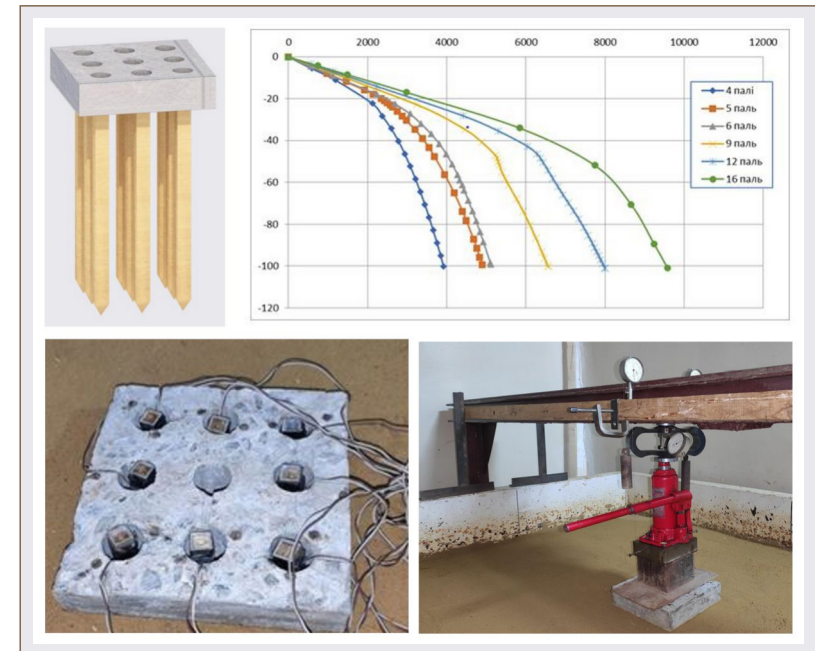


І. В. Маєвська, Н. В. Блащук

РОБОТА ПАЛЬ І РОСТВЕРКУ У СКЛАДІ СТОВПЧАСТИХ ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТІВ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

І. В. Маєвська, Н. В. Блащук

**РОБОТА ПАЛЬ І РОСТВЕРКУ
У СКЛАДІ СТОВПЧАСТИХ ПАЛЬОВИХ
ФУНДАМЕНТІВ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2023

УДК 624.131:624.15

M12

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 29.12.2022 р.)

Рецензенти:

Ю. Л. Винников, доктор технічних наук, професор, НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

О. В. Самородов, доктор технічних наук, професор, ХНУБА.

Маєвська І. В.

M12 Робота паль і ростверку у складі стовпчастих пальових фундаментів : монографія / І. В. Маєвська, Н. В. Блащук. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 182 с.

ISBN 978-966-641-941-8

Монографію присвячено оцінюванню НДС основ стовпчастих пальових фундаментів. Шляхом фізичного та чисельного моделювання встановлено основні закономірності залежності частки навантаження, що сприймають палі та ростверк таких фундаментів, від геометричних параметрів фундаменту, виду ґрунту основи і технології влаштування паль (без виймання та з вийманням ґрунту). Виявлена краща реалізація роботи бурових паль у групі у порівнянні з забивними. Висвітлені особливості поведінки пальових фундаментів з коротких паль і ресурси їх несучої здатності. Запропоновано при проектуванні пальових фундаментів враховувати ступінь реалізації несучої здатності паль і ростверку у складі фундаменту. Наведені кількісні залежності цих параметрів від різних факторів.

УДК 624.131:624.15

ISBN 978-966-641-941-8

© І. Маєвська, Н. Блащук, 2023

ЗМІСТ

Вступ	5
1 Аналіз сучасного стану питання з дослідження роботи пальових фундаментів з ґрунтовою основою	7
1.1 Експериментальні дослідження сумісної роботи паль та низького ростверку у складі пальового фундаменту	7
1.2 Чисельне моделювання системи «палі – ростверк – основа».....	22
1.3 Практичні методи врахування роботи ростверку у пальовому фундаменті	23
<i>Висновки за розділом 1 та постановка задач дослідження</i>	27
2 Фізичні модельні дослідження сумісної роботи елементів стовпчастих пальових фундаментів з основою	29
2.1 Фізичне моделювання роботи стовпчастого пальового фундаменту з варіюванням кроку і довжини паль при сталій їх кількості.....	33
2.1.1 Планування фізичного моделювання роботи стовпчастого пальового фундаменту	34
2.1.2 Результати фізичного моделювання роботи стовпчастого пальового фундаменту	37
<i>Висновки за підрозділом 2.1</i>	54
2.2 Фізичне моделювання роботи пальових кущів з коротких та довгих паль.....	55
2.2.1 Планування фізичного моделювання роботи пальових кущів з коротких та довгих паль.....	55
2.2.2 Результати фізичного моделювання роботи пальових кущів з коротких та довгих паль.....	59
<i>Висновки за підрозділом 2.2</i>	65
3 Чисельне моделювання НДС систем «ростверк – палі – основа»	66
3.1 Обґрунтування вибору моделей систем «ростверк – палі – основа» ..	66
3.2 Моделювання НДС системи «фундамент – палі – основа» для стовпчастого пальового фундаменту при сталій кількості паль	77
3.2.1 Програма чисельного моделювання НДС системи «фундамент – палі – основа» для стовпчастого пальового фундаменту при сталій кількості паль.....	77

3.2.2	Результати моделювання НДС системи «фундамент – палі – основа» для стовпчастого пальового фундаменту при сталій кількості пальь.....	79
3.2.3	Аналіз впливу геометричних параметрів групи пальь, способу влаштування пальь та виду ґрунту на НДС системи «фундамент – палі – основа» для стовпчастого фундаменту зі сталою кількістю пальь.....	97
	<i>Висновки за підрозділом 3.2</i>	104
3.3	Моделювання впливу різних факторів на НДС системи «фундамент – палі – основа» для стовпчастого пальового фундаменту	105
3.3.1	Програма чисельного моделювання впливу різних факторів на перерозподіл зусиль між елементами стовпчастого пальового фундаменту.....	105
3.3.2	Результати чисельного моделювання впливу різних факторів на перерозподіл зусиль між елементами стовпчастого пальового фундаменту	109
	<i>Висновки за підрозділом 3.3</i>	135
4	Аналіз зміни перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту при зростанні навантаження.....	136
4.1	Аналіз розвитку перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту по мірі зростання навантаження при фізичному моделюванні	137
4.2	Аналіз розвитку перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту по мірі зростання навантаження при математичному моделюванні	143
	<i>Висновки за розділом 4</i>	150
5	Особливості роботи пальових кущів з коротких пальь	151
5.1	Програма та методика математичного моделювання роботи пальь різної довжини в умовах різних ґрунтових умов.....	151
5.2	Результати математичного моделювання роботи стовпчастого пальового фундаменту з коротких та довгих пальь	153
	<i>Висновки за підрозділом 5.2</i>	163
6	Методика врахування сумісної роботи пальь і ростверку у складі пальового куща	164
	Загальні висновки	173
	Список використаних джерел	176

ВСТУП

Застосування паль в якості фундаментів промислових та цивільних будівель дозволяє майже виключити земляні роботи та механізувати процес влаштування фундаменту. В будівництві при влаштуванні пальового фундаменту виникає потреба в значних витратах, що призводить до збільшення вартості будівництва в цілому.

Існуючі методи розрахунку пальових фундаментів досить умовні. В їхню основу не в достатній мірі закладено аналіз механічних процесів, що виникають при їхньому навантаженні. Саме тому розміри пальових фундаментів визначаються розрахунком за принципом простого складання несучих здатностей одиночних паль, хоча гранична несуча здатність пальового фундаменту не є простим додаванням граничних несучих здатностей одиночних паль. Великою кількістю дослідів встановлено, що у складі пальового фундаменту частина навантаження передається на палі, а частина – на ростверк, навантаження між палями розподіляється нерівномірно. Чинні на території України нормативні документи рекомендують враховувати роботу ростверку як реакцію ґрунтової основи під подошвою, але і такий підхід не дозволяє адекватно врахувати роботу ростверку у складі пальового фундаменту.

В результаті врахування роботи елементів пальового фундаменту відбувається зменшення вартості фундаменту в цілому. Ці обставини зумовлюють доцільність та актуальність подальшого дослідження напружено-деформованого стану пальового фундаменту та його складових частин при роботі з ґрунтовою основою.

Створення розрахункової моделі ґрунтової основи, що забезпечує достатню відповідність між результатами розрахунку і роботою натурних паль – все ще одна із найважливіших проблем фундаментобудування. Одним з програмних комплексів, в якому можна реально змоделювати ґрунтове середовище навколо палі є Plaxis, який розроблений на основі методів скінченних елементів та умов просторової задачі.

У цій монографії представлені результати дослідження сумісної роботи паль і ростверку у складі стовпчастих пальових фундаментів шляхом фізичного та математичного моделювання пальових фундаментів з різними геометричними параметрами та в різних ґрунтах. Варіювався також спосіб влаштування палі (без виймання або з вийманням ґрунту).

У першому розділі проаналізований експериментальний досвід і методи урахування роботи складових частин пальових фундаментів, запропоновані іншими авторами.

Другий розділ присвячений дослідженню напружено-деформованого стану пальових фундаментів шляхом фізичного моделювання.

У третьому – п'ятому розділах представлені результати математичного моделювання систем пальовий фундамент – основа за допомогою програмного комплексу Plaxis з варіюванням різних параметрів.

У шостому розділі запропонована методика врахування сумісної роботи паль і ростверку у складі пальового куща.

При написанні монографії використані матеріали магістерських дисертацій студентів ВНТУ К. А. Чобанової, О. М. Малишева, С. О. Цимбала, Ю. О. Кремінської, Я. М. Кримняка, В. В. Колібаби, Є. О. Шевчука, виконаних під керівництвом авторів монографії.

Автори будуть вдячні читачеві за зауваження і згодні разом з Вами працювати над удосконаленням методик розрахунку та проектування пальових фундаментів.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ З ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТІВ З ГРУНТОВОЮ ОСНОВОЮ

1.1 Експериментальні дослідження сумісної роботи паль та низького ростверку у складі пальового фундаменту

Дослідженнями закономірностей взаємодії паль і пальових фундаментів з ґрунтовими основами займалися В. М. Голубков, Б. І. Далматов, А. О. Бартоломей, Б. В. Бахолдін, В. Н. Бронин, А. В. Вронський, Н. М. Дорошкевич, Ф. К. Лапшин, В. Н. Морозов, Є. Е. Девальтовський, В. В. Знаменський, І. В. Песков і багато інших. Питанням вивчення роботи ростверку в складі пальового фундаменту присвячені роботи Н. М. Дорошкевич, К. С. Заврієва, М. І. Нікітенка, И. І. Орленка, Ю. Н. Платонова, І. І. Сахарова, В. Д. Яблочкова, В. О. Сернова, І. П. Бойка, О. В. Самородова, В. Л. Седіна, В. Л. Підлуцького, Р. К. Ковальського, А. М. Рузаєва та інших.

Визначення несучої здатності паль та пальових фундаментів проводиться наближеними методами [12, 16], які не враховують цілий ряд особливостей взаємодії паль з навколишнім ґрунтом. Визначення несучої здатності паль в польових умовах при статичному навантаженні має в більшості випадків недолік – вона визначається за критерієм граничної деформації будівель. Такі ж недоліки, які мають місце при визначенні несучої здатності одиночної палі, присутні і при визначенні несучої здатності паль в групі. Тут до того ж додається ефект сумісної роботи паль між собою і з ростверком, який також був досліджений ще далеко не в повній мірі.

Голубков В. М. у Одеському інженерно-будівельному інституті (1950-1966) встановив залежність осідання паль і пальових фундаментів від навантаження на базі аналізу спільної роботи їх із ґрунтом основи. В склад цього аналізу покладені результати польових натурних досліджень, що дозволили виявити принципову схему взаємодії між зовнішніми і внутрішніми силами, що діють у межах зони деформації, що формується під палями і пальовими фундаментами. В експериментах Голубкова В. М. лише незначна частина навантаження передавалась через подошву ростверку. Це пояснюється тим, що на дослідному майданчику були присутні значної потужності слабкі ґрунти, а розміри ростверку незначні в плані. Згідно з дослідженнями Голубкова В. М. ростверк вступає в роботу з ґрунтом і передає на ґрунт навантаження, величина якого пропорційна модулю деформації ґрунту під подошвою фундаменту і осіданню фундаменту.

Велика кількість експериментів з вивчення роботи низького ростверку у складі пальового фундаменту з використанням оптичного методу вимірювання напружень була проведена на кафедрі «Механіки ґрунтів, основ та фундаментів» Московського інженерно-будівельного інституту під ке-

рівництвом Н. М. Дорошкевич в 1958 р. Оброблення отриманих експериментальних результатів дало змогу Дорошкевич Н. М. встановити, що:

- ростверк включається в роботу після певного обтиснення верхніх шарів ґрунту;

- через підшову ростверку основі передається 10-20% загального навантаження на фундамент;

- ґрунт у міжпальовому просторі переміщується разом з палями, тому опір тертю на бічній поверхні внутрішніх паль незначний;

- палі переносять зовнішнє навантаження на ґрунти, що залягають у площині нижче їх вістря, завдяки чому напружена зона ґрунту навколо пальового фундаменту розповсюджується на значно більшу глибину, ніж для фундаментів мілкового закладання;

- розміри напруженої зони ґрунту в основі пальового фундаменту залежать від його розмірів в плані, що збігається з теоретичними висновками.

В 1966 році Сальніковим Б. О. були проведені експерименти з вивчення роботи низького ростверку в слабких глинистих ґрунтах, за результатами яких на ростверк приходилось близько 15% від несучої здатності фундаменту.

Дослідження траєкторії руху частинок ґрунту в основі паль і ростверку були проведені Кондрашовим В. О. (1970) на моделях забивних паль у ґрунтовому лотку з прозорою передньою стінкою. Варіювались крок паль, їх довжина і тип ростверку (рис. 1.1). При осіданні групи паль без ростверку деформації міжпальового ґрунту відбуваються в безпосередній близькості від бічної поверхні та під нижніми кінцями паль. Ґрунт міжпальового простору не осідає (рис. 1.1 а, 1.1 в, 1.1 д). При осіданні пальового фундаменту з низьким ростверком в роботу включається міжпальовий ґрунт (рис. 1.1 б, 1.1 г, 1.1 е). Максимальні осідання основи в міжпальовому просторі спостерігаються безпосередньо під ростверком і з глибиною затухають, як під фундаментом на природній основі. Порівнюючи епюри деформації ґрунту (рис. 1.1), можна зробити висновки, що при відношенні довжини палі до поперечнику $L/d = 10$ і кроці паль $a = 3d$ в міжпальовому просторі затухає близько половини напружень від взаємодії ростверку з ґрунтом. Інша половина створює додаткове привантаження в рівні нижніх кінців паль і повинна бути врахована при розрахунку осідання паль. При відношенні $L/d = 20$ напруження від взаємодії ростверку з основою повністю затухають в міжпальовому просторі. В такому випадку можна вважати, що група паль і ростверк працюють окремо.

В лабораторії пальових фундаментів НДІОСП Д. Є. Разводовским і В. О. Кондрашовим під керівництвом проф. Б. В. Бахолдіна були випробувані групи з трьох модельних паль довжиною 0,7 м (рис. 1.2) і трьох натурних паль довжиною 4,2 м (рис. 1.3) з глибинними марками. З цих рисунків видно, що при передачі навантаження через ростверк максимальні деформації основи відбуваються безпосередньо під підшовою ростверку і з

глибиною затухають. У такому випадку відбувається проковзування бічної поверхні палья відносно ґрунту.

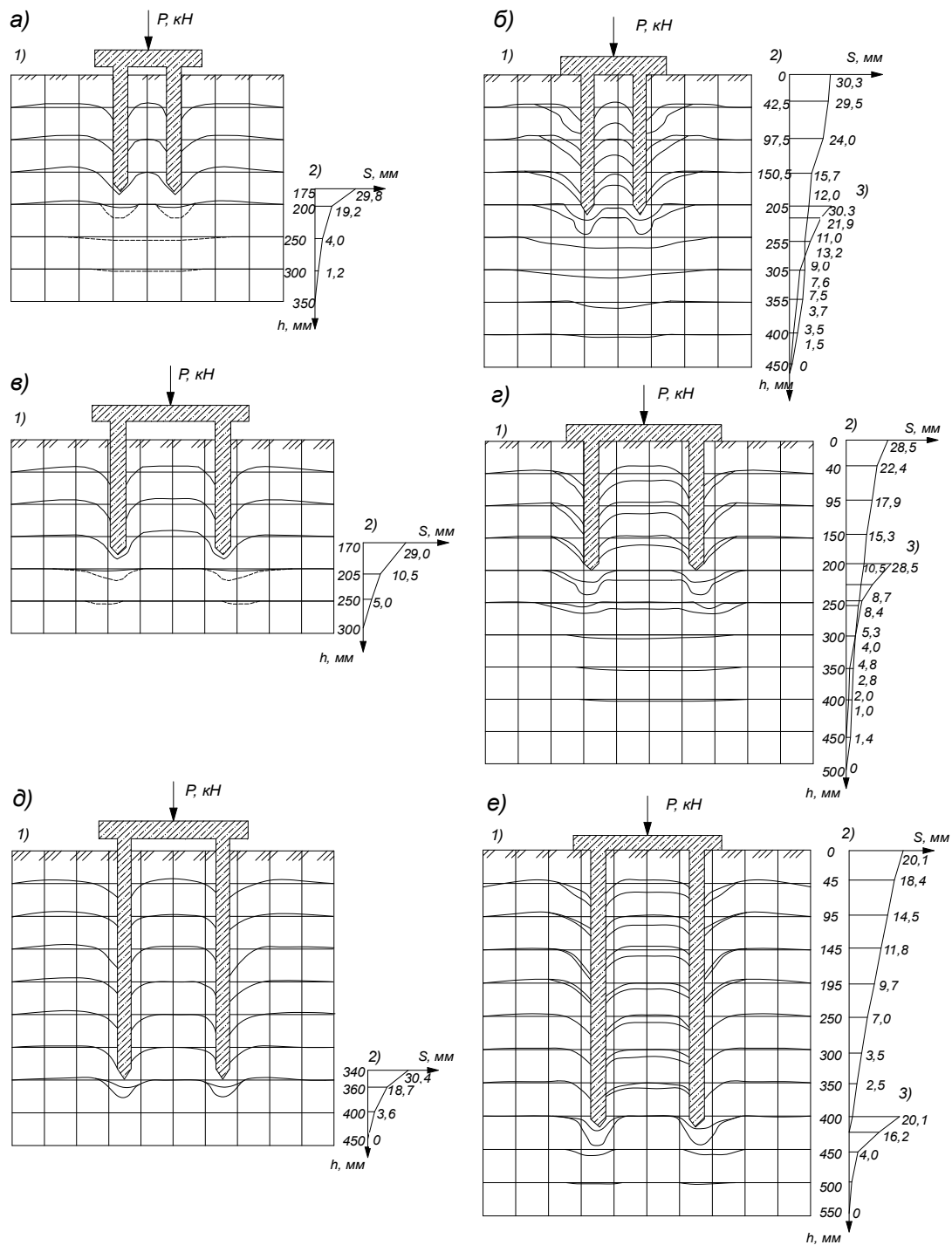


Рис. 1.1 – Деформації ґрунту в основі пальового фундаменту:
а – $L/d = 10, a = 3d$, високий ростверк; б – $L/d = 10, a = 3d$, низький ростверк;
в – $L/d = 10, a = 6d$, високий ростверк; г – $L/d = 10, a = 6d$, низький ростверк;
д – $L/d = 20, a = 3d$, високий ростверк; е – $L/d = 20, a = 3d$, низький ростверк
(1 – загальний вигляд деформацій; еюра пошарових переміщень ґрунту під вістрям паль; L – довжина, d – розмір поперечного перерізу, a – крок паль)

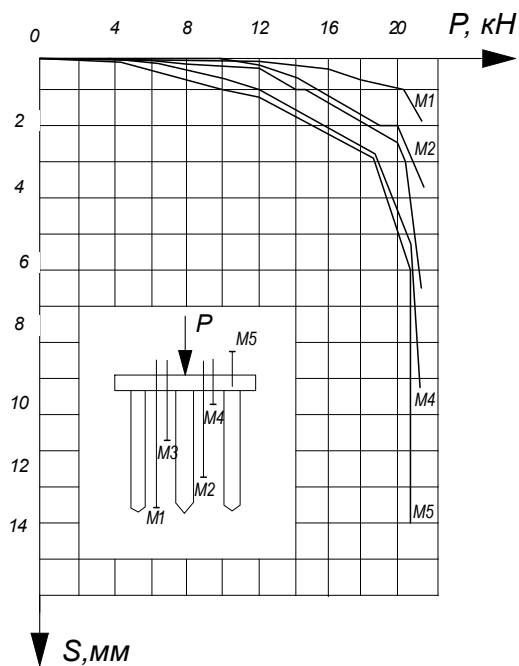


Рис. 1.2 – Переміщення глибинних марок, що встановлені в основі моделі пальового фундаменту

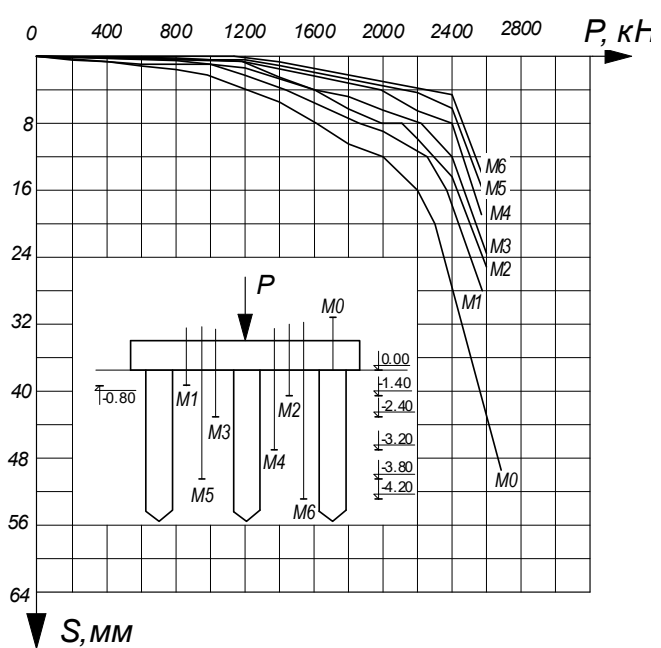


Рис. 1.3 – Залежність переміщення від навантаження заглиблених марок, що встановлені в основі куца натурних паль

Приведені результати досліджень ще раз підтверджують, що напруження під ростверком і фундаментом на природній основі аналогічні. Подібність епюр напружень і деформацій дозволяє наближено розглядати ростверк як фундамент на природній основі.

Результати дослідів Д. Є. Разводовского та В. О. Кондрашова використовувались в подальшому для розробки методик розрахунку пальново-плитних фундаментів.

В 1971 р. Знаменський В. В. разом із співробітниками Бюро науково-технічної допомоги Красноярського Промбудндіпроекту провів ряд натурних випробувань палових фундаментів з низьким і високим ростверком у глинистих тугопластичних і твердих ґрунтах. За результатами випробувань було встановлено, що при відстані між палями $3d$ (де d – поперечний розмір палі) в цих ґрунтових умовах на частку ростверку приходить близько 20% від загального навантаження на фундамент, а при відстані $6d$ вже 60%. Слід зауважити, що частка несучої здатності ростверку за даними цих випробувань більша, ніж у інших дослідників (Яблочков В. Д., Сальніков Б. О.). Це пояснюється декількома причинами: з одного боку досліди проводились в більш міцних ґрунтах у порівнянні з дослідом інших дослідників, з іншого – виконувалась якісна підготовка ґрунту з метою забезпечення повного контакту під подошвою ростверку, а також використовувалась спеціальна методика визначення несучої здатності низького ростверку. Зазвичай несучу здатність низького ростверку визначали як різницю несучих здатностей груп паль з низьким і високим ростверком. В своїй роботі Знаменський В. В. визначав фактичну

несучу здатність низького ростверку за результатами тензометричних вимірювань, що дозволило визначати навантаження на кожен палю в групі і на ростверк окремо (рис. 1.4).

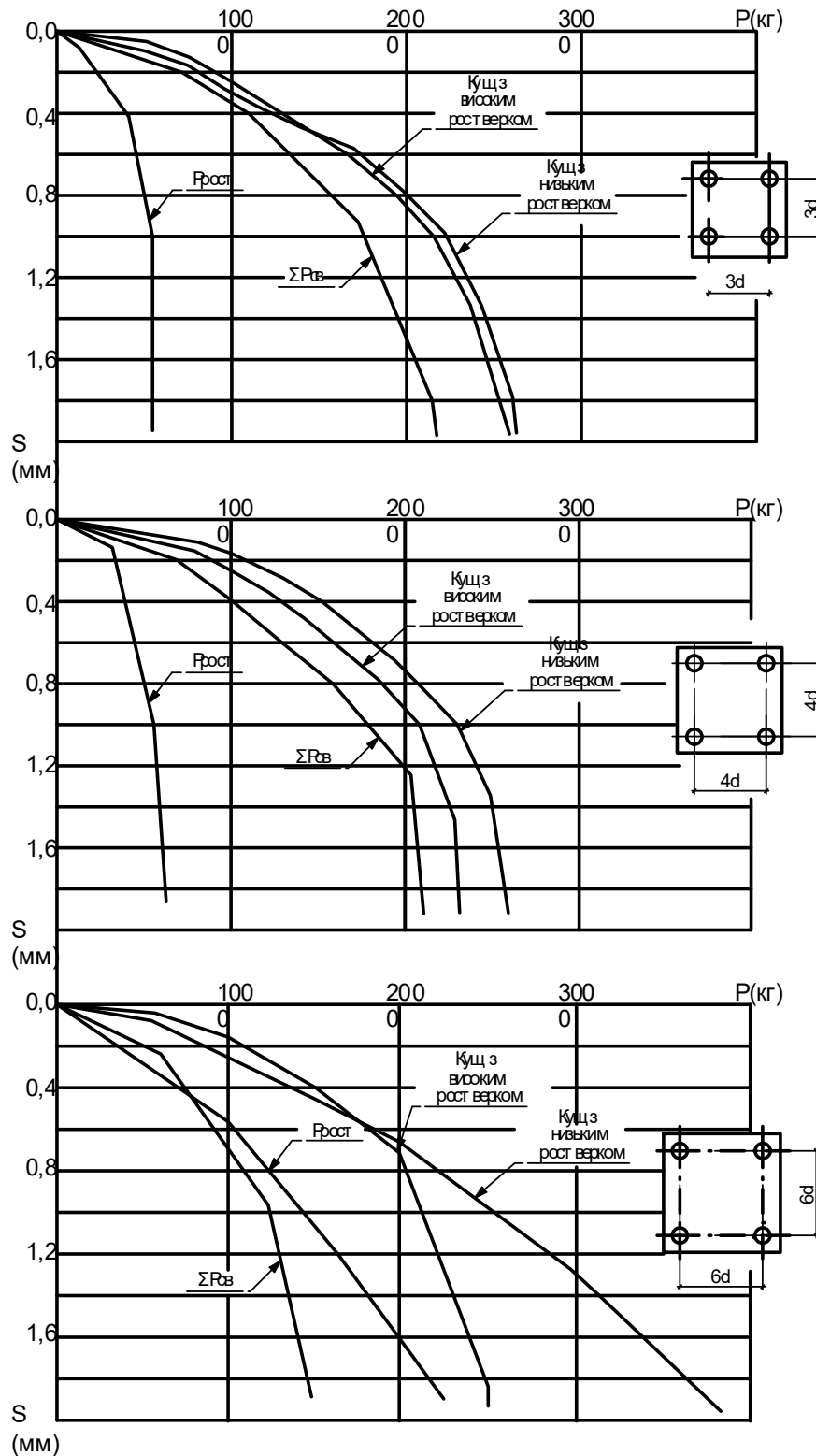


Рис. 1.4 – Графіки випробування груп з 4 металевих модельних палів вертикальним статичним навантаженням, що були проведені В. В. Знаменським

Графіки на рис. 1.4 показують, що фактична несуча здатність низького ростверку ($P_{\text{факт}}$) відрізняється від різниці несучих здатностей куштів з високим і низьким ростверками. Цю відмінність автор пояснює тим, що низький ростверк не лише приймає на себе частину навантаження, але й в той же час знижує сили тертя на бічній поверхні паль з групи за рахунок осідання ґрунту під його подошвою. В результаті цього впливає висновок, що через різний характер роботи бічних поверхонь паль у палювих групах з низьким і високим ростверком визначати несучу здатність низького ростверку як різницю їх несучих здатностей некоректно.

Результати випробувань палювих фундаментів, що були проведені Сірожиддіновим З. у 1978 р. в глинистих м'яко- і тугопластичних ґрунтах підтвердили результати, отримані Сальніковим Б. О. і Знаменським В. В. Аналогічні випробування з вивчення роботи ростверку в лабораторних і натурних умовах були проведені в 1981 р. О. К. Югаєм і в 1982 р. О. М. Бадеевим і Б. В. Варнаковим.

Дослідження напруженого стану ґрунту в міжпальовому просторі, що були виконані Л. Д. Козачком (Львів, 1979), показують, що розподіл напружень в основі ростверку аналогічний фундаменту на природній основі. Епюри напружень в основі різних палювих груп з високим і низьким ростверком наведено на рисунках 1.5 та 1.6. Варіювалась кількість паль у групі та їх крок.

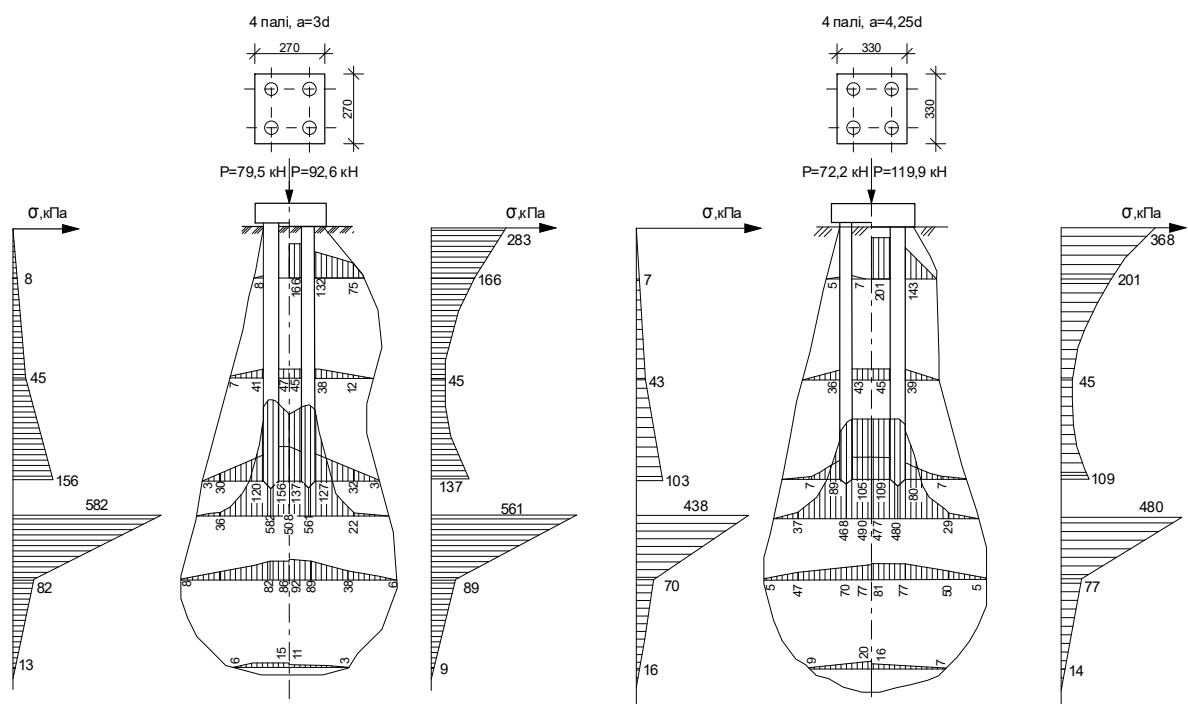


Рис. 1.5 – Напружений стан ґрунту в основі груп з 4-х паль з кроком $a = 3d$ і $a = 4,25d$ з високим і низьким ростверком

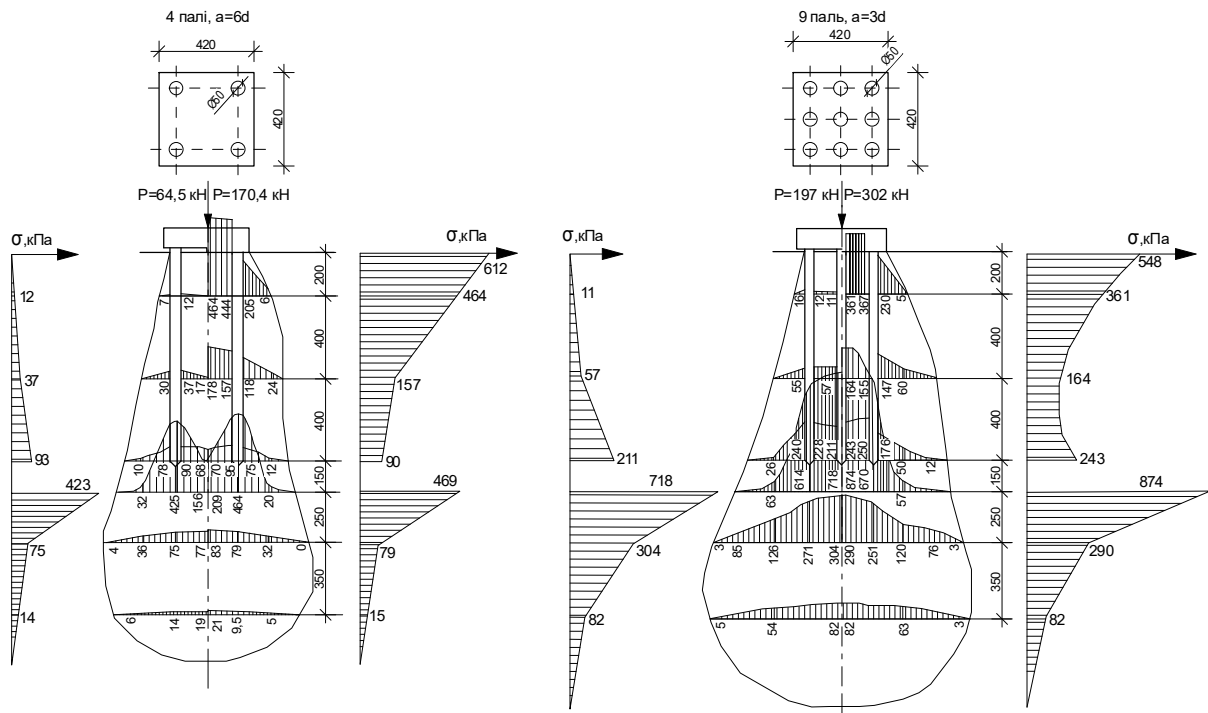


Рис. 1.6 – Напружений стан ґрунту в основі груп з 4-х паль з кроком $a = 6d$ і 9-ти паль з кроком $a = 3d$ з високим і низьким ростверком

При взаємодії ростверку з основою частина навантаження передається на верхні шари ґрунту і несуча здатність основи використовується більш повно. Напружений стан ґрунту в міжпальовому просторі та за контуром групи паль визначається силами тертя вздовж бічних поверхонь і тиском ростверку на ґрунт. Сили тертя зростають з глибиною, напруження від ростверку навпаки згасають. В результаті виходить сідлоподібна епюра з мінімальним значенням у точці рівних напружень від сил тертя вздовж бічних поверхонь паль і опору ростверку (рис. 1.5, 1.6).

Ряд натурних випробувань, проведених А. О. Бартоломеем і І. М. Омельчаком (1972 – 1994), показали, що ростверки включаються в роботу при осіданні пального фундаменту 2-3 мм і по мірі зростання навантаження напруження під ростверком зростають і досягають максимального значення при осіданнях 15 – 20 мм. В подальшому ці напруження залишаються практично постійними.

Авторами встановлено, що при довжині паль 6 м середнє напруження під ростверком палі більше (150 кПа), ніж при довжині паль 12 м (90 кПа). При осіданні 20 мм частка ростверку в несучій здатності пального фундаменту при довжині паль 6 м склала 32%, а при довжині паль 12 м – 8%. При осіданні 40 мм частка ростверку в несучій здатності фундаментів склала 10 і 6 %, відповідно.

Досліджувався також процес розподілу навантаження між палями фундаментів. В куцах з 4 паль навантаження розподілялись між палями рівномірно. В куцах з 9 паль на початкових етапах навантаження кутові

палі сприймають на 20% більше навантаження, ніж центральні та крайні в середині ряду. Зі збільшенням навантаження на фундамент і зростанням осідань кутові і середні палі крайніх рядів сприймають майже однакове навантаження, а доля центральної палі зменшується. Слід відзначити, що при дослідженнях палі забивались з кроком 3d, а затосовані ростверки були жорсткими.

У 1970 р. к. т. н. Н. С. Метелюк та інженери В. В. Грузинцев, А. В. Куцменко провели випробування з виявлення резерву несучої здатності пальових кущів. Випробування проводились на дослідному майданчику НДІБК (Київ). Майданчик складений ґрунтово-рослинним шаром товщиною 0,4 м, який підтримувався шаром пухкого супіску товщиною 0,7 м щільністю 1,49-1,53 г/см³, вологістю 11%, модулем деформації 10 МПа і шаром в 1,1 м супіску з вологістю 16,3%, модулем деформації 16 МПа. Нижче залягає шар (4 м) мілкого піску щільністю 1,64 г/см³, вологістю 8,1%, модулем деформації 28 МПа. Палі, що випробовувались, Ø120 мм та довжиною 2000 мм, відстань між палями – 3d. Навантаження передавались, як звичайним методом, так і стадійно.

У результаті проведених авторами випробувань отримали, що ростверк вступає в роботу одночасно з палями і в даних геологічних умовах може сприйняти на себе до 50% загального навантаження у фундаментах звичайного зведення і значно більше 50% у фундаментах стадійного завантаження.

Велика робота по оцінці несучої здатності груп взаємозалежних паль була виконана Є. Е. Девальтовським (1982). Ним були проведені модельні випробування груп паль в лотку розміром 800×800×1000 мм. В якості основи був прийнятий сухий дрібнозернистий пісок (середньої щільності та пухкий). Моделі паль – круглі сталеві стержні діаметром 10 мм, довжиною 200 мм з гладкою та шорсткою поверхнею. Було виконано також випробування групи з 25 паль в глинистих ґрунтах м'якопластичної консистенції. Палі являли собою металеві труби із оцинкованої сталі діаметром 75 мм, довжиною 3 м.

Є. Е. Девальтовським встановлено, що гранична несуча здатність групової палі завжди вище, ніж одиночної, але її величина пов'язана з розвитком значних осідань, часто неприпустимих для будівель та споруд.

Наявність низького ростверку ще більше ускладнює процес взаємодії паль з ґрунтом та робить поняття "граничної несучої здатності" паль невизначеним. Вплив низького ростверку починає суттєво відбиватися лише при значному розвитку процесів сковзання стовбурів паль по ґрунту. При однакових осіданнях пальові фундаменти з низьким ростверком здатні сприймати більше навантаження, ніж пальові фундаменти з високим ростверком.

Важливим для оцінки роботи паль в групі є питання про розподіл навантаження між ними. Факт нерівномірного розподілу навантаження між палями був експериментально встановлений цілим рядом дослідників.

Дослідження Б. С. Юшкова (1980) в глинистих ґрунтах на палях перерізом 30x30 см та довжиною від 5 до 12 м показали, що несуча здатність групи з 9 паль через 6 діб після забивання складає 1080 кН та розподіляється між палями групи нерівномірно: кутові палі сприймають по 140 кН, середні палі крайніх рядів – 110 кН, середні палі – 80 кН.

Через 45 діб після забивки несуча здатність групи з 9 паль зросла на 75% і складала 1890 кН. Навантаження розподілилось між палями також нерівномірно: кутові палі – 260 кН (збільшення склало 85%), середні палі крайніх рядів – 180 кН (збільшення 60%), середні палі – 120 кН (збільшення 33%).

В модельних дослідах Вітакера [63] досліджувався розподіл навантажень між палями в групах при відстані між осями паль 2d та 4d. На крайні палі передаються навантаження в 3-5 раз більші, ніж на центральні. Ця різниця зменшується при навантаженнях, близьких до граничних. Із збільшенням відстані між палями різниця в розподілі навантажень зменшується.

Розподіл навантаження між взаємозалежними палями в групі докладно досліджувався й Є. Е. Девальтовським. Ним були отримані такі результати: розподіл зусиль по довжині центральної та кутової паль відмінні одне від одного; робота кутової палі більш близька до роботи одиночної палі, але збільшується частка вістря в передачі навантаження на ґрунт; кутова паля сприймає значно більше навантаження, ніж одиночна і тільки на останніх етапах навантаження відбувається сковзання її стовбура по ґрунту, на перших етапах майже все навантаження на центральну палю передається через її вістря. По мірі навантаження фундаменту, все більша частка навантаження на центральну палю починає передаватися її бічною поверхнею; значна частка навантаження, яка передається міжпальовому ґрунту стовбуром центральної палі, особливо на останніх етапах навантаження, свідчить про активну участь міжпального ґрунту у сприйнятті навантаження.

Харичкин А. І. (2020) досліджував розподіл зусиль між палями групи в залежності від розміру і конфігурації груп (включаючи стрічку з однорядним розміщенням паль), а також від міцності глинистого ґрунту основи. Проведені натурні дослідження на пальовому полі під реальним об'єктом, а також математичне моделювання в програмному комплексі Plaxis. В процесі досліджень встановлено:

– при зміні відстані між палями в групі співвідношення зусиль крайових (кутових) паль до центральних змінюється нелінійно. При цьому в певних умовах значення цих співвідношень можуть знижуватись до менших 1;

– при збільшенні характеристик міцності ґрунту різниця між зусиллями в крайових (кутових) і центральних палях збільшується, а при зменшенні характеристик міцності – зменшується;

– при визначенні впливу паль одна на одну під час розрахунку осідання пального фундаменту необхідно враховувати форму і розміри пального поля.

У роботах В. А. Сернова [37] проведений аналіз результатів експериментальних і теоретичних досліджень на будівельних майданчиках м. Мінська, що дозволили виявити основні закономірності взаємодії групи паль і несучого ростверку з основою. Дослідження показали, що традиційні розрахункові схеми для визначення несучої здатності і осідання палових фундаментів надмірно спрощені, не враховують взаємодію елементів фундаменту, а результати розрахунків часто в кілька разів відрізняються від експериментальних даних. При визначенні осідань групи паль для умовного масиву приймається, що ґрунт у межах умовного фундаменту осідає разом з палями. Така схема не дозволяє правильно відобразити роль кроку паль і врахувати взаємодію ростверку з основою. Експериментально було встановлено, що при зменшенні кроку паль у групі від 6d до 3d без зміни розмірів умовного фундаменту осідання останнього знижувалася в 2 і більше разів. При включенні ростверку в роботу осідання фундаменту також істотно зменшується. Результати проведених досліджень спростовують припущення про те, що ґрунт міжпального простору осідає разом з палями. Автором розглянуто деякі факти, які підтверджують, що вертикальні деформації ґрунту міжпального простору незначні порівняно з осіданням паль:

– по-перше, тиск на ґрунт під нижніми кінцями паль в десятки разів перевищує тиск на тому ж рівні в міжпальному просторі від сил тертя уздовж їх бічних поверхонь. Отже, осідання паль повинно бути більше, ніж осідання навколишнього ґрунту;

– по-друге, вертикальні напруження від сил тертя уздовж бічних поверхонь паль різко зменшуються з віддаленням від них. Значення цих напружень в будь-якій площині, перпендикулярній її осі, можна визначити, використовуючи рішення Д. Паті (1963).

У 2008 р. В. В. Знаменський, А. М. Рузаєв та Н. Н. Полинков провели ряд досліджень із взаємодії низького ростверку з палями. Програмою численних експериментів передбачались варіювання такими параметрами палових фундаментів, як довжина паль, крок між палями та жорсткість низького ростверку. Розглядалась група із 25-ти паль (рис. 1.7).

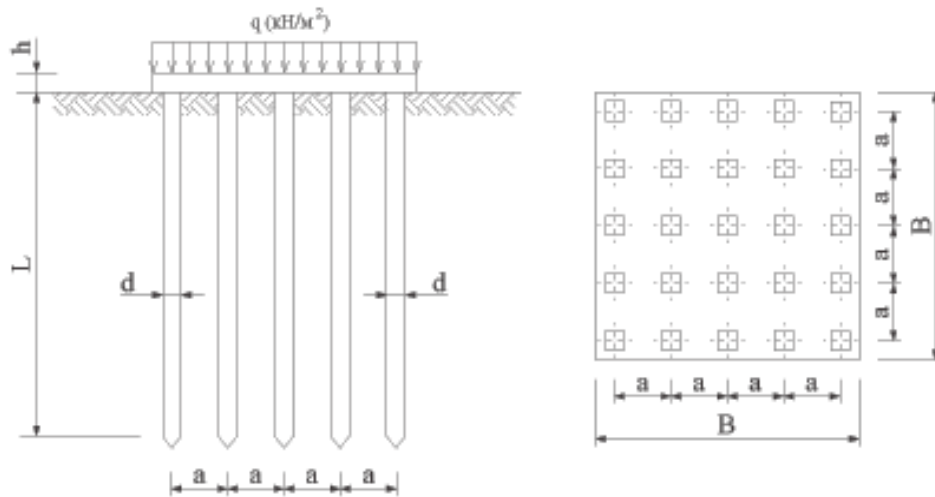


Рис. 1.7 – Група з 25-ти паль з низьким ростверком

Результати, наведені на рис. 1.8, показали, що з одного боку ростверк може сам нести частину навантаження на фундамент, а з іншого – знижує несучу здатність паль, розвантажуючи їх бокову поверхню. В результаті виходить, що при відстані між палями 3–4d включення в роботу низького ростверку мало впливає на несучу здатність пального фундаменту.

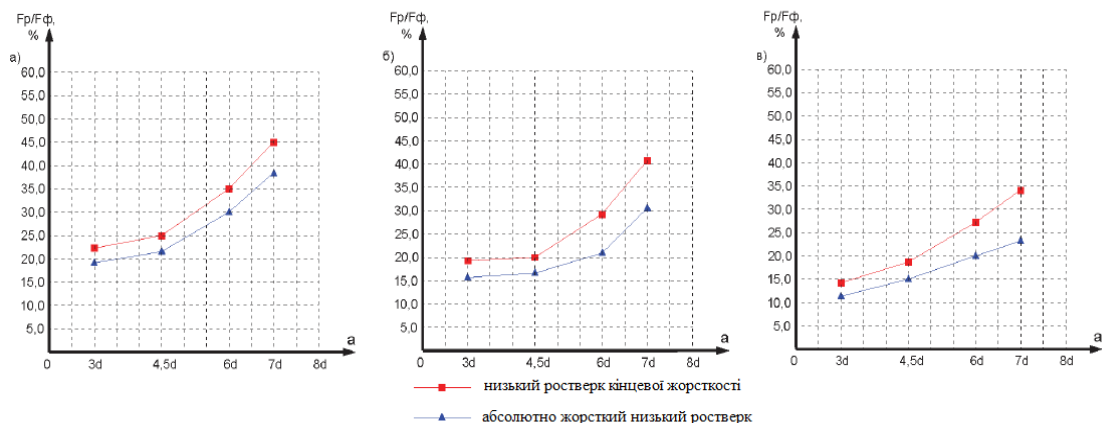


Рис. 1.8 – Графіки залежності $F_p/F_\phi = f(a)$
 а – довжина паль $L = 6$ м; б – довжина паль $L = 9$ м;
 в – довжина паль $L = 12$ м

Результати чисельного моделювання та їх математично – статистичний аналіз, проведений А. М. Рузаєвим, показали, що при оцінці впливу роботи низького ростверку на несучу здатність пального фундаменту необхідно враховувати всі розглянуті фактори (довжина паль, відстань між ними, кількість паль, жорсткість ростверка, спосіб влаштування палі, характер напластування ґрунтів), однак найбільш значущими з них є відносна довжина паль (L/d) і відносна відстань між палями (a/d). Вплив способу влаштування паль відзначається як несуттєвий.

В роботі Динь Хоанг Нам (2006) проведено чисельне моделювання роботи куща з 9 бурових паль діаметром 1 м довжиною 30, 45 та 60 м на глинистих ґрунтах із слабким верхнім шаром. Проаналізоване зміння навантаження на палі куща у порівнянні з одиночною палею по мірі зростання осідання. На рис. 1.9 наведені одержані графіки навантаження – осідання для паль довжиною 30 м. По мірі зростання навантаження палі поступово втягуються у роботу і при певному значенні осідання їх несуча здатність перевищує несучу здатність одиночної палі. Із зростанням відстані між палями і довжини паль різниця між зусиллями центральної і одиночної палі зменшується.

Вплив жорсткості ростверку на перерозподіл зусиль між елементами пального фундаменту вивчався також у роботі Гембарської М. А. [11]. Акцентовано увагу на вплив жорсткості ростверку кущового пального фундаменту на характер його роботи з ґрунтом і осідання пального куща.

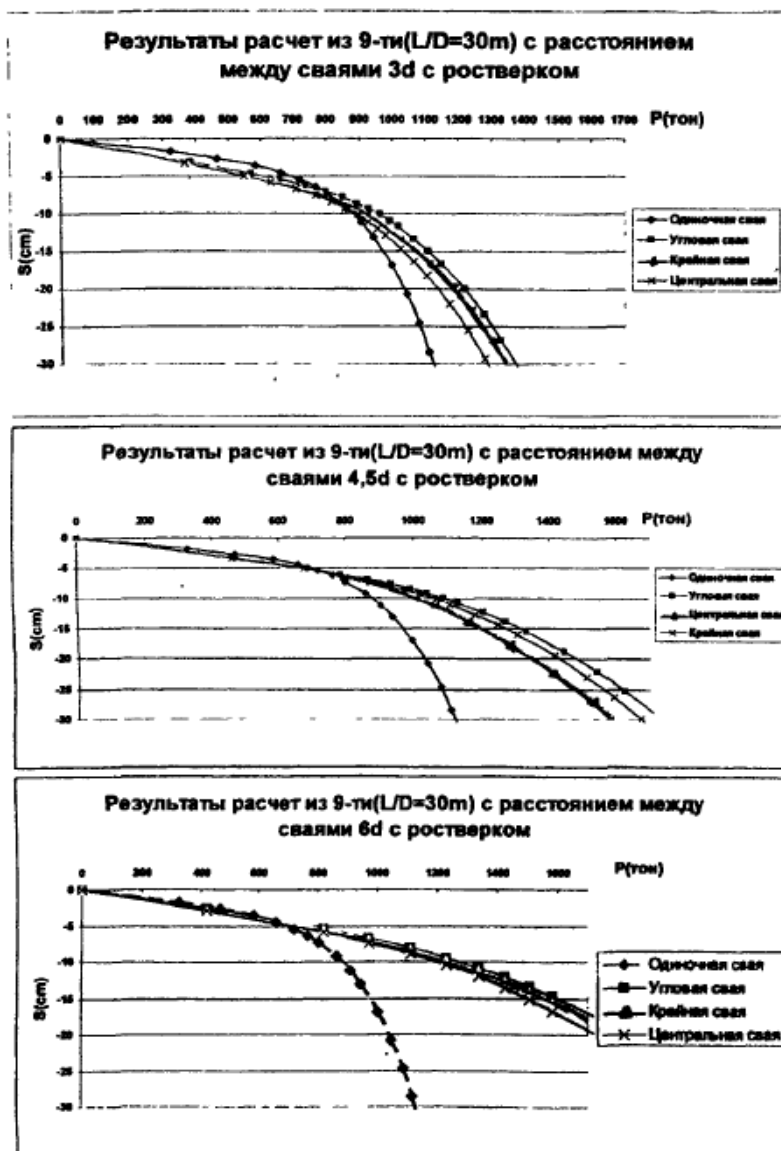


Рис. 1.9 – Криві осідання – навантаження для паль довжиною 30 м

Для аналізу цього впливу виконане математичне моделювання пального куца з 5 палів у програмному комплексі Plaxis 3D Foundation для двох випадків: при відстанях між палями 3d та 6d. Схема пального куца наведена на рис. 1.10.

Для кожного з випадків розглянуто такі варіанти розрахунку: група палів не об'єднана ростверком; група палів об'єднана жорстким ростверком з модулем деформації $E = 2,1 \times 10^8$ кНм²; група палів об'єднана гнучким ростверком з модулем деформації $E = 1 \times 10^6$ кНм². Встановлено, що група палів, об'єднана ростверком, дає менші значення осідання, що відбувається за рахунок передачі навантаження на основу не тільки палями, а і ростверком на верхні шари ґрунту.

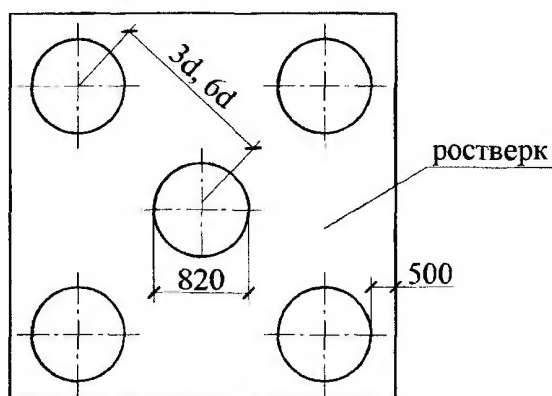


Рис. 1.10 – Розташування палів у куці, об'єднаних низьким ростверком [11]

При відсутності ростверку найбільше навантаження сприймає середня паля, при жорсткому ростверку навантаження між палями розподіляється рівномірно, при гнучкому ростверку периферійні палі погано включаються у роботу, а центральна паля разом з ґрунтом під ростверком виявляються перевантаженими.

Питання впливу жорсткості ростверка на перерозподіл зусиль між палями розглядається також у роботі В. Ручківського [34]. Шляхом математичного моделювання групи з 5 палів діаметром 420 мм з різною відстанню між палями визначається вплив ростверка товщиною 300 та 500 мм. Аналізується включення ростверку у роботу та різниця осідань кутових та центральної палі в залежності від відстані між палями.

У роботі П. О. Кравченко (2013) наведені результати модельних експериментів груп з 4 палів, які показали збільшення несучої здатності палів у групі у порівнянні з несучою здатністю одиночної палі. Автор пов'язує це збільшення з розвитком напружень в масиві ґрунту від тиску ростверка. Додаткове напруження від ростверка збільшує горизонтальний тиск на палі, що призводить до збільшення тертя по бічній поверхні палі.

П. О. Кравченко висуває припущення, що розподіл зусиль між палями і ростверком є пропорційним несучій здатності палів і ростверка.

Аналогічні причини збільшення несучої здатності паль у групі у порівнянні з несучою здатністю одиночної палі, висловленим у П. О. Кравченко, наводяться у дисертації Алехина В. С. (2020). За В. С. Алехиним основною причиною, яка визначає поведінку паль у складі групи, є взаємодія паль через ґрунтове середовище. При цьому виникають додаткові вертикальні і горизонтальні напруження, створюючи ефект «обтиснення» палі ґрунтом від навантажень, що передаються на сусідні палі. Величина додаткового «обтиснення» характеризує збільшення опору пл бічній поверхні і під нижнім кінцем палі у складі групи у порівнянні з одиночною палею. Автором запропонований графік (рис. 1.11) для попередньої оцінки несучої здатності паль у складі групи. Дослідження виконані для буронабивних паль у складі пального поля. Недоліком роботи є неврахування роботи низького ростверка.

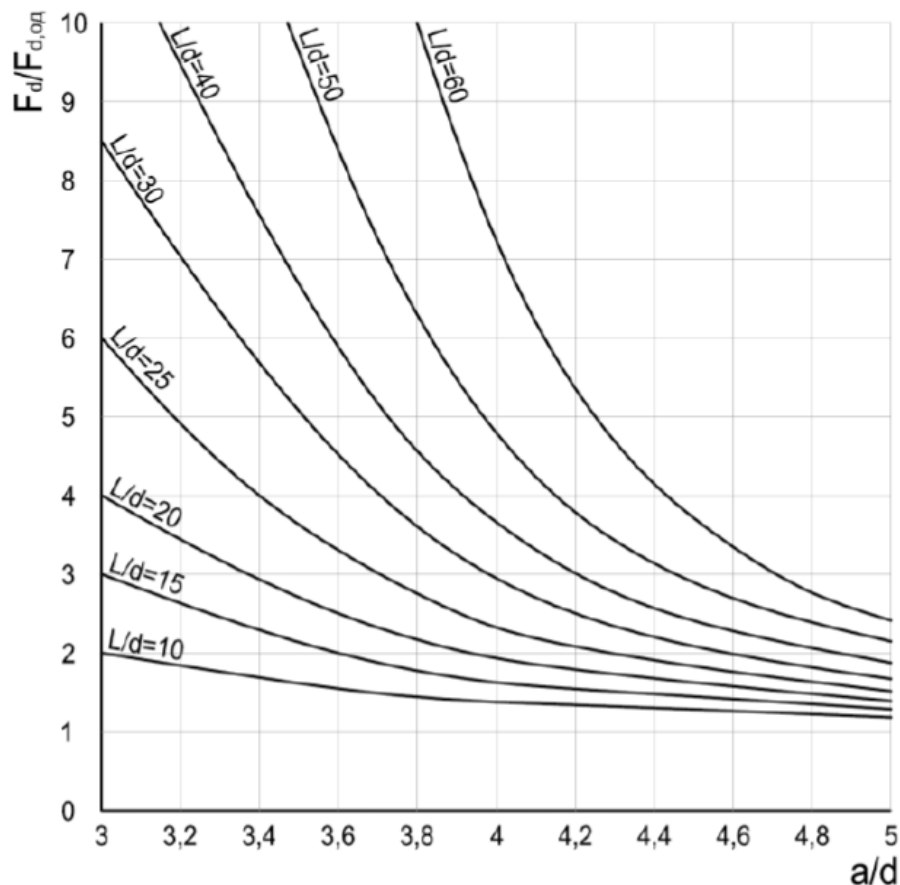


Рис. 1. 11 – Графік залежності граничного опору палі у групі відносно одиночної палі в залежності від відносної довжини паль і відносної відстані між палями

Роботи з дослідження палих фундаментів різних видів проводяться при кафедрі «Будівництва, міського господарства та архітектури» Вінницького національного технічного університету з 1980 року. Аль-Хасауни Аднан проводив статичні випробовування полунатурних палих груп з палі довжиною 3 м перерізом 120×120 мм (1990).

Вимірювалися зусилля, які приходяться на кожную палю в групі при різних ступенях загального навантаження на групу. Навантаження, яке приходиться на кожную палю, залежить від розташування палі в групі, відносного занурення палі, величини навантаження на групу при заданих ґрунтових умовах та жорсткості ростверку. В більшості випадків максимальне навантаження, в момент втрати несучої здатності групи, приходиться на центральну палю, а в початковій стадії навантаження більшу частину загального навантаження сприймають кутові палі.

В подальшому дослідження роботи стовпчастих пальових фундаментів виконувались шляхом маломасштабного фізичного моделювання та математичного моделювання [3 – 5, 18, 20 – 23, 25 – 28].

За положеннями існуючих нормативних документів [12] проєктування пальового фундаменту передбачає визначення допустимого навантаження на палю і визначення кількості паль з умови неперевищення цього допустимого навантаження на палю. При цьому потрібне формальне задоволення умови неперевищення граничних значень осідань при використанні моделі лінійно-деформованого середовища з обмеженням тиску в рівні нижніх кінців паль величиною розрахункового опору ґрунту R , яке для пальово-плитного фундаменту практично завжди виконується.

В зв'язку з цим при нормативному підході до проєктування пальових фундаментів для виконання умови неперевищення допустимого навантаження на палю збільшують їх кількість, що призводить до «перенасичення» палями умовного фундаменту при незмінному осіданні будівлі і, як наслідок, до завищення капітальних вкладень у роботи нульового циклу. Ствердження про незмінне осідання при збільшенні кількості паль при інших рівних умовах підтверджене численними експериментальними дослідженнями [35].

Для оптимізації проєктних рішень пальово-плитних фундаментів з'являються нові методики, які пропонують врахування роботи з ґрунтом плити ростверку [7, 17, 33, 46, 48, 49, 56] або розгляд умовного фундаменту як єдиного пальово-плитного масиву [35, 36, 59].

Отже, проведені різними авторами дослідження впливу низького ростверку на роботу пальового фундаменту показали, що частина навантаження передається на ґрунт підшоною ростверку, а несуча здатність паль у складі пальового фундаменту не завжди відповідає несучій здатності одиночної палі.

Основні фактори, що впливають на частку роботи ростверку – інженерно-геологічні умови, геометричні характеристики пальового фундаменту, інтенсивність навантаження на пальовий фундамент. Але проведені дослідження поки ще недостатні для практичних рекомендацій щодо визначення кількісного співвідношення між сумою несучих здатностей одиночних паль і несучою здатністю групи паль з низьким ростверком.

1.2 Чисельне моделювання системи «паля – ростверк – основа»

Перспективним напрямком досліджень напружено-деформованого стану (НДС) системи «паля – ростверк – основа» є використання методів математичного моделювання на основі чисельних методів аналізу. Найпоширенішим на сьогодні є метод скінчених елементів (МСЕ), який покладений в основу сучасних програмних комплексів для розрахунку будівельних конструкцій, будівель і споруд.

Програми на базі МСЕ для основ та фундаментів розроблені І. П. Бойком [6, 7], Ю. Л. Винниковим та М. Л. Зоценком [10, 14, 15], А. Л. Готманом, Н. З. Готман (2003), О. О. Петраковим [32], В. Г. Федоровським (2000 – 2003), Я. Й. Червинським [40], Д. М. Шапіро [41], J. S. Pressley, H. G. Poulos [55], В. В. Sheil, В. А. McCabe [61], S. Alturi, D. Druker, J. Duncan, M. Kimura, R. Lewis та іншими вченими різних країн світу.

Для вирішення геотехнічних задач на теперішній час найбільш часто використовуються наступні програмні комплекси: ЛІРА [17, 19, 31], Scad, VSEM, АСНД VESNA [6], PRIZ-Pile [9, 10], ANSYS [1, 29], NASTRAN, CivilFEM, Plaxis [15, 19, 29, 40, 46, 50], Midas GTS NX [31, 42], FLAC 3D [47], ABAQUS [44, 45, 62] та інші [39] які дають можливість аналізувати сумісну роботу фундаментних конструкцій та ґрунтової основи, використовуючи різні моделі ґрунтового середовища. Перераховані програмні комплекси відрізняються інтерфейсом, бібліотеками скінчених елементів, функціональними можливостями та орієнтуванням на певний клас задач.

Для визначення НДС системи «паля – ростверк – основа» найбільш широко застосовують Plaxis [15, 19, 29], ANSYS [1], ЛІРА [17, 24], PRIZ-Pile [9, 10], АСНД VESNA [6].

Особливістю сучасного застосування МСЕ при проектуванні пальових фундаментів є проведення чисельного моделювання, тобто моделювання роботи тих чи інших конструкцій під навантаженням в електронній формі. Такий вид досліджень має ряд суттєвих переваг у порівнянні з фізичними модельними, крупномасштабними та натурними дослідженнями. Моделювання МСЕ дозволяє оцінити напружено-деформований стан (НДС) системи на будь-якій стадії роботи, показати в динаміці розподіл напружень та деформацій. Головна проблема широкого застосування методу – це відсутність порівняно простої моделі ґрунтової основи, яка з достатньою точністю моделює поведінку ґрунту під навантаженням. Натурні дослідження дають більш точні результати, але їх вартість досить значна.

Складність моделювання викликана неоднорідністю та анізотропністю ґрунту, а також складними фізико-механічними процесами, що відбуваються при передачі навантаження від наземної конструкції на ґрунт. На сьогодні запропоновано багато моделей, що в тій чи іншій мірі враховують такі фактори, як повзучість ґрунту, нелінійна стисливість ґрунту, пружно-пластичні деформації, дилатансія та інші. Основним недоліком цих моделей є необхідність знання особливих характеристик ґрунту, а також те, що програмні комплекси, що містять дані моделі, мають вузький діапазон застосування.

1.3 Практичні методи врахування роботи ростверку у пальному фундаменті

У одній з редакцій радянських норм (Руководство по проектированию свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1980) розрахунок несучої здатності палі виконувався за формулою

$$\Phi = m(m_R RF + u \sum m_f \cdot f_i \cdot l_i), \quad (1.1)$$

де F – площа обпирання палі на ґрунт, м²;

m, m_R – поправочні коефіцієнти;

m_f – коефіцієнт умов роботи, що враховує спосіб занурення;

R – розрахунковий опір під нижнім кінцем палі, тс/м²;

u – зовнішній периметр, м;

f_i – розрахунковий опір ґрунту по боковій поверхні палі, тс/м²;

l_i – товщина i -го шару ґрунту, що прорізається боковою поверхнею палі, м.

Зазначено, що несуча здатність забивних висячих палей, що працюють в групі, в загальному випадку відрізняється від несучої здатності одиночних палей. Це пов'язано з тим, що в результаті взаємодії палей опір ґрунту на їх бокову поверхню зменшується за рахунок розподілу напружень в ґрунті міжпального простору, а опір ґрунту під нижнім кінцем збільшується за рахунок ущільнення ґрунту в результаті занурення сусідніх палей.

Ступінь зміни несучої здатності залежить від довжини палей, числа палей в куці та від властивостей ґрунтів, що знаходяться під вістрям, а також від співвідношення навантаження, яке передається через бокову поверхню і через вістря палі. Однак в переважній більшості випадків вказана зміна несучої здатності невалика, оскільки явища, які її обумовлюють, діють в прямо протилежних один одному напрямках. Тому при розрахунку

відповідно до методики наведеної в нормах, несуча здатність паль в кущі приймається рівною несучій здатності одиночної палі [12].

При виникненні необхідності під час проектування оцінити несучу здатність паль в кущі з урахуванням їх взаємодії при сумісній роботі вказану несучу здатність можна визначити за формулою

$$\Phi = m \left[m_R (1 + B) RF + Au \sum m_f \cdot f_i \cdot l_i \right], \quad (1.2)$$

A , B – коефіцієнти, що враховують збільшення розрахункового опору під нижнім кінцем палі в результаті ущільнення ґрунту та зменшення розрахункового опору по боковій поверхні палі в результаті сумісної роботи паль в кущі.

Коефіцієнти A і B залежать від числа паль n та відносної глибини занурення $\eta = \frac{l}{d}$ для відносної відстані між палями $3d$.

Методика врахування спільної роботи паль в групі, аналогічна з формулою (1.2), зазнала розвитку у роботі Зайцевої О. В. (2006). Основна увага в цій роботі приділена палевим фундаментам на двошаровій основі, коли нижній кінець палі занурений у міцний пісок, а верхня частина палі знаходиться у слабкому ґрунті. Але розглядається також і варіант однорідного ґрунту. Автором запропоновані коефіцієнти взаємного впливу паль у групі до 4 паль в залежності від їх кроку для однорідної і двошарової основи. За дослідженнями Зайцевої О. В. для однорідної основи при кроці паль менше $6d$ коефіцієнти впливу менше за одиницю (палі в групі працюють гірше за одиночні), а для двошарової основи практично завжди несуча здатність палі у групі вище, ніж у одиночної. Виключення складає заглиблення в міцний шар на 1 м при відстані між палями $4,5d$ і $6d$. При відстані між палями $6d$ палі в групі працюють як одиночні і збільшення несучої здатності не відбувається.

На основі матеріалів експериментальних та теоретичних досліджень ряду авторів, а також результатів, отриманих співробітниками кафедри «Геотехніка в строительстве» БНТУ, БелНИИС Минстройархитектуры Республіки Білорусь видані «Рекомендации по расчету свайных фундаментов с несущими ростверками Р5.01.015.05», засновані на [37]. Запропонована методика розрахунку включає визначення несучої здатності палевого фундаменту з урахуванням роботи ростверку.

Розрахункове допустиме вертикальне навантаження на палевий фундамент з несучим ростверком (з обов'язковим ущільненням ґрунту під ростверком) визначається за формулою

$$N = N_r + N_{pf} \quad (1.3)$$

$$N_r = \gamma_{cr} p_r A_r' \quad (1.4)$$

$$N_{pf} = \gamma_{ck} \frac{n(F_d - F_{B/2})}{\gamma_k} \quad (1.5)$$

де N_r – навантаження, що сприймається ростверком, кН;

N_{pf} – навантаження, що сприймає група паль, кН;

γ_{cr} – коефіцієнт умов роботи ґрунту під подошвою ростверку;

p_r – середній тиск ґрунту під подошвою ростверку, кПа.

Якщо $S_p > S_R$ (S_R – осідання фундаменту при тиску під його подошвою рівному розрахунковому опору ґрунту R , кПа) приймається $p_r = R$,

якщо $S_p \leq S_R$ $p_r = R \frac{S_p}{S_R}$.

A_r' – приведена площа подошви ростверку, $A_r' = (A_r - nA_{ci})$, м²;

A_r – площа подошви ростверку, м²;

A_{ci} – площа поперечного перерізу перерізу палі, м²;

n – кількість паль у фундаменті;

γ_{ck} – коефіцієнт умов роботи основи фундаменту;

F_d – несуча здатність одиночної палі, кН,;

$F_{B/2}$ – несуча здатність бічної поверхні одиночної палі в межах від верхнього кінця до глибини $B/2$, кН;

γ_k – коефіцієнт надійності метода випробувань в залежності від способу визначення несучої здатності.

Що стосується визначення напружень в ґрунті від ряду чи групи паль простим підсумовуванням, то необхідно відмітити, що просте підсумовування напружень від одиночних паль і ростверку наближене, оскільки палі в палювому фундаменті знаходяться у взаємному зв'язку і робота палі в палювому фундаменті суттєво відрізняється від роботи одиночної палі.

Дані рекомендації розроблені лише для проектування стовпчастих палювих фундаментів з несучими ростверками.

Практичні методи визначення несучої здатності палювих фундаментів з урахуванням роботи низького ростверку були запропоновані Добровольським К. І. (1935), Бірюковим А. А. (1938), Тер-Ованесовим Г. С. (1953), Кереселідзе Д. І., Голубковим В. М. (1966), Яблочковим В. Д. (1964), Метелюком М. С. (1970), Далматовим Б. І. (1975), Грутманом М. С. (1975), Сімвуді А. І. (1987) та іншими авторами.

У Московських державних будівельних нормах (2003) було передбачено, що розрахунок осідання плитно-палювого фундаменту

необхідно виконувати згідно з рішенням Н. G. Poulos [52 – 54]. Це рішення засноване на визначенні значень жорсткості групи паль і ростверку і коефіцієнта їх взаємодії, що використовується для визначення коефіцієнта жорсткості всього фундаменту. Виконані розрахунки осідання повинні бути порівняні з розрахунками осідання як умовного фундаменту мілкого закладання.

Цей метод, на жаль, не може бути використаний для стовпчастих та стрічкових пальових фундаментів.

Трегуб А. С. і Шокарев О. С. [38] пропонують ураховувати роботу ростверку введенням при визначенні загальної несучої здатності пальового фундаменту поправочного коефіцієнту. Авторами також встановлено, що сумісна робота паль і ростверку, зменшує величину загального осідання будівлі. Визначення даного поправочного коефіцієнту є досить трудомістким, а також має цілу низку припущень, що зменшує частку роботи ростверку.

Чинні на території України нормативні документи рекомендують враховувати роботу низького ростверку як реакцію ґрунтової основи п. 8.5.2.16 [12] (за максимальне значення реакції приймається розрахунковий опір ґрунту основи). В нормативі [8] аналогічним способом рекомендовано враховувати роботу існуючого фундаменту після підсилення палями.

Корнієнко М. В. [30] запропонував при розрахунку несучої здатності підсиленого палями фундаменту виключати несучу здатність паль по боковій поверхні під подошвою фундаменту на товщину $(1,0 \dots 1,5)b$ (b – ширина існуючого фундаменту). Тоді несуча здатність підсиленого фундаменту визначається як сума несучих здатностей паль та несучої здатності ростверку (в склад якого входить існуючий фундамент), яка визначається добутком площі ростверку на розрахунковий опір ґрунтової основи. Такий підхід схожий на рішення Сернова В. О. [37], відмінність полягає лише в тому, що Сернов В. О. пропонує такий підхід для нових фундаментів та менша товща виключення несучої здатності по боковій поверхні паль $(0,5b)$.

Наведений огляд методів свідчить про роботи ряду науковців в напрямку врахування впливу низького ростверку на несучу здатність пальового фундаменту в цілому. Було розроблено багато методів, які містять значну кількість допущень.

Методи, що регламентують Московські норми 2003 р., передбачають розрахунок лише плитних пальових фундаментів; методи Кереселідзе Д. І. та Голубкова В. М. взагалі не враховують сумісну роботу ростверку та паль; методи Сімвуді А. І. передбачені при застосуванні паль-стійок; Тер-Ованесов Г. С. в своєму методі розрахунку нехтує роботою під вістрям паль.

У роботі [25] виконаний порівняльний розрахунок частки навантаження, яка сприймається ростверком, що визначені за методами чиних норм [12, 8], Корнієнка М. В. [30] та Сернова В. О. [37]. Частка навантаження, яка сприймається ростверком, у несучій здатності фундаменту, що визначена за цими методами, коливається в межах від 0,16 до 0,84. Експериментальними дослідженнями різних авторів встановлено, що частка навантаження, яка сприймається ростверком, коливається в межах від 0,08 до 0,62. Отже, отримані за розрахунком методами чиних норм [12, 8], Корнієнка М. В. [30] та Сернова В. О. [37] дані дещо завищені у порівнянні з даними експериментальних досліджень.

В зв'язку з цим необхідною є розробка більш досконалого методу розрахунку, який дозволив би адекватно враховувати сумісну елементів пального фундаменту.

Висновки за розділом 1 та постановка задач дослідження

1. Аналіз попередніх досліджень перерозподілу зусиль між елементами паливих фундаментів з низьким ростверком показав, що:

– несуча здатність палів в групі може суттєво відрізнитись від несучої здатності одиночної палі (кущовий ефект). Кущовий ефект може бути як позитивним (несуча здатність групи палів більше за суму несучих здатностей одиночних палів), так і негативним (несуча здатність групи палів менше за суму несучих здатностей одиночних палів). Цей ефект залежить від відстані між палями, довжини палів та виду ґрунту. Відзначається, що для піщаних ґрунтів кущовий ефект позитивний.

– частина зовнішнього навантаження передається ґрунту основи через подошву ростверку;

– при зміні кількості, кроку і довжини палів частина навантаження, що сприймається ростверком, змінюється;

– наявність низького ростверку ускладнює врахування процесу взаємодії палів з ґрунтом, робить поняття «граничної несучої здатності» палів невизначеним. Несуча здатність палів у складі групи може бути не повністю реалізована внаслідок включення у роботу ґрунту під ростверком;

– навантаження між палями групи розподіляється нерівномірно. Цей перерозподіл залежить від геометричних параметрів групи (крок, довжина і кількість палів), жорсткості ростверку, величини навантаження відносно граничного значення, розподільчої здатності ґрунтової основи.

За даними більшості дослідників в перший момент завантаження фундаменту з групи палів максимальне навантаження сприймають кутові палі, мінімальне – центральні. Із зростанням навантаження, а також із часом відбувається перерозподіл і різниця зменшується. Гранична величина несучої здатності максимальна біля центральних палів, а мінімальна біля кутових. Кутові, в тому числі крайні палі, першими втрачають свою несучу здатність.

– виконані експериментальні дослідження не висвітлили в повній мірі сумісну роботу ростверку і паль та залежність частки несучої здатності ростверку і паль у складі пальового фундаменту від інженерно-геологічних умов, геометричних характеристик пальового фундаменту, характеру прикладання навантаження;

– відсутні дослідження впливу типу паль (утворюються з вийманням чи без виймання ґрунту) на роботу пальового фундаменту.

2. Проведені дослідження поки ще недостатні для практичних рекомендацій щодо визначення кількісного співвідношення між сумою несучих здатностей одиночних паль і несучою здатністю групи паль з низьким ростверком.

3. Огляд результатів досліджень за допомогою чисельного моделювання показав, що основним питанням при чисельному моделюванні пальових фундаментів є вибір моделі ґрунту, яка б адекватно відображала взаємодію основи і конструктивних елементів пальового фундаменту під навантаженням.

4. Проведений аналіз практичних методів урахування сумісної роботи ростверку і паль дозволив виявити ряд спрощень та недоліків у розрахункових схемах різних авторів. Більшість з них не враховує один або декілька основних факторів (не враховується сумісна робота ростверку і паль, робота палі під вістря, спрощена розрахункова схема) взаємодії ростверку з основою, що призводить до значних похибок при розрахунку.

В зв'язку з цим необхідно є розробка більш досконалої методики розрахунку, яка дозволила б адекватно враховувати сумісну елементів пальового фундаменту. Для досягнення поставленої в роботі мети, необхідно вирішити наступні задачі:

– виявити якісну картину і особливості сумісної роботи елементів пальових фундаментів різних типів на маломасштабних моделях;

– шляхом чисельного моделювання, в якому використовується пружно-пластична модель ґрунту, методом скінчених елементів (МСЕ) проаналізувати напружено-деформований стан систем «ростверк – палі – основа»;

– виявити вплив фізико-механічних характеристик основи та роль геометричних параметрів пальових фундаментів на частку несучої здатності ростверку і паль у складі пальових фундаментів при моделюванні методом скінчених елементів;

– виявити вплив способу влаштування паль (палі, що влаштовані з вийманням та без виймання ґрунту) на частку навантаження, що сприймає ростверк і палі у складі пальового фундаменту, при моделюванні методом скінчених елементів;

– запропонувати інженерну методику визначення допустимого навантаження на пальовий фундамент із врахуванням сумісної роботи його елементів з основою.

2 ФІЗИЧНІ МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СУМІСНОЇ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ СТОВПЧАСТИХ ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТІВ З ОСНОВОЮ

Виявлення характеру розподілу зусиль між елементами пальового фундаменту в залежності від геометричних параметрів зручніше за все проводити шляхом фізичного моделювання на маломасштабних моделях. Таке моделювання проводиться у лотку з піщаним ґрунтом, в якому штучно створюється основа з заданими характеристиками (щільність, вологість, характеристики міцності).

Умови моделювання обґрунтовуються методами теорії подібності. Відомо, що при використанні сипучого ґрунту для моделювання ґрунтового середовища можливе пряме моделювання. При цьому масштаб моделювання однаковий для навантажень, напружень та геометричних параметрів моделі.

Фізичне моделювання на маломасштабних моделях дозволяє доступними методами проводити дослідження якісного характеру впливу параметрів моделі на напружено-деформований стан системи, варіювати цими параметрами, виконувати повторення експерименту для врахування статистичного розбросу.

При плануванні модельного експерименту в якості незалежних змінних приймаються основні геометричні і конструктивні параметри, які характеризують паливий фундамент:

L/d – приведена довжина палі (X_1);

a – крок палі (X_2).

Вибір основних рівнів варіювання виконується на підставі аналізу геометричних і конструктивних параметрів пальових фундаментів. Оскільки експерименти проводяться на моделях, то при цьому обов'язково враховується масштабний фактор, який підбирається на базі рекомендацій і закономірностей теорії подібності. Межі варіювання факторів встановлюються з врахуванням апіорної інформації, експериментальних можливостей, технічних обмежень і на основі результатів попередніх пошукових експериментів.

Кількість випробувань з визначення впливу кожного параметру повинна бути не менше шести. Шестикратне повторювання є величиною, яка визнана найменшою для можливої статистичної обробки результатів із забезпеченням необхідної їх точності.

При моделюванні ґрунтового середовища використовувався металевий лоток з геометричними розмірами 1800×1200×1000 мм (рис. 2.1). В якості упорної системи для передачі навантаження на моделі використовується металева рама з прокатних профілів, що дозволяє передавати навантаження на модель до 100 кН. В якості ґрунтової основи використовувався пісок середньої крупності. Основа створювалась шляхом шарового засипання у лоток піску заданої вологості з ущільненням кожного шару до

заданої щільності. Щільність контролювалась методом ріжучого кільця у трьох точках кожного шару товщиною 15 см [13]. Вологість визначалась методом висушування до постійної ваги згідно з [13].



Рис. 2.1 – Лоток з ґрунтовою основою під фундамент з пристроєм для ущільнення ґрунту

Враховуючи геометричні розміри лотка з піском, обмежені можливості упорної системи та можливість проведення після одного пересипання ґрунту випробування трьох моделей пальового фундаменту був прийнятий масштаб фізичного моделювання 1:15.

Для моделювання натурних паль довжиною 3 м, 4,5 м та 6 м з поперечним перерізом 30 × 30 см виготовлені дерев'яні моделі з поперечним перерізом 20 × 20 мм, довжиною 200, 300 і 400 мм.

В таблиці 2.1 наведені характеристики піску, який використовувався для випробування.

Таблиця 2.1 – Фізико-механічні характеристики піщаного ґрунту у лотку

Назва характеристики	Пісок середньої щільності
Щільність, кг/м ³	1670
Вологість	0,07
Коефіцієнт пористості	0,70
Кут внутрішнього тертя, град.	30
Питоме зчеплення, кПа	1
Модуль деформації, МПа	24

Для замірювання частки навантаження, що припадає на кожну окрему палю групи, були виготовлені тензометричні наголовники для паль. Наголовники виконувались з відрізків квадратної труби, на яку наклеєні тензометричні датчики з опором по 100 Ом (рис. 2.2). Від кожного тензометричного датчика відходить два провідники: один з'єднується з іншим тензометричним датчиком, а до іншого припаюється провід, який пізніше буде підключено до приладу ИДЦ-1 (вимірювач деформацій числовий).



Рис. 2.2 – Тензометричний датчик

На рисунку 2.3 наведена схема закріплення палі в моделях ростверку.

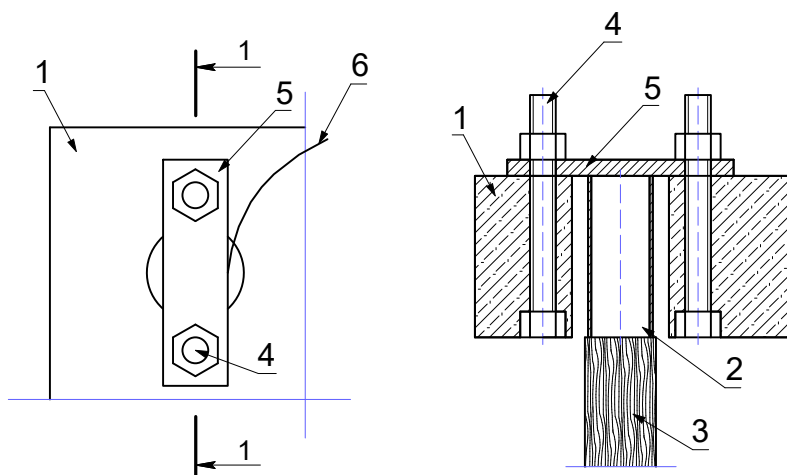


Рис. 2.3 – Кріплення палі, ростверку і наголовника:

- 1 – ростверк; 2 – наголовник; 3 – палля; 4 – болт; 5 – металева пластина;
6 – дріт від наголовника

Перед встановленням тензометричних наголовників у модель фундаменту виконане їх тарирування за допомогою спеціального навантажувального пристрою і контрольного динамометра (рис. 2.4).

Навантаження на ростверк передавалось за допомогою домкратів, а для виміру зусилля, що передається, використовувався динамометр. Домкрат і динамометр розраховані на передачу навантаження до 5 - 10 т.

Для замірювання переміщень фундаменту використовувались система прогиномірів, встановлена на незалежній упорній системі, закріпленій на стінки лотка. На рис. 2.5 показана в зборі система для передавання навантаження на моделі фундаменту.



Рис. 2.4 – Пристрій для тарирування датчиків



Рис. 2.5 – Проведення дослідів з навантаження моделі пального фундаменту

Результати фізичних модельних досліджень стовпчастих пальових фундаментів з варіюванням різних факторів висвітлені в роботах [27, 28, 4, 22, 20].

Для аналізу відмінності поведінки паль і ростверку у складі фундаменту і поведінки одиночної палі та плити ростверку проведені випробування одиночних паль різної довжини та плити ростверку без паль.

Навантаження одиночних паль виконувалось за допомогою спеціального важеля, що шарнірно кріпиться до стінки лотка. В залежності від місця розміщення палі в лотку співвідношення плечей важеля буде коливатись в межах від 1:6 до 1:6,35. Процес випробування одиночної палі зображений на рисунку 2.6.



Рис. 2.6 – Процес випробування одиночної палі в лотку

2.1 Фізичне моделювання роботи стовпчастого пальового фундаменту з варіюванням кроку і довжини паль при сталій їх кількості

Фізичним моделюванням на маломасштабних моделях досліджувався вплив на роботу стовпчастого пальового фундаменту та його окремих елементів (паль та ростверку) таких факторів, як відносна довжина паль та їх крок у кущі.

2.1.1 Планування фізичного моделювання роботи стовпчастого пальового фундаменту

Кількість паль в куці прийнята сталою (9 штук).

З метою варіювання кроком паль було виготовлено три моделі ростверків, що дозволяють приймати крок паль $3d$, $5d$ та $7d$, де d – розмір поперечника палі. Моделі ростверків були виготовлені з залізобетону. Товщина моделей плит ростверків прийнята 50 мм, що відповідає товщині 750 мм у натурного ростверку і є достатньою для забезпечення їх жорсткості під час випробувань.

Розміри моделей в планя 200×200 мм, 290×290 мм та 410×410 мм. Для всіх ростверків використано бетон класу С16/20. Для ростверку 200×200 мм в якості армування використано арматурну сітку $6\text{Ø}6$ А400С, для 290×290 мм – $6\text{Ø}6$ А400С, для 410×410 мм – $10\text{Ø}6$ А400С (рис. 2.7). Для забезпечення потрібної міцності бетону ростверків здійснювалось ущільнення бетону на вібростолі і витримка у пропарювальній камері.

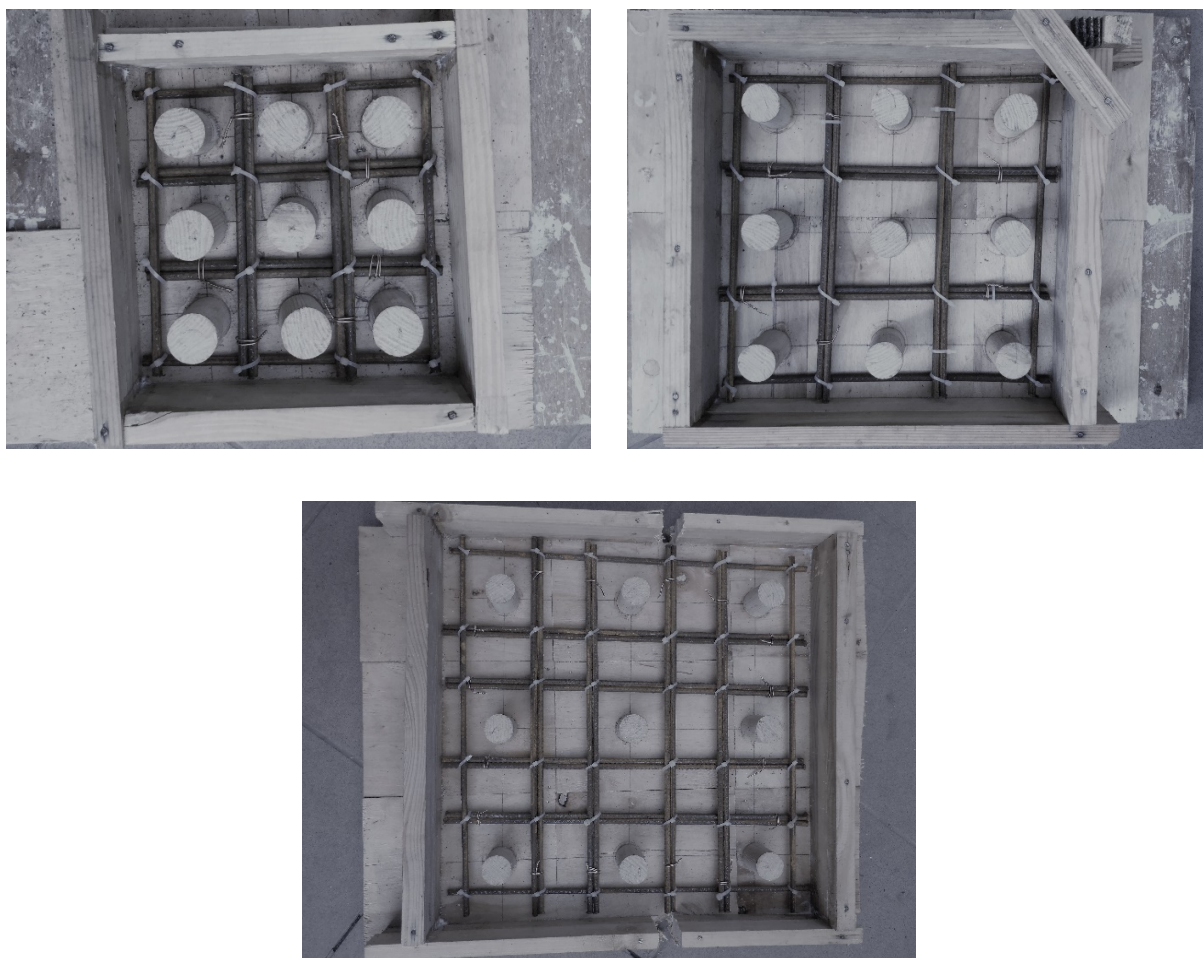


Рис. 2.7 – Опалубка і схема розташування арматури ростверків розмірами 200×200 мм, 290×290 мм, 410×410 мм

Ростверки мають отвори для пропуску голів паль та систему анкерних болтів для забезпечення спільної роботи паль та ростверку (рис. 2.8). Навантаження на ростверк передається через металеву модель підколонику (рис. 2.9).



Рис. 2.8 – Система анкерних болтів для закріплення голів паль у ростверку



Рис. 2.9 – Ростверк з закріпленими в ньому палями та підколонином

На рис. 2.10 наведені геометричні розміри моделей ростверків. На рис. 2.11 показані об'ємні зображення моделей ростверків.

На рис. 2.12 показана в зборі система для передавання навантаження на моделі фундаменту.

Кількість різних значень для кожного параметра прийнята не менше трьох з метою можливості відслідковування залежностей. У таблиці 2.2 наведена програма модельного експериментального дослідження.

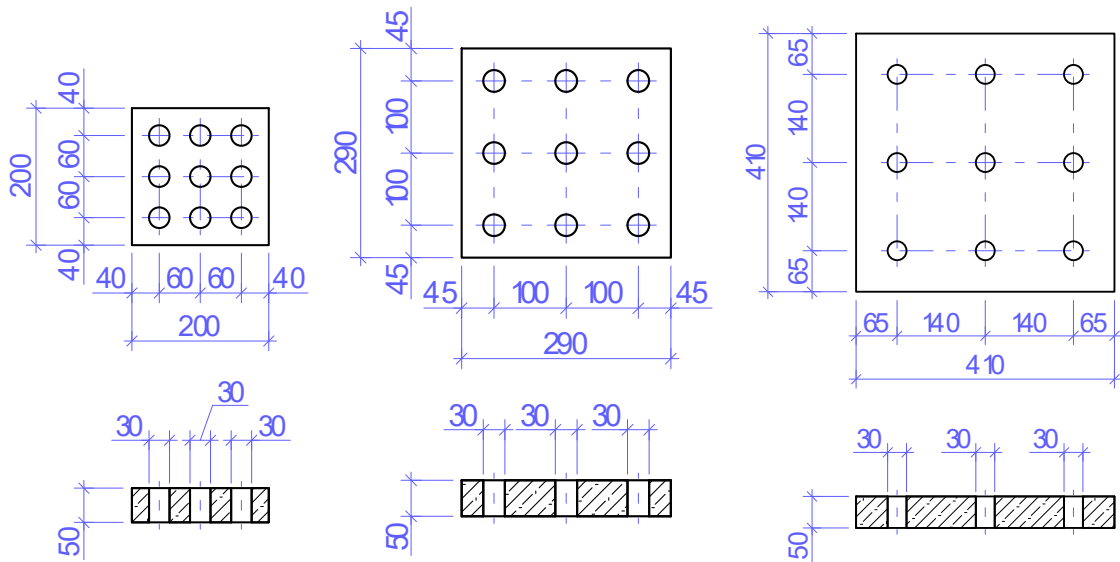


Рис. 2.10 – Моделі ростверків

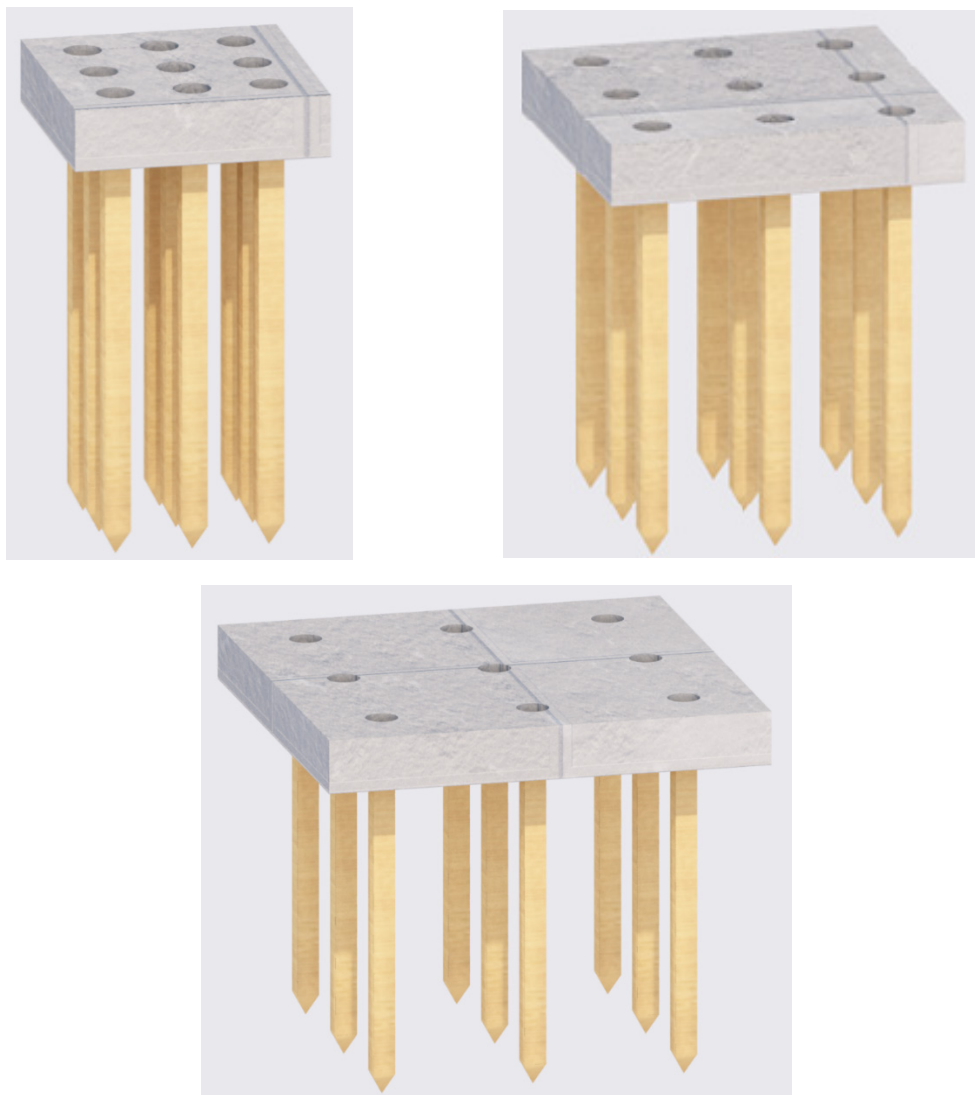


Рис. 2.11 – Об'ємне зображення моделі ростверків

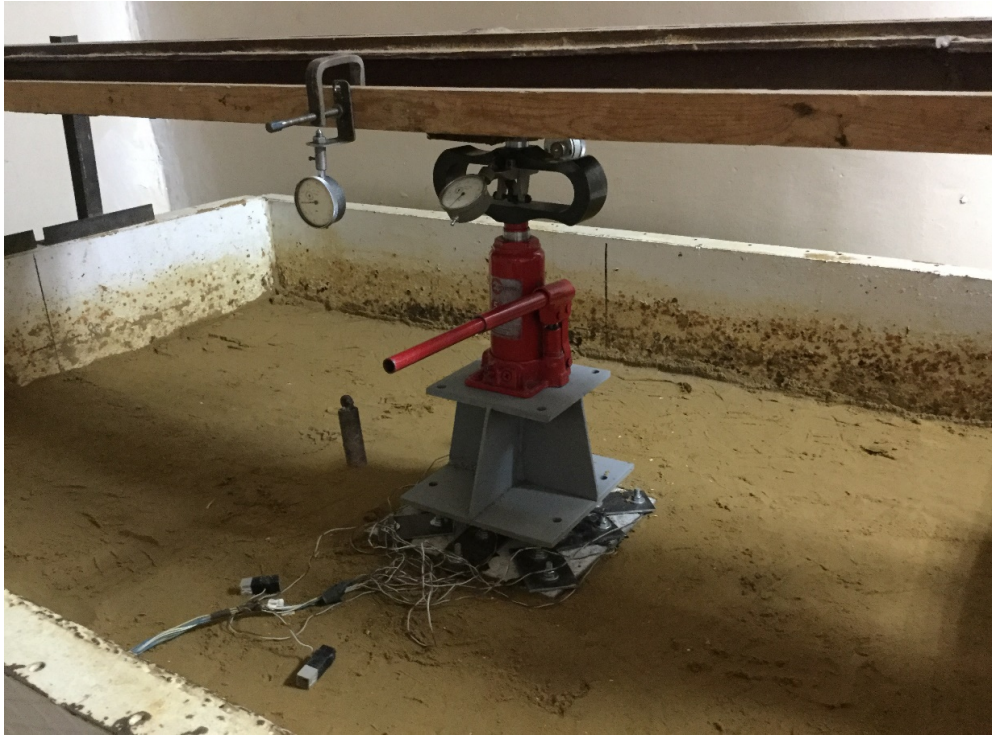


Рис. 2.12 – Модель пальового фундаменту з ростверком 290×290 мм перед випробуванням

Таблиця 2.2 – Програма модельного експериментального дослідження стовпчастих пальових фундаментів

Розміри ростверку, мм	Крок палі	Довжина палі, мм	Приведена довжина палі
200×200	3d	200	10
		300	15
		400	20
290×290	5d	200	10
		300	15
		400	20
410×410	7d	200	10
		300	15
		400	20

2.1.2 Результати фізичного моделювання роботи стовпчастого пальового фундаменту

В результаті проведення кожного з дослідів за програмою експериментального дослідження були одержані графіки залежності осідання – навантаження куца в цілому та графіки залежності зусиль в кожній палі куца від його осідання. Також були одержані графіки осідання –

навантаження за результатами випробування одиночних паль різної довжини та графік осідання – навантаження при випробуванні плити ростверку розміром 290×290 мм як штампа без паль.

На рис. 2.13 – 2.15 для прикладу наведені графіки осідання – навантаження для моделі фундаменту $200 \text{ мм} \times 200 \text{ мм}$ при довжинах паль 200 мм, 300 мм і 400 мм.

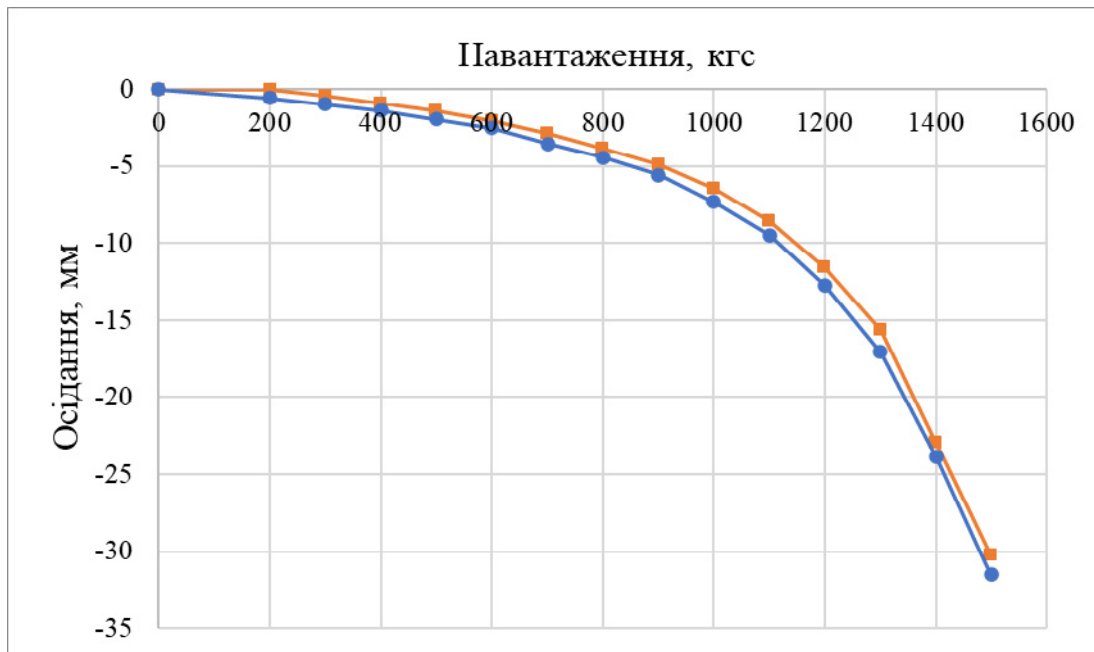


Рис. 2.13 – Графік залежності навантаження – осідання моделі пального фундаменту розмірами $200 \text{ мм} \times 200 \text{ мм}$ при довжині паль 200 мм

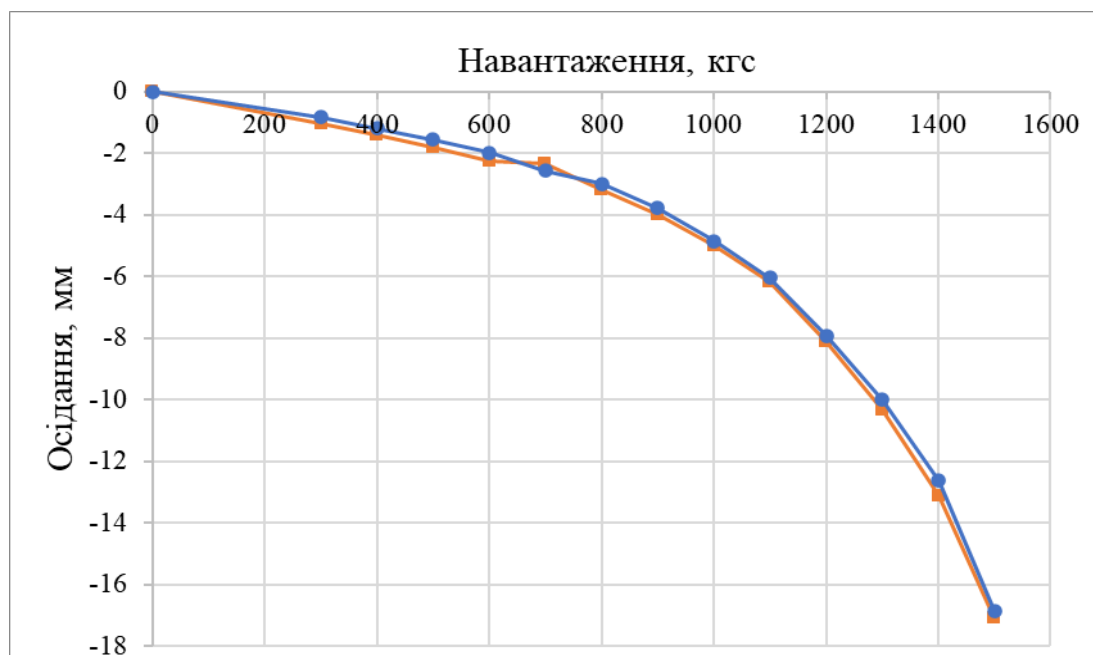


Рис. 2.14 – Графік залежності навантаження – осідання моделі пального фундаменту розмірами $200 \text{ мм} \times 200 \text{ мм}$ при довжині паль 300 мм

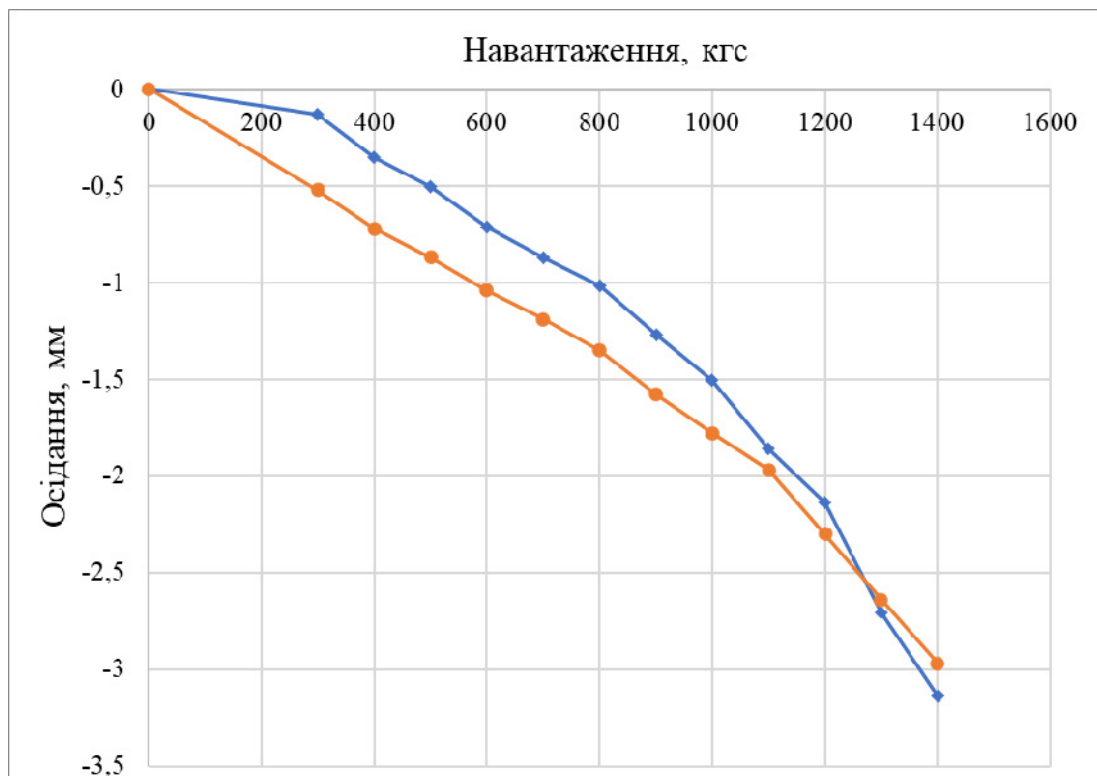


Рис. 2.15 – Графік залежності навантаження – осідання моделі пального фундаменту розмірами 200 мм × 200 мм при довжині паль 400 мм

На рис. 2.16 – 2.18 наведені такі графіки для одиночних паль, на рис. 2.19 – для плити ростверку розмірами 290×290 мм як штампу без паль.

Частка навантаження, яке сприймають палі куца, визначалась як сума зусиль в палях, замірених тензодатчиками, частка навантаження, яку сприймає ростверк, визначалась як різниця між навантаженням, переданим на куц, та сумою зусиль в палях.

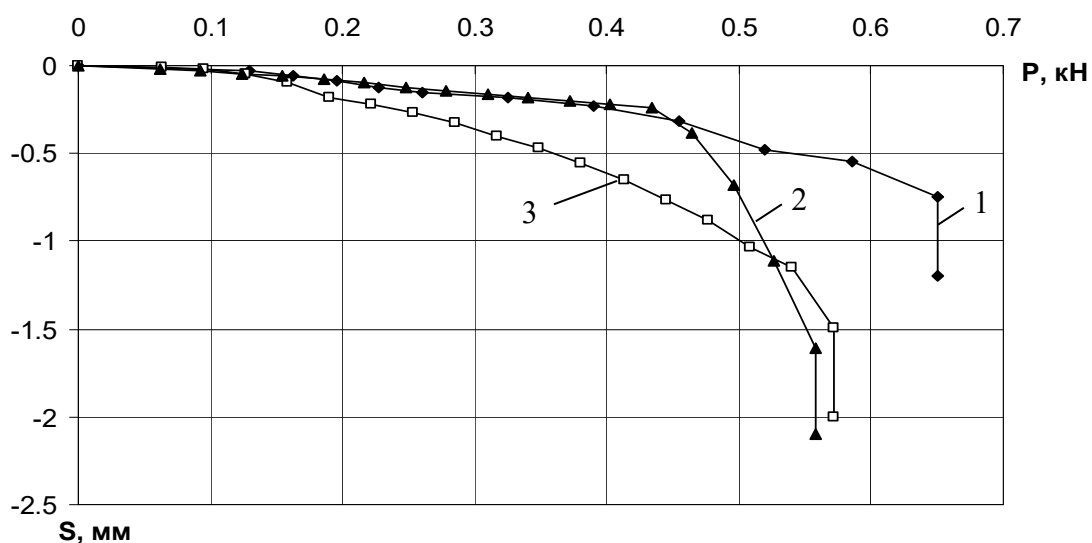


Рис. 2.16 – Графік залежності осідання – навантаження для паль довжиною 20 см

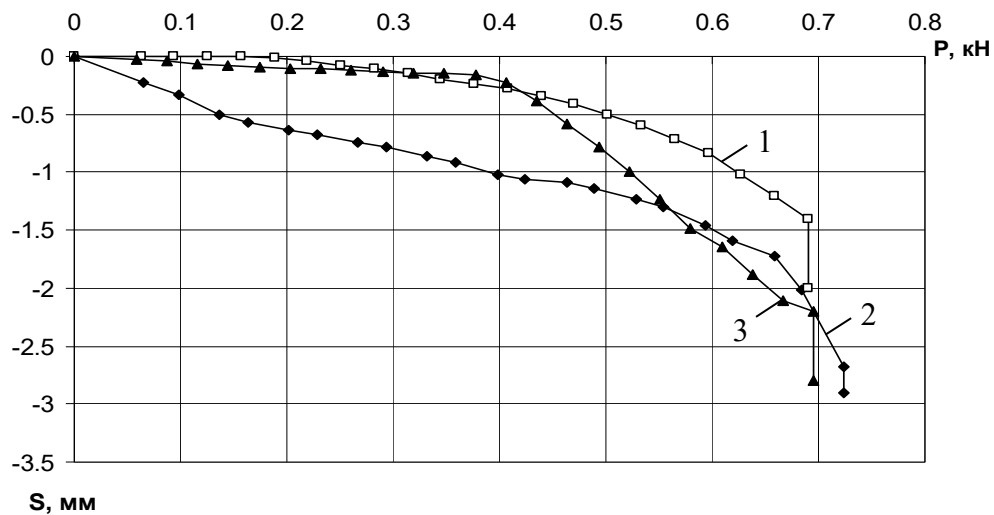


Рис. 2.17 – Графік залежності осідання – навантаження для паль довжиною 30 см

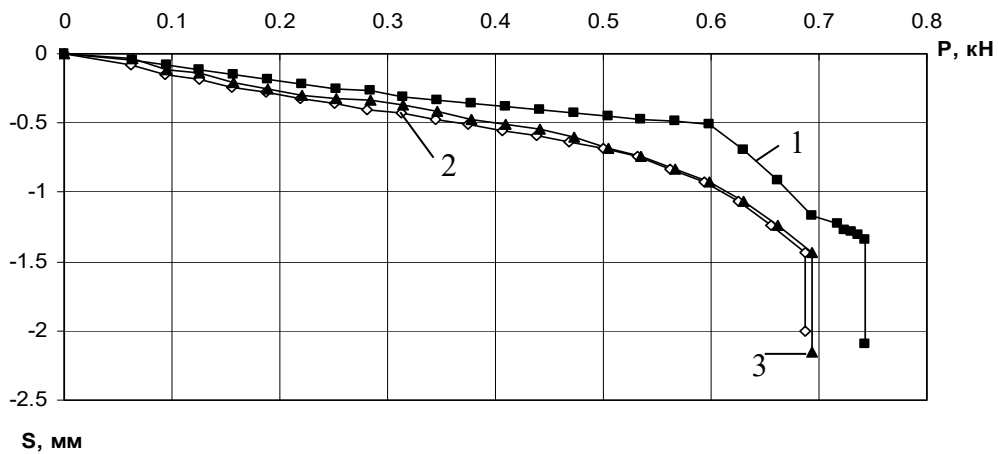


Рис. 2.18 – Графік залежності осідання – навантаження для паль довжиною 40 см

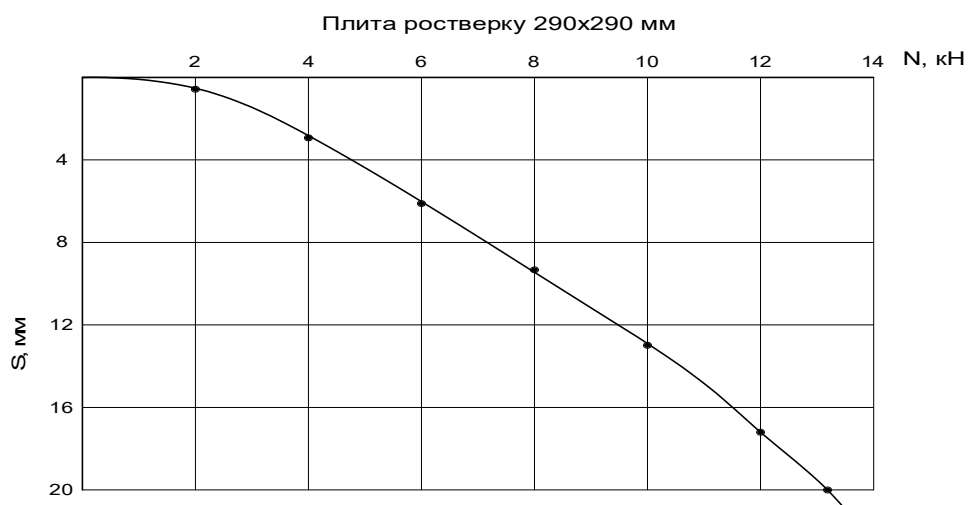


Рис. 2.19 – Графік залежності осідання – навантаження для плити ростверку розмірами 290 × 290 мм як штампу без паль

У таблиці 2.3 наведено результати експериментальних досліджень маломасштабних моделей пальових фундаментів при осіданні 2 мм, 3 мм, 4,5 мм, 6 мм, 10 мм та 15 мм. Площа підшви ростверку за винятком площі паль: при кроці 3d – 0,03641 м²; при кроці 5d – 0,0805 м²; при кроці 7d – 0,1645 м².

Таблиця 2.3 – Результати експериментальних випробувань моделей стовпчастих пальових фундаментів

Осідання, мм	Крок паль	Приведена довжина паль, (l/d)	Навантаження на модель фундаменту, кН	Навантаження, яке сприймають палі, кН	Несуча здатність одиночної палі при 0,2S, кН	Ступінь реалізації несучої здатності палі	Навантаження, яке сприймає ростверк, кН	Тиск під підшвою ростверку, кПа	Частка ростверку, %
S = 2	3d	10	5,50	2,07	0,3	0,77	3,43	94,2	62,36
		15	6,00	2,40	0,3	0,89	3,60	98,9	60,00
		20	11,60	8,64	0,35	2,74	2,96	81,3	25,52
	5d	10	8,00	4,05	0,3	1,5	3,95	49,1	49,38
		15	9,50	4,23	0,3	1,57	5,27	65,5	55,47
		20	15,00	9,26	0,35	2,94	5,74	71,3	38,27
	7d	10	9,00	5,63	0,3	2,09	3,37	20,5	37,44
		15	11,00	4,58	0,3	1,70	6,42	39,0	58,36
		20	21,00	11,90	0,35	3,78	9,10	55,3	43,33
S = 3	3d	10	7,00	3,30	0,46	0,8	3,70	101,6	52,86
		15	8,00	4,35	0,49	0,99	3,65	100,2	45,63
		20	14,00	11,90	0,52	2,54	2,10	57,7	15,00
	5d	10	11,00	5,40	0,46	1,30	5,60	69,6	50,91
		15	11,50	5,32	0,49	1,21	6,18	76,8	53,74
		20	18,00	13,04	0,52	2,78	4,96	61,6	27,56
	7d	10	12,00	7,65	0,46	1,85	4,35	26,4	36,25
		15	13,00	5,78	0,49	1,31	7,22	43,9	55,50
		20	25,00	17,10	0,52	3,65	7,90	48,0	31,60
S = 4,5	3d	10	8,50	4,42	0,52	0,94	4,08	112,1	48,00
		15	9,50	5,20	0,53	1,09	4,30	118,1	45,26
	5d	10	13,00	6,07	0,52	1,30	6,93	86,1	53,31
		15	14,00	6,75	0,53	1,41	7,25	90,1	51,79
	7d	10	15,00	7,65	0,52	1,63	7,35	44,7	49,00
		15	15,00	5,18	0,53	1,09	9,82	59,7	65,47
S = 6,0	3d	10	9,50	5,47	0,55	1,105	4,03	110,7	42,42
		15	11,00	6,00	0,59	1,13	5,00	137,3	45,45
	5d	10	15,00	6,90	0,55	1,39	8,10	100,6	54,00
		15	15,00	7,20	0,59	1,36	7,80	96,9	52,00
	7d	10	17,00	7,65	0,55	1,55	9,35	56,8	55,00
		15	-	-	0,59	-	-	-	-
S = 10,0	3d	10	11,50	7,20	0,56	1,43	4,30	118,1	37,39
		15	13,00	6,67	0,70	1,06	6,33	173,9	48,69
S = 15,0	3d	10	13,00	8,17	0,56	1,62	4,83	132,7	37,15
		15	14,50	7,38	0,71	1,15	7,12	195,6	49,10

В наслідок обмеженості можливостей упорної системи випробування пальових кущів не могли бути доведені до втрати ними несучої здатності, тому при аналізі перерозподілу зусиль між елементами пального фундаменту аналізувалась ситуація при декількох фіксованих значеннях переміщень (осідань) куща. На жаль, для кущів з палями довжиною 400 мм були досягнуті лише незначні переміщення (до 3 мм).

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що при збільшенні осьової відстані між палями несуча здатність ростверку збільшується, оскільки збільшується площа контакту плити ростверку з ґрунтовим масивом; при збільшенні значення приведеної довжини паль навантаження, яке сприймає ростверк, зменшується, оскільки більша частка навантаження сприймається палями.

На рис. 2.20 зображено графік залежності навантаження – крок паль при певному осіданні, а саме при $S = 2$ мм та при $S = 3$ мм, та при довжинах паль 200 мм, 300 мм та 400 мм. Аналізуючи даний рисунок та табл. 2.3, робимо висновок, що при збільшенні довжини паль несуча здатність фундаменту збільшується, при цьому частка навантаження, яке сприймає плита ростверку, зменшується і досить на значну величину, тобто більшу частку навантаження сприймають палі.

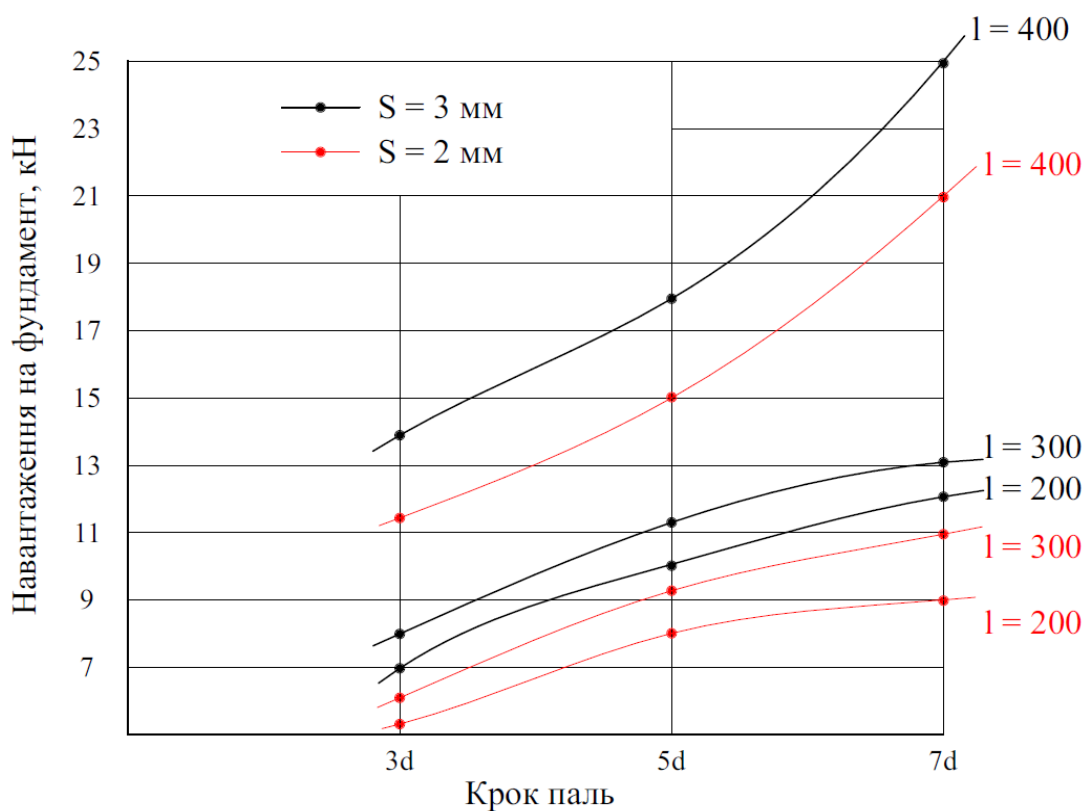


Рис. 2.20 – Графік залежності навантаження – крок паль при довжині паль 200 мм, 300 мм та 400 мм

На рис. 2.21 зображено графік залежності частки ростверку – кроку паль при осіданні $S = 3$ мм та при осіданні $S = 6$ мм. Як видно із рис. 2.21, при збільшенні кроку паль несуча здатність плити ростверку збільшується, а при використанні паль більшої довжини (400 мм) зменшується у порівнянні з палями меншої довжини, 300 мм і 200 мм відповідно.

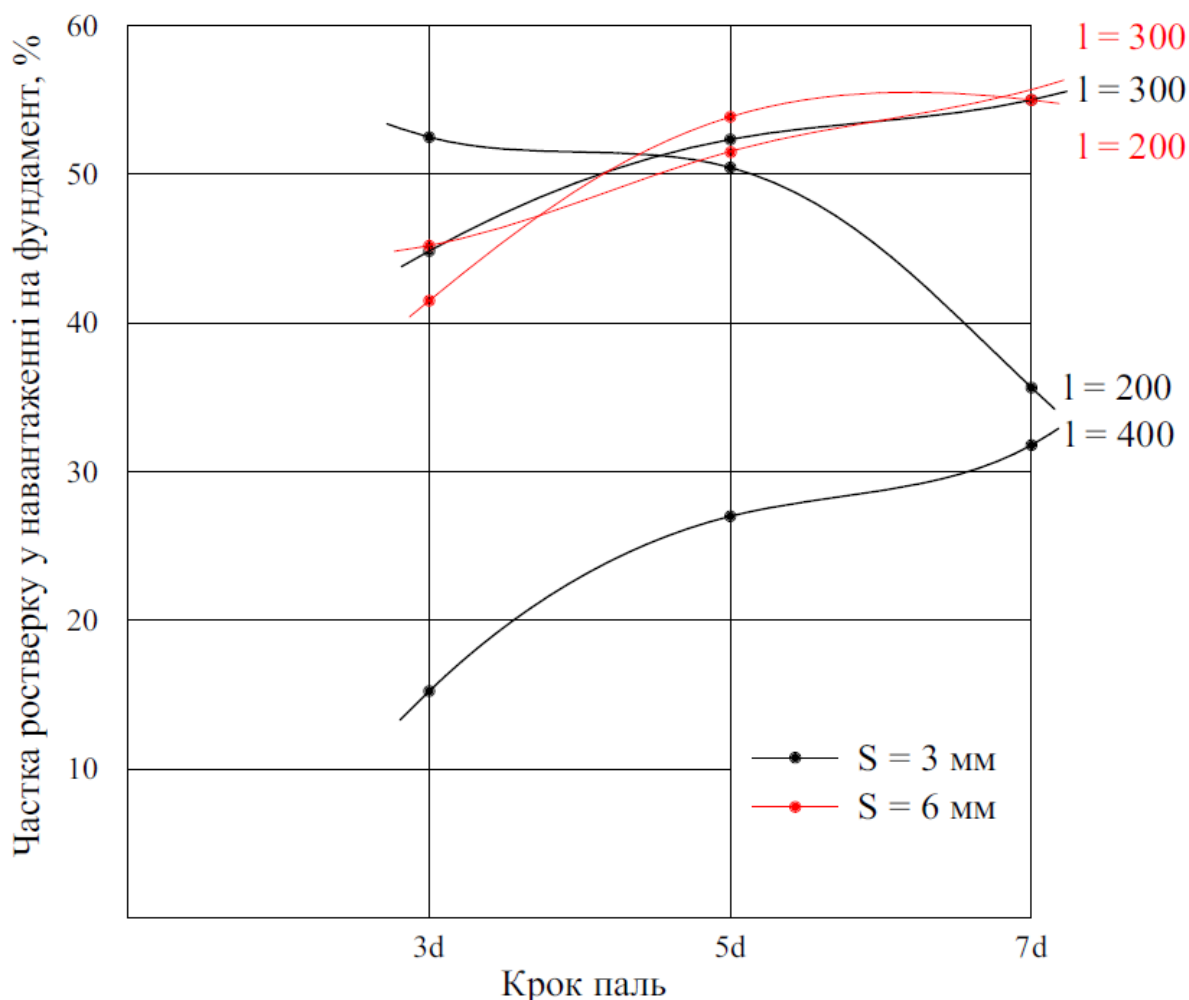


Рис. 2.21 – Графік залежності частки ростверку – кроку паль при осіданні 3 мм, 6 мм та довжині паль 200 мм, 300 мм і 400 мм

На рис. 2.22 зображено графік залежності частки ростверку від відносної довжини паль при осіданні $S = 3$ мм та при осіданні $S = 6$ мм.

На рис. 2.23 показаний графік залежності навантаження, що сприймається ростверком, від осідання при довжинах паль 200 мм, 300 мм, 400 мм та осевих відстанях між палями 3d, 5d і 7d. Як видно із графіку при використанні довгих паль (400 мм) при збільшенні навантаження на фундамент навантаження, що сприймається ростверком, зменшується. При кроці паль 3d та осіданні $S = 2$ мм реакція плити ростверку становить 3,0 кН, а при осіданні $S = 3$ мм – 2,2 кН. При кроці паль 5d збільшується з 5,5 кН до

6 кН відповідно при осіданні фундаменту 2 мм і 3 мм. Це явище можна обґрунтувати як можливу неточність роботи тензометричного датчика під час випробування моделі фундаменту розмірами 290 мм × 290 мм. При кроці паль 7d при збільшенні осідання також зменшується реакція плити ростверку з 9 кН при осіданні $S = 2$ мм до 7,8 кН при осіданні 3 мм. Як було вище зазначено, при збільшенні довжини паль більша частка навантаження сприймається палями.

При довжині паль 300 мм, згідно графіку на рис. 2.23, при збільшенні осідання реакція ростверку зростає. При кроці паль 3d показник частки несучої здатності менший, оскільки площа плити ростверку в такому випадку найменша. Із збільшенням осової відстані між палями до 5d і 7d реакція плити ростверку вища ніж при кроці 3d.

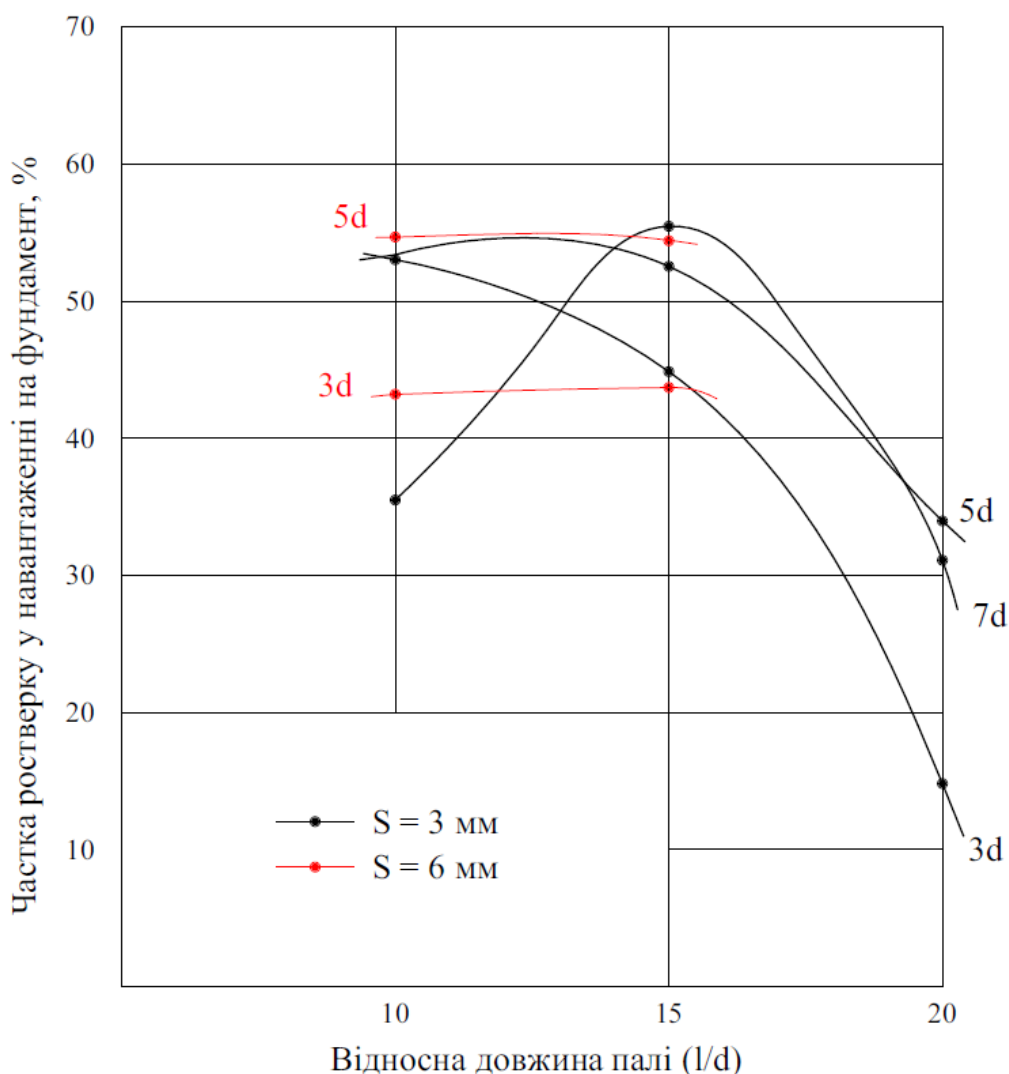


Рис. 2.22 – Графік залежності частки ростверку від відносної довжини паль при осіданні 3 мм, 6 мм та осовій відстані між палями 3d, 5d і 7d

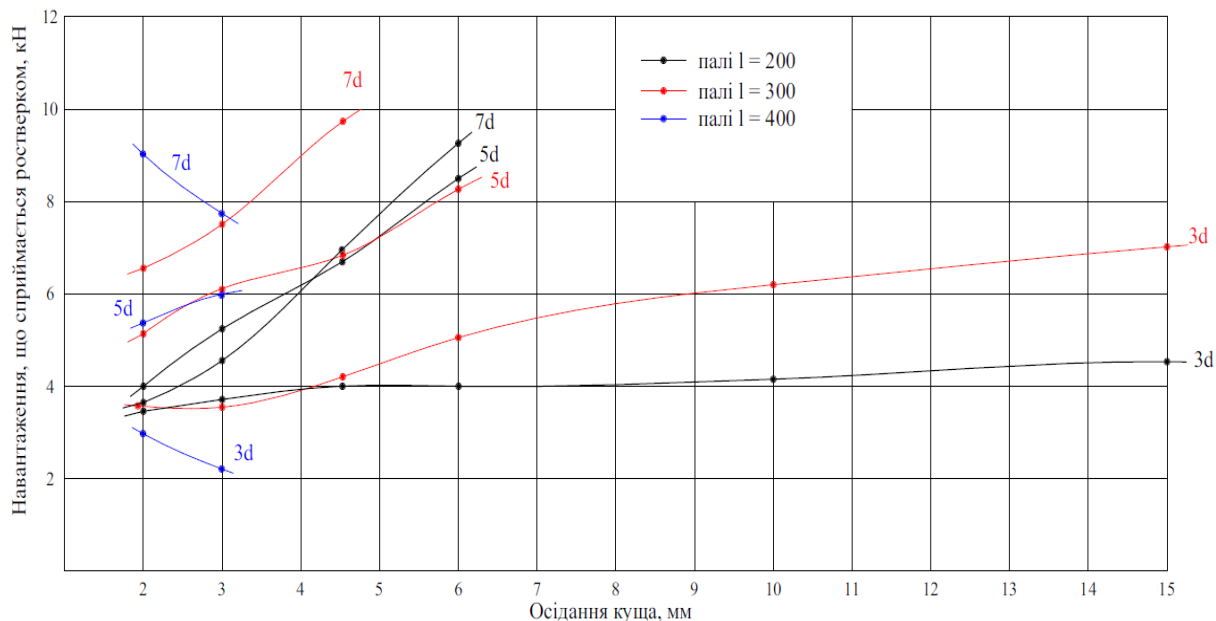


Рис. 2.23 – Графік залежності навантаження, що сприймається ростверком, від осідання при довжинах палей 200 мм, 300 мм, 400 мм та при кроці палей 3d, 5d, 7d

Аналогічна ситуація і з палями найменшої довжини (200 мм) – із збільшенням кроку палей частка навантаження, яка сприймається плитою ростверку збільшується. Із графіку на рис. 2.23 видно, що найбільш оптимальною довжиною палей є використання палей з приведеною довжиною $(l/d) = 15$.

На рис. 2.24 наведено графік залежності частки навантаження плити ростверку від осідання. Згідно з даним рисунком максимальна частка ростверку складає 65% від загального навантаження на модель пального фундаменту при використанні палей довжиною 300 мм і при осьовій відстані між палями 7d. При такому кроці палей площа плити ростверку максимальна. Мінімальна частка навантаження, яка сприймається плитою ростверку, становить 15% від загального навантаження на модель пального фундаменту при використанні палей довжиною 400 мм та при кроці палей 3d.

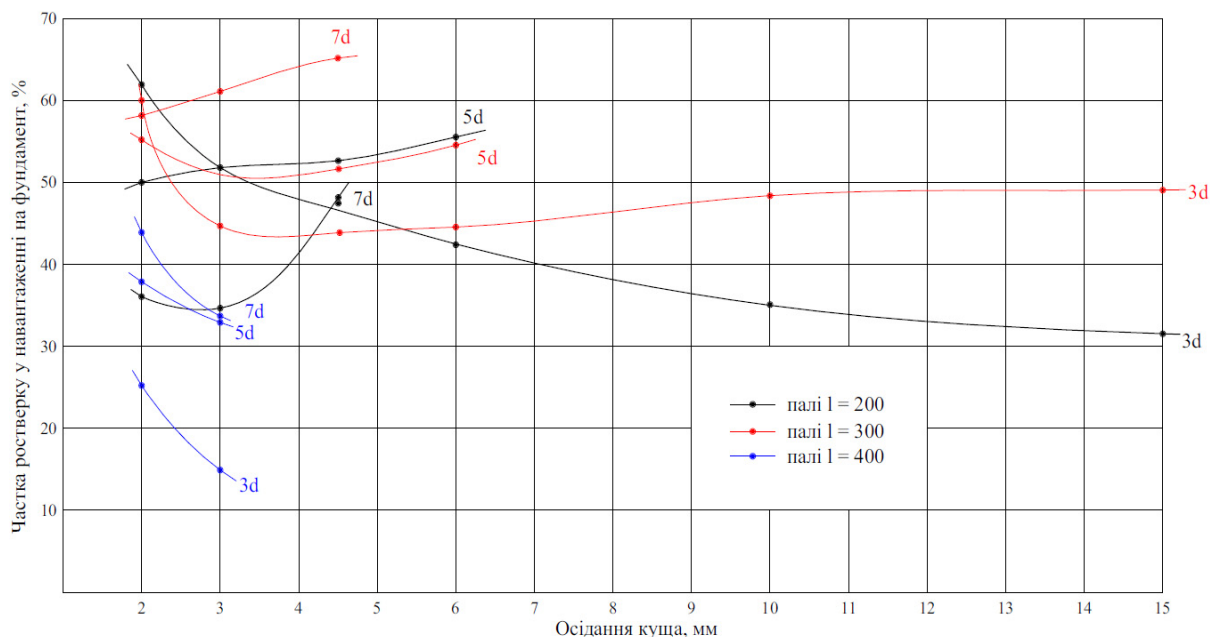


Рис. 2.24 – Графік залежності частки навантаження плити ростверку у навантаженні на фундамент від осідання при довжинах паль 200 мм, 300 мм, 400 мм та при кроці паль 3d, 5d, 7d

В таблицях 2.4 – 2.6 наведене порівняння навантаження, яке сприймає палевий фундамент з плитою ростверку 290×290 мм (крок паль 5d), з сумою навантажень, які сприймають одиночні палі та ростверк як плита без паль при різних значеннях осідання. При цьому навантаження, яке сприймає плита ростверку без паль, приймалось при відповідній величині осідання палевого фундаменту (S), а несуча здатність одиночних паль визначалась при величині осідання палі при випробуваннях, що відповідає $0,2 \cdot S$.

Як бачимо з таблиці 2.4, при незначних деформаціях (на перших етапах завантаження) несуча здатність коротких паль реалізується не повністю, а довгі палі сприймають більше навантаження, ніж випробовані як одиночні. Для коротких паль неповну реалізацію несучої здатності можна пояснити негативним впливом переміщення ґрунту під подошвою ростверку. На ростверк у всіх випадках припадає більше навантаження, ніж на плиту без паль, що пояснюється ущільненням ґрунту в міжпальовому просторі під час забивання паль.

Таблиця 2.4 – Порівняння роботи стовпчастого пальового фундаменту з плитою ростверку 290×290 мм (крок паль 5d) з роботою його окремих елементів при осіданні куща $s = 3,0$ мм

Довжина паль, мм	При роботі у складі фундаменту				При роботі кожного з елементів як окремого			
	Осереднене навантаження на палю фундаменту, кН	Сума зусиль в палях куща, кН	Навантаження, що сприймається ростверком, кН	Навантаження на куц, кН	Несуча здатність одиночної палі, кН	Сума зусиль в палях, кН	Навантаження, що сприймається плитою ростверку без паль, кН	Навантаження на куц, як сума окремих елементів кН
200	0,51	4,63	5,37	10,0	0,46	4,14	4,5	8,64
300	0,59	5,32	6,17	11,5	0,49	4,41	4,5	8,91
400	1,30	11,8	6,20	18,0	0,52	4,68	4,5	9,18

Таблиця 2.5 – Порівняння роботи стовпчастого пальового фундаменту з плитою ростверку 290×290 мм (крок паль 5d) з роботою його окремих елементів при осіданні куща $s = 4,5$ мм

Довжина паль, мм	При роботі у складі фундаменту				При роботі кожного з елементів як окремого			
	Осереднене навантаження на палю фундаменту, кН	Сума зусиль в палях куща, кН	Навантаження, що сприймається ростверком, кН	Навантаження на куц, кН	Несуча здатність одиночної палі, кН	Сума зусиль в палях, кН	Навантаження, що сприймається плитою ростверку без паль, кН	Навантаження на куц, як сума окремих елементів кН
200	0,67	6,07	6,93	13,0	0,52	4,68	5,5	10,18
300	0,75	6,74	7,25	14,0	0,53	4,77	5,5	10,27

При подальшому завантаженні сума зусиль в палях куща перевищує суму несучих здатностей одиночних паль. Зусилля, що сприймається ростверком, також зростає. Отже в цілому як палі, так і ростверк працюють в групі краще, ніж як окремі елементи.

Таблиця 2.6 – Порівняння роботи стовпчастого пальового фундаменту з плитою ростверку 290×290 мм (крок паль 5d) з роботою його окремих елементів при осіданні куща $s = 6,0$ мм

Довжина паль, мм	При роботі у складі фундаменту				При роботі кожного з елементів як окремого			
	Осереднене навантаження на палю фундаменту, кН	Сума зусиль в палях куща, кН	Навантаження, що сприймається ростверком, кН	Навантаження на куцц, кН	Несуча здатність одиночної палі, кН	Сума зусиль в палях, кН	Навантаження, що сприймається плитою ростверку без паль, кН	Навантаження на куцц, як сума окремих елементів кН
200	0,73	6,60	8,40	15,0	0,55	4,95	6,5	11,45
300	0,75	6,75	8,25	15,0	0,59	5,31	6,5	11,81

Метою моделювання є також дослідження реалізації роботи паль у складі стовпчастого пальового фундаменту. Проаналізуємо різні аспекти цього процесу.

Розподіл навантаження між палями фундаментів.

Аналіз розподілу навантажень між палями в групі показав, що на цей розподіл чинять вплив такі фактори:

- етап завантаження;
- жорсткість ростверку.

На рис. 2.25 – 2.27 наведена залежність зусиль у палях кущів з жорстким ростверком від його осідання (у процесі збільшення навантаження на куцц).

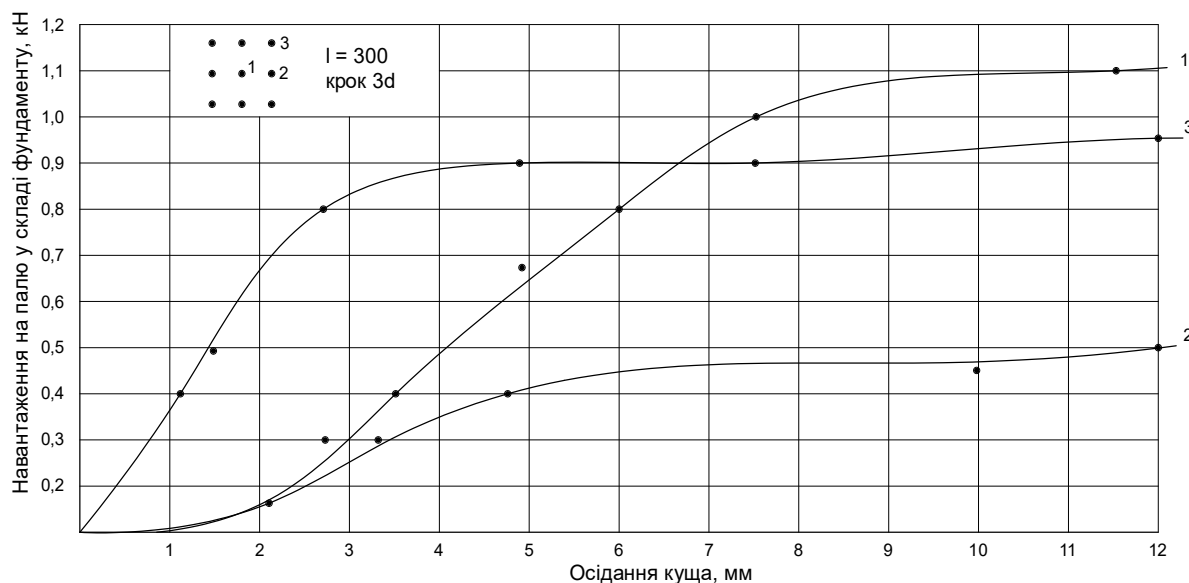


Рис. 2.25 – Розподіл зусиль між палями фундаменту при довжині паль 300 мм та кроці $3d$

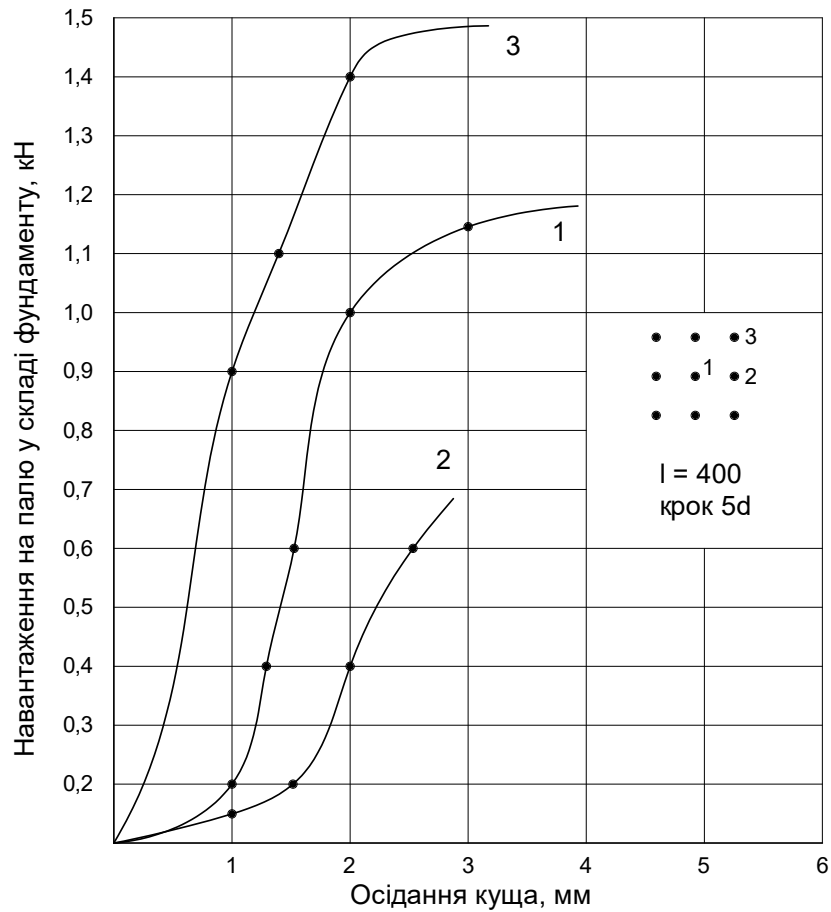


Рис. 2.26 – Розподіл зусиль між палями фундаменту при довжині палей 400 мм та кроці 5d

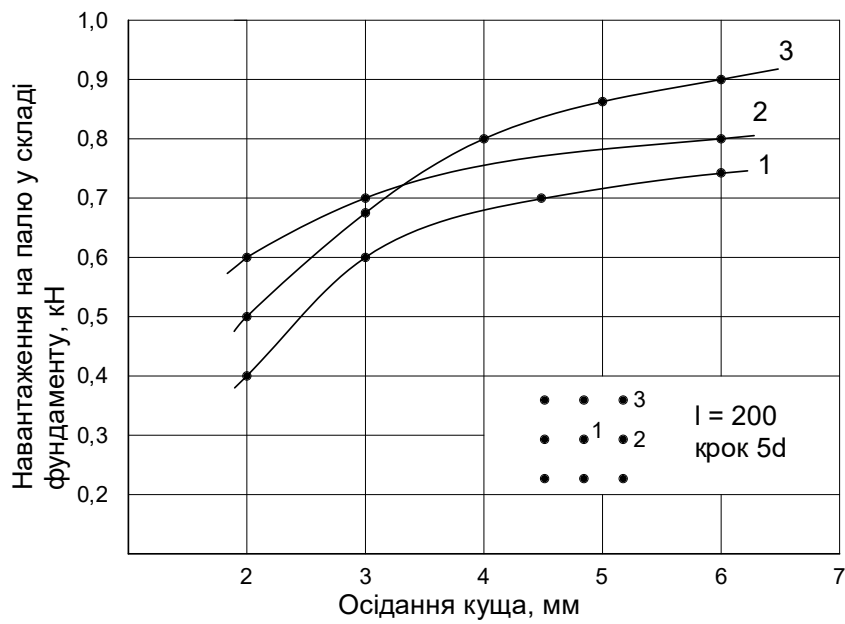


Рис. 2.27 – Розподіл зусиль між палями фундаменту при довжині палей 200 мм та кроці 5d

На початкових етапах завантаження при жорстких ростверках найбільше зусилля сприймають кутові палі (рис. 2.25 – 2.27), найменше – центральні, при подальшому збільшенні навантаження і наближенні його до граничного значення (рис. 2.25) виникає перерозподіл зусиль з кутових і крайніх паль до центральної внаслідок вичерпання несучої здатності кутових паль.

Для ростверку розмірами 410×410 мм (крок паль 7d), який є відносно гнучким (відношення виліту уступу плитної частини до його висоти 3:1) навантаження між палями групи спочатку розподіляється рівномірно, а по мірі зростання навантаження найбільше зусилля бере на себе центральна паля (рис. 2.28).

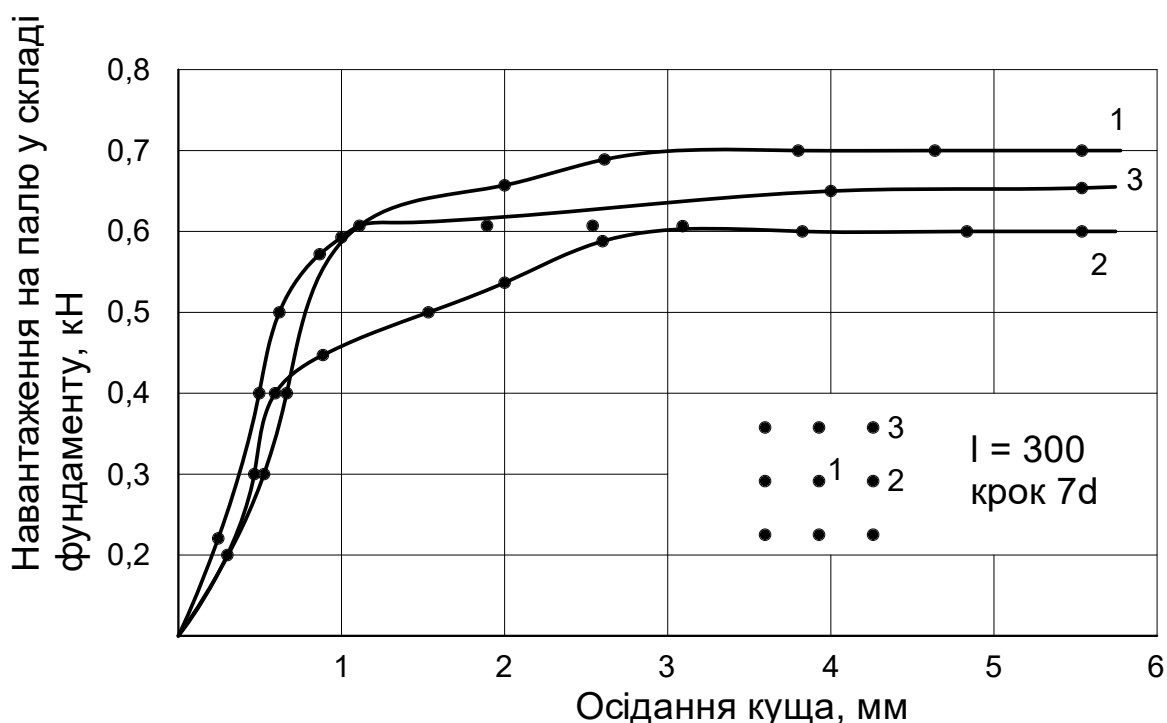


Рис. 2.28 – Розподіл зусиль між палями фундаменту при довжині паль 300 мм та кроці 7d

Реалізація несучої здатності паль у складі стовпчастого пального фундаменту у порівнянні з несучою здатністю одиночної палі.

З таблиць 2.4 – 2.6 видно, що при незначних навантаженнях і відносно коротких палях їх несуча здатність реалізується не повністю, але по мірі збільшення навантаження і відповідно осідань куща палі все більше включаються у роботу. На рис. 2.29, 2.30 показаний процес включення паль у роботу при різних геометричних параметрах фундаментів.

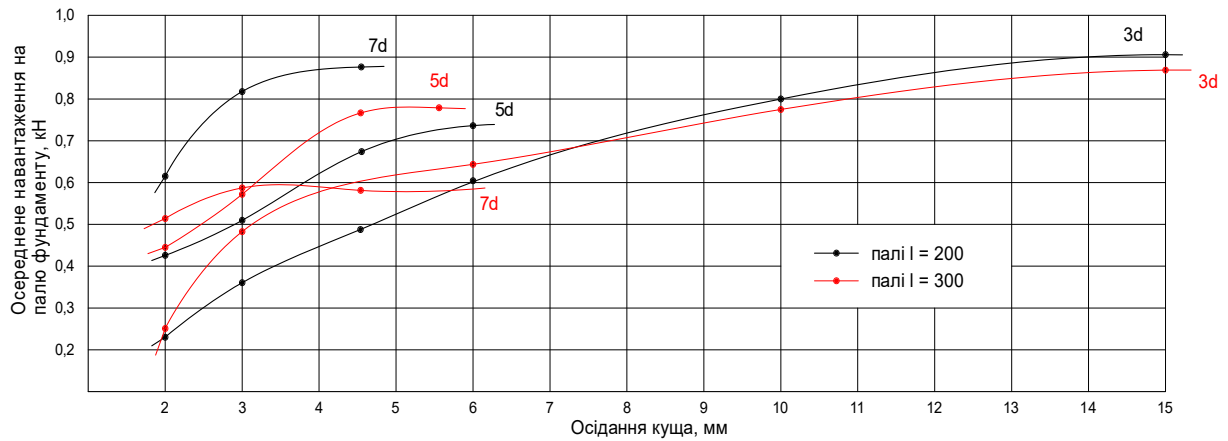


Рис. 2.29 – Включення палей довжиною 200 та 300 мм у роботу при різному кроці в ростверку

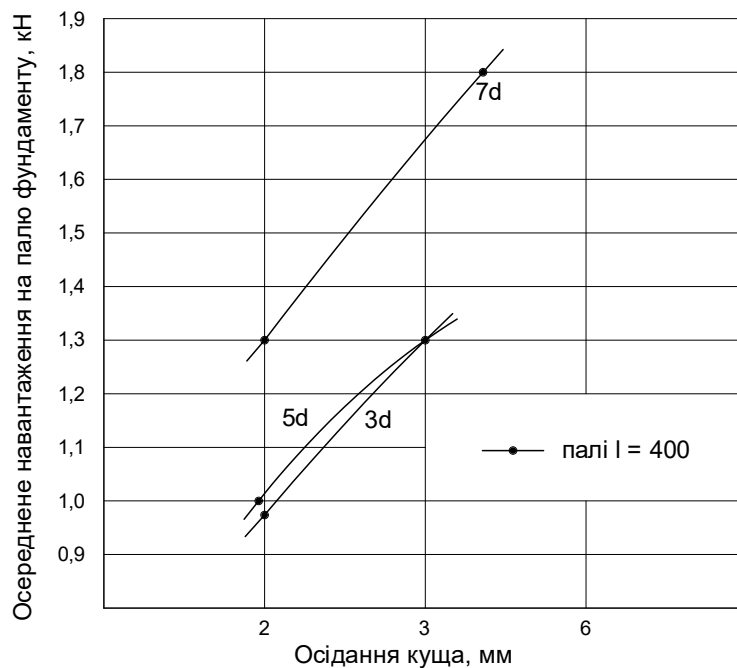


Рис. 2.30 – Включення палей довжиною 400 мм у роботу при різному кроці в ростверку

З рисунків видно, що при коротких палях спочатку зусилля в палях збільшуються інтенсивно, а потім цей процес уповільнюється. Подальше зростання навантаження на куц здійснюється за рахунок роботи ростверку та ущільненого ґрунту під фундаментом. При довжині палей 200 та 300 мм їх розміри сумірні з розмірами ростверків в плані, а такі палеві фундаменти краще розглядати як єдиний ґрунто-пальовий масив.

Для довгих палей (рис. 2.30) характерне інтенсивне втягування палей у роботу, частка ростверку при цьому зменшується.

На рис. 2.31 наведена залежність осередненого навантаження на палю у складі фундаменту від довжини і кроку паль, а на рис. 2.32 залежність ступеню реалізації несучої здатності палі у складі фундаменту у порівнянні з навантаженням, яке сприймає одиночна паля.

На рис. 2.33 наведена залежність тиску під подошвою ростверку у складі стовпчастого пальового фундаменту від довжини і кроку паль.

З рисунків видно, що реалізація несучої здатності паль у складі фундаменту підвищується із збільшенням кроку паль. З рисунків також видно, що при більшій довжині несуча здатність паль реалізується менше.

Тиск під подошвою ростверку із збільшенням кроку паль зменшується, але він перевищує тиск, який сприймає плита ростверку як фундамент мілкого закладання, тобто ростверк також реалізує себе краще у складі пальового фундаменту.

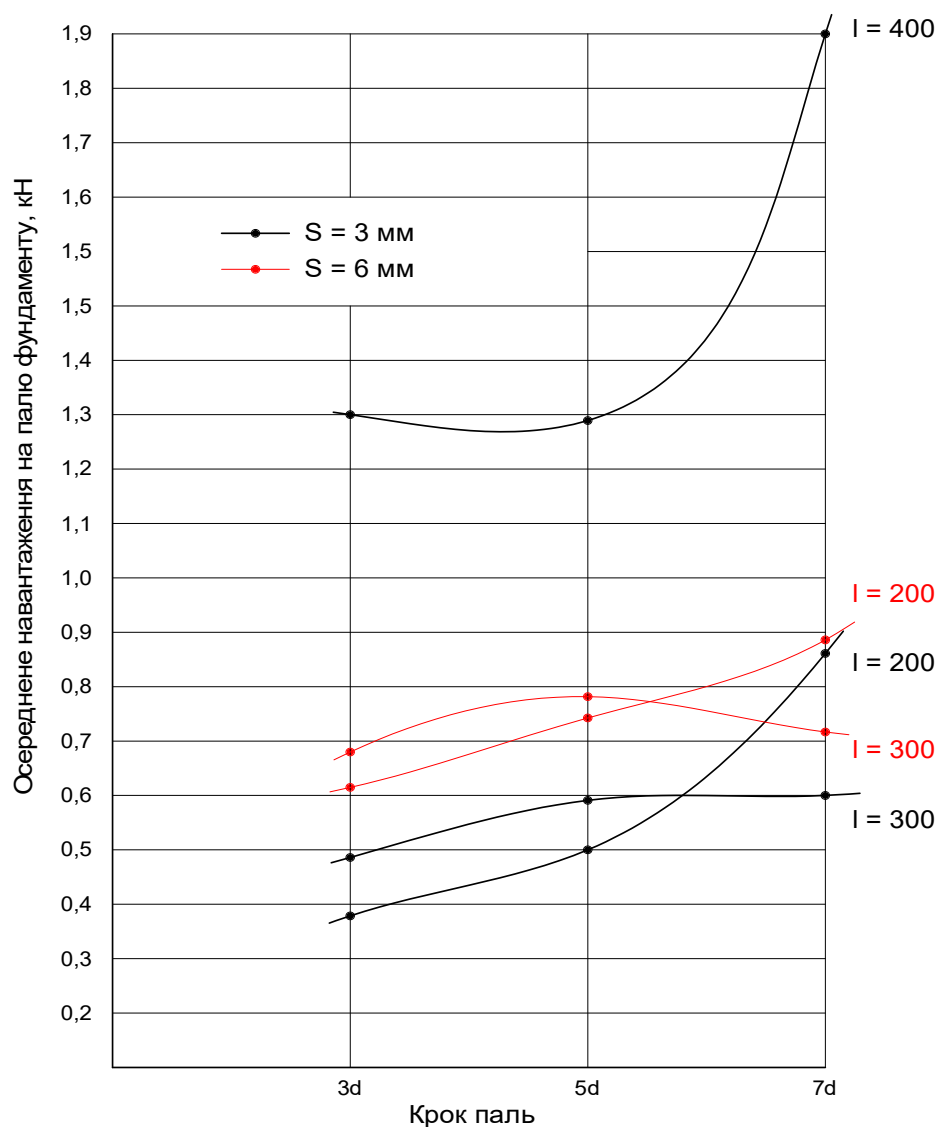


Рис. 2.31 – Залежність осередненого навантаження на палю у складі фундаменту від довжини і кроку паль

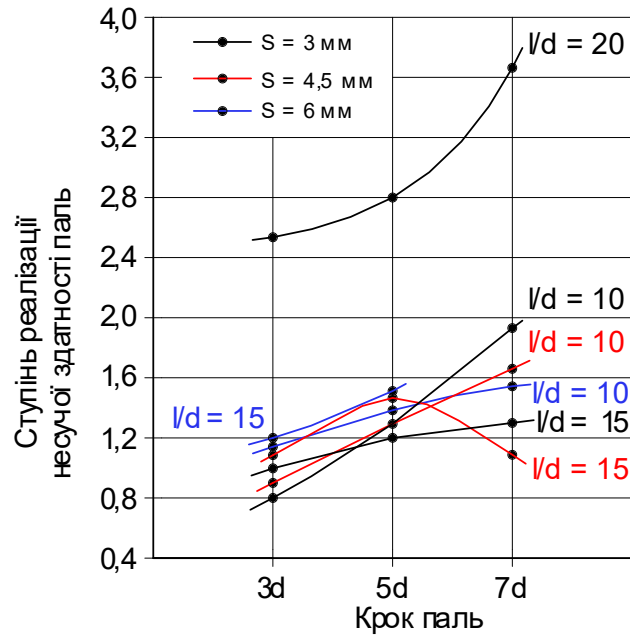


Рис. 2.32 – Залежність ступеню реалізації несучої здатності палі у складі фундаменту у порівнянні з навантаженням, яке сприймає одиночна паля

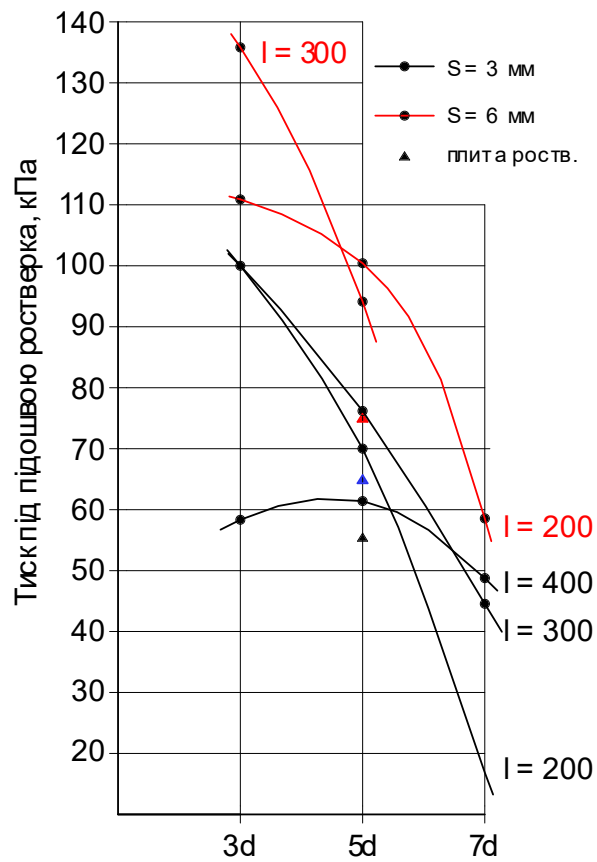


Рис. 2.33 – Залежність тиску під подошвою ростверку у складі стовпчастого пального фундаменту від довжини і кроку палі

Висновки за підрозділом 2.1

1. Несуча здатність стовпчастого пальового фундаменту з низьким ростверком перевищує суму несучих здатностей одночних паль.

2. Вертикальне навантаження на стовпчастий паловий фундамент сприймається не тільки паловим кущем, а і плитою ростверку, хоча у норми [24] закладена методика розрахунку палових фундаментів, при якій навантаження сприймається виключно палями.

3. Частка навантаження, яка сприймається плитою ростверку, сягає до 50% від загального навантаження на паловий фундамент.

4. Частка навантаження, яке сприймає ростверк, залежить від довжини палі і осьової відстані між палями.

5. Із збільшенням відносної довжини палі (l/d) частка ростверку зменшується, оскільки палі великої довжини сприймають більше навантаження за рахунок великої площі бокової поверхні.

6. Із збільшенням осьової відстані між палями частка ростверку збільшується, оскільки площа плити ростверку також збільшується.

7. Із збільшенням осідання фундаменту, частка плити ростверку у навантаженні на паловий фундамент збільшується.

8. Робота палі в групі з низьким ростверком суттєво відрізняється від роботи одиночної палі. По мірі зростання навантаження осереднене навантаження на палю у складі фундаменту зростає і для палових фундаментів у піщаних ґрунтах перевищує несучу здатність одиночної палі.

9. Перерозподіл навантаження між палями фундаменту залежить від етапу навантаження і жорсткості ростверку. На початкових етапах завантаження при жорстких ростверках найбільше зусилля сприймають кутові палі, найменше – центральні, при подальшому збільшенні навантаження і наближенні його до граничного значення виникає перерозподіл зусиль з кутових і крайніх палей до центральної внаслідок вичерпання несучої здатності кутових палей. Для гнучких ростверків навантаження між палями групи спочатку розподіляється рівномірно, а по мірі зростання навантаження найбільше зусилля бере на себе центральна палля.

10. Ступінь реалізації несучої здатності палі у складі палового фундаменту залежить від відносної довжини і кроку палі. Реалізація несучої здатності палі у складі фундаменту підвищується із збільшенням кроку палі. При більшій довжині несуча здатність палі реалізується менше.

11. Тиск під подошвою ростверку із збільшенням кроку палі зменшується, але він перевищує тиск, який сприймає плита ростверку як фундамент мілкового закладання, тобто ростверк також реалізує себе краще у складі палового фундаменту.

12. При відносній довжині палі (l/d) менше 15 їх розміри сумірні з розмірами ростверків в плані і такі палові фундаменти краще розглядати як єдиний ґрунто-паловий масив.

2.2 Фізичне моделювання роботи пальових кущів з коротких та довгих паль

Використання ресурсів несучої здатності паль є одним із передових способів досягнення економії при влаштуванні пальових фундаментів. Попередні дослідження показали, що при роботі куща з короткими палями група працює як суцільний ґрунто-пальовий масив. При підтвердженні цієї гіпотези можна було б зменшувати кількість паль в межах габаритів ростверку без суттєвої втрати несучої здатності куща.

Для того щоб побачити якісну картину сумісної роботи забивних паль і ростверку в складі нового пальового фундаменту було проведено фізичне маломасштабне моделювання в лабораторних умовах.

2.2.1 Планування фізичного моделювання роботи пальових кущів з коротких та довгих паль

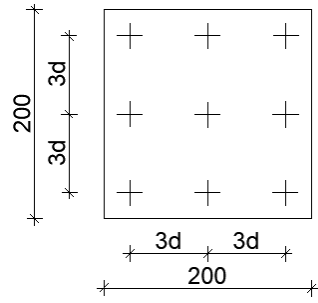
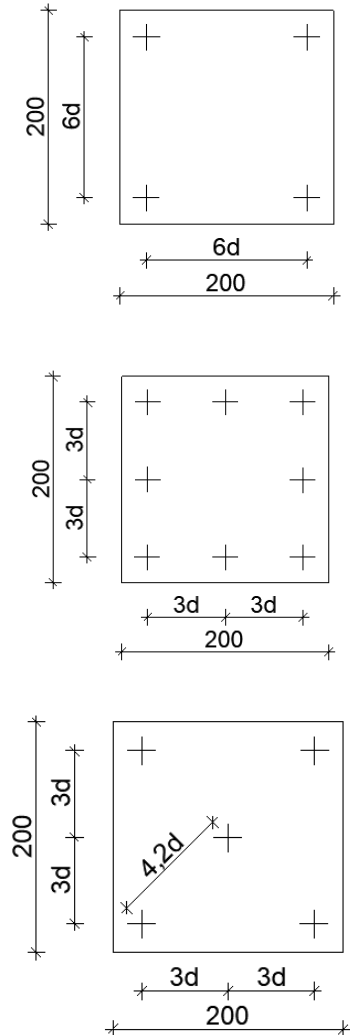
Для моделювання натурних коротких і довгих паль довжиною 3 м та 6 м, поперечним перерізом 300×300 мм, виготовлено дерев'яні моделі довжиною 200 мм і 400 мм з поперечним перерізом 20×20 мм (масштаб моделювання 1:15). Товщина моделі плити ростверку прийнята 50 мм, розміри в плані 200×200 мм (рис. 2.34).



Рис. 2.34 – Модель ростверку 200×200 мм

Для аналізу відмінностей поведінки пальового фундаменту виконувались три групи дослідів (табл. 2.7). Перша група дослідів з найбільшою можливою кількістю паль (типове рішення) та друга група зі зменшеною кількістю паль в межах однакового зовнішнього контуру, які проводяться двічі при довжині паль у ростверку 200 мм та 400 мм, а також третя група дослідів для плити ростверку без паль з різною глибиною закладання. У другій групі дослідів варіювались три схеми розміщення паль у ростверку. В таблиці 2.7 наведено програму модельних випробувань. Варіант розміщення плити ростверку без паль на глибині 200 мм моделював умовний фундамент мілкового закладання для пальового фундаменту з довжиною паль 200 мм.

Таблиця 2.7 – Програма фізичного моделювання для порівняння роботи коротких та довгих паль

Група дослідів	Довжина та поперечний розмір паль	Крок і кількість паль
1	$L = 0,2 \text{ м}, d = 0,02 \text{ м}$	
2	$L = 0,4 \text{ м}, d = 0,02 \text{ м}$	
3	Плита ростверку без паль з розмірами у плані 200×200 мм, висотою 50 мм, глибина закладання 0 та 200 мм	-

При проведенні досліджень передбачалось визначення зусиль у палях куща за допомогою тензOMETричних датчиків, закріплених на наголовниках паль, виконаних з відрізків квадратної труби (рис. 2.2). Для визначення зусилля в кожній палі пальового фундаменту був застосований прилад ИДЦ-1 (вимірювач деформацій числовий).

Палі в ґрунтову основу вдавлювались за допомогою важільної системи (рис. 2.35).



Рис. 2.35 – Вдавлювання паль за допомогою важільної системи

На вдавнені палі у ростверк ставились наголовники із тензOMETричними датчиками, які фіксувались металевою пластиною. Розміщення наголовників у різних варіантах показано на рис. 2.36.

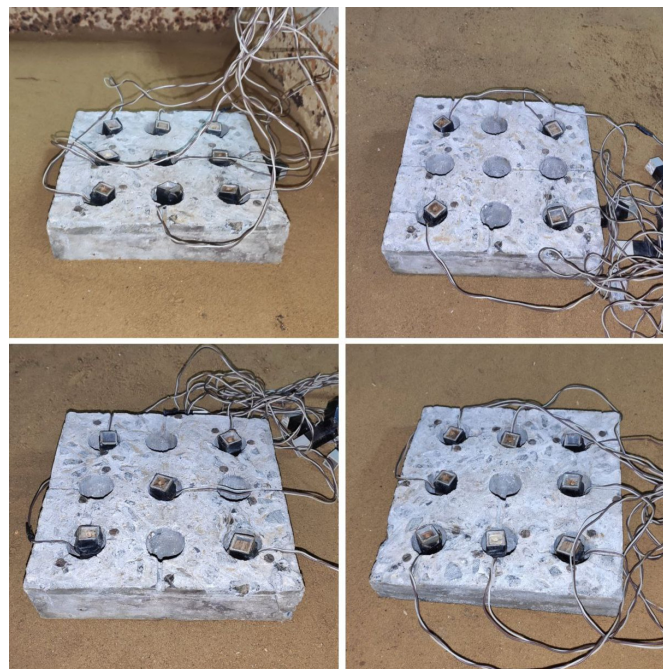


Рис. 2.36 – Розміщення тензOMETричних датчиків у ростверку

На ростверк навантаження передавалось за допомогою домкрату, а для виміру зусилля використовувався динамометр. Навантаження, на яке розрахований домкрат і динамометр становить до 5 т.

Для виміру осідання пальового фундаменту використовувались два прогиноміри, встановлені на незалежній упорній системі, по праву і ліву сторони основної упорної системи. Система в зборі наведена на рис. 2.37.



Рис. 2.37 – Модель пальового фундаменту перед випробуванням

Проведене також випробування одиночних паль довжиною 200 мм та 400 мм та плити ростверку без паль на поверхні ґрунтового масиву (рис. 2.38) і у варіанті умовного фундаменту, коли плита ростверку мала глибину закладання на рівні ниніх кінців паль.



Рис. 2.38 – Модель випробування плити ростверку

Навантаження одиночних паль здійснювалось за допомогою спеціального важеля, що шарнірно кріпиться до стінки лотка. Фотофіксація випробування одиночної палі зображена на рис. 2.39.



Рис. 2.39 – Випробування одиночної палі в лотку

2.2.2 Результати фізичного моделювання роботи пальових кущів з коротких та довгих паль

В результаті проведення експерименту за розробленою програмою дослідження були одержані графіки залежності осідання – навантаження куща в цілому та графіки залежності суми зусиль в палях від його осідання. Також були одержані графіки осідання – навантаження за результатами випробування одиночних паль різної довжини, графік осідання – навантаження при випробуванні плити ростверку розміром 200×200 мм як штампа без паль та графік осідання – навантаження при випробуванні плити ростверку у варіанті умовного фундаменту.

На рис. 2.40, 2.41 наведені графіки осідання – навантаження для кушів з короткими (200 мм) та довгими (400 мм) пальями. На графіку рис. 2.40 наведена також така залежність для фундаменту мілкового закладання глибиною 200 мм, що моделює умовний фундамент мілкового закладання.

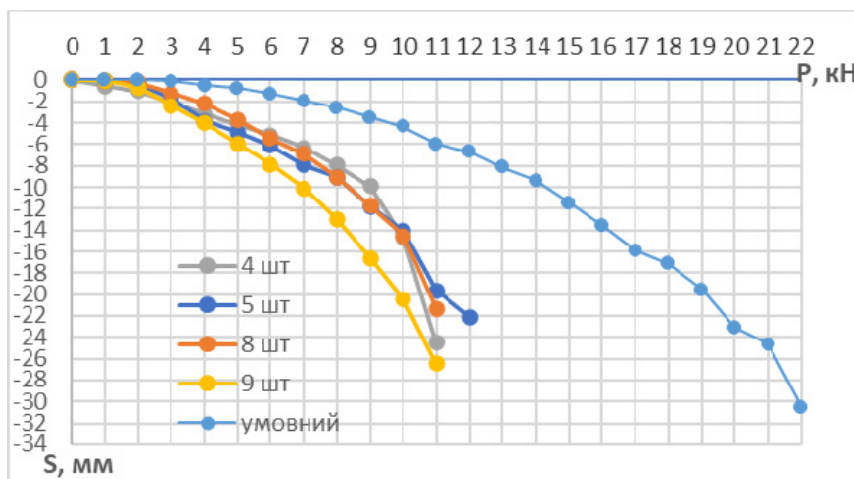


Рис. 2.40 – Графіки залежності навантаження – осідання для куща паль довжиною 200 мм

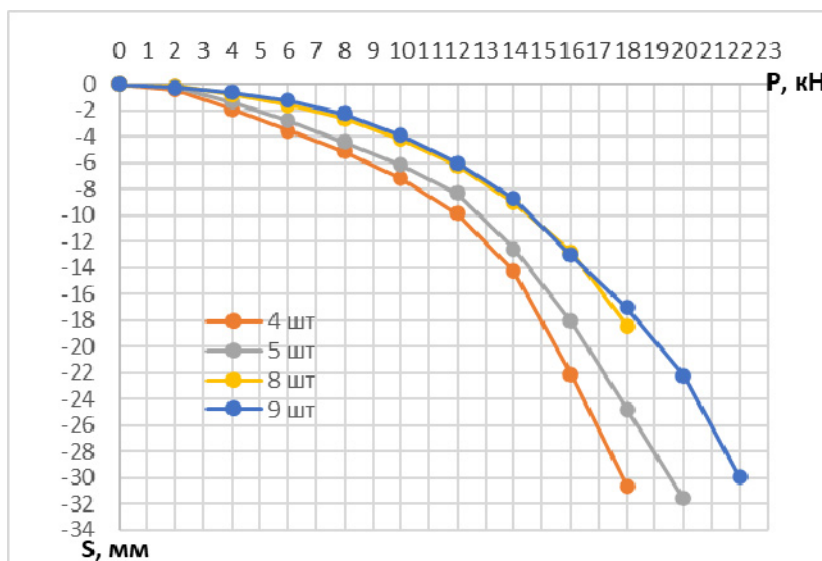


Рис. 2.41 – Графіки залежності навантаження – осідання для куща паль довжиною 400 мм

Бачимо, що зменшення кількості паль в межах єдиного зовнішнього контуру призводить до несуттєвого зменшення несучої здатності куща. Для паль довжиною 200 мм (співвідношення довжини до поперечного перерізу 10) зменшення несучої здатності не спостерігається (спостерігається навіть збільшення), а для паль довжиною 400 мм (співвідношення довжини до поперечного перерізу 20) зменшення несучої здатності при осіданні 10 мм сягає від 0 до 40% для різної кількості паль.

Отже, при відносній довжині паль (l/d) 15 і менше можна зменшувати кількість паль при сталих габаритах ростверку без втрати несучої здатності.

Порівняння пального фундаменту з умовним фундаментом мілкого закладання показало, що така заміна не дає адекватних результатів ні за деформаціями, ні за несучою здатністю.

На рис. 2.42 наведені такі графіки для одиночних паль, на рис. 2.43 – для плити ростверку розмірами 200×200 мм як штампу без паль.

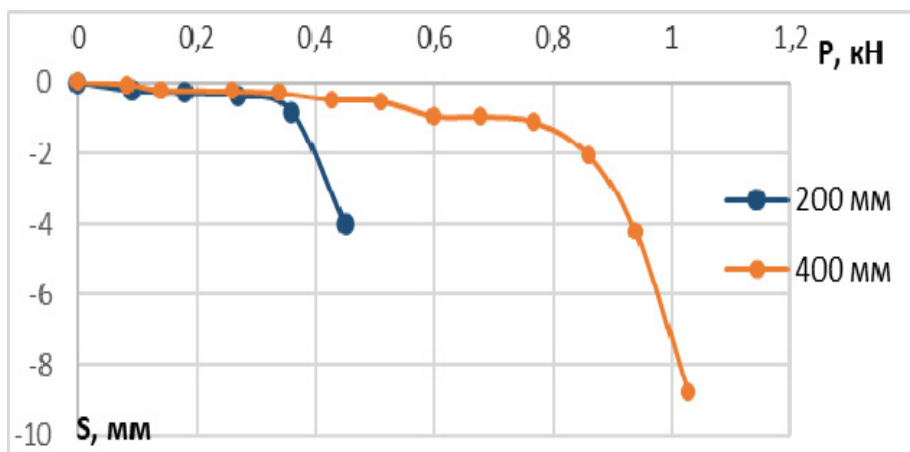


Рис. 2.42 – Графіки залежності навантаження – осідання для паль довжиною 200 мм та 400 мм

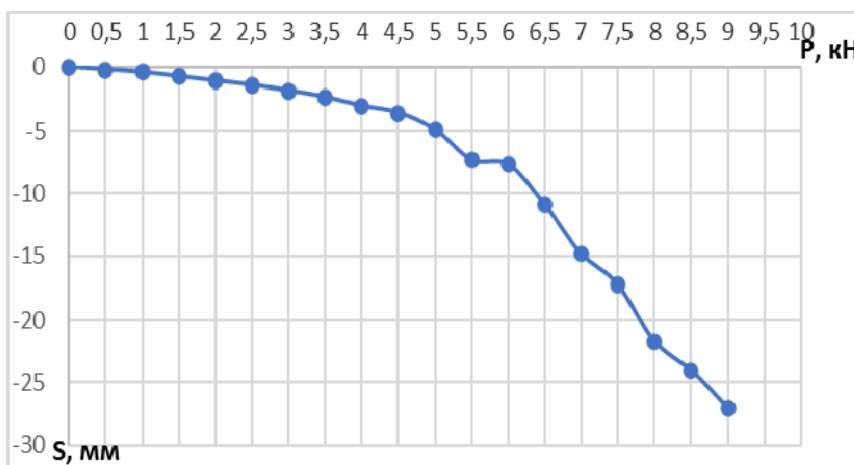


Рис. 2.43 – Графік залежності навантаження – осідання для плити ростверку розмірами 200×200 мм як штампу без паль

Частка навантаження, яке сприймають палі куща, визначалась як сума зусиль в палях, замірених тензометричними датчиками, частка навантаження, яку сприймає ростверк, визначалась як різниця між навантаженням, переданим на куш, та сумою зусиль в палях.

В таблиці 2.8 наведені результати випробувань при осіданні пального фундаменту $s = 10,0$ мм.

Таблиця 2.8 – Порівняння роботи пальового фундаменту з плитою ростверку 200×200 мм з роботою його окремих елементів при осіданні куща $s = 10,0$ мм

Довжина палів, мм	Кількість палів в кущі, шт	При роботі у складі фундаменту					При роботі кожного з елементів як окремого			
		Осереднене навантаження на палю фундаменту, кН	Сума зусиль в палях куща, кН	Навантаження, що сприймається ростверком, кН	Навантаження на кущ, кН	Частка ростверку, %	Несуча здатність одиночної палі, кН	Сума зусиль в одиночних палях, кН	Навантаження, що сприймається плитою ростверку без палів, кН	Навантаження на кущ, як сума окремих елементів кН
200	4	0,5	1,95	7,07	9,02	78	0,4	1,6	6,36	8,0
	5	0,51	2,55	5,8	8,35	70		2,0		8,36
	8	0,51	4,07	4,28	8,35	51		3,2		9,56
	9	0,3	2,58	4,37	6,95	63		3,6		10
400	4	1,15	4,58	7,42	12,0	62	0,86	3,44	6,36	9,8
	5	1,5	7,48	5,42	12,9	42		4,3		10,66
	8	1,21	9,66	4,84	14,5	33		6,88		13,24
	9	1,14	10,24	4,26	14,5	29		7,74		14,1

В таблиці 2.8 проаналізована можлива несуча здатність куща за двома теоретичними гіпотезами: як сума несучих здатностей одиночних палів без урахування плити ростверку (гіпотеза норм [12]) та як сума несучих здатностей одиночних палів та несучої здатності плити ростверку як фундаменту мілкового закладання без палів.

Бачимо, що обидві ці гіпотези не працюють. Неврахування роботи ростверку у складі фундаменту дає занижені значення навантажень на кущ, а врахування роботи ростверку без коригування на перерозподіл зусиль між елементами куща при кучному розміщенні палів призводить до завищення несучої здатності куща.

Таким чином, при оцінці несучої здатності куща через несучі здатності його окремих елементів потрібно виходити із ступеня реалізації цих несучих здатностей у складі куща.

На рис. 2.44 та 2.45 наведений характер зміни навантажень, що сприймають палі і ростверк у складі куща при зміні кількості палів.

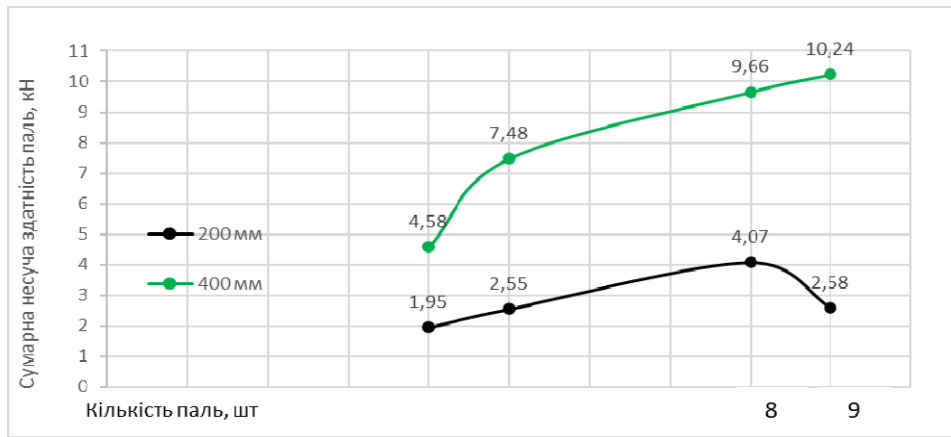


Рис. 2.44 – Графік залежності суми зусиль у палях у складі фундаменту від кількості і довжини паль

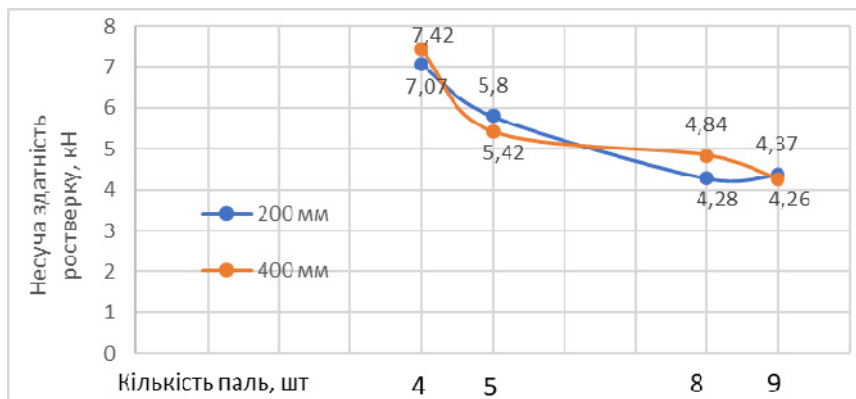


Рис. 2.45 – Графік залежності навантаження, що сприймає ростверк, від кількості та довжини паль

Бачимо, що сума зусиль у палях у складі групи зростає при збільшенні кількості паль, але не пропорційно збільшенню кількості, а навантаження, що сприймає ростверк, зменшується.

Для кількісної оцінки характеру перерозподілу зусиль між елементами пального фундаменту при обробці результатів досліджень аналізувались такі параметри:

- частка ростверку у навантаженні на паливий фундамент;
- ступінь реалізації несучої здатності паль при роботі у групі;
- ступінь реалізації тиску під ростверком.

Ступінь реалізації несучої здатності паль визначався як відношення осередненого зусилля, що сприймає паля у групі, до несучої здатності одиночної палі. Ступінь реалізації тиску під ростверком – як відношення частки навантаження, яку сприймає ростверк у складі фундаменту, до навантаження, яке сприймає плита ростверку, працюючи без паль.

У таблиці 2.9 та на рис. 2.46 – 2.48 наведені результати обробки параметрів фізичного експерименту.

Таблиця 2.9 – Ступінь реалізації несучої здатності паль та тиску під ростверком пального фундаменту у піщаному ґрунті

Довжина паль, мм	Кількість паль в куці, шт.	Ступінь реалізації несучої здатності палі	Ступінь реалізації ростверку
200	4	1,22	1,11
	5	1,28	0,91
	8	1,27	0,67
	9	0,72	0,7
400	4	1,33	1,17
	5	1,74	0,85
	8	1,4	0,76
	9	1,32	0,67

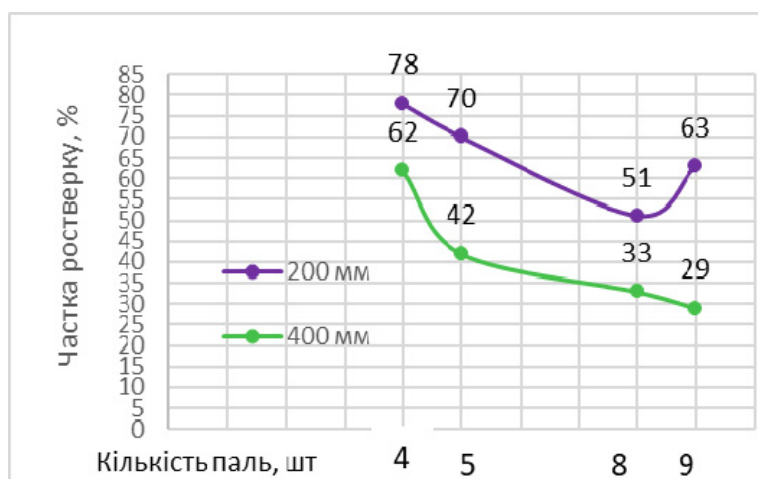


Рис. 2.46 – Графік залежності частки ростверку у навантаженні на паливий фундамент від довжини та кількості паль

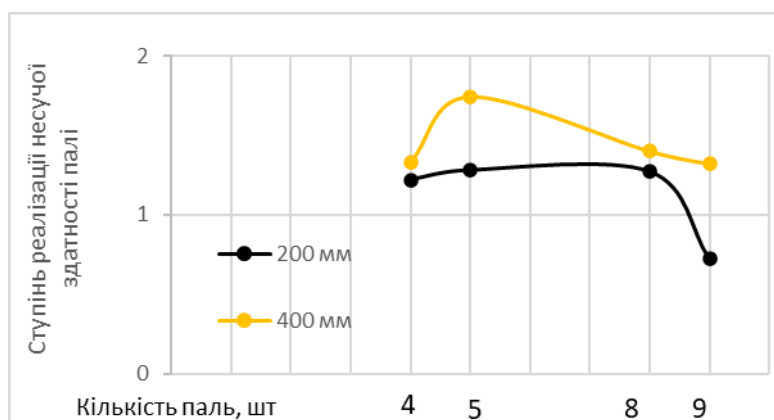


Рис. 2.47 – Залежність ступеню реалізації несучої здатності палі у складі фундаменту від кількості і довжини паль

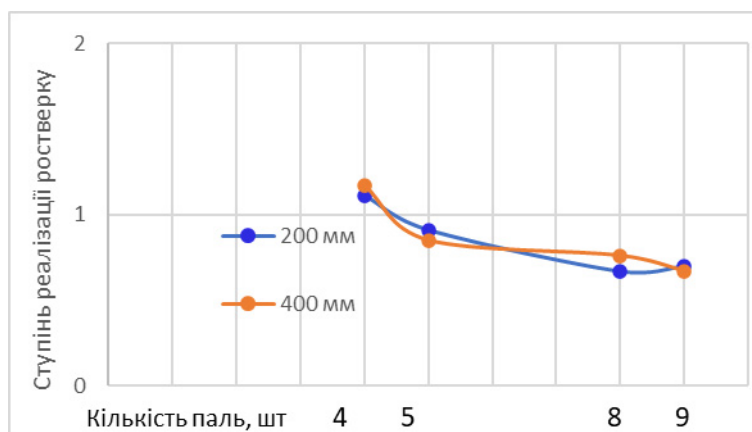


Рис. 2.48 – Графік залежності ступеня реалізації ростверку від довжини та кількості паль

Бачимо, що ступінь реалізації несучої здатності паль складає не менше 1,2 (виключенням є палі довжиною 200 мм при кількості 9 штук у кущі), а реалізація несучої здатності ростверка змінюється від 1,1 при малій кількості паль до 0,7 при найбільшій кількості паль незалежно від їх довжини.

Оскільки обидва варіанти довжини паль, що були прийняті в експериментах, можна відносити до категорії коротких (співвідношення довжини до поперечного перерізу 10 та 20), то можна зробити висновок, що при використанні коротких паль реалізація їх несучої здатності в групі перевищує одиницю (тобто вони працюють краще у кущі, ніж як одиночні), а потенційна можливість ростверку сприймати навантаження не використовується в повній мірі, але збільшується при зменшенні кількості паль.

Висновки за підрозділом 2.2

1. Зменшення кількості паль в межах єдиного зовнішнього контуру призводить до несуттєвого зменшення несучої здатності куща. Для паль довжиною 200 мм (співвідношення довжини до поперечного перерізу 10) зменшення несучої здатності не спостерігається (спостерігається навіть збільшення), а для паль довжиною 400 мм (співвідношення довжини до поперечного перерізу 20) зменшення несучої здатності при осіданні 10 мм сягає від 0 до 40% для різної кількості паль.

Отже, при відносній довжині паль (l/d) 15 і менше можна зменшувати кількість паль при сталих габаритах ростверку без втрати несучої здатності.

2. Неврахування роботи ростверку у складі фундаменту дає занижені значення навантажень на кущ, а врахування роботи ростверку без коригування на перерозподіл зусиль між елементами куща при кучному розміщенні паль призводить до завищення несучої здатності куща.

Таким чином, при оцінці несучої здатності куща через несучі здатності його окремих елементів потрібно виходити із ступеня реалізації цих несучих здатностей у складі куща.

3. Заміна пального фундаменту на умовний фундамент мілкового закладання не дає адекватних результатів ні за деформаціями, ні за несучою здатністю.

4. При використанні коротких палей потенційна можливість ростверку сприймати навантаження не використовується в повній мірі, але збільшується при зменшенні кількості палей в межах сталого розміру ростверка.

5. У випадку застосування коротких палей можна з метою економії матеріалів зменшити кількість палей в групі при збереженні розмірів ростверку з незначною втратою несучої здатності.

3 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НДС СИСТЕМ «РОСТВЕРК – ПАЛІ – ОСНОВА»

У розділі 2 наведені результати фізичного моделювання на маломасштабних моделях сумісної роботи елементів стовпчастих палевих фундаментів. Ці дослідження дозволили виконати якісну оцінку впливу геометричних та конструктивних параметрів на роботу пального фундаменту при сталих ґрунтових умовах.

У розділі 3 шляхом чисельного моделювання виконаний комплексний аналіз НДС системи «ростверк – палі – основа» з врахуванням не тільки впливу геометричних та конструктивних параметрів, але і фізико-механічних характеристик ґрунтів основи та способу улаштування палей (з вийманням чи без виймання ґрунту).

3.1 Обґрунтування вибору моделей систем «ростверк – палі – основа»

Не дивлячись на широке застосування палевих фундаментів і велику кількість досліджень, недостатньо вивченими є ряд факторів, що впливають на несучу здатність і осідання при їх роботі в різних ґрунтових умовах. Широке застосування в останні роки отримали чисельні методи для моделювання та розрахунку.

Для математичного моделювання роботи пального фундаменту обрано програмний продукт Plaxis 3D, який базується на використанні чисельного методу скінчених елементів.

Право на користування ліцензійним програмним продуктом Plaxis 3D Foundation було надано спільним українсько-французьким підприємством «Основа-Солсиф» в рамках договору про творчу співдружність № 60/2 від 30.05.2011.

Розрахунковий комплекс Plaxis являє собою цільовий пакет геотехнічних програм для скінчено-елементного аналізу напруженого стану системи

«будівля-основа» в плоскій і просторовій постановці. Всі моделі матеріалів, що використовуються, базуються на залежності між швидкістю зміни ефективних деформацій і швидкістю проходження деформацій. Така залежність може бути представлена в наступному вигляді [25]:

$$\sigma = M \cdot \varepsilon, \quad (3.1)$$

де M – матриця жорсткості матеріалу.

У рівнянні (3.1) тензори швидкостей зміни напружень і деформацій представлені у векторному вигляді і включають шість декартових складових (для просторової задачі):

$$\sigma = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}); \quad \varepsilon = (\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}); \quad (3.2)$$

При проведенні розрахунку малі деформації визначаються на основі часткових похідних компонент переміщення переміщень u_x і u_y за наступними формулами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}; \\ \varepsilon_{zz} = 0 \text{ (при плоскій деформації);} \\ \varepsilon_{zz} = \frac{1}{r} u_x \text{ (при осьовій симетрії, де } r \text{ – радіус).} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

При розробці визначених моделей матеріалів застосовуються головні напруження, а не декартові компоненти напружень. У випадку плоскої чи вісесиметричної деформації головні напруження розраховуються на основі декартових напружень за формулами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) - \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \sigma_{xy}^2}; \\ \sigma_2 = \sigma_{zz}; \\ \sigma_3 = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) + \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \sigma_{xy}^2}. \end{array} \right. \quad (3.4)$$

В Plaxis головні напруження розміщуються в алгебраїчній послідовності $\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1$, тут σ_1 – найбільше стискаюче напруження.

Механічна поведінка ґрунтів в даному програмному комплексі може бути змодельована за допомогою використання різних моделей ґрунту: модель Кулона-Мора; модель ґрунту, що ущільнюється; модель повзучості слабкого ґрунту (реологічна модель). Для розрахунку прийнято модель ґрунтів Кулона-Мора.

Модель Кулона-Мора – пружнопластична модель, що містить 5 основних параметрів: E і ν – параметри пружності ґрунту; c і φ – параметри міцності ґрунту; ψ – кут дилатансії. Модель Кулона-Мора являє собою апроксимацію першого порядку поведінки ґрунту або скельної породи. Для кожного шару ґрунту розраховується постійна середня жорсткість. При постійній жорсткості розрахунки виконуються доволі швидко, даючи перше уявлення про напруження і деформації в межах вибраної ґрунтової основи.

При розрахунках з використанням моделі Кулона-Мора (як і для решти моделей), що реалізована в Plaxis, генеруються початкові горизонтальні напруження в ґрунті. Пластичність в даній моделі пов'язана з виникненням незворотних деформацій. Функція текучості задається у вигляді напружень і деформацій, а також може бути представлена як поверхня в просторі головних напружень. Модель Кулона-Мора має фіксовану поверхню текучості, тобто таку поверхню, яка повністю визначається параметрами моделі і на якій не відображається пластичне деформування. При напружених станах, що представлені точками в межах поверхні текучості, поведінка ґрунту є пружною, а всі деформації зворотніми.

Основний принцип пружнопластичності полягає в тому, що деформації і їх швидкості поділяються на пружні та пластичні складові.

Для оцінки коректності отриманих результатів за допомогою програми Plaxis 3D було виконано моделювання:

- роботи одиночних паль: буронабивна, буроін'єкційна (статичні випробування проведені лабораторіями ДП НДІБК) та забивна (статичне випробування проведено НДЛ ЕфБК ВНТУ за участю автора монографії);
- штампового випробування;
- пального фундаменту з десяти паль.

1. Буронабивна паля $d = 350$ мм, $l = 10$ м (буд. майданчик – вул. Чернівецька, м. Бобровиця).

Схему розміщення палі № 1 в ґрунті та її розрахункову модель наведено на рис. 3.1.

Ґрунти будівельного майданчику (фізико-механічні характеристики визначені за даними інженерно-геологічних вишукувань):

- 1 – Насипний шар (1,3 м) $\gamma = 14,6$ кН/м³;
- 2 – Супісок твердий (4 м), $\gamma = 16,4$ кН/м³; $c_{II} = 22$ кПа, $\varphi_{II} = 25^\circ$, $E = 3,9$ МПа;
- 3а – Суглинок тугопластичний (2,9 м), $\gamma = 18,8$ кН/м³; $c_{II} = 21$ кПа, $\varphi_{II} = 17^\circ$, $E = 4,7$ МПа;
- 4 – Пісок пилюватий (0,4 м), $\gamma = 17,8$ кН/м³; $c_{II} = 4$ кПа, $\varphi_{II} = 29^\circ$, $E = 17$ МПа;
- 6 – Супісок пластичний (3,8 м), $\gamma = 20,6$ кН/м³; $c_{II} = 15$ кПа, $\varphi_{II} = 26^\circ$, $E = 25$ МПа;
- 7 – Супісок пластичний (4,7 м), $\gamma = 19,8$ кН/м³; $c_{II} = 11$ кПа, $\varphi_{II} = 18^\circ$, $E = 8,2$ МПа.

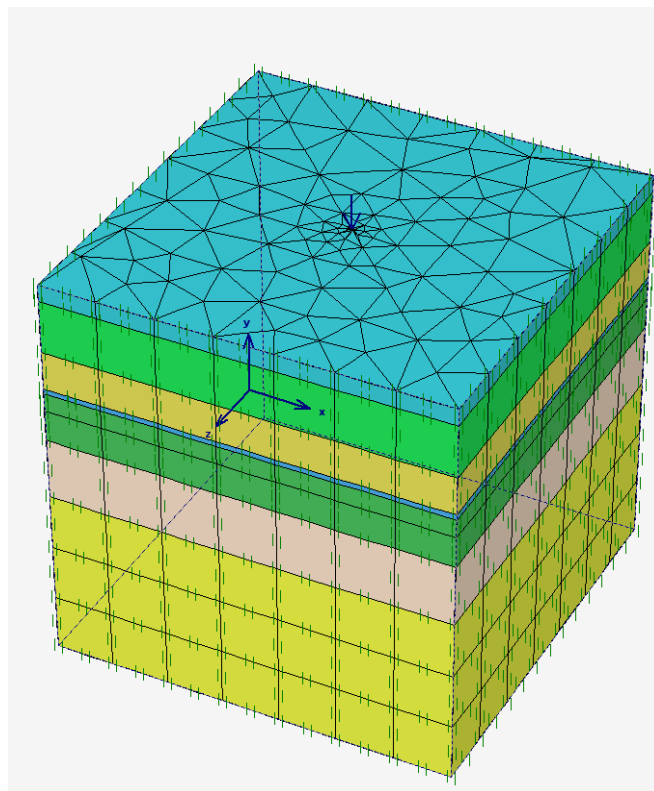
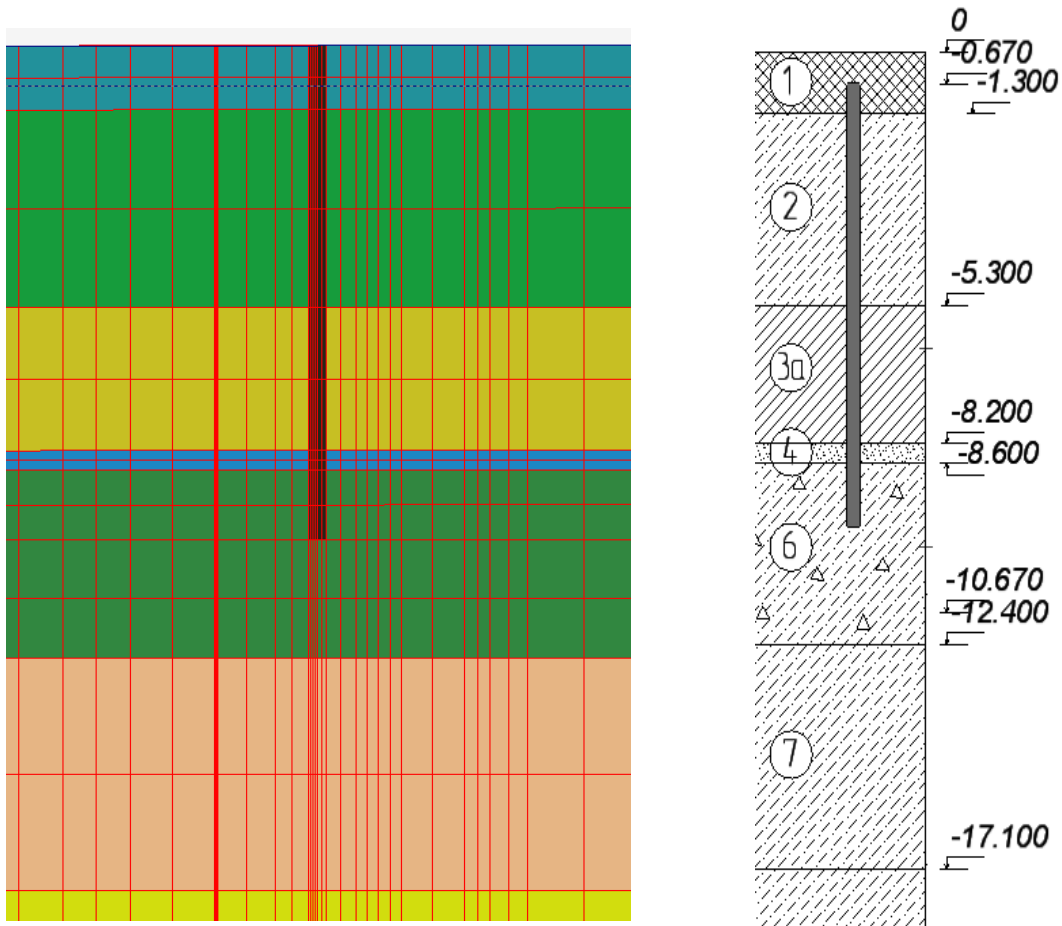


Рис. 3.1 – Схема розміщення в ґрунті та розрахункова модель палі № 1

В таблиці 3.1 наведені дані статичного випробування палі.

Таблиця 3.1 – Результати польових випробувань палі статичним навантаженням

№ Зав.	Ступінь зав. кН	Загальне зав. кН	Загальне переміщення, мм	Загальна тривалість, год : хв
0	0	0	0	0
1	100	100	0,195	2:05
2	100	200	1,145	4:40
3	100	300	4,665	8:15
4	100	400	12,565	13:20
5	100	500	28,600	18:55

На рис. 3.2 наведено графіки залежності осідання-навантаження для палі № 1. Теоретичний розрахунок осідання одиночної палі виконаний згідно чинних норм [12].

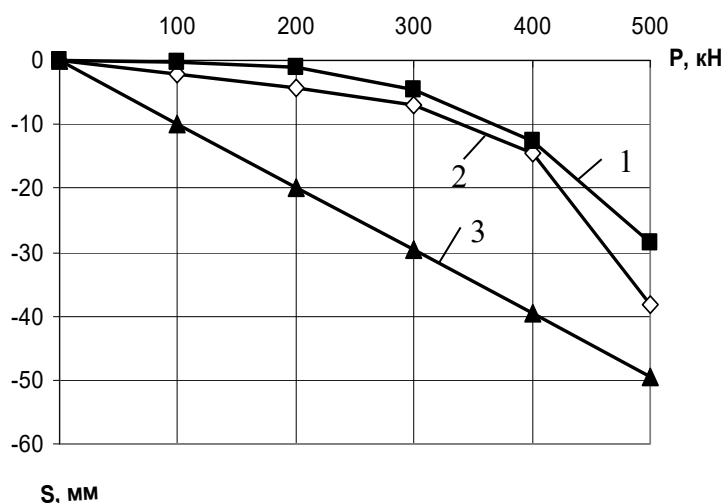


Рис. 3.2 – Графіки залежності осідання-навантаження для палі № 1:
1 – статичне випробування, 2 – моделювання в Plaxis,
3 – теоретичний розрахунок

2. Буроін'єкційна паля $d = 620$ мм, $l = 17$ м (буд. майданчик – вул. Трутенко, м. Київ). Геологічний розріз наведено на рис. 3.3.

Ґрунти будівельного майданчику (фізико-механічні характеристики визначені за даними інженерно-геологічних вишукувань):

1 – Насипний ґрунт (1,65 м) $\gamma = 16,0$ кН/м³;

- 2 – Супісок твердий (1,35 м), $\gamma = 18,4 \text{ кН/м}^3$; $c_{II} = 14 \text{ кПа}$, $\varphi_{II} = 25^\circ$, $E = 15 \text{ МПа}$;
- 4 – Пісок дрібний, середньої щільності (9,9 м), $\gamma = 17,2 \text{ кН/м}^3$; $c_{II} = 2 \text{ кПа}$, $\varphi_{II} = 31^\circ$, $E = 25 \text{ МПа}$;
- 5 – Глина бура тверда (6,7 м), $\gamma = 18,3 \text{ кН/м}^3$; $c_{II} = 32 \text{ кПа}$, $\varphi_{II} = 18^\circ$, $E = 20 \text{ МПа}$.
- 5а – Глина червоно-бура тверда (5,1 м), $\gamma = 19,0 \text{ кН/м}^3$; $c_{II} = 34 \text{ кПа}$, $\varphi_{II} = 17^\circ$, $E = 20 \text{ МПа}$.
- 7 – Супісок пластичний (5,2 м), $\gamma = 19,3 \text{ кН/м}^3$; $c_{II} = 16 \text{ кПа}$, $\varphi_{II} = 22^\circ$, $E = 15 \text{ МПа}$;
- 8 – Пісок дрібний, вологий (6,2 м), $\gamma = 18,5 \text{ кН/м}^3$; $c_{II} = 3 \text{ кПа}$, $\varphi_{II} = 32^\circ$, $E = 30 \text{ МПа}$;
- 9 – Пісок дрібний, насичений водою $\gamma = 20,1 \text{ кН/м}^3$; $c_{II} = 2 \text{ кПа}$, $\varphi_{II} = 30^\circ$, $E = 30 \text{ МПа}$.

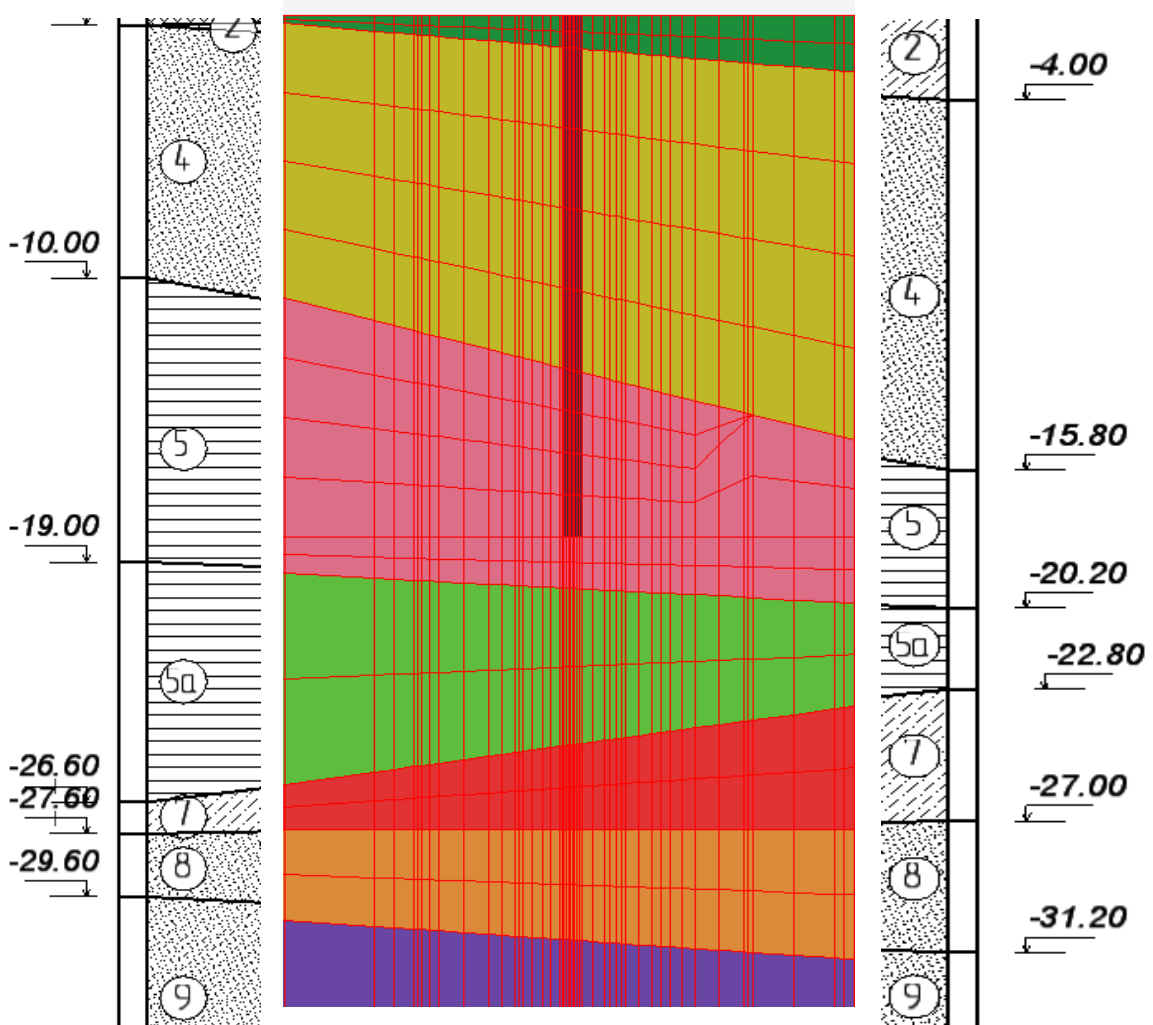


Рис. 3.3 – Схема розміщення в ґрунті палі № 2 (ИС-1) по вул. Трутенко, м. Київ

В таблиці 3.2 наведені дані статичного випробування палі № 2.

Таблиця 3.2 – Результати польових випробувань палі № ІС-1 статичним навантаженням

№ Завант.	Ступінь зав. кН	Загальне зав. кН	Загальне переміщення, мм	Загальна тривалість, год : хв
0	0	0	0	0
1	400	400	5,8	1:10
2	200	600	7,9	2:15
3	200	800	10,50	3:20
4	200	1000	13,35	4:25
5	200	1400	19,85	6:35
6	200	1600	23,6	7:40
7	200	1800	29,75	8:45
8	200	2000	34,1	9:50
9	100	2100	34,9	10:50

На рис. 3.4 наведена розрахункова модель палі.

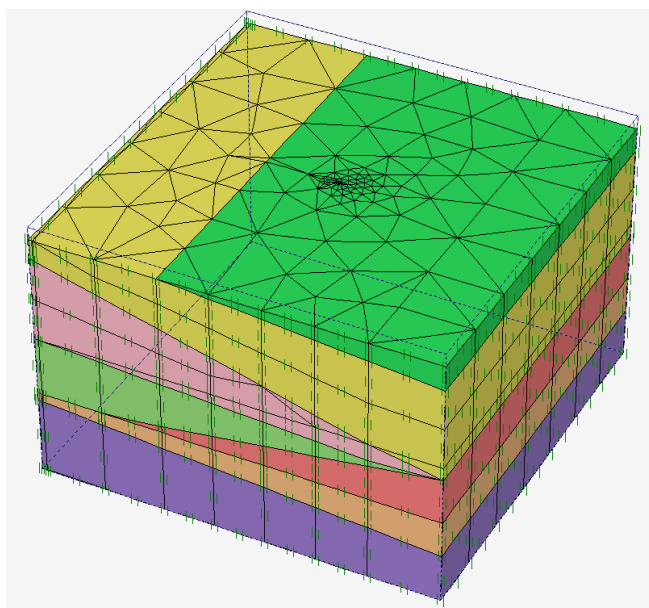


Рис. 3.4 – Розрахункова модель палі № 2 (ІС-1)
по вул. Трутенко, м. Київ

На рис. 3.5 наведено графіки залежності осідання-навантаження для палі № 2. Теоретичний розрахунок осідання поодинокі палі виконаний згідно чинних норм [24].

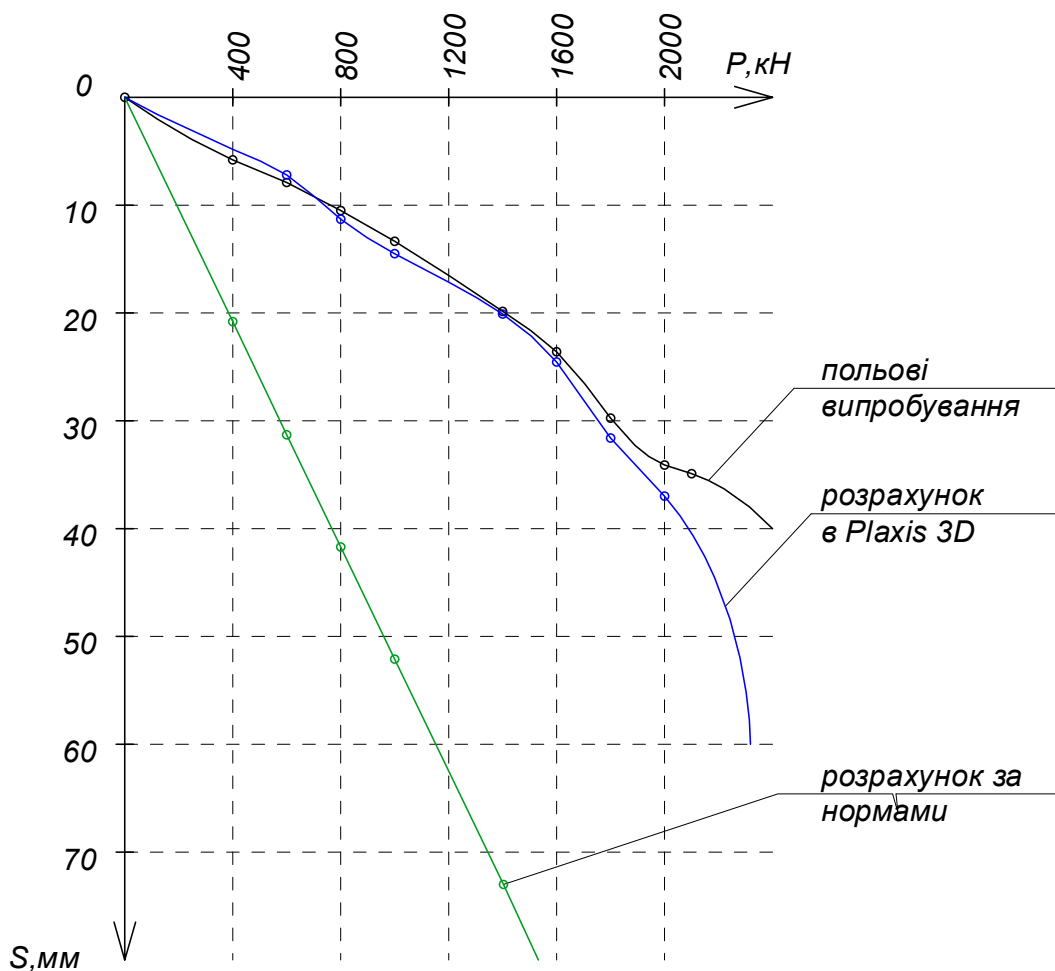


Рис. 3.5 – Графіки залежності осідання-навантаження для палі № 2:

3. Забивна палля $d = 273$ мм (трубобетонна), $l = 4$ м (буд. майданчик – вул. Ватутіна, 55а, м. Житомир). Геологічний розріз наведено на рис. 3.6.

Ґрунти будівельного майданчику (фізико-механічні характеристики визначені за даними інженерно-геологічних вишукувань):

- 1 – Рослинний шар (0,8 м) $\gamma = 20,3$ кН/м³; $c_{II} = 3,7$ кПа, $\varphi_{II} = 19^\circ$, $E = 27$ МПа;
- 2 – Лесоподібний суглинок м'якопластичний до текучого (1,4 м) $\gamma = 17,8$ кН/м³; $c_{II} = 15,7$ кПа, $\varphi_{II} = 16^\circ$, $E = 4$ МПа;
- 3 – Лесоподібний суглинок м'якопластичний до текучого (4,7 м) $\gamma = 19,8$ кН/м³; $c_{II} = 17,3$ кПа, $\varphi_{II} = 18^\circ$, $E = 8$ МПа;
- 4 – Суглинок запісочений, тугопластичний (0,7 м) $\gamma = 18,9$ кН/м³; $c_{II} = 20,9$ кПа, $\varphi_{II} = 24^\circ$, $E = 17$ МПа;
- 5 – Суглинок з дресвою до 15% напівтвердий (необмеж.) $\gamma = 17,9$ кН/м³; $c_{II} = 30$ кПа, $\varphi_{II} = 24^\circ$, $E = 27$ МПа.

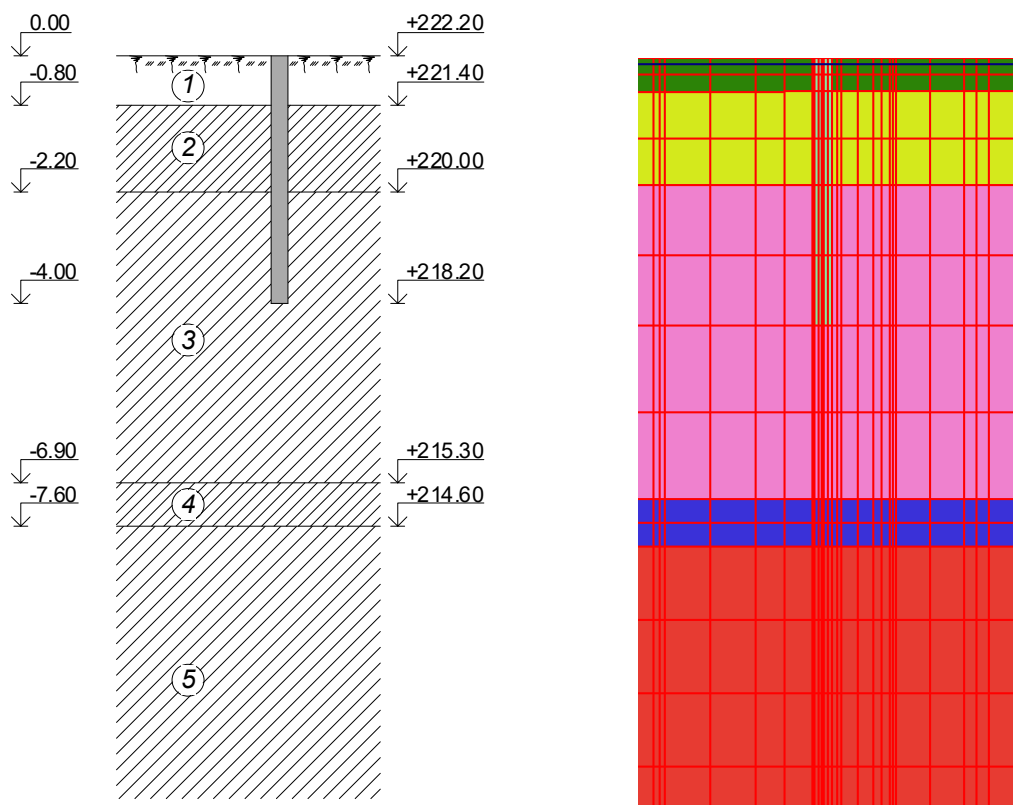


Рис. 3.6 – Схема розміщення в ґрунті та розрахункова модель палі № 3

В таблиці 3.3 наведені дані статичного випробування палі № 3.

Таблиця 3.3 – Результати польових випробувань палі № 3 статичним навантаженням

№ зав.	Ступінь завантаження, кг	Загальне завантаження, кг	Загальне переміщення, мм
0	0	0	0
1	1250	1250	-0.22
2	1250	2500	-0.395
3	1250	3750	-0.52
4	1250	5000	-0.98
5	1250	6250	-1.05
6	1250	7500	-1.695
7	1250	8750	-2.345
8	1250	10000	-3.035
9	1250	11250	-3.895
10	1250	12500	-7.275
11	1250	13750	-48.33

На рис. 3.7 наведено графіки залежності осідання-навантаження для палі № 3 за результатами статичного випробування та моделювання в Plaxis.

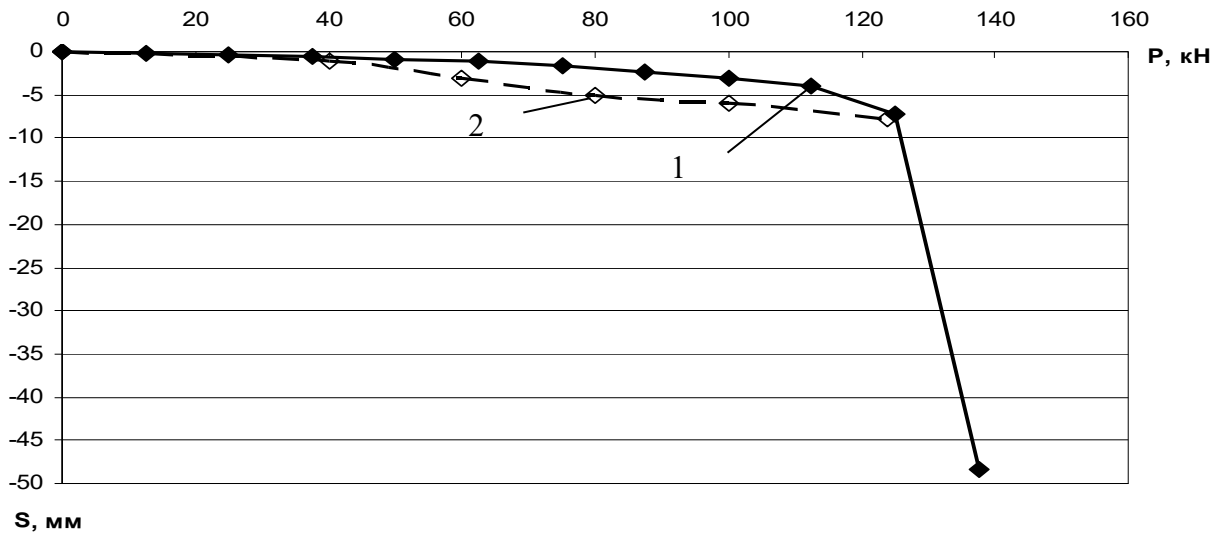


Рис. 3.7 – Графіки залежності осідання-навантаження для палі № 3:
1 – статичне випробування, 2 – моделювання в Plaxis

4. Пальовий фундамент (10 палі). Натурне випробування цього пальового фундаменту було виконане Баротоломеєм А. А.: палі призматичні забивні С6-30, ростверк розмірами в плані 1,5 × 4,2 м товщиною 0,5 м (рис. 3.8).

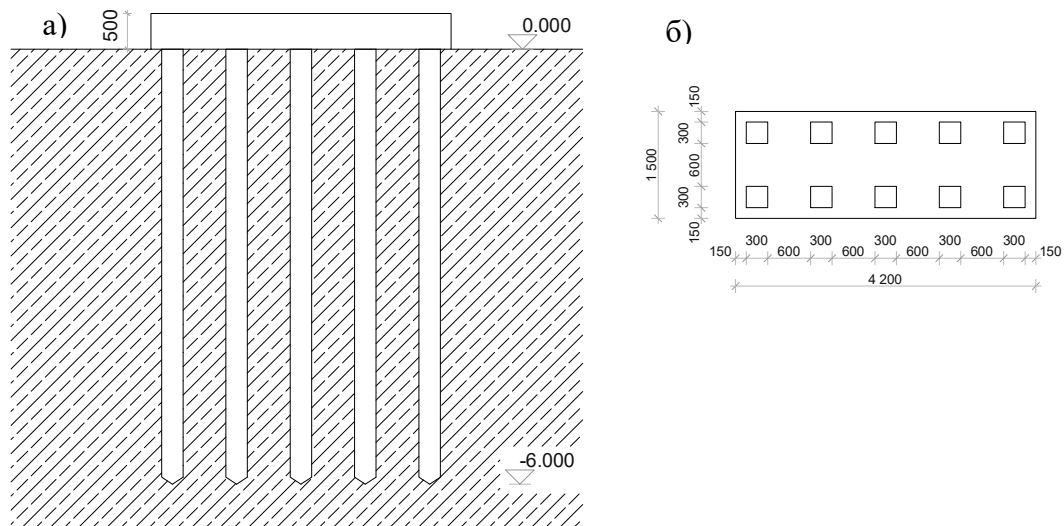


Рис. 3.8 – Схема розміщення палі в ґрунті (а) та в ростверку (б)

Ґрунтові умови представлені четвертинними суглинками і глинами потужністю 12 м, питома вага коливається в межах 18,2 – 19,8 кН/м³, природна вологість – 0,31 – 0,37, модуль деформації $E = 13$ МПа, $c_{II} = 5,3$ кПа, $\varphi_{II} = 20^\circ$.

В результаті розрахунку отримано залежність осідання – навантаження для даного фундаменту (рис. 3.9). На рис. 3.9 також показано залежність осідання – навантаження, що отримана при статичному випробуванні.

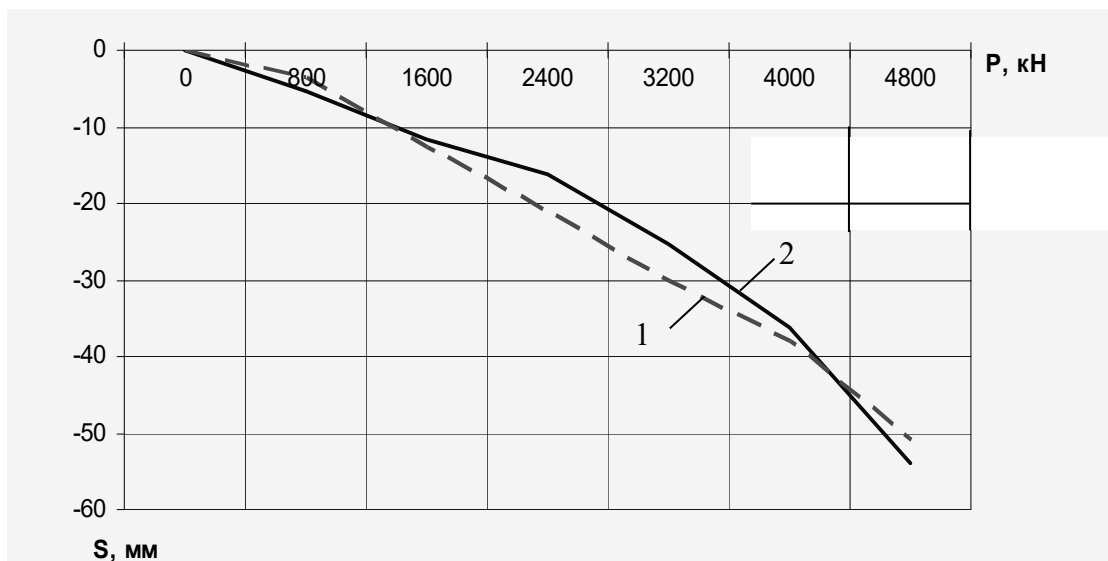


Рис. 3.9 – Графік залежності осідання-навантаження для пального фундаменту: 1 – випробування, 2 – моделювання в Plaxis

5. Штампові випробування. В роботі Болдирєва Г. Г. та Нікітіна Є. В. (1987) наведено результати випробування моделі штампу із сталевієї полоси шириною 50 мм та довжиною 145 мм. Розміри лотка з прозорими стінками з оргскла складають 600×600×145 мм; в якості основи використовувався пісок середньої щільності (питома вага частинок 2,66 г/см³, вологість 1%, коефіцієнт пористості 0,58, кут внутрішнього тертя 35°).

На рис. 3.10 наведено графіки залежності осідання – навантаження, що отримані безпосередньо випробуванням та моделюванням в Plaxis.

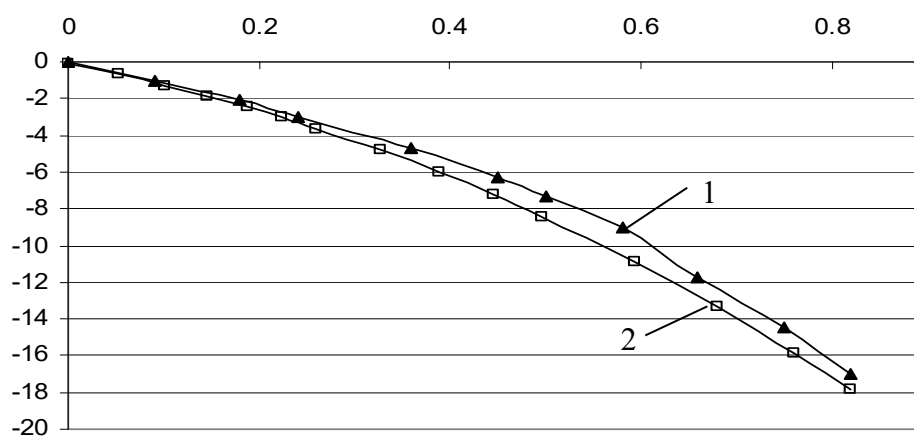


Рис. 3.10 – Графік залежності осідання – навантаження для штампу: 1 – випробування, 2 – моделювання в Plaxis

Як видно з рис. 3.2, 3.5, 3.7, 3.9 розбіжність між значеннями осідань при однакових навантаженнях при статичному випробуванні і за результатами моделювання не перевищує 10%. З рис. 3.10 видно, що розбіжність між значеннями осідань при однакових навантаженнях при фізичному моделюванні на маломасштабних моделях і за результатами моделювання теж незначна, тому дана модель може бути використана для подальшого дослідження роботи пальового фундаменту.

3.2 Моделювання НДС системи «фундамент – палі – основа» для стовпчастого пальового фундаменту при сталій кількості паль

Результатами експериментальних досліджень впливу низького ростверку на роботу пальового фундаменту різних авторів (розділ 1), а також даними фізичного моделювання роботи пальового фундаменту та паль на маломасштабних моделях (розділ 2) встановлено, що факторами, які впливають на розподіл навантаження між елементами пальового фундаменту, є:

- довжина паль (l_i), м;
- розмір поперечного перерізу палі (d), м;
- відстань між палями (a_i, b_i), м;
- кількість паль у кущі (n);
- фізико-механічні характеристики ґрунту;
- спосіб влаштування паль.

Для розв'язання поставленої задачі виконане моделювання методом скінчених елементів сумісної роботи ростверку і паль з ґрунтовою основою та окремо роботи палі і ростверку як фундаменту мілкого закладанням у програмному комплексі «Plaxis 3D Foundation».

3.2.1 Програма чисельного моделювання НДС системи «фундамент – палі – основа» для стовпчастого пальового фундаменту при сталій кількості паль

Програма визначення навантаження, яке сприймається окремими елементами у складі стовпчастого пальового фундаменту складає:

- створення розрахункової схеми пальового фундаменту під колону з коригуванням довжини і кроку паль;
- прикладання навантаження до розрахункової схеми стовпчастого пальового фундаменту;
- побудова графіків для визначення навантаження, яке сприймає палевий кущ, плита ростверку та палі фундаменту.

При чисельно-математичному моделюванні поведінки плити ростверку і паль під навантаженням були прийняті такі параметри:

- модель ґрунту – пружно-пластична модель Кулона-Мора;
- модель пальового фундаменту під колону – ростверк товщиною 0,5 м і палі поперечного перерізу 0,3 м × 0,3 м (або діаметром 0,3 м);
- палі довжиною 3,0 м з кроком 3d, 5d і 7d;
- палі довжиною 6,0 м з кроком 3d, 5d і 7d;
- палі довжиною 9,0 м з кроком 3d, 5d і 7d;
- палі довжиною 12,0 м з кроком 3d, 5d і 7d;
- величина навантаження, яка сприймається плитою ростверку, розраховується як добуток реактивного опору ґрунту, який знаходиться під подошвою ростверку, на площу ростверку (без врахування площі паль);
- величина навантаження, яка сприймається палями, розраховується як різниця загального навантаження на стовпчастий палевий фундамент і величини навантаження, яка сприймається плитою ростверку.

Моделльні експерименти розділено на такі підгрупи:

I – моделювання сумісної роботи ростверку і паль на однорідній піщаній основі при довжинах паль 3 м, 6 м, 9 м, 12 м та при осьовій відстані між ними 3d, 5d, 7d, *що влаштовані без виймання ґрунту*, товщина ростверку 500 мм, програму моделювання наведено в табл. 3.4. Характеристики піщаного ґрунту: пісок дрібний, $\gamma = 18,6$ кН/м³, $e = 0,67$, $c = 2$ кПа, $\varphi = 32^\circ$, $E = 28$ МПа;

II – моделювання сумісної роботи ростверку і паль на однорідній піщаній основі при довжинах паль 3 м, 6 м, 9 м, 12 м та при осьовій відстані між ними 3d, 5d, 7d, *що влаштовані з вийманням ґрунту*, товщина ростверку 500 мм, програму моделювання наведено в табл. 3.4. Характеристики піщаного ґрунту: пісок дрібний, $\gamma = 18,6$ кН/м³, $e = 0,67$, $c = 2$ кПа, $\varphi = 32^\circ$, $E = 28$ МПа;

III – моделювання сумісної роботи ростверку і паль на однорідній глинистій основі при довжинах паль 3 м, 6 м, 9 м, 12 м та при осьовій відстані між ними 3d, 5d, 7d, *що влаштовані без виймання ґрунту*, товщина ростверку 500 мм, програму моделювання наведено в табл. 3.4. Характеристики глинистого ґрунту: суглинок, $\gamma = 18,7$ кН/м³, $c = 23$ кПа, $\varphi = 21^\circ$, $\nu = 0,35$, $E = 14$ МПа;

IV – моделювання сумісної роботи ростверку і паль на однорідній глинистій основі при довжинах паль 3 м, 6 м, 9 м, 12 м та при осьовій відстані між ними 3d, 5d, 7d, *що влаштовані з вийманням ґрунту*, товщина ростверку 500 мм, програму моделювання наведено в табл. 3.4. Характеристики глинистого ґрунту: суглинок, $\gamma = 18,7$ кН/м³, $c = 23$ кПа, $\varphi = 21^\circ$, $\nu = 0,35$, $E = 14$ МПа;

Таблиця 3.4 – Програма моделювання сумісної роботи ростверку і паль стовпчастого пальового фундаменту для підгруп I – IV (додатково варіюється вид ґрунту і спосіб влаштування палі)

Група дослідів	Довжина та поперечний розмір паль	Крок і кількість паль
1	$L = 3 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт.
2		5d, 9 шт.
3		7d, 9 шт.
4	$L = 6 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт.
5		5d, 9 шт.
6		7d, 9 шт.
7	$L = 9 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт.
8		5d, 9 шт.
9		7d, 9 шт.
10	$L = 12 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт.
11		5d, 9 шт.
12		7d, 9 шт.

У програму моделювання в різних ґрунтових умовах підгруп I – IV входить моделювання роботи одиночних паль різної довжини та моделювання роботи ростверку як фундаменту мілкового закладання.

3.2.2 Результати моделювання НДС системи «фундамент – палі – основа» для стовпчастого пальового фундаменту при сталій кількості паль

При моделюванні роботи пальового фундаменту були враховані наступні фази роботи:

- робота ґрунтової товщі без фундаментів (початкова фаза);
- влаштування стовпчастого пальового фундаменту;
- робота стовпчастого пальового фундаменту під дією вертикального навантаження.

Величина навантаження на моделі збільшувалась до тих пір, поки деформації знаходились в межах допустимих значень.

При чисельно-математичному моделюванні визначення частки ростверку і паль у навантаженні на стовпчастий пальовий фундамент використовувалися повномасштабні моделі. При кількості паль 9 шт. (підгрупи I – IV), кроці паль 3d ростверк мав габаритні розміри в плані 2,4 м × 2,4 м; при кроці паль 5d – 3,6 м × 3,6 м; при кроці паль 7d – 4,8 м × 4,8 м.

На рис. 3.11, 3.12 для прикладу наведені розрахункові моделі стовпчастого пальового фундаменту та ґрунтового масиву.

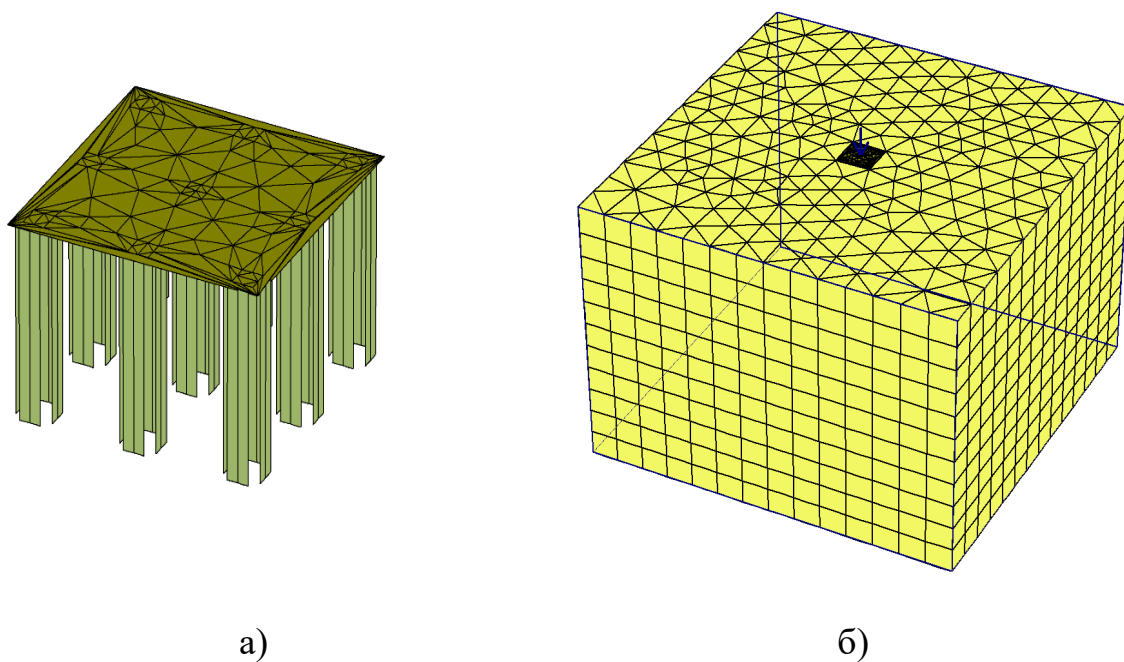


Рис. 3.11 – Розрахункові моделі стовпчастого пальового фундаменту:
а) пальовий фундамент, палі довжиною 3 м; б) ґрунтовий масив

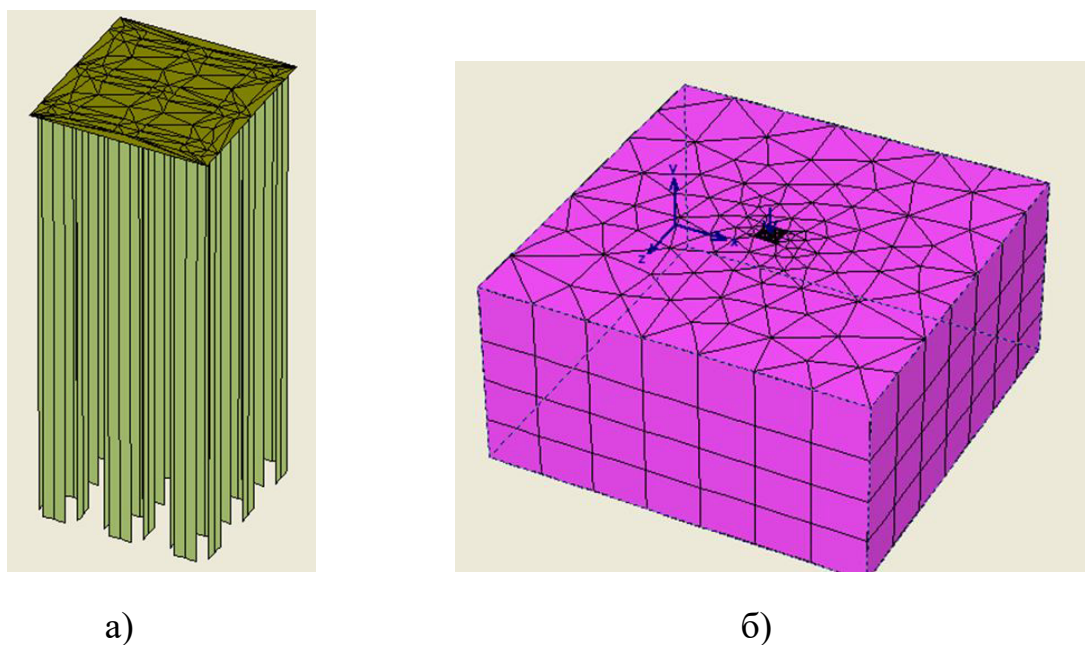


Рис. 3.12 – Розрахункові моделі стовпчастого пальового фундаменту:
а) пальовий фундамент з ростверком $2,4 \text{ м} \times 2,4 \text{ м}$, палі довжиною 6 м;
б) ґрунтовий масив

На рис. 3.13, 3.14 показані напруження під подошвою плити ростверку $4,8 \text{ м} \times 4,8 \text{ м}$ при довжині палі 12 м та $2,4 \text{ м} \times 2,4 \text{ м}$ при довжині палі 3 м .

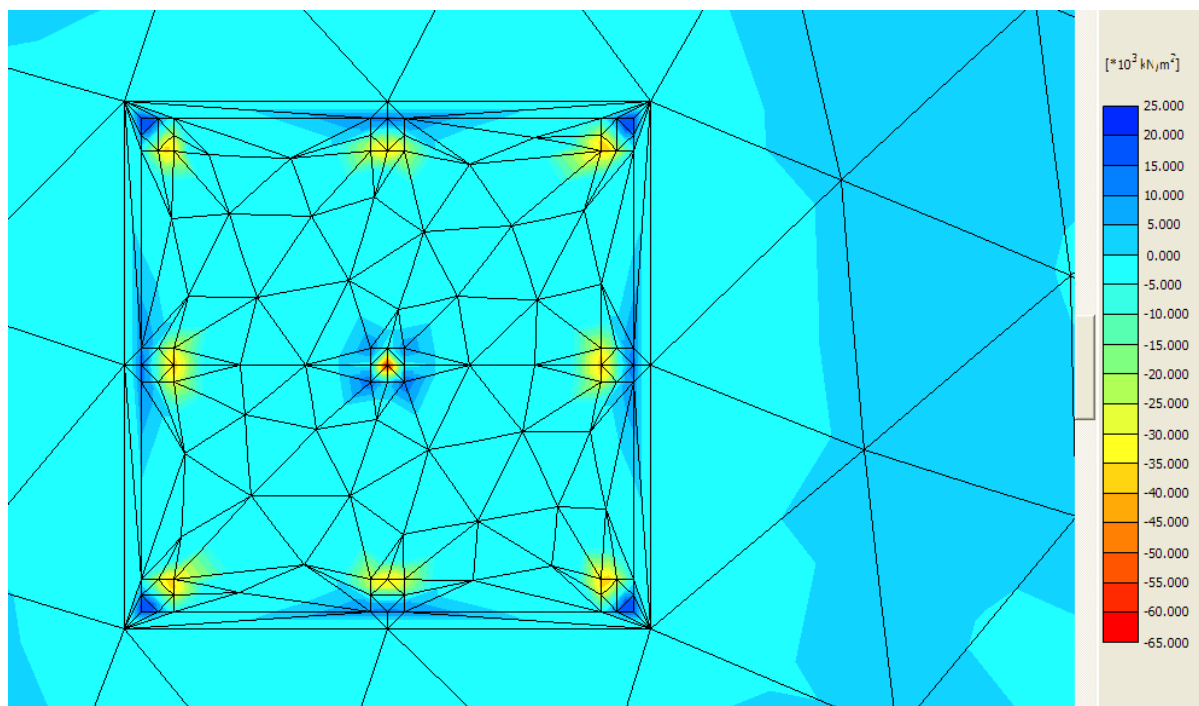


Рис. 3.13 – Напруження в рівні подошви ростверку $4,8 \text{ м} \times 4,8 \text{ м}$ при довжині палі 12 м

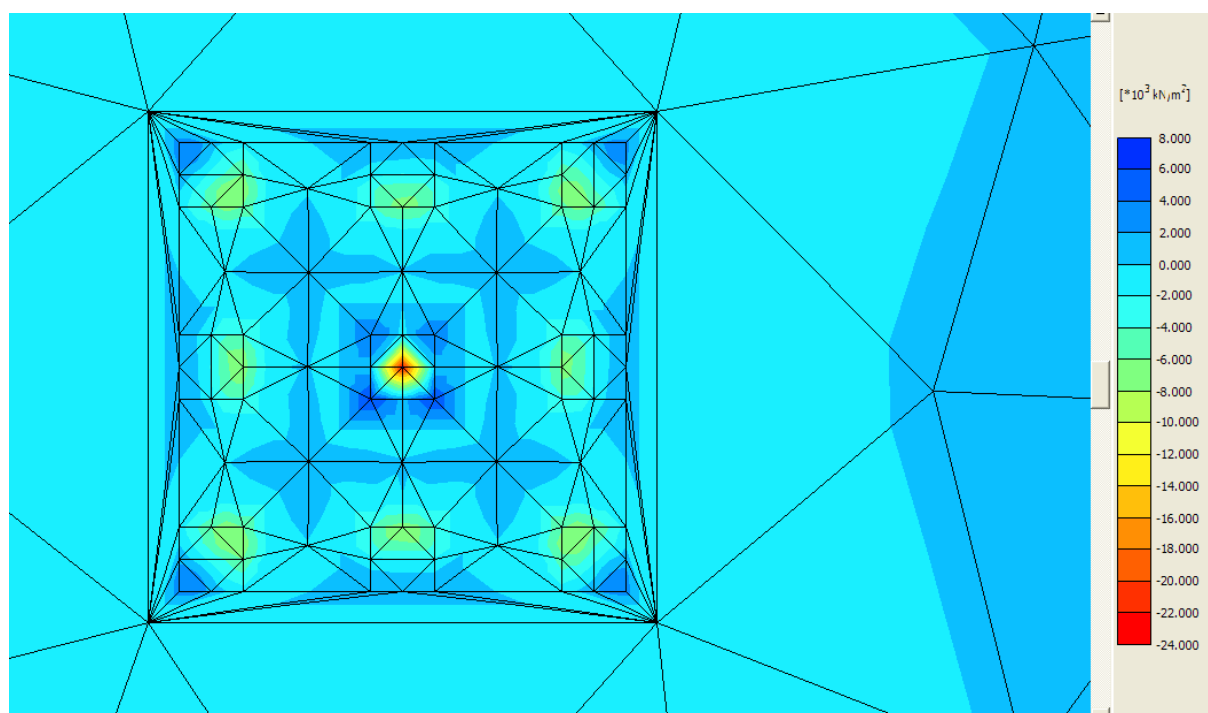


Рис. 3.14 – Напруження в рівні подошви ростверку $2,4 \text{ м} \times 2,4 \text{ м}$ при довжині палі 3 м

На рис. 3.15 – 3.17 для прикладу показані мозаїки вертикальних деформацій стовпчастого пальового фундаменту з забивних паль з розмірами ростверку 2,4 м × 2,4 м; 3,6 м × 3,6 м; 4,8 м × 4,8 м з палями довжиною 3 м у піщаному ґрунті.

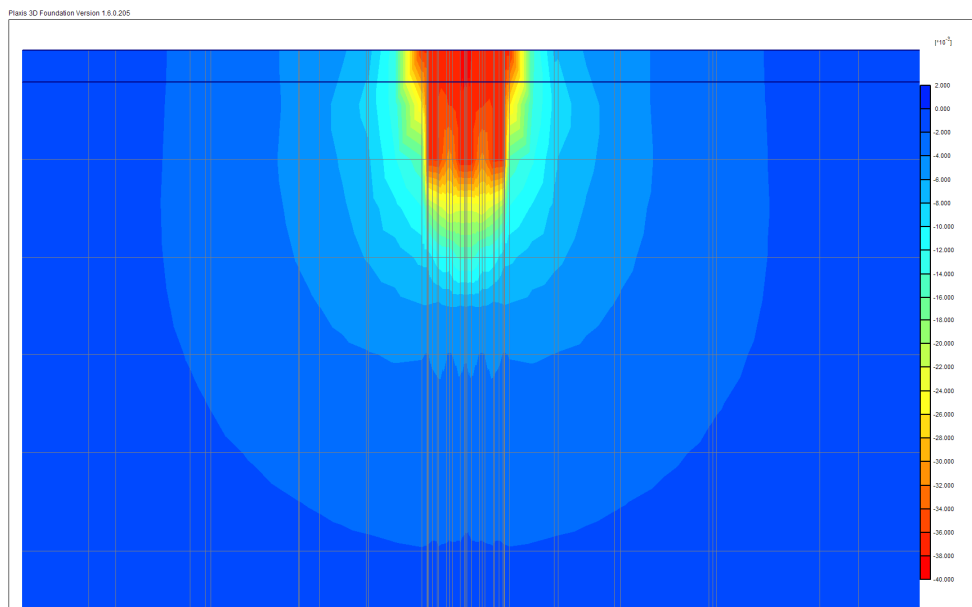


Рис. 3.15 – Мозаїка вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні пальового фундаменту розмірами ростверку 2,4 м × 2,4 м; довжина паль 3 м

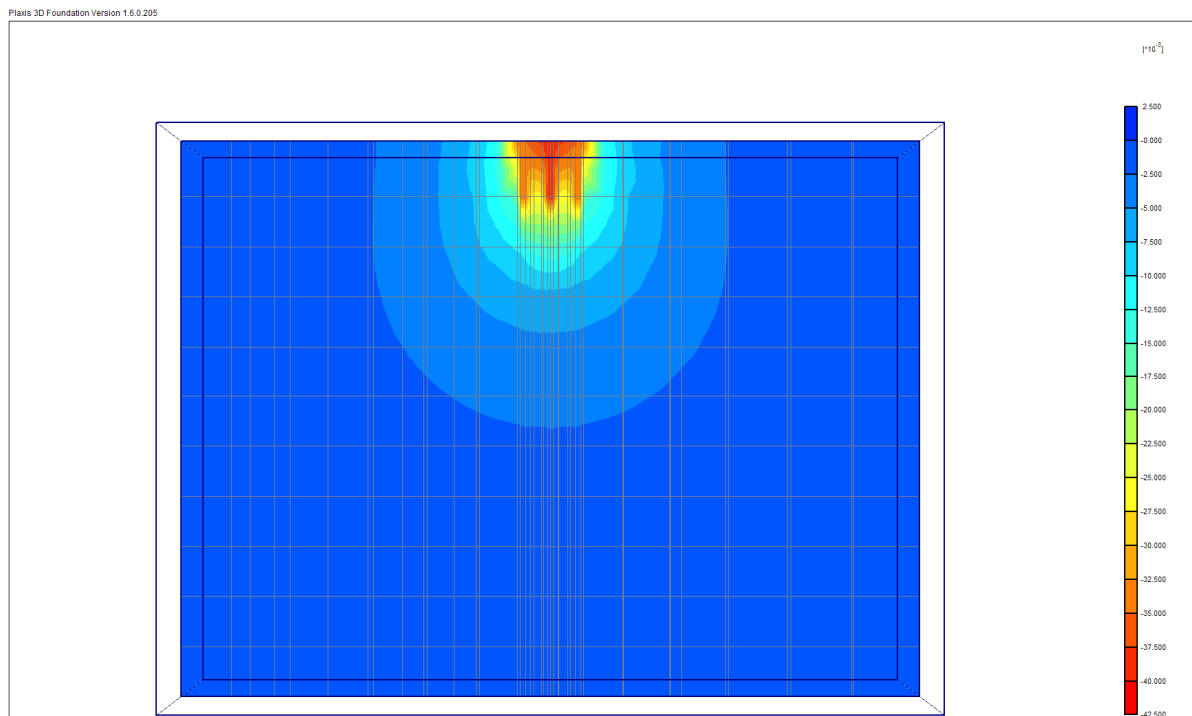


Рис. 3.16 – Мозаїка вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні пальового фундаменту з розмірами ростверку 3,6 м × 3,6 м; довжина паль 3 м

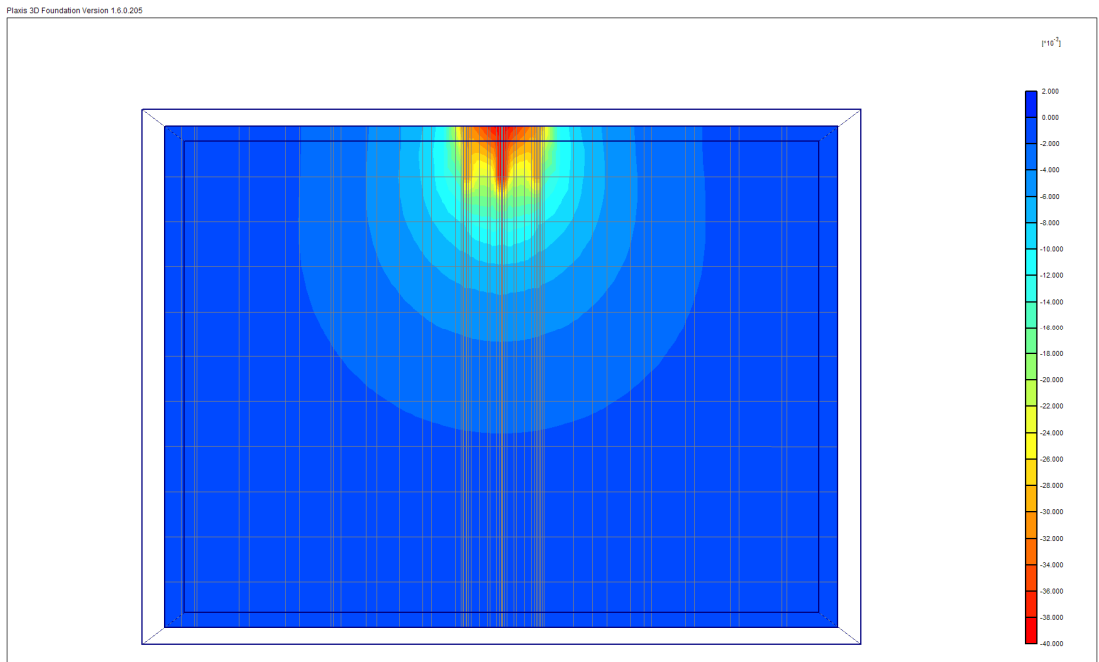


Рис. 3.17 – Мозаїка вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні пальового фундаменту розмірами 4,8 м × 4,8 м; довжина паль 3 м

На рис. 3.18 – 3.20 показані мозаїки вертикальних деформацій стовпчастого пальового фундаменту з забивних паль з розмірами ростверку 2,4 м × 2,4 м; 3,6 м × 3,6 м; 4,8 м × 4,8 м з палями довжиною 9 м у піщаному ґрунті.

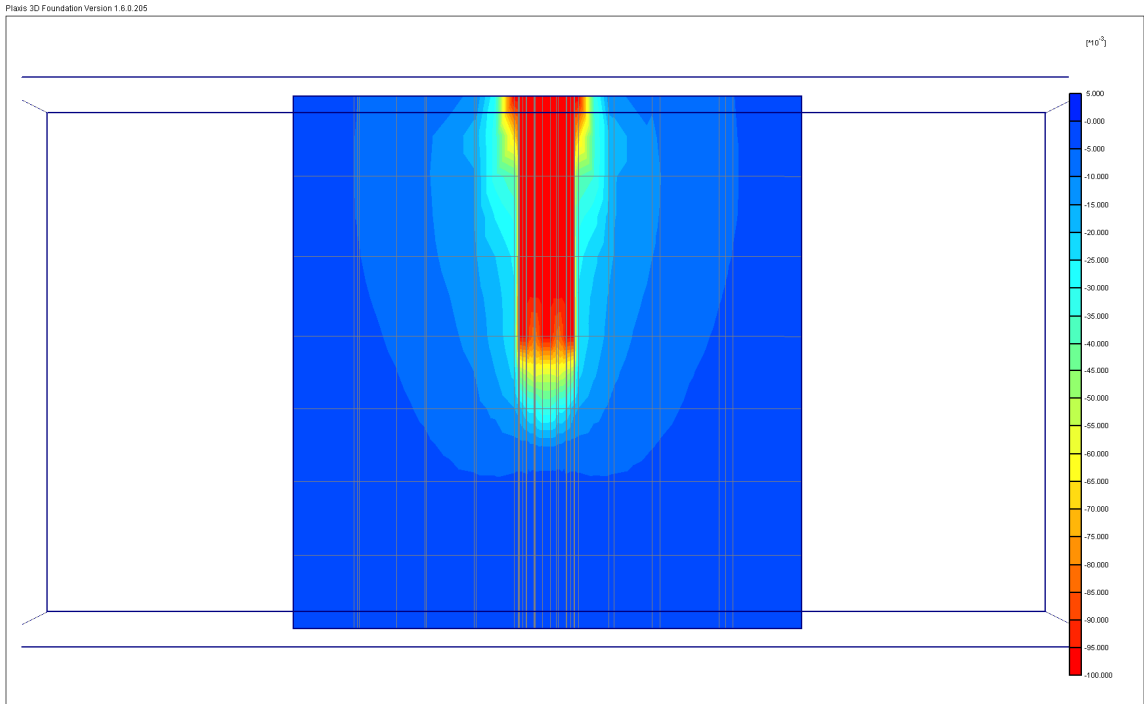


Рис. 3.18 – Мозаїка вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні пальового фундаменту розмірами ростверку 2,4 м x 2,4 м; довжина паль 9 м

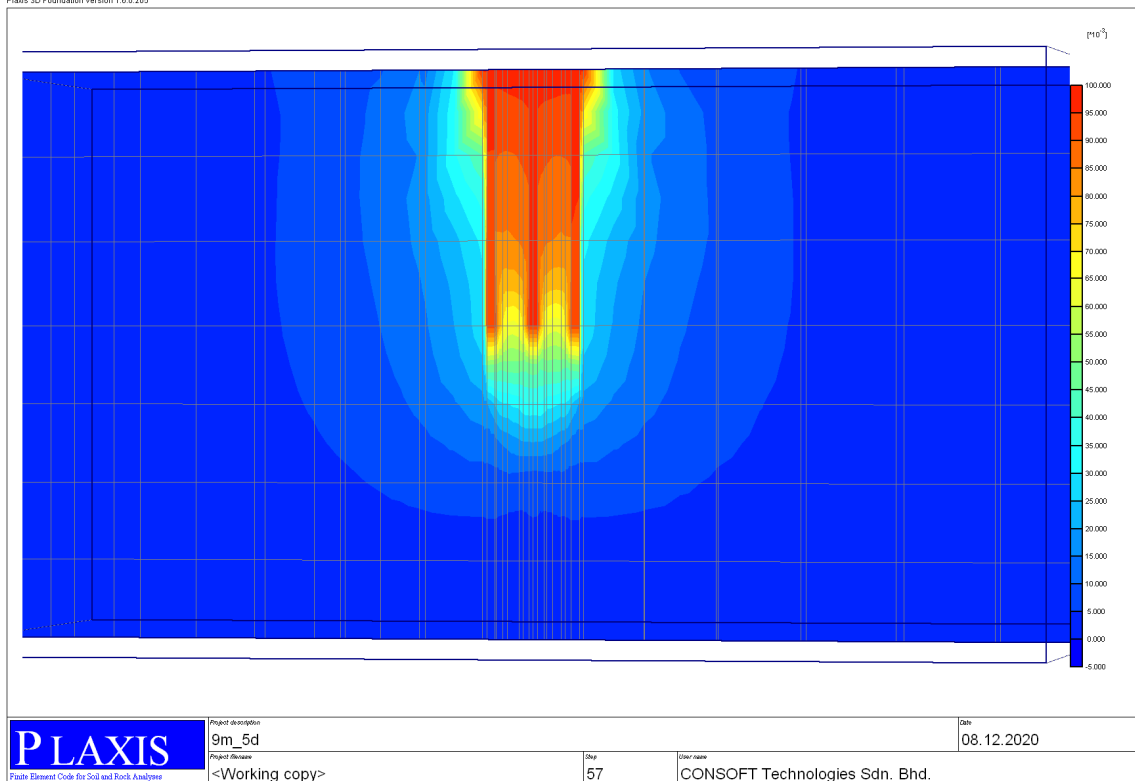


Рис. 3.19 – Мозаїка вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні пальового фундаменту з розмірами ростверку 3,6 м × 3,6 м; довжина паль 9 м

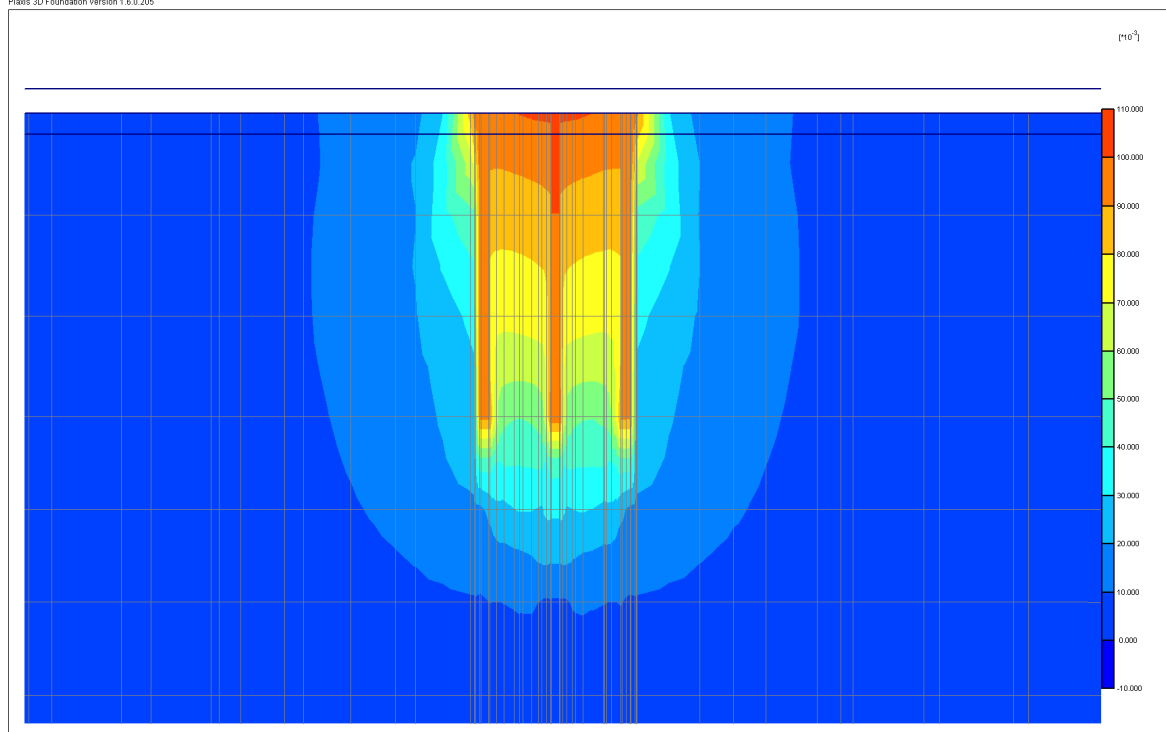


Рис. 3.20 – Мозаїка вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні пальового фундаменту розмірами 4,8 м × 4,8 м; довжина паль 9 м

Аналізуючи вище наведені мозаїки очевидно, що при незначному кроці ґрунтопальовий масив працює як єдине ціле, при збільшенні кроку паль значна частина навантаження передається на плиту ростверку. Очевидно також, що при збільшенні кроку паль більша частина навантаження передається на плиту ростверку і центральну палю. Перерозподіл навантаження на центральну палю пояснюється малою жорсткістю ростверку (товщина 500 мм при розмірах 4,8 м × 4,8 м).

Для оцінки роботи окремої палі у складі фундаменту було проведено моделювання роботи одиночних паль для всіх типів і довжин в різних ґрунтових умовах.

I – моделювання сумісної роботи ростверку і паль на однорідній піщаній основі при довжинах паль 3 м, 6 м, 9 м, 12 м та при осьовій відстані між ними 3d, 5d, 7d, що влаштовані без виймання ґрунту, товщина ростверку 500 мм, програму моделювання наведено в табл. 3.4. Характеристики піщаного ґрунту: пісок дрібний, $\gamma = 18,6 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,67$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 32^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$ [23].

На рис. 3.21 – 3.24 наведено графіки залежності навантаження – осідання пального фундаменту з кроками паль 3d, 5d і 7d. Загальна несуча здатність збільшується при збільшенні довжини і кроку паль, що можна було передбачити.

На рис. 3.25, 3.26 наведено графіки залежності навантаження – осідання для одиночних паль та плит ростверків як фундаментів мілкого закладання.

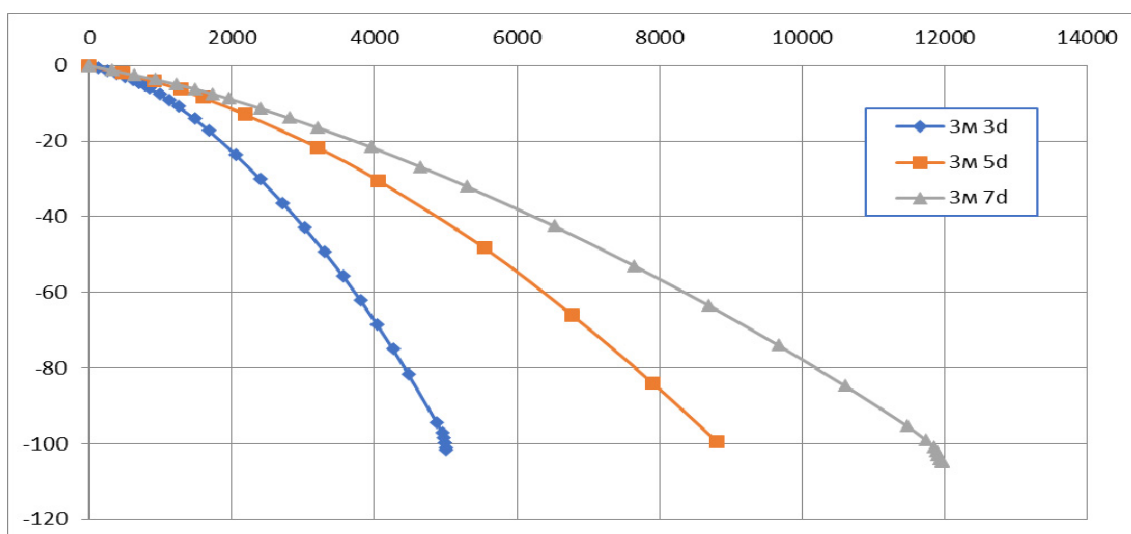


Рис. 3.21 – Графік залежності навантаження – осідання при довжині забивних паль 3 м для піску

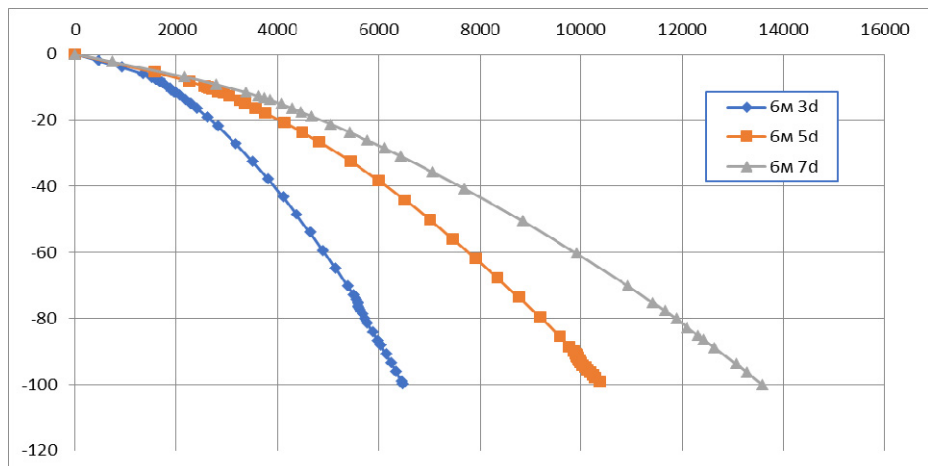


Рис. 3.22 – Графік залежності навантаження – осідання при довжині забивних палей 6 м для піску

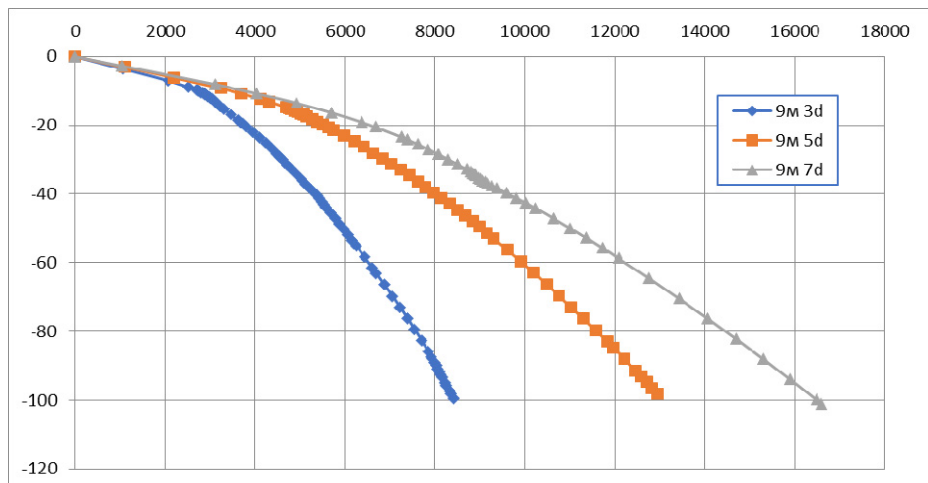


Рис. 3.23 – Графік залежності навантаження – осідання при довжині забивних палей 9 м для піску

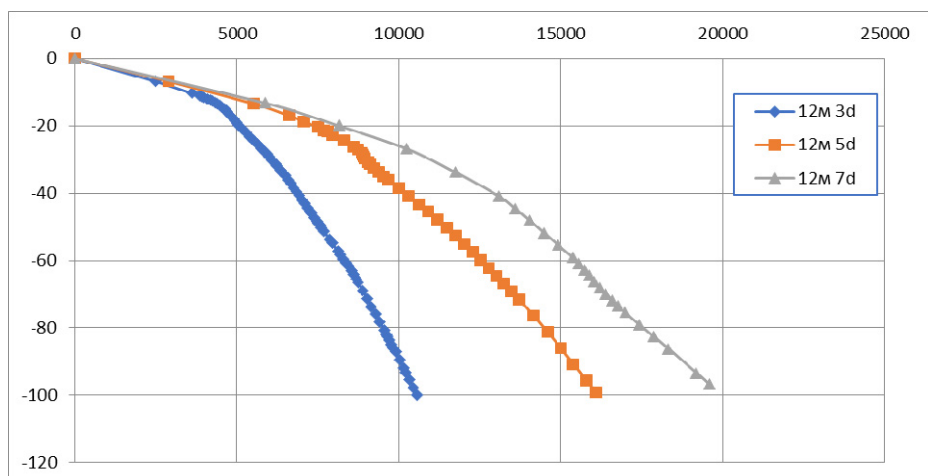


Рис. 3.24 – Графік залежності навантаження – осідання при довжині забивних палей 12 м для піску

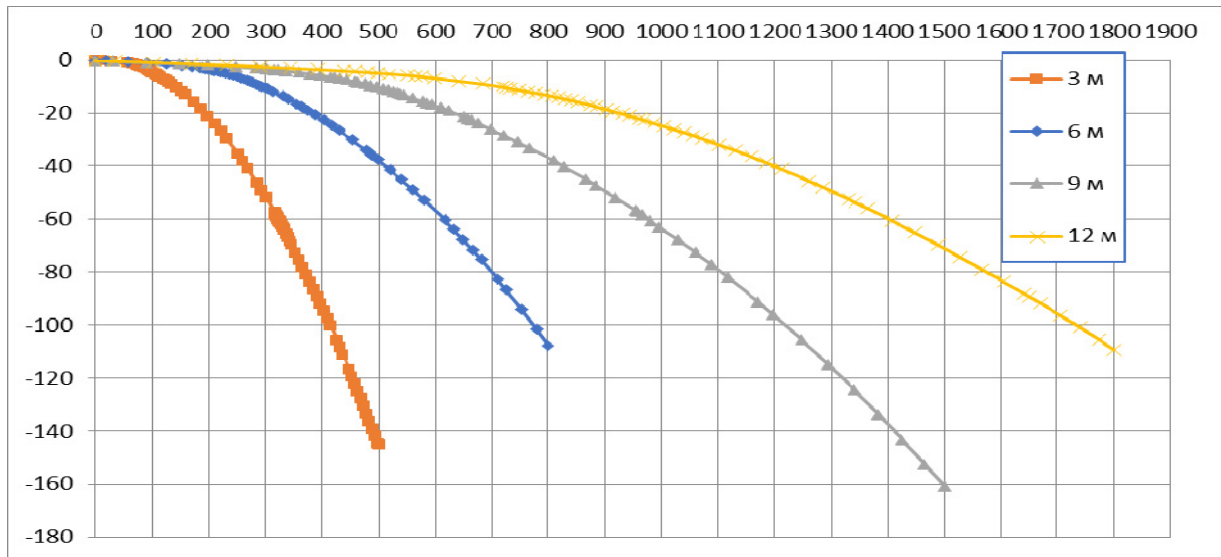


Рис. 3.25 – Графік залежності осідання – навантаження для одиночних забивних палей різної довжини в піщаному ґрунті

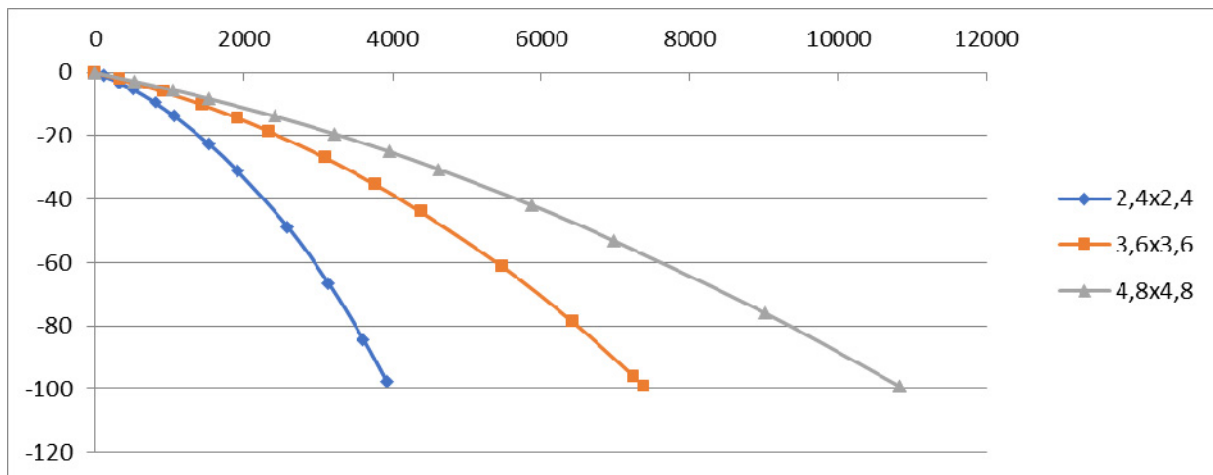


Рис. 3.26 – Графік залежності осідання – навантаження для ростверків як фундаментів мілкового закладання в піщаному ґрунті

Результати моделювання наведено в таблиці 3.5. Несуча здатність фундаменту та одиночної палі визначена при осіданні 100 мм.

Таблиця 3.5 – Результати моделювання стовпчастого пального фундаменту за підгрупою І (9 палів, влаштованих без виймання ґрунту, товщина ростверку 500 мм, ґрунт однорідний – пісок дрібний)

Крок палів і розміри ростверку, м	Реактивний тиск під ростверком як фундаментом м'якого закладання кПа	L = 3 м Несуча здатність одиночної палі P = 415 кН				L = 6 м Несуча здатність одиночної палі P = 778 кН				L = 9 м Несуча здатність одиночної палі P = 1220 кН				L = 12 м Несуча здатність одиночної палі P = 1740 кН			
		N, кН	$\frac{N_d}{P_p}$ $\frac{\text{кН}}{\text{кПа}}$	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН	N, кН	$\frac{N_d}{P_p}$ $\frac{\text{кН}}{\text{кПа}}$	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН	N, кН	$\frac{N_d}{P_p}$ $\frac{\text{кН}}{\text{кПа}}$	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН	N, кН	$\frac{N_d}{P_p}$ $\frac{\text{кН}}{\text{кПа}}$	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН
3d 2,4 × 2,4 A _p = 4,95	620	5000	$\frac{625,4}{126,3}$	12,5	508,3	6480	$\frac{282,9}{57,1}$	5,8	688,6	8409	$\frac{257,7}{52,1}$	3,1	905,7	10540	$\frac{263,7}{53,3}$	2,5	1142
5d 3,6 × 3,6 A _p = 12,15	494	8813	$\frac{1920,2}{158,0}$	21,8	765,9	10368	$\frac{1666,3}{137,1}$	16,7	966,9	12960	$\frac{1540,0}{126,7}$	11,9	1269	16070	$\frac{1622,7}{136,8}$	10,4	1601
7d 4,8 × 4,8 A _p = 22,23	432	11859	$\frac{4178,0}{188}$	34,9	853,4	13593	$\frac{4718,7}{212,2}$	36,4	986	16481	$\frac{4566,2}{205,4}$	27,5	1324	19584	$\frac{4616,6}{207,7}$	23,6	1663

A_p – площа ростверку, м²; N – несуча здатність фундаменту; N_d – несуча здатність ростверку; P_p – середній тиск під підшовою ростверку.

II – моделювання сумісної роботи ростверку і паль на однорідній піщаній основі при довжинах паль 3 м, 6 м, 9 м, 12 м та при осьовій відстані між ними 3d, 5d, 7d, що влаштовані з вийманням ґрунту, товщина ростверку 500 мм, програму моделювання наведено в табл. 3.4. Характеристики піщаного ґрунту: пісок дрібний, $\gamma = 16,6 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,67$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 32^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$ [18].

На рис. 3.27 – 3.30 наведено графіки залежності навантаження – осідання пальових фундаментів різної довжини з кроками паль 3d, 5d і 7d.

На рис. 3.31 наведений графік залежності навантаження – осідання для одиночних паль. Графік залежності навантаження – осідання для плит ростверків як фундаментів мілкового закладання згідно з рис. 3.26.

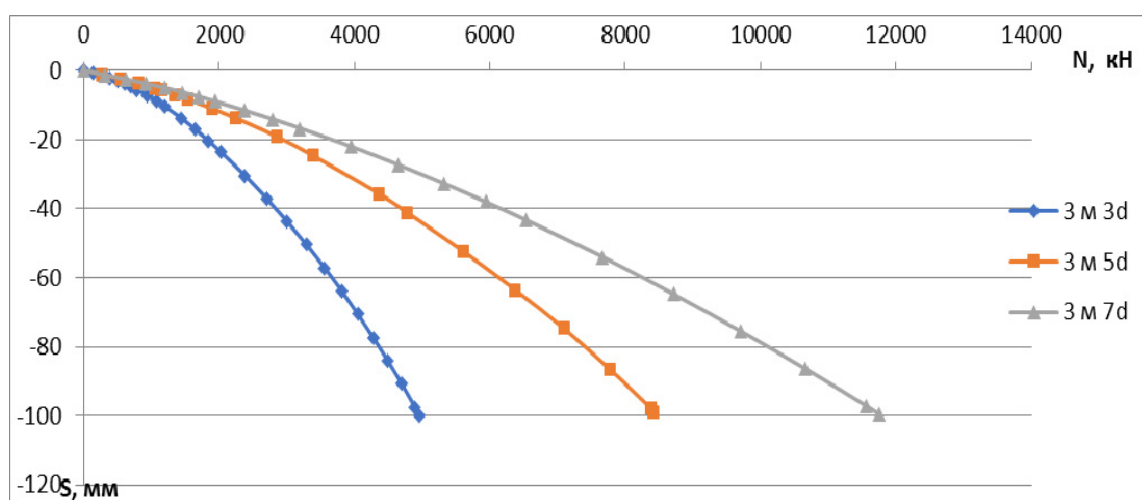


Рис. 3.27 – Графік залежності навантаження – осідання при довжині бурових паль 3 м в піщаному ґрунті

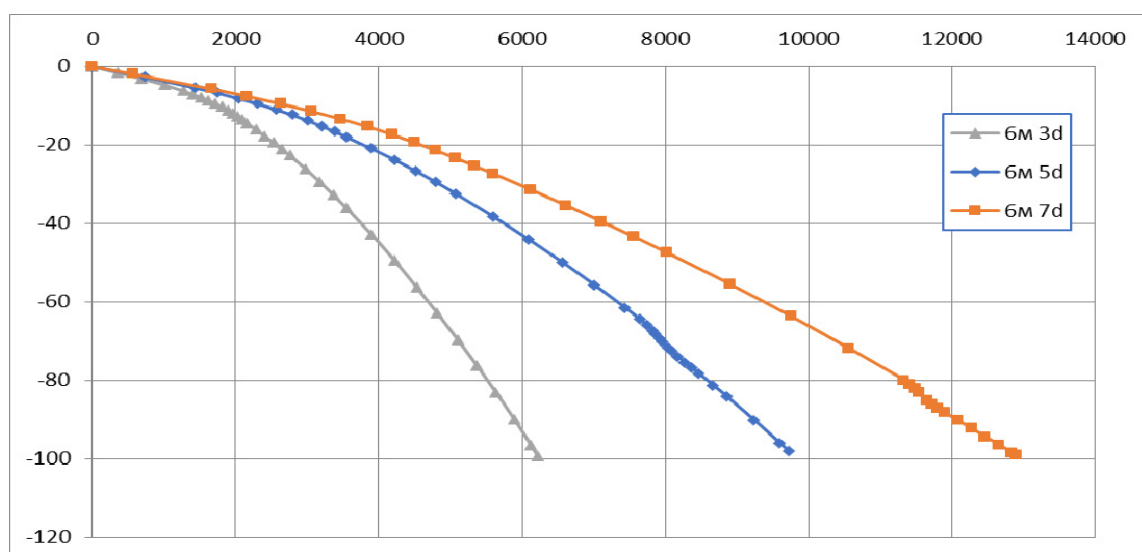


Рис. 3.28 – Графік залежності навантаження – осідання при довжині бурових паль 6 м в піщаному ґрунті

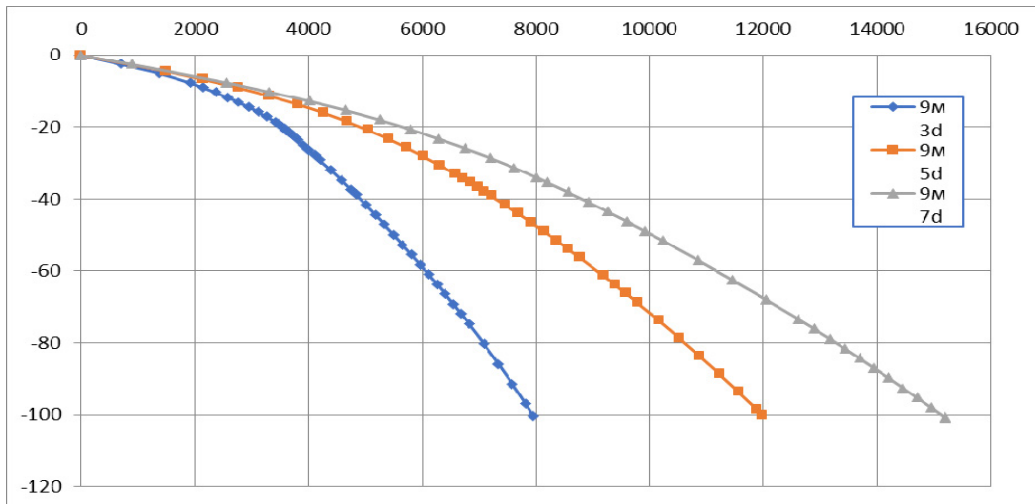


Рис. 3.29 – Графік залежності навантаження – осідання при довжині бурових паль 9 м в піщаному ґрунті

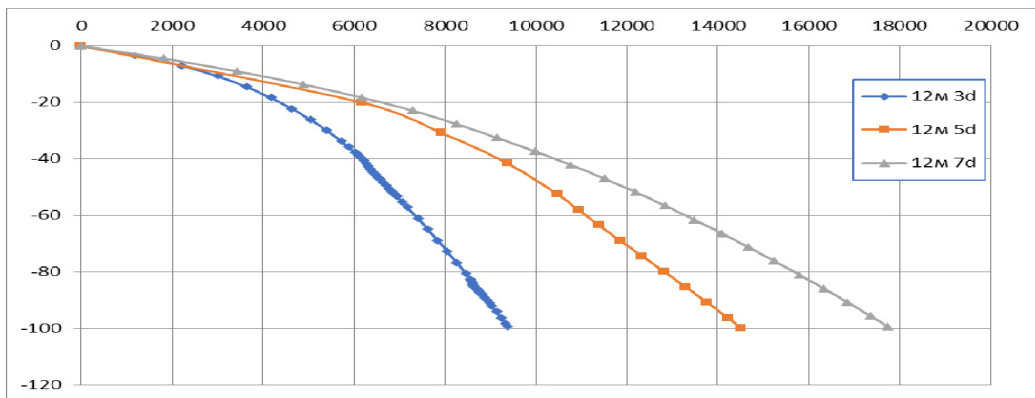


Рис. 3.30 – Графік залежності навантаження – осідання при довжині бурових паль 12 м в піщаному ґрунті

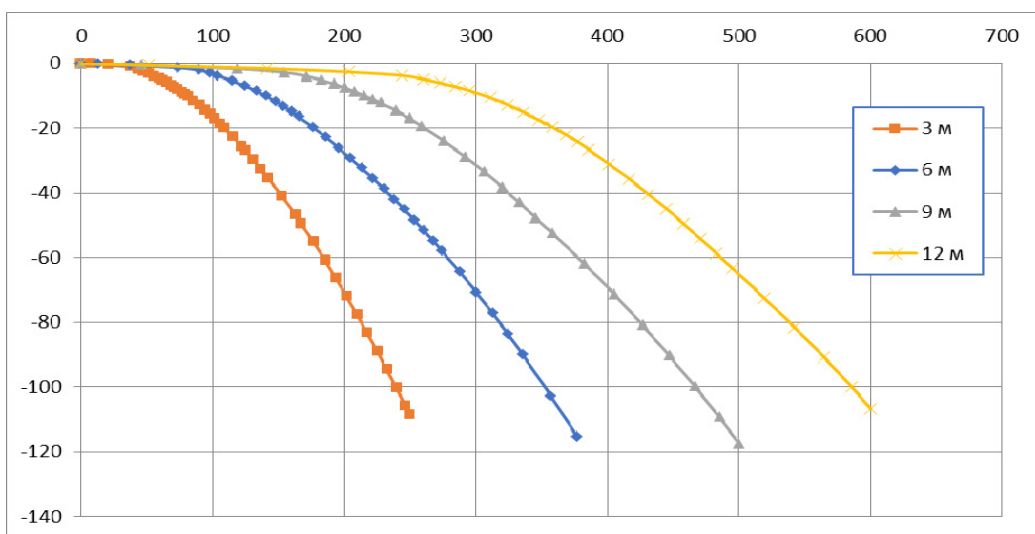


Рис. 3.31 – Графік залежності осідання – навантаження для одиночних бурових паль різної довжини в піщаному ґрунті

Результати моделювання наведено в таблиці 3.6. Несуча здатність фундаменту та одиночної палі визначена при осіданні 100 мм

Таблиця 3.6 – Результати моделювання стовпчастого пальового фундаменту за підгрупою П (9 палей, влаштованих з вийманням ґрунту, товщина ростверку 500 мм, ґрунт однорідний – пісок дрібний)

Крок палей і розміри ростверку, м	Тиск під підпошвою ростверка як фундаменту мілкого закладання P , кПа	$L = 3$ м Несуча здатність одиночної палі $P = 240$ кН				$L = 6$ м Несуча здатність одиночної палі $P = 357$ кН				$L = 9$ м Несуча здатність одиночної палі $P = 467$ кН				$L = 12$ м Несуча здатність одиночної палі $P = 585$ кН			
		N , кН	$\frac{Np}{P_p}$ кН/кПа	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН	N , кН	$\frac{Np}{P_p}$ кН/кПа	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН	N , кН	$\frac{Np}{P_p}$ кН/кПа	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН	N , кН	$\frac{Np}{P_p}$ кН/кПа	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН
3d 2,4 × 2,4 $A_p = 5,12$	620	4954	$\frac{1460,9}{285,1}$	29,5	388,1	6221	$\frac{1404,0}{274}$	22,6	535,2	7949	$\frac{1703,2}{332,4}$	21,4	694	9389	$\frac{2040,9}{398,3}$	21,7	816,4
5d 3,6 × 3,6 $A_p = 12,32$	494	8424	$\frac{2733,3}{210,9}$	32,4	632,3	9720	$\frac{3330,7}{257}$	34,3	709,9	11988	$\frac{4061,9}{329,7}$	33,9	880,7	14515	$\frac{5143,6}{417,5}$	35,4	1041,3
7d 4,8 × 4,8 $A_p = 22,4$	432	11750	$\frac{5861,1}{261,6}$	49,9	654,3	12902	$\frac{6246,6}{278,8}$	48,4	739,5	15206	$\frac{7272}{324,6}$	47,8	881,6	17740	$\frac{8610,1}{384,3}$	48,5	1014,4

A_p – площа ростверку, м²; N – несуча здатність фундаменту; N_p – несуча здатність ростверку; P_p – середній тиск під підпошвою ростверку.

III – моделювання сумісної роботи ростверку і паль на однорідній глинистій основі при довжинах паль 3 м, 6 м, 9 м, 12 м та при осьовій відстані між ними 3d, 5d, 7d, що влаштовані без виїмання ґрунту, товщина ростверку 500 мм, програму моделювання наведено в табл. 3.4. Характеристики глинистого ґрунту: суглинок, $\gamma = 18,7 \text{ кН/м}^3$, $c = 23 \text{ кПа}$, $\varphi = 21^\circ$, $\nu = 0,35$, $E = 14 \text{ МПа}$ [23].

На рис. 3.32 – 3.35 наведено графіки залежності навантаження – осідання пального фундаменту з кроками паль 3d, 5d і 7d. На рис. 3.36, 3.37 наведено графіки залежності навантаження – осідання для одиночних паль та плит ростверків як фундаментів мілкового закладання.

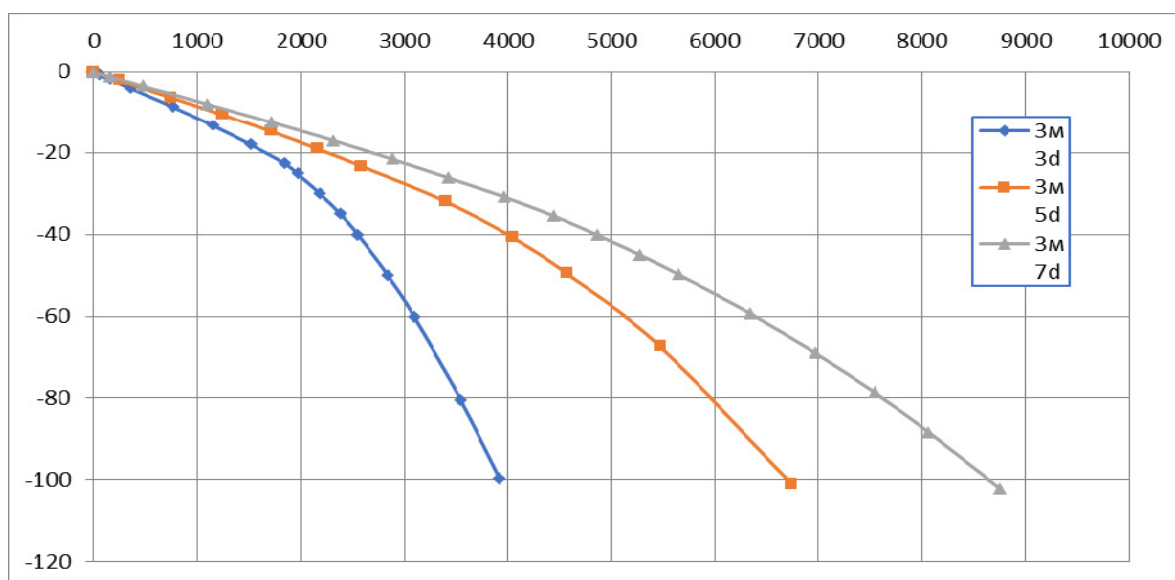


Рис. 3.32 – Графік залежності навантаження – осідання при довжині забивних паль 3 м для суглинку

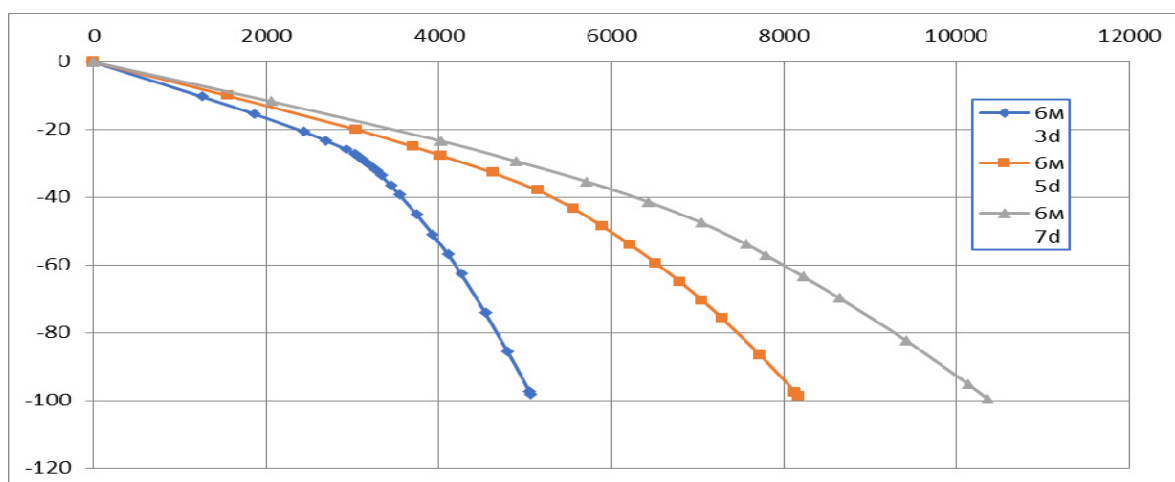


Рис. 3.33 – Графік залежності навантаження – осідання при довжині забивних паль 6 м для суглинку

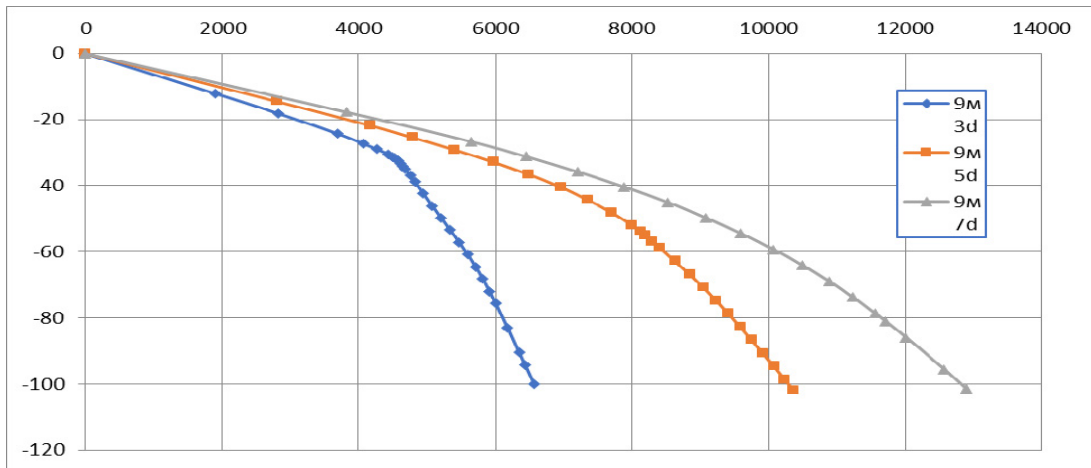


Рис. 3.34 – Графік залежності навантаження – осідання при довжині забивних палей 9 м для суглинку

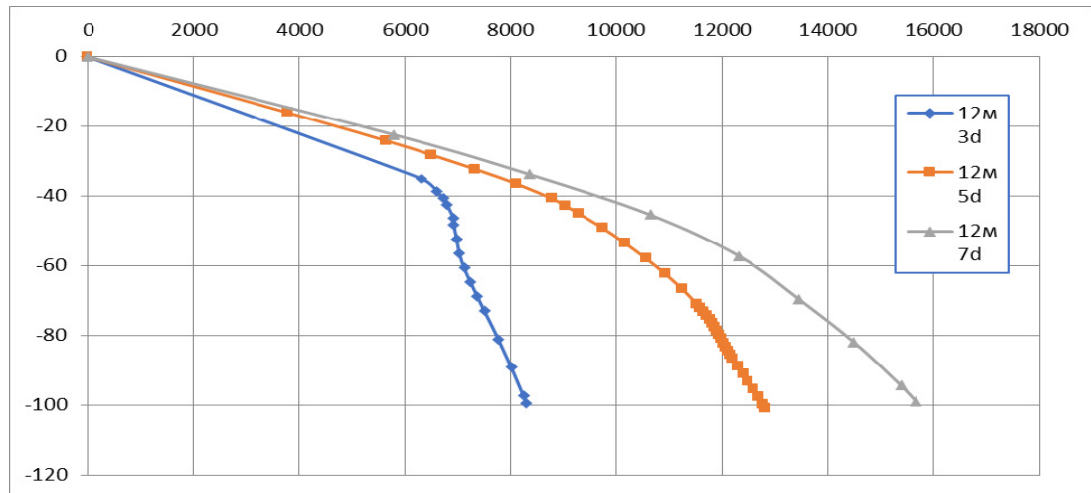


Рис. 3.35 – Графік залежності навантаження – осідання при довжині забивних палей 12 м для суглинку

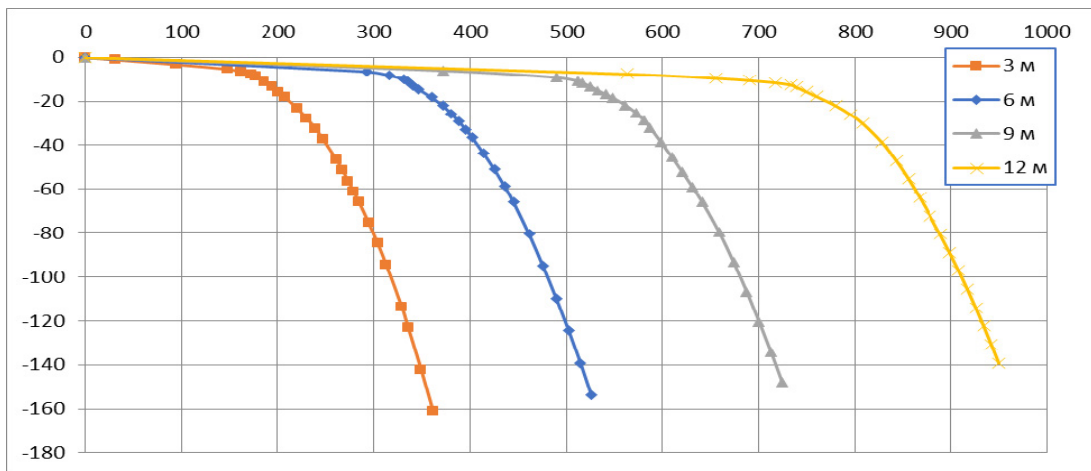


Рис. 3.36 – Графік залежності осідання – навантаження для одиночних забивних палей різної довжини в глинистому ґрунті

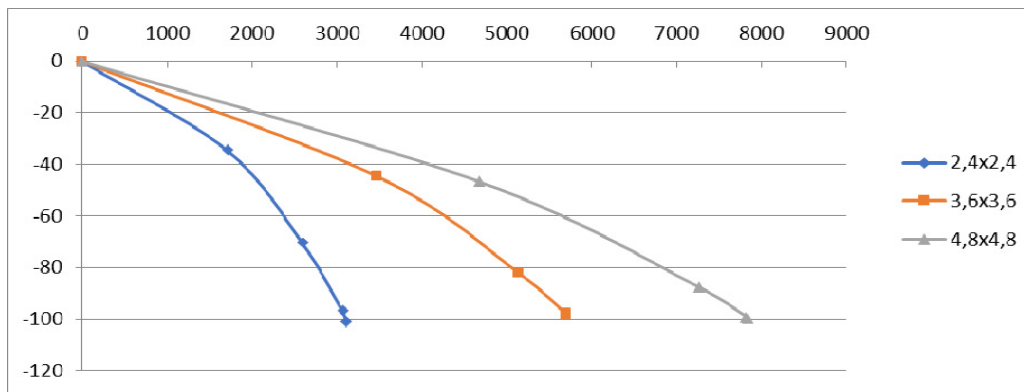


Рис. 3.37 – Графік залежності осідання – навантаження для ростверків як фундаментів мілкового закладання в глинистому ґрунті

Результати моделювання наведено в таблиці 3.7. Несуча здатність одиночної палі визначена при осіданні 100 мм.

IV – моделювання сумісної роботи ростверку і палі на однорідній глинистій основі при довжинах палі 3 м, 6 м, 9 м, 12 м та при осьовій відстані між ними 3d, 5d, 7d, що влаштовані з вийманням ґрунту, товщина ростверку 500 мм, програму моделювання наведено в табл. 3.4. Характеристики глинистого ґрунту: суглинок, $\gamma = 18,7 \text{ кН/м}^3$, $c = 23 \text{ кПа}$, $\varphi = 21^\circ$, $\nu = 0,35$, $E = 14 \text{ МПа}$.

Для IV підгрупи проведені розрахунки, аналогічні підгрупі II з заміною піщаного ґрунту на глинистий.

Для оцінки роботи окремої палі у складі фундаменту було проведено моделювання роботи одиночних палі для всіх довжин (підгрупа IV) та роботи ростверків при різному кроці палі як фундаментів мілкового закладання.

На рис. 3.38 наведено графіки залежності навантаження – осідання для одиночних бурових палі. Для плит ростверків як фундаментів мілкового закладання рис. 3.37.

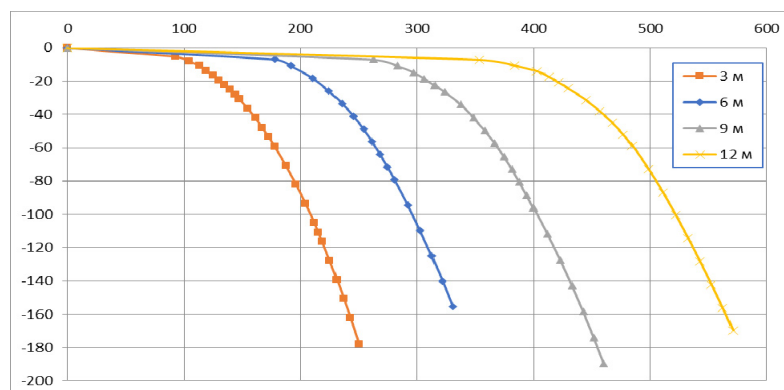


Рис. 3.38 – Графік залежності осідання – навантаження для одиночних бурових палі різної довжини в глинистому ґрунті

Таблиця 3.7 – Результати моделювання стовпчастого пальового фундаменту за підгрупою III (9 палів, влаштованих без виймання ґрунту, товщина ростверку 500 мм, ґрунт однорідний – суглинок)

Крок палів і розміри ростверку, м	Реактивний тиск під ростверком як фундаментом мілкого закладання кПа	L = 3 м Несуча здатність одиночної палі P = 415 кН				L = 6 м Несуча здатність одиночної палі P = 778 кН				L = 9 м Несуча здатність одиночної палі P = 1220 кН				L = 12 м Несуча здатність одиночної палі P = 1740 кН			
		N, кН	$\frac{N_p}{P_p}$ кН/кПа	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН	N, кН	$\frac{N_p}{P_p}$ кН/кПа	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН	N, кН	$\frac{N_p}{P_p}$ кН/кПа	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН	N, кН	$\frac{N_p}{P_p}$ кН/кПа	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН
3d 2,4 × 2,4 A _p = 4,95	383	3917	$\frac{359,3}{72,6}$	9,2	395,3	5069	$\frac{205,0}{41,4}$	4,0	540,4	6566	$\frac{171,3}{34,6}$	2,6	710,5	8300	$\frac{162,9}{32,9}$	2,0	904
5d 3,6 × 3,6 A _p = 12,15	282	6730	$\frac{843,8}{69,4}$	12,5	654,0	8165	$\frac{1206,4}{99,3}$	14,8	772,3	10360	$\frac{1265,0}{104,1}$	12,2	1010	12830	$\frac{1470,3}{121,0}$	12,2	1262
7d 4,8 × 4,8 A _p = 22,23	247	8700	$\frac{2773,9}{124,8}$	31,7	658,5	10368	$\frac{2852,6}{128,3}$	27,5	835	12900	$\frac{1757,0}{79,0}$	15,2	1238	15670	$\frac{3336,8}{150,1}$	21,3	1370

A_p – площа ростверку, м²; N – несуча здатність фундаменту; N_p – несуча здатність ростверку; P_p – середній тиск під подошвою ростверку.

Результати моделювання бурових пального фундаментів у глинистому ґрунті наведено в таблиці 3.8. Несуча здатність одиночної палі визначена при осіданні 100 мм.

Таблиця 3.8 – Результати моделювання стовпчастого пального фундаменту за підгрупою IV (9 палів, влаштованих з вийманням ґрунту, товщина ростверку 500 мм, ґрунт однорідний – суглинок)

Крок палі і розміри ростверку, м	Тиск під подошвою ростверка як фундаменту мілкого закладання Р, кПа	L = 3 м Несуча здатність одиночної палі P = 215 кН				L = 6 м Несуча здатність одиночної палі P = 300 кН				L = 9 м Несуча здатність одиночної палі P = 405 кН				L = 12 м Несуча здатність одиночної палі P = 522 кН			
		N, кН	$\frac{N}{P}$, $\frac{кН}{кПа}$	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН	N, кН	$\frac{N}{P}$, $\frac{кН}{кПа}$	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН	N, кН	$\frac{N}{P}$, $\frac{кН}{кПа}$	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН	N, кН	$\frac{N}{P}$, $\frac{кН}{кПа}$	Частка ростверку, %	Середнє навант. на палю, кН
3d 2,4 × 2,4 A _p = 5,12	383	3859	$\frac{721,9}{141,0}$	18,7	348,6	5011,2	$\frac{917,0}{179}$	18,3	454,9	6336	$\frac{1101}{215,1}$	17,4	581,6	7891	$\frac{1361,9}{266}$	17,3	725,6
5d 3,6 × 3,6 A _p = 12,32	282	6480	$\frac{1344,1}{109,1}$	20,7	570,6	7905,6	$\frac{2080,8}{169}$	26,3	647,2	9720	$\frac{2631,6}{213,6}$	27,1	787,6	11664	$\frac{2932}{238}$	25,1	970,2
7d 4,8 × 4,8 A _p = 22,4	247	8525	$\frac{3274,8}{146,1}$	38,4	583,3	9907,2	$\frac{3726}{166,3}$	37,6	686,8	11981	$\frac{4446,4}{198,5}$	37,1	837,1	13594	$\frac{4729,5}{211,1}$	34,8	984,9

A_p – площа ростверку, м²; N – несуча здатність фундаменту; N_p – несуча здатність ростверку; P_p – середній тиск під подошвою ростверку.

3.2.3 Аналіз впливу геометричних параметрів групи паль, способу влаштування паль та виду ґрунту на НДС системи «фундамент – палі – основа» для стовпчастого фундаменту зі сталою кількістю паль

Крім зміни геометричних параметрів палевих кущів зі сталою кількістю паль (відносна довжина і крок паль з відповідною зміною площі ростверку) у дослідженнях у програмному комплексі Plaxis 3D за підгрупами I – IV варіювались вид ґрунту (піщаний та глинистий) і спосіб влаштування палі (з вийманням та без виймання ґрунту).

Оскільки при влаштуванні бурових паль навколо них не утворюється ущільнена зона на відміну від забивних, то ступінь реалізації несучої здатності палі у складі групи (куша) для бурових паль, можна очікувати більшою, ніж для забивних при аналогічних геометричних параметрах.

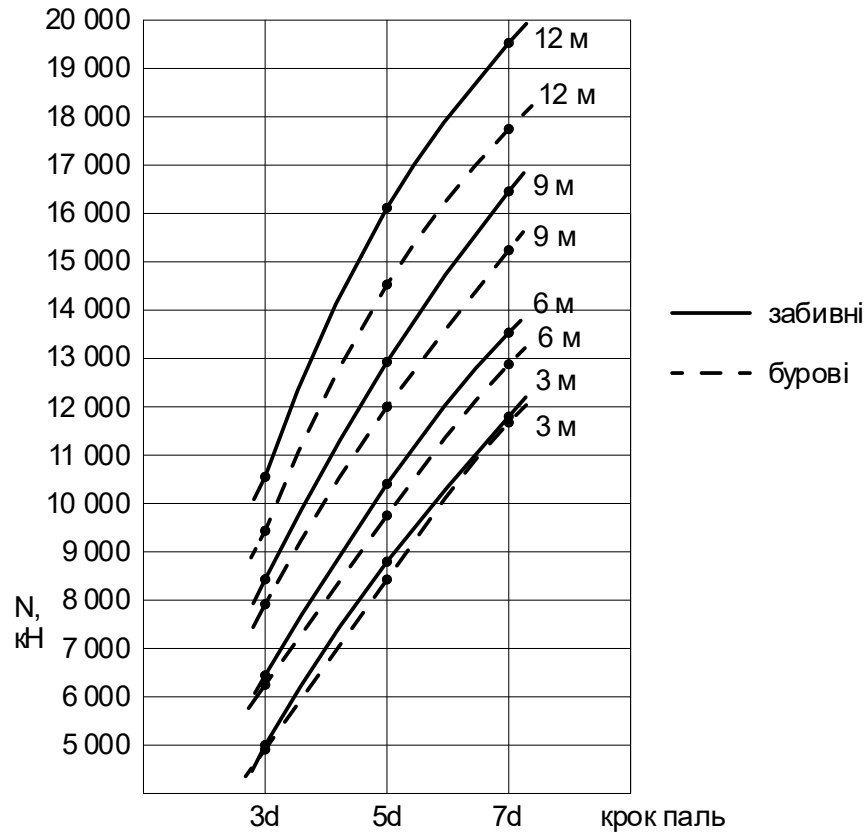
Для доведення цього припущення було проведено порівняння роботи кущів з забивних паль з роботою кущів з бурових паль з аналізом перерозподілу зусиль між елементами фундаментів (палями і низьким ростверком) при варіюванні довжини паль, кроку паль в ростверку і виду ґрунту при сталій кількості паль [2].

На рис. 3.39 наведено графіки залежності несучої здатності стовпчастого палевого фундаменту в цілому від кроку паль при довжині паль 3 м, 6 м, 9 м, 12 м для піщаних та глинистих ґрунтів. Бачимо закономірне зростання несучої здатності фундаменту при збільшенні довжини паль та їх кроку. Якісний характер зростання близький для різних видів ґрунту.

З рис. 3.39 також можна бачити, що несуча здатність фундаментів з забивних паль більше за несучу здатність фундаментів з бурових паль у тому самому ґрунті, але не на стільки, як цього можна було б очікувати. Для коротких паль зменшення несучої здатності при переході до бурових паль не перевищує 5%, а для довгих паль 10–12% у піщаних ґрунтах і 10–15% в глинистих ґрунтах. Найменша різниця спостерігається при кроці паль 3d і найбільша при кроці паль 7d. Водночас несуча здатність одиночних бурових паль набагато менша за несучу здатність одиночних забивних паль в аналогічних умовах, що можна бачити з таблиці 3.9.

Покращення умов роботи паль у складі фундаментів можна пояснити включенням у роботу низького ростверку, а також обтисненням паль ґрунтом навколопалевого простору. Оцінка несучої здатності паль у складі фундаментів у цих роботах виконується з припущення, що за рахунок додаткових напружень по бічній поверхні і в рівні нижнього кінця паль, спричинених навантаженням від ростверку і взаємним впливом паль, створюється ефект «обтиснення» ствола палі, що збільшує тертя по бічній поверхні і опір під нижнім кінцем палі. Таким чином не тільки ґрунт під ростверком додає опору вертикальним навантаженням, а і палі у складі фундаменту краще себе реалізують.

а)



б)

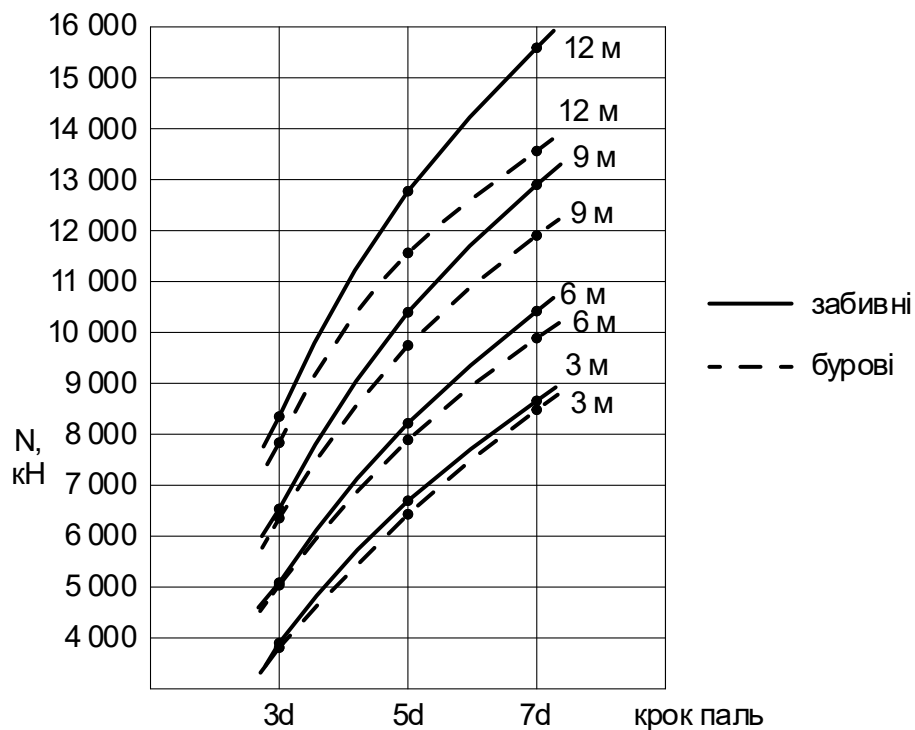


Рис. 3.39 – Графіки залежності несучої здатності стовпчастого пального фундаменту з забивних та бурових паль від кроку і довжини паль:
а) – для піщаного ґрунту; б) – для глинистого ґрунту

Таблиця 3.9 – Співвідношення несучих здатностей одиночних забивних і бурових паль в аналогічних умовах

Вид ґрунту	Вид палі	$L = 3$ м	$L = 6$ м	$L = 9$ м	$L = 12$ м
Піщаний ґрунт	Несуча здатність одиночної забивної палі, кН	415	778	1220	1740
	Несуча здатність одиночної бурової палі, кН	240	357	467	585
	Співвідношення несучих здатностей	1,72	2,18	2,61	2,97
Глинистий ґрунт	Несуча здатність одиночної забивної палі, кН	315	480	680	910
	Несуча здатність одиночної бурової палі, кН	215	300	405	522
	Співвідношення несучих здатностей	1,46	1,60	1,68	1,74

Слід відзначити, що таке покращення умов роботи паль у складі навантаженого фундаменту спостерігається тим більше, чим більше осідання фундаменту. За дослідями Бартоломея А. О., осідання пального фундаментів зростає не різко і при осіданнях стрічкових фундаментів 2 – 3 см графіки «осідання-навантаження» для фундаменту перетинають графіки одиночних паль (після перетинання паля фундаменту сприймає більше навантаження ніж одиночна).

На перших етапах досліджень при аналізі перерозподілу зусиль між елементами пального фундаменту визначались лише частка навантаження, що сприймає ростверк, і відповідно частка навантаження, яку сприймають палі [28]. Пізніше [23, 18] був зроблений висновок, що додатково аналізувати треба ступінь реалізації несучої здатності паль (відношення усередненого навантаження на палю у складі фундаменту до несучої здатності одиночної палі) та ступінь реалізації тиску під подошвою ростверка у порівнянні з реактивним опором під подошвою відповідного фундаменту мілкового закладання. Маючи при проектуванні пального фундаменту несучу здатність паль, визначену тим чи іншим шляхом, а також розрахунковий опір під подошвою ростверка як фундаменту мілкового закладання, можна за допомогою даних про ступінь реалізації несучої здатності кожного з елементів пального фундаменту вийти на його сумарну несучу здатність.

Для детального аналізу ступеню реалізації несучої здатності окремих елементів пального фундаменту і різниці у характері цієї реалізації при застосуванні паль різних видів при аналізі результатів моделювання визначались (табл. 3.5 – 3.8):

- частка ростверку у навантаженні на фундамент;
- усереднене навантаження на палю у складі фундаменту для порівняння з несучою здатністю одиночної палі (ступінь реалізації несучої здатності палі);
- реактивний опір під подошвою ростверку і ступінь його реалізації у порівнянні з реактивним опором під подошвою відповідного фундаменту мілкового закладання.

Ступінь реалізації несучої здатності палі і ступінь реалізації реактивного опору під подошвою ростверку у порівнянні з реактивним опором під подошвою відповідного фундаменту мілкового закладання за результати дослідження наведені у табл. 3.10 – 3.13.

Таблиця 3.10 – Ступінь реалізації несучої здатності палі та тиску під ростверком пального фундаменту у піщаному ґрунті при різній довжині і кроці забивних палі

Крок палі	L = 3 м		L = 6 м		L = 9 м		L = 12 м	
	для палі	для ростверку	для палі	для ростверку	для палі	для ростверку	для палі	для ростверку
3d	1,22	0,20	0,89	0,09	0,74	0,08	0,66	0,08
5d	1,84	0,32	1,24	0,28	1,04	0,26	0,92	0,28
7d	2,0	0,44	1,27	0,49	1,09	0,47	0,96	0,48

Таблиця 3.11 – Ступінь реалізації несучої здатності палі та тиску під ростверком пального фундаменту у глинистому ґрунті при різній довжині і кроці забивних палі

Крок палі	L = 3 м		L = 6 м		L = 9 м		L = 12 м	
	для палі	для ростверку	для палі	для ростверку	для палі	для ростверку	для палі	для ростверку
3d	1,25	0,19	1,12	0,11	1,04	0,09	0,99	0,09
5d	2,08	0,25	1,61	0,35	1,49	0,37	1,39	0,43
7d	2,09	0,50	1,74	0,52	1,82	0,32	1,50	0,61

Таблиця 3.12 – Ступінь реалізації несучої здатності палі та тиску під ростверком пального фундаменту у піщаному ґрунті при різній довжині і кроці бурових палі

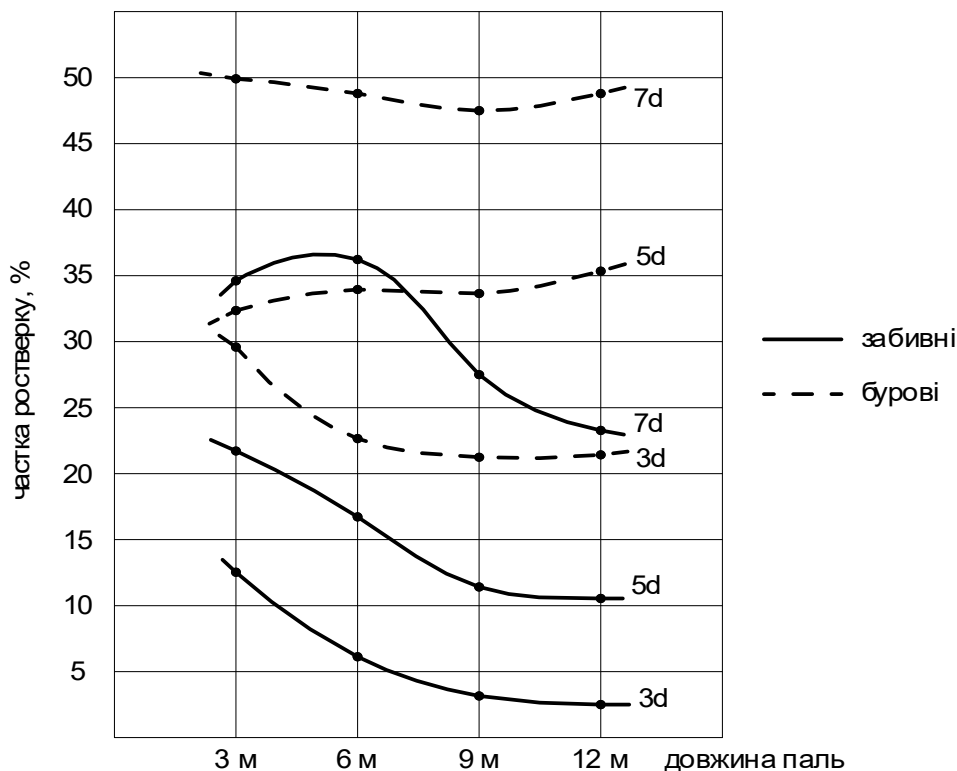
Крок палі	L = 3 м		L = 6 м		L = 9 м		L = 12 м	
	для палі	для ростверку	для палі	для ростверку	для палі	для ростверку	для палі	для ростверку
3d	1,62	0,460	1,5	0,442	1,49	0,536	1,40	0,642
5d	2,63	0,427	1,99	0,520	1,89	0,667	1,78	0,845
7d	2,72	0,605	2,07	0,645	1,89	0,751	1,73	0,890

Таблиця 3.13 – Ступінь реалізації несучої здатності палі та тиску під ростверком пального фундаменту у глинистому ґрунті при різній довжині і кроці бурових палі

Крок палі	L = 3 м		L = 6 м		L = 9 м		L = 12 м	
	для палі	для ростверку	для палі	для ростверку	для палі	для ростверку	для палі	для ростверку
3d	1,62	0,368	1,52	0,468	1,44	0,562	1,34	0,694
5d	2,65	0,387	2,16	0,599	1,94	0,757	1,86	0,844
7d	2,71	0,591	2,29	0,673	2,07	0,804	1,89	0,855

На рис. 3.40 наведені графіки залежності частки ростверку у навантаженні на стовпчастий пальовий фундамент від довжини і кроку паль для різних видів ґрунтів і різних видів паль.

а)



б)

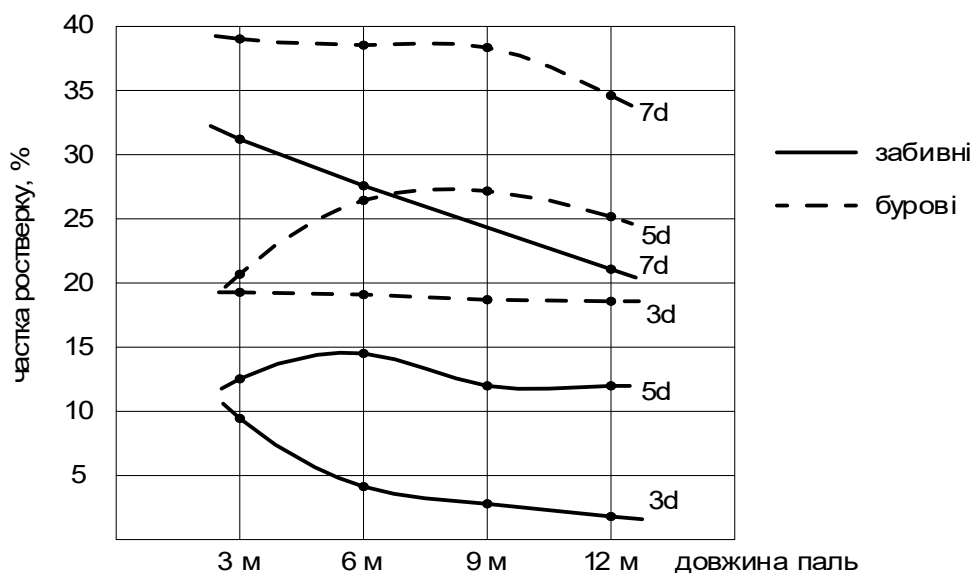


Рис. 3.40 – Графіки залежності частки ростверку у навантаженні на стовпчастий пальовий фундамент з забивних та бурових паль від довжини і кроку паль:

а) – для піщаного ґрунту; б) – для глинистого ґрунту

За результатами чисельного моделювання видно, що частка ростверку у фундаментах з бурових паль суттєво більша (20 – 50% для піщаних ґрунтів та 20 – 40% для глинистих). Для забивних паль ця частка складає 3 – 35% для піщаних ґрунтів та 2 – 30% для глинистих.

Характер залежності частки ростверку від геометричних параметрів куца для забивних і бурових паль аналогічний. Частка ростверку залежить переважно від осьової відстані між палями. Збільшення відстані між палями призводить до суттєвого збільшення частки ростверку, але для палювих куців збільшення відстані між палями призводить до збільшення загальної площі ростверку, що закономірно збільшує і реактивний опір ґрунту.

При збільшенні довжини палі частка ростверку у навантаженні на фундамент знижується, але несуттєво. Характер зміни частки ростверку аналогічний при роботі фундаментів у піщаному та глинистому ґрунті.

На рис. 3.41 наведені графіки залежності ступеню реалізації несучої здатності палі у складі пального фундаменту від довжини і кроку паль.

Також, як і частка ростверку, ступінь реалізації несучої здатності палі у складі пального фундаменту суттєво більший для фундаментів з бурових паль. Незалежно від виду ґрунту ступінь реалізації несучої здатності палі для фундаментів з бурових паль коливається в межах 1,4 – 2,7, а для забивних паль в межах 0,7 – 2,0. Для фундаментів з забивних паль при кроці 3d палі у складі куца у піщаних ґрунтах реалізують свою несучу здатність не повністю, у глинистих ґрунтах при кроці 3d ступінь реалізації несучої здатності паль близький до одиниці. Куці з бурових паль підвищують свою спроможність сприймати навантаження працюючи у групі навіть при мінімальному кроці.

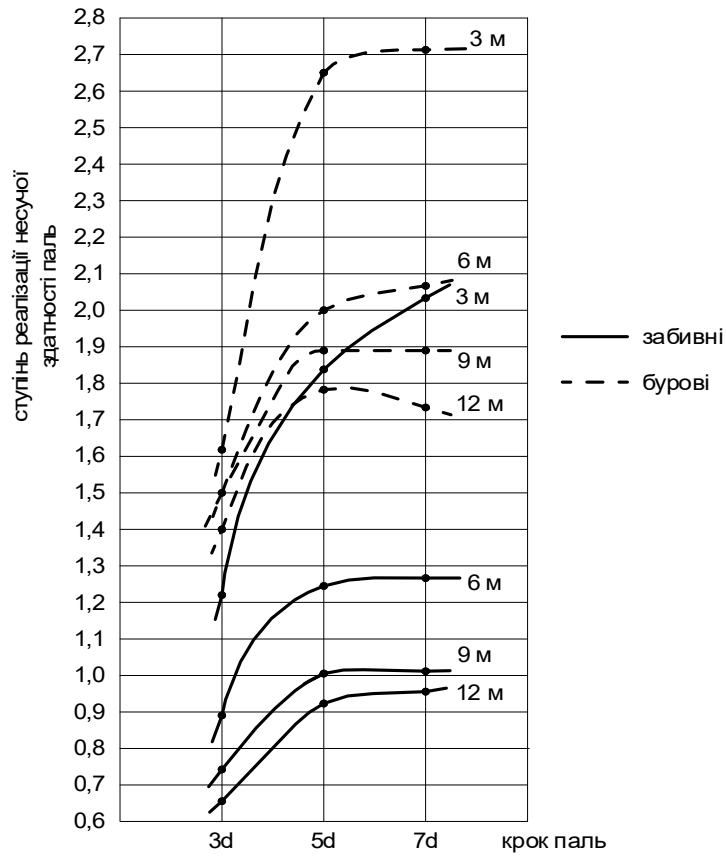
З табл. 3.10 – 3.13 та рис. 3.41 видно, що ступінь реалізації несучої здатності палі у складі пального фундаменту залежить від довжини і кроку паль. Реалізація несучої здатності паль у складі фундаменту зменшується із збільшенням їх довжини. При збільшенні кроку паль реалізація несучої здатності палі збільшується. Характер включення паль у роботу аналогічний при роботі у різних ґрунтах.

Навантаження, що припадає на ростверк пального фундаменту, менше у порівнянні з навантаженням на ростверк, як на фундамент мілкового закладання. На рис. 3.42 наведено графік залежності ступеня реалізації тиску під подошвою ростверку стовпчастого пального фундаменту від кроку паль різної довжини.

Ступінь реалізації тиску під подошвою ростверку, як і ступінь реалізації несучої здатності паль для фундаментів з бурових паль вища (в інтервалі 0,4 – 0,9 для фундаментів з бурових паль і 0,08 – 0,6 для фундаментів з забивних паль).

Як бачимо, довжина палі мало впливає на роботу ґрунту під ростверком забивних паль. Цей ґрунт краще включається у роботу при збільшенні кроку паль. Характер зміни ступеню реалізації тиску під подошвою ростверку аналогічний для фундаментів у глинистому та піщаному ґрунті.

а)



б)

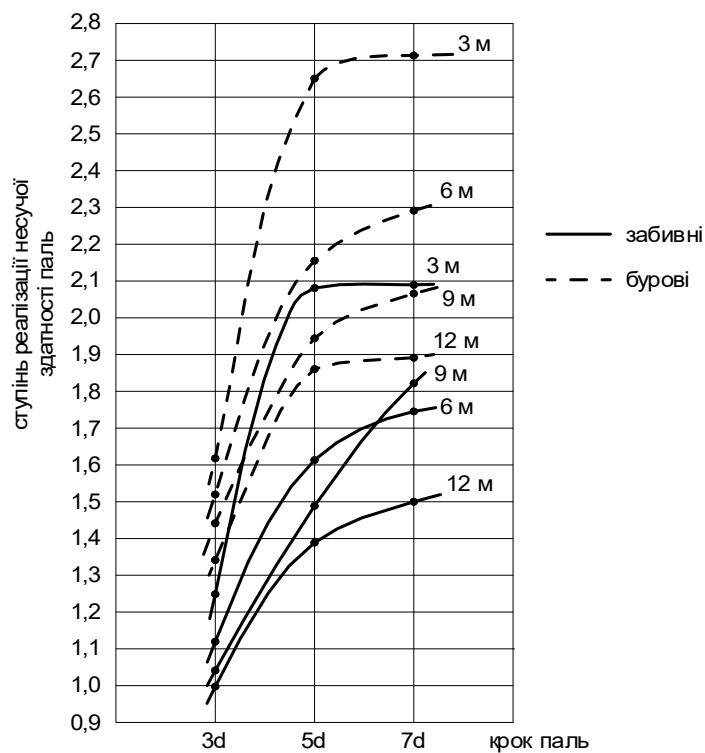


Рис. 3.41 – Залежність ступеню реалізації несучої здатності палі у складі фундаменту з забивних та бурових палей від кроку і довжини палей: а) – для піщаного ґрунту; б) – для глинистого ґрунту

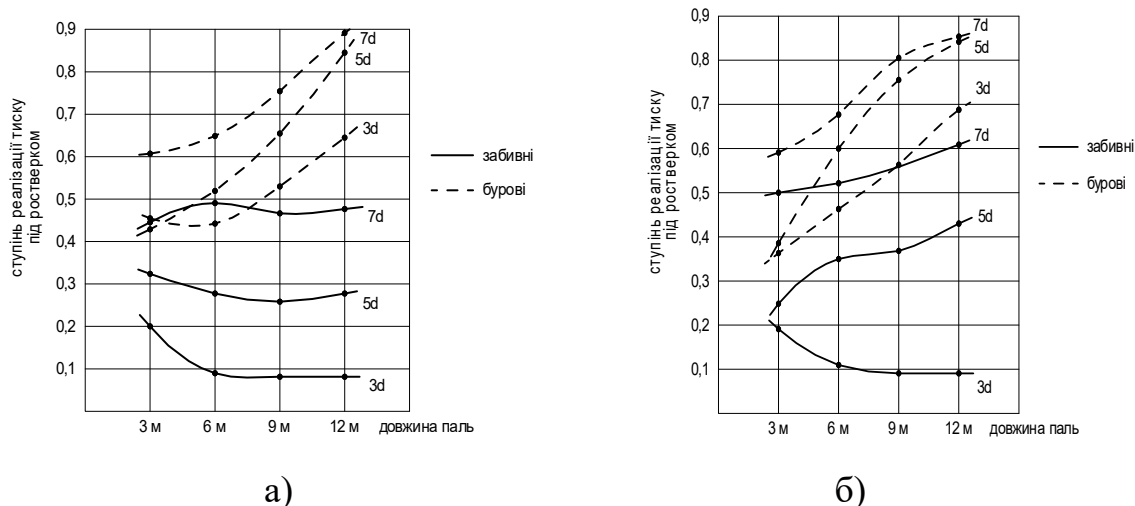


Рис. 3.42 – Залежність ступеню реалізації тиску під подошвою ростверку стовпчастого пальового фундаменту з забивних та бурових паль від кроку паль різної довжини:

а) – для піщаного ґрунту; б) – для глинистого ґрунту

Для фундаментів з бурових паль довжина палі вже суттєво впливає на роботу ґрунту під ростверком. При збільшенні довжини паль ростверк сприймає більше навантаження. Також як і для забивних паль ґрунт краще включається у роботу під ростверком при збільшенні кроку паль. Характер зміни ступеню реалізації тиску під подошвою ростверку аналогічний для фундаментів у глинистому та піщаному ґрунті.

Висновки за підрозділом 3.2

На підставі виконаних досліджень шляхом чисельно-математичного моделювання стовпчастих пальових фундаментів встановлено:

1. Несуча здатність пальового фундаменту з низьким ростверком як правило перевищує суму несучих здатностей одиночних паль. Виключення складають кущі з забивних паль при кроці 3d. При частому розміщенні забивних паль навіть включення у роботу ростверку не забезпечує позитивний кущовий ефект, оскільки палі в таких кущах частково виключаються з роботи. Фундаменти з бурових паль завжди показують більшу несучу здатність, ніж сума несучих здатностей одиночних паль.

2. Несуча здатність низького ростверку в системі пальового фундаменту:

- у пальових фундаментах з бурових паль майже вдвічі більша ніж у пальових фундаментах з забивних паль;
- збільшується, при збільшенні кроку між палями;
- збільшується, при збільшенні довжини паль в системі пальового фундаменту;
- характер залежності частки навантаження низького ростверку при роботі фундаменту в піщаному та глинистому середовищах, в залежності від довжини та кроку паль, змінюється не суттєво.

3. Робота палі в групі з низьким ростверком суттєво відрізняється від роботи одиночної палі. По мірі зростання навантаження осереднене навантаження на палю у складі фундаменту зростає.

Ступінь реалізації несучої здатності палі у складі пального фундаменту суттєво більший для фундаментів з бурових паль у порівнянні з фундаментами з забивних паль.

Для фундаментів з забивних паль при кроці 3d палі у складі куща у піщаних ґрунтах реалізують свою несучу здатність не повністю, у глинистих ґрунтах при кроці 3d ступінь реалізації несучої здатності паль близький до одиниці. Кущі з бурових паль підвищують свою несучу здатність, працюючи у групі, навіть при мінімальному кроці.

4. Ступінь реалізації несучої здатності палі у складі пального фундаменту залежить від довжини і кроку паль. Реалізація несучої здатності паль у складі фундаменту зменшується із збільшенням їх довжини. При збільшенні кроку паль реалізація несучої здатності палі збільшується. Характер включення паль у роботу аналогічний при роботі у різних ґрунтах.

5. Врахування реальної роботи паль і ростверку у складі пального фундаменту дозволяє підвищувати несучу здатність пального фундаменту в цілому і відповідно економити матеріальні та трудові ресурси під час проведення будівельних робіт.

6. Оскільки палові фундаменти з бурових паль значно більш інтенсивно підвищують свою несучу здатність за рахунок спільної роботи їх елементів під навантаженням у порівнянні з паловими фундаментами з забивних паль, то при врахуванні цієї спільної роботи палові фундаменти з бурових паль стають конкурентоспроможними з аналогічними фундаментами з забивних паль.

3.3 Моделювання впливу різних факторів на НДС системи «фундамент – палі – основа» для стовпчастого пального фундаменту

3.3.1 Програма чисельного моделювання впливу різних факторів на перерозподіл зусиль між елементами стовпчастого пального фундаменту

Додатковими факторами, вплив яких на перерозподіл зусиль між палями стовпчастих палових фундаментів досліджувався у даному підрозділі, є:

- механічні характеристики ґрунту основи;
- неоднорідність ґрунтової основи пального фундаменту;
- кількість паль у групі.

Моделльні експерименти розділено на такі підгрупи:

V – моделювання сумісної роботи фундаменту і паль ($n = 9$ шт.), що влаштовані без виймання ґрунту, зі сталим кроком 3d та довжиною 6 м у різних видах ґрунту з різними механічними властивостями.

Для визначення залежності напружено-деформованого стану стовпчастого пального фундаменту залежно від ґрунтових умов, був

змодельований фундамент з однаковим кроком та довжиною паль. Вибір ґрунтових умов був здійснений таким чином, щоб охопити характерні діапазони реального змінювання комплексу фізико-механічних характеристик. Характеристики прийнятих ґрунтів:

- 1) пісок 1, $\gamma = 16,3 \text{ кН/м}^3$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 43^\circ$, $E = 50 \text{ МПа}$;
- 2) пісок 2, $\gamma = 17,0 \text{ кН/м}^3$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 38^\circ$, $E = 40 \text{ МПа}$;
- 3) пісок 3, $\gamma = 16,6 \text{ кН/м}^3$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 32^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$;
- 4) пісок 4, $\gamma = 17,0 \text{ кН/м}^3$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 26^\circ$, $E = 11 \text{ МПа}$;
- 5) супісок, $\gamma = 19,8 \text{ кН/м}^3$, $c = 15 \text{ кПа}$, $\varphi = 27^\circ$, $E = 16 \text{ МПа}$;
- 6) суглинок, $\gamma = 19,8 \text{ кН/м}^3$, $c = 28 \text{ кПа}$, $\varphi = 22^\circ$, $E = 19 \text{ МПа}$;
- 7) глина 1, $\gamma = 17,0 \text{ кН/м}^3$, $c = 81 \text{ кПа}$, $\varphi = 21^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$;
- 8) глина 2, $\gamma = 17,0 \text{ кН/м}^3$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 7^\circ$, $E = 7 \text{ МПа}$;
- 9) глинистий 1, $\gamma = 16,7 \text{ кН/м}^3$, $c = 28 \text{ кПа}$, $\varphi = 30^\circ$, $E = 32 \text{ МПа}$;
- 10) глинистий 2, $\gamma = 16,0 \text{ кН/м}^3$, $c = 28 \text{ кПа}$, $\varphi = 15^\circ$, $E = 12 \text{ МПа}$;
- 11) глинистий 3, $\gamma = 16,7 \text{ кН/м}^3$, $c = 28 \text{ кПа}$, $\varphi = 28^\circ$, $E = 19 \text{ МПа}$;
- 12) глинистий 4, $\gamma = 16,0 \text{ кН/м}^3$, $c = 28 \text{ кПа}$, $\varphi = 7^\circ$, $E = 7 \text{ МПа}$.

Програму моделювання наведено в табл. 3.14.

Таблиця 3.14 – Програма моделювання сумісної роботи ростверку і паль стовпчастого пальового фундаменту для підгрупи V

Група дослідів	Довжина та поперечний розмір паль	Крок і кількість паль (n)	Ґрунтові умови
1	$L = 6 \text{ м}$, $d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	пісок 1, $\gamma = 16,3 \text{ кН/м}^3$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 43^\circ$, $E = 50 \text{ МПа}$
2	$L = 6 \text{ м}$, $d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	пісок 2, $\gamma = 17,0 \text{ кН/м}^3$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 38^\circ$, $E = 40 \text{ МПа}$
3	$L = 6 \text{ м}$, $d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	пісок 3, $\gamma = 16,6 \text{ кН/м}^3$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 32^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$
4	$L = 6 \text{ м}$, $d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	пісок 4, $\gamma = 17,0 \text{ кН/м}^3$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 26^\circ$, $E = 11 \text{ МПа}$
5	$L = 6 \text{ м}$, $d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	супісок, $\gamma = 19,8 \text{ кН/м}^3$, $c = 15 \text{ кПа}$, $\varphi = 27^\circ$, $E = 16 \text{ МПа}$
6	$L = 6 \text{ м}$, $d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	суглинок, $\gamma = 19,8 \text{ кН/м}^3$, $c = 28 \text{ кПа}$, $\varphi = 22^\circ$, $E = 19 \text{ МПа}$
7	$L = 6 \text{ м}$, $d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	глина 1, $\gamma = 17,0 \text{ кН/м}^3$, $c = 81 \text{ кПа}$, $\varphi = 21^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$
8	$L = 6 \text{ м}$, $d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	глина 2, $\gamma = 17,0 \text{ кН/м}^3$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 7^\circ$, $E = 7 \text{ МПа}$

Продовження таблиці 3.14

Група дослідів	Довжина та поперечний розмір паль	Крок і кількість паль (n)	Ґрунтові умови
9	$L = 6 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	глинистий 1, $\gamma = 16,7 \text{ кН/м}^3$, $c = 28 \text{ кПа}, \varphi = 30^\circ, E = 32 \text{ МПа}$
10	$L = 6 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	глинистий 2, $\gamma = 16,0 \text{ кН/м}^3$, $c = 28 \text{ кПа}, \varphi = 15^\circ, E = 12 \text{ МПа}$
11	$L = 6 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	глинистий 3, $\gamma = 16,7 \text{ кН/м}^3$, $c = 28 \text{ кПа}, \varphi = 28^\circ, E = 19 \text{ МПа}$
12	$L = 6 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	глинистий 4, $\gamma = 16,0 \text{ кН/м}^3$, $c = 28 \text{ кПа}, \varphi = 7^\circ, E = 7 \text{ МПа}$

VI – моделювання сумісної роботи фундаменту і паль з кроком 3d, 5d, 7d, 9d довжиною 6 м, 9 м та 12 м на неоднорідному ґрунті з наступними характеристиками: суглинок тугопластичний $\gamma = 16,5 \text{ кН/м}^3$, $c = 5 \text{ кПа}$, $\varphi = 19^\circ$, $E = 9,2 \text{ МПа}$, супісок $\gamma = 19,2 \text{ кН/м}^3$, $c = 14 \text{ кПа}$, $\varphi = 25^\circ$, $E = 9,9 \text{ МПа}$, пісок $\gamma = 20,2 \text{ кН/м}^3$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 39^\circ$, $\nu = 0,3$, $E = 42 \text{ МПа}$ (рис. 3.43). Програму моделювання наведено в табл. 3.15.

Таблиця 3.15 – Програма моделювання сумісної роботи ростверку і паль для підгрупи VI

Група дослідів	Довжина та поперечний розмір паль	Крок і кількість паль (n)	Ґрунтові умови (рис. 1.35)	
			Під вістрям паль	Під ростверком
1	$L = 6 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	суглинок тугопластичний $\gamma = 16,5 \text{ кН/м}^3$, $c = 5 \text{ кПа}, \varphi = 19^\circ$, $E = 9,2 \text{ МПа}$,	суглинок тугопластичний $\gamma = 16,5 \text{ кН/м}^3$, $c = 5 \text{ кПа}, \varphi = 19^\circ$, $E = 9,2 \text{ МПа}$,
		5d, 9 шт		
		7d, 9 шт		
		9d, 9 шт		
2	$L = 9 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	супісок $\gamma = 19,2 \text{ кН/м}^3$, $c = 14 \text{ кПа}, \varphi = 25^\circ$, $E = 9,9 \text{ МПа}$,	суглинок тугопластичний $\gamma = 16,5 \text{ кН/м}^3$, $c = 5 \text{ кПа}, \varphi = 19^\circ$, $E = 9,2 \text{ МПа}$,
		5d, 9 шт		
		7d, 9 шт		
		9d, 9 шт		
3	$L = 12 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	3d, 9 шт	пісок $\gamma = 20,2 \text{ кН/м}^3$, $c = 2 \text{ кПа}, \varphi = 39^\circ$, $\nu = 0,3, E = 42 \text{ МПа}$	суглинок тугопластичний $\gamma = 16,5 \text{ кН/м}^3$, $c = 5 \text{ кПа}, \varphi = 19^\circ$, $E = 9,2 \text{ МПа}$
		5d, 9 шт		
		7d, 9 шт		
		9d, 9 шт		

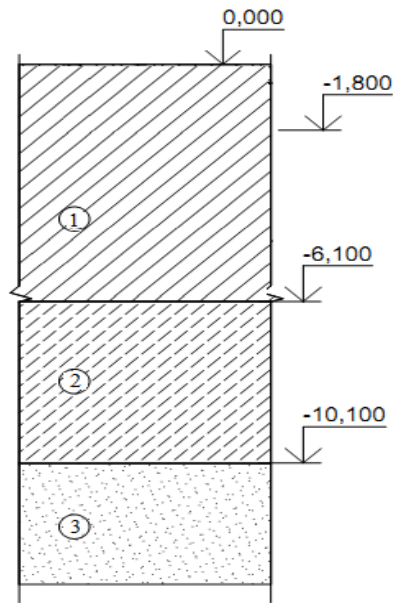


Рис. 3.43 – Інженерно-геологічний розріз неоднорідного ґрунту

VII – моделювання сумісної роботи фундаменту і паль поперечним перерізом $0,3 \times 0,3$ м зі сталим кроком $3d$, довжиною 9 м в однорідних ґрунтових умовах та різною кількістю паль. Характеристики однорідного ґрунту розглядаються у двох варіантах:

- пісок дрібний, $\gamma = 18,6 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,67$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 32^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$;
- суглинок тугопластичний, $\gamma = 18,7 \text{ кН/м}^3$, $c = 23 \text{ кПа}$, $\varphi = 21^\circ$, $\nu = 0,35$, $E = 14 \text{ МПа}$.

Програму моделювання наведено в табл. 3.16.

Таблиця 3.16 – Програма моделювання сумісної роботи ростверку і паль для підгрупи VII

Група дослідів	Кількість паль	Розмір ростверку в плані	Вид ґрунту
Пальові фундаменти	4	1,5×1,5 м	піщаний
			глинистий
	5	1,8×1,8 м	піщаний
			глинистий
	6	1,5×2,4 м	піщаний
			глинистий
	9	2,4×2,4 м	піщаний
			глинистий
	12	2,4×3,3 м	піщаний
			глинистий
	16	3,3×3,3 м	піщаний
			глинистий

Продовження таблиці 3.16

Група дослідів	Кількість паль	Розмір ростверку в плані	Вид ґрунту
Ростверки як фундаменти мілкового закладання	-	1,5×1,5 м	піщаний
			глинистий
	-	1,8×1,8 м	піщаний
			глинистий
	-	1,5×2,4 м	піщаний
			глинистий
	-	2,4×2,4 м	піщаний
			глинистий
	-	2,4×3,3 м	піщаний
			глинистий
	-	3,3×3,3 м	піщаний
			глинистий

3.3.2 Результати чисельного моделювання впливу різних факторів на перерозподіл зусиль між елементами стовпчастого пальового фундаменту

V – моделювання сумісної роботи фундаменту і паль ($n = 9$ шт.), що влаштовані без виймання ґрунту, зі сталим кроком $3d$ та довжиною 6 м у різних видах ґрунту [27].

Метою випробувань було варіювання видом ґрунту. Стовпчастий паловий фундамент з кількістю паль $n = 9$ шт. однакових розмірів, з однаковими кроком паль $3d$, поперечним перерізом паль $0,3$ м та довжиною 6 м змодельовано в різних видах ґрунту (табл. 3.14).

Для аналізу отриманих результатів були прийняті такі передумови і параметри:

- модель ґрунту основи – пружно-пластична модель Кулона-Мора;
- модель стовпчастого фундаменту – забивні палі поперечним перерізом 30×30 см;
- крок паль $3d$ довжиною 6 м;
- розміри розрахункової області в плані 10×10 м;
- за навантаження, що сприймається фундаментом, приймається значення зовнішнього навантаження без урахування ваги ростверку на різних етапах навантаження: при деформаціях 4 см та 10 см;
- частка навантаження, що сприймається ростверком, визначається як добуток реактивного опору основи на площу ростверку без урахування площі паль.

Результати, отримані при чисельному моделюванні показали, що частка навантаження, яка сприймається ростверком становить від $2,0\%$ до $6,0\%$ для фундаментів з деформацією 4 см та від $2,0\%$ до $7,0\%$ – з деформацією 10 см.

На рис. 3.44 показано графік залежності між часткою навантаження, що припадає на ростверк, та питомим зчепленням для всіх змодельованих ґрунтів (і піщаних, і глинистих разом).

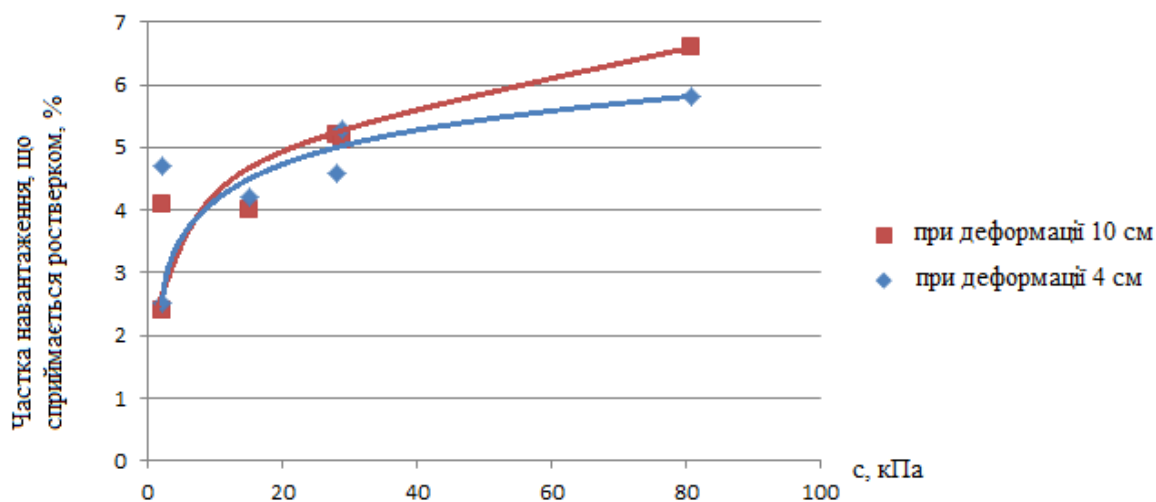


Рис. 3.44 – Залежність частки навантаження, що сприймається ростверком, від питомого зчеплення ґрунту

З рис. 3.44 видно, що частка навантаження, яка передається на ростверк, зростає із збільшенням питомого зчеплення. Якщо розглянути цю залежність при деформації фундаменту 4 см та 10 см, то можна побачити, що при більшій деформації ростверк краще включається в роботу.

На рис. 3.45 наведено графік залежності між часткою навантаження, що припадає на ростверк та кутом внутрішнього тертя для всіх змодельованих ґрунтів (і піщаних, і глинистих разом).

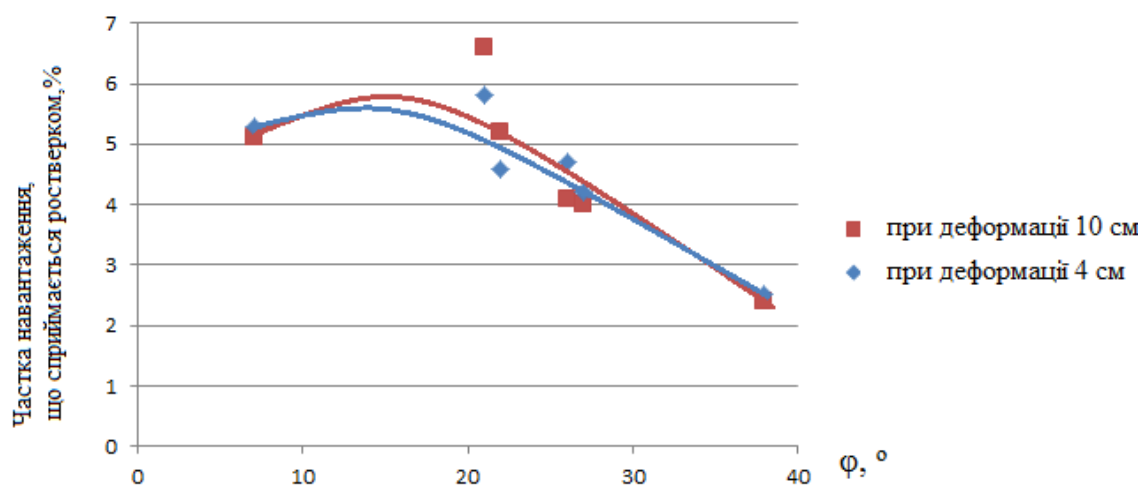


Рис. 3.45 – Залежність частки навантаження, що сприймається ростверком від кута внутрішнього тертя

З рис. 3.45 видно, що при збільшенні кута внутрішнього тертя ґрунту частка навантаження, що сприймається ростверком у складі стовпчастого пальового фундаменту, зменшується і коливається від 7 – 2%. Зменшення частки ростверку обумовлюється збільшенням роботи паль по бічній поверхні. По відношенню до деформації фундаменту: при більшій деформації (10 см) ростверк сприймає більше навантаження, ніж при меншій деформації (4 см).

Розглянемо частку навантаження, що передається на ростверк у складі стовпчастого пальового фундаменту в залежності від модуля деформації ґрунту (для піщаних та глинистих разом) (рис. 3.46).

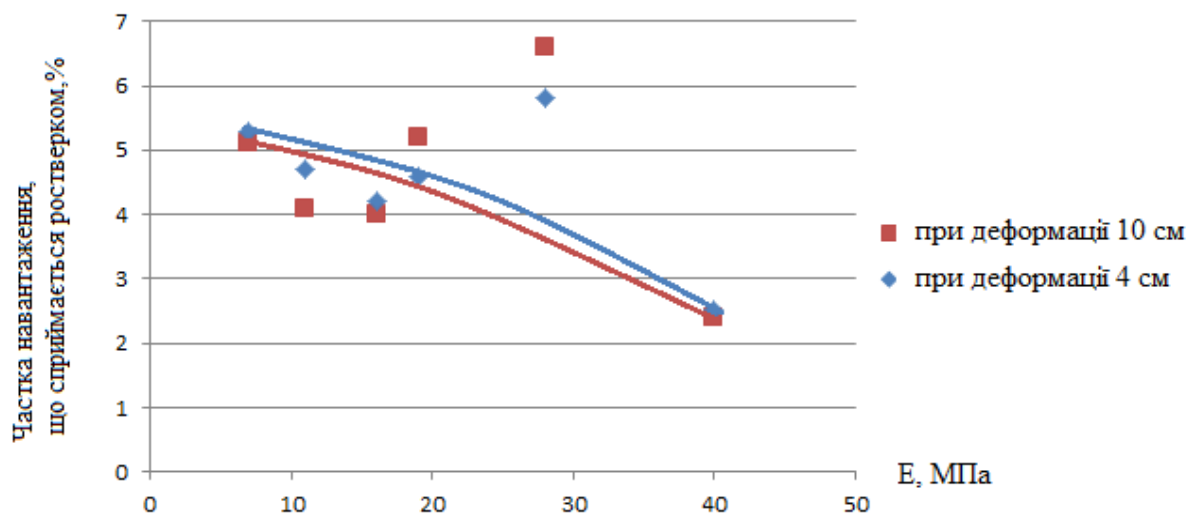


Рис. 3.46 – Залежність частки навантаження, що сприймається ростверком, від модуля деформації

З рис. 3.46 помітно, що із збільшенням модуля деформації ґрунту, частка ростверку на деяких ділянках зростає, а на інших – спадає, але все ж таки помітна тенденція зменшення частки ростверку. На різних етапах навантаження частка ростверку мало змінюється та складає 7 – 2%.

Розглянемо вплив характеристик міцності ґрунту на частку ростверку окремо у піщаних та в глинистих ґрунтах.

На рис. 3.47 наведено частку ростверку, що включається в роботу, залежно від кута внутрішнього тертя – φ , ° у піщаних ґрунтах при деформації 4 см та 10 см, що відображає різні етапи навантаження. Питоме зчеплення у змодельованих ґрунтах прийнято сталим.

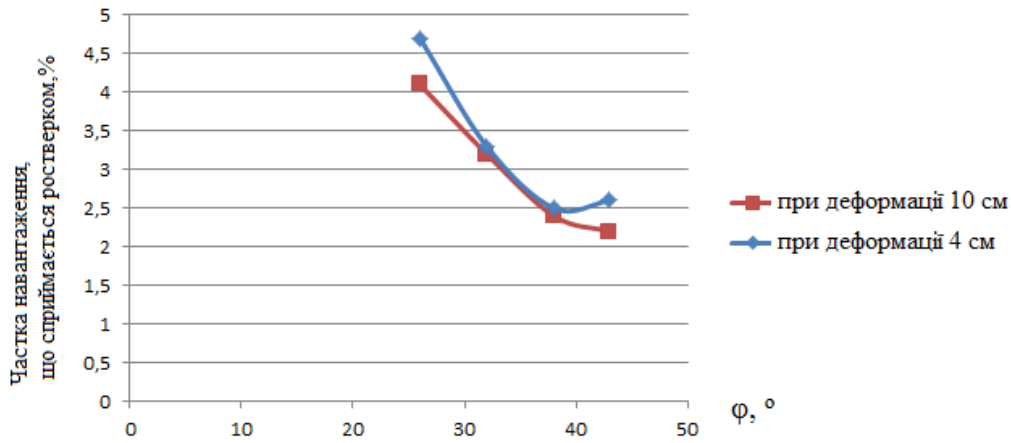


Рис. 3.47 – Залежність частки навантаження, що сприймається ростверком, від кута внутрішнього тертя у піщаних ґрунтах

Як видно з рис. 3.47, при збільшенні кута внутрішнього тертя ґрунту та деформації, робота ростверку у складі фундаменту зменшується. На різних етапах навантаження частка ростверку практично не змінюється.

Графік залежності частки навантаження від модуля деформації – E , МПа, у піщаних ґрунтах показаний на рис. 3.48.

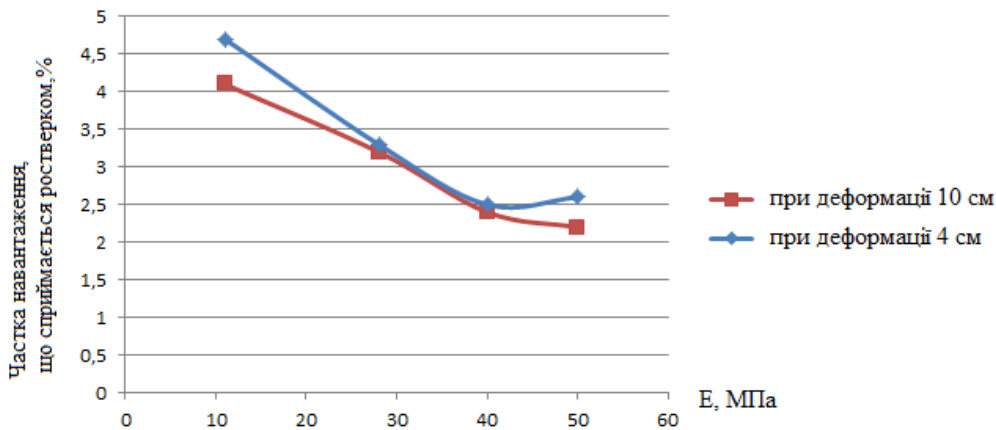


Рис. 3.48 – Залежність частки навантаження, що сприймається ростверком, від модуля деформації у піщаних ґрунтах

З рис. 3.48 помітно, що збільшення модуля деформації у піщаних ґрунтах призводить до зменшення частки навантаження, що передається на ростверк стовпчастого пальового фундаменту. На різних етапах навантаження частка ростверку залишається майже незмінною і становить від 5% до 2% загального навантаження фундаменту.

Розглянемо, як змінюється частка навантаження, що сприймається ростверком, у складі стовпчастого пальового фундаменту від кута внутрішнього тертя при сталому питомому щепленні у глинистих ґрунтах (рис. 3.49).

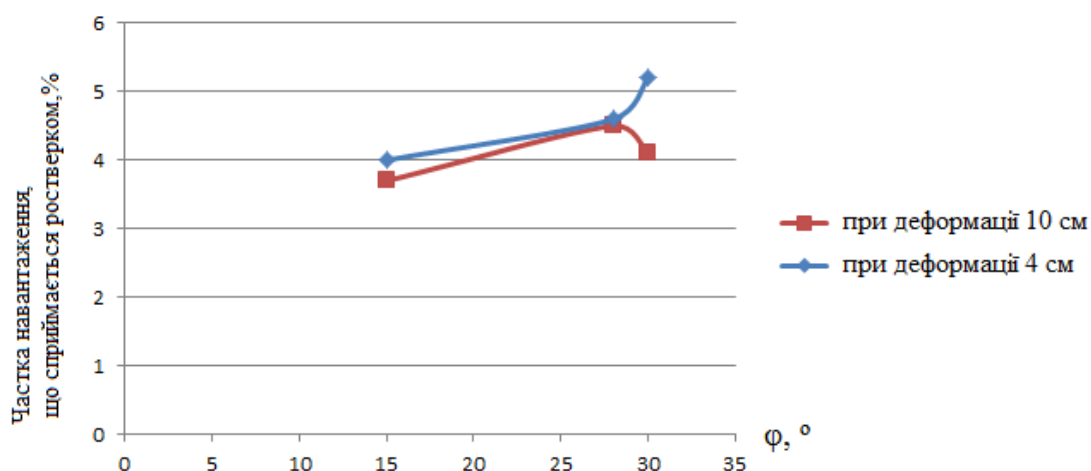


Рис. 3.49 – Залежність частки навантаження, що сприймається ростверком, від кута внутрішнього тертя у глинистих ґрунтах

З рис. 3.49 видно, що при збільшенні кута внутрішнього тертя у глинистих ґрунтах частка навантаження, що сприймається ростверком, у складі стовпчастого пальового фундаменту зростає і становить 3,5 – 6% навантаження фундаменту. При збільшенні навантаження частка ростверку зменшується.

На рис. 3.50 наведено графік залежності частки навантаження, що сприймається ростверком, у складі стовпчастого пальового фундаменту від модуля деформації глинистого ґрунту.

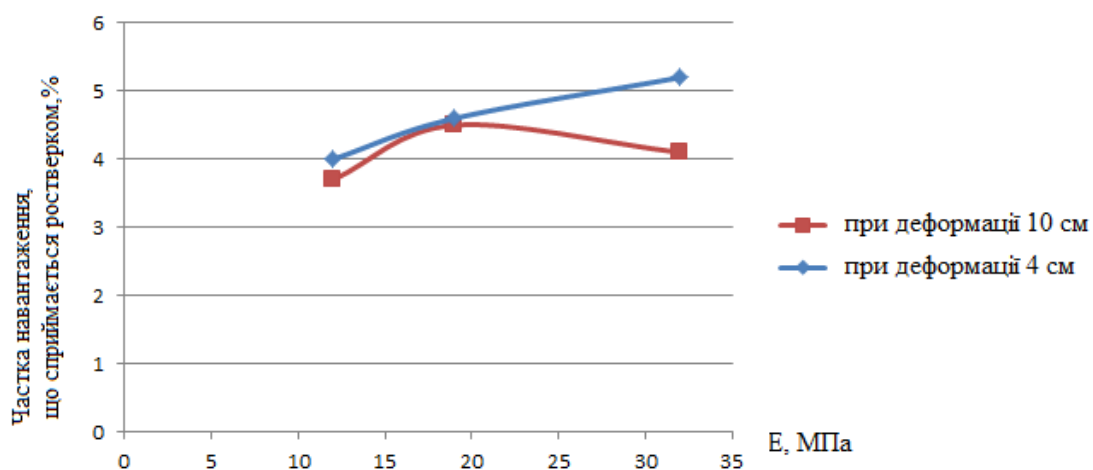


Рис. 3.50 – Залежність частки навантаження, що сприймається ростверком, від модуля деформації у глинистих ґрунтах

Збільшення модуля деформації у глинистих ґрунтах призводить до зростання частки навантаження, що сприймається ростверком, у складі стовпчастого пальового фундаменту лише при невеликих навантаженнях на фундамент: на етапі, коли деформації досягають 4 см. При деформації 10 см не прослідковується залежності частки ростверку від модуля деформації.

Оскільки на несучу здатність ростверку та включення його в роботу впливають характеристики міцності ґрунту, проведено розрахунок частки навантаження в залежності від f , кПа – розрахункового опору ґрунту по бічній поверхні палі, який враховує як кут внутрішнього тертя, так і питоме зчеплення [12] та визначається за формулою

$$f_i = \sigma_{zq,i} \frac{\nu_i}{1-\nu_i} \operatorname{tg} \varphi_{l,i} + c_{l,i} \quad (3.5)$$

де $\sigma_{zq,i}$ – напруження в середині ґрунту i -го розрахункового шару ґрунтової основи, кПа;

ν_i – коефіцієнт Пуассона в середині ґрунту i -го розрахункового шару ґрунтової основи.

На рис. 3.51 наведено графіки залежності частки навантаження, що сприймається ростверком, від розрахункового опору ґрунту по бічній поверхні палі у піщаних ґрунтах на глибині 1 м під подошвою фундаменту, на різних етапах навантаження, а саме: при деформації 4 см та 10 см.

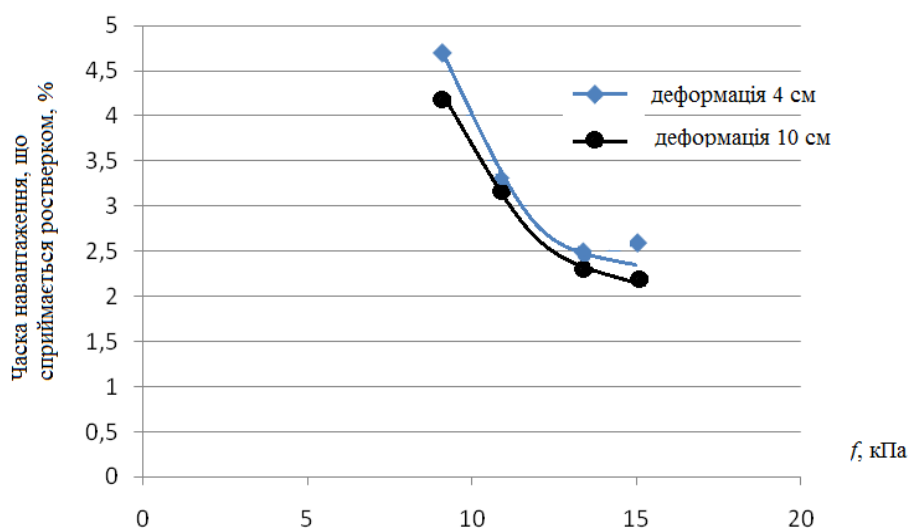


Рис. 3.51 – Частка навантаження, що сприймається ростверком, у складі стовпчастого пальового фундаменту в залежності від розрахункового опору ґрунту по бічній поверхні палі у піщаних ґрунтах на глибині 1 м під подошвою

Помітно, що зі збільшенням міцності ґрунту та деформацій, несуча здатність ростверку має зменшувальний характер.

Розглянемо, як впливають на частку ростверку стовпчастого пальового фундаменту сили граничного опору основи.

Сили граничного опору основи, складеної нескельними ґрунтами в стабілізованому стані, визначається за формулою [12]

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi_1 + c_1 \quad (3.6)$$

де φ_1 – кут внутрішнього тертя ґрунту, °;

c_1 – питоме зчеплення ґрунту, кПа.

Цей параметр також є таким, що сукупно враховує характеристики міцності ґрунту.

Графіки залежності частки навантаження, що сприймається ростверком, від граничного опору основи наведені на рис. 3.52.

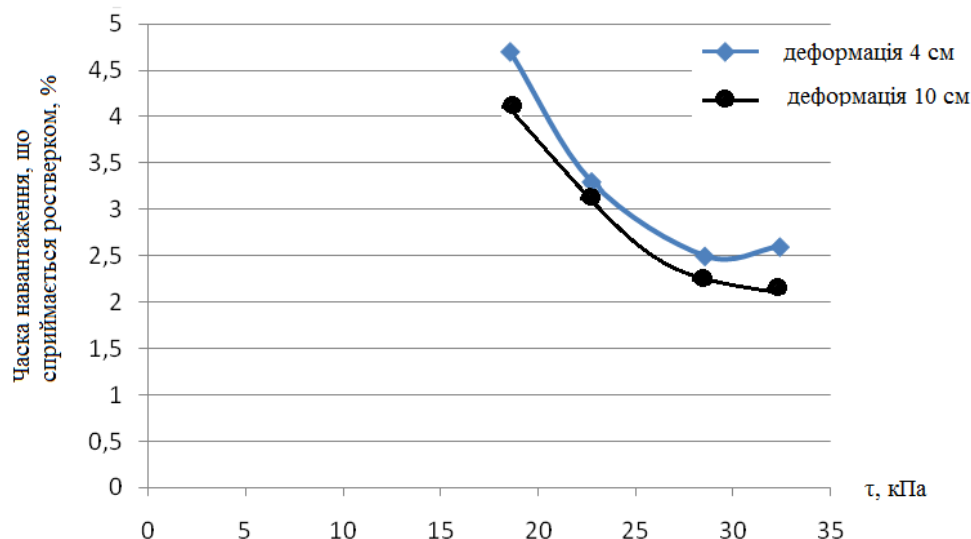


Рис. 3.52 – Частка навантаження, що сприймається ростверком, у складі стовпчастого пальового фундаменту в залежності від граничного опору основи у піщаних ґрунтах на глибині 1 м під подошвою

Із рис 3.52 видно, що збільшення граничного опору піщаних ґрунтів основи призводить до зменшення частки ростверку. Різні етапи навантаження: при досягненні деформації 4 см та 10 см, практично не впливають на частку навантаження, що передається на ростверк.

Розглянемо вплив розрахункового опору ґрунту по бічній поверхні палі та граничного опору основи у глинистих ґрунтах на частку навантаження, що сприймається ростверком, у складі стовпчастого пальового фундаменту на різних етапах навантаження.

На рис. 3.53 показано, що при збільшенні розрахункового опору глинистих ґрунтів по бічній поверхні палі частка ростверку зростає. При цьому ростверк включається в роботу краще при більшій деформації.

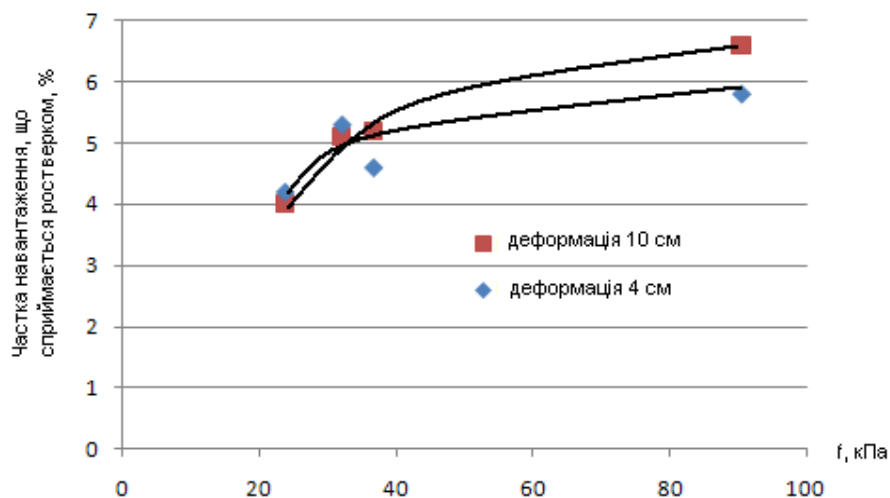


Рис. 3.53 – Частка навантаження, що сприймається ростверком, у складі стовпчастого пальового фундаменту в залежності від розрахункового опору ґрунту по бічній поверхні палі у глинистих ґрунтах на глибині 1 м під подошвою

Частка навантаження, що сприймається ростверком, в залежності від граничного опору основи у глинистих ґрунтах на відстані 1 м під подошвою наведена на рис. 3.54. Помітно, що із збільшенням граничного опору основи частка ростверку збільшується і становить від 4% до 7%.

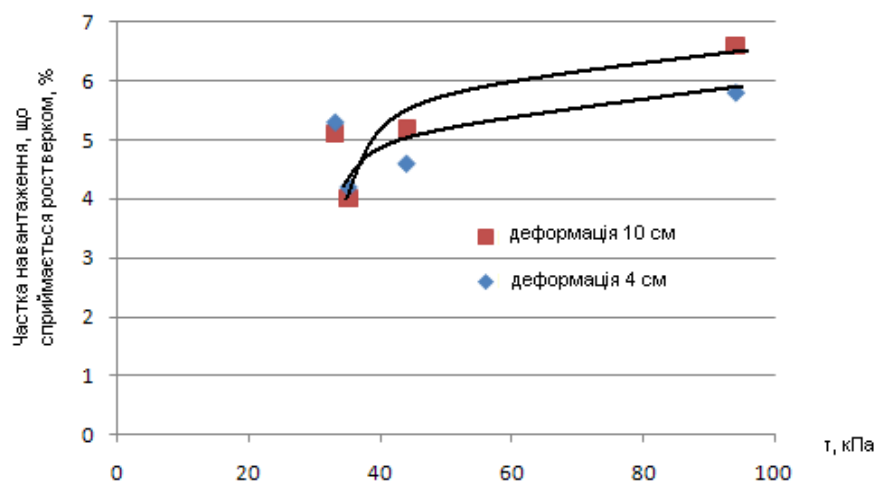


Рис. 3.54 – Частка навантаження, що сприймається ростверком, у складі стовпчастого пальового фундаменту в залежності від граничного опору основи у глинистих ґрунтах на глибині 1 м під подошвою

Отже, виявлено залежність сумісної роботи ростверку та паль у стовпчастому пальовому фундаменті від характеристик ґрунту: кута внутрішнього тертя, питомого зчеплення та модуля деформації.

При збільшенні питомого зчеплення ґрунту частка навантаження, що сприймається ростверком, зростає на різних етапах навантаження незалежно від виду ґрунту. При цьому ростверк краще включається в роботу при більшому навантаженні.

У піщаних ґрунтах частка навантаження, що сприймається ростверком, зменшується зі збільшення кута внутрішнього тертя та модуля деформації.

У глинистих ґрунтах частка навантаження, що сприймається ростверком, зростає зі збільшення кута внутрішнього тертя та модуля деформації.

Отримано, що ростверк краще включається в роботу при більшій деформації фундаменту.

У піщаних ґрунтах частка ростверку при збільшенні опору ґрунту по бічній поверхні та граничного опору ґрунту зменшується.

У глинистих ґрунтах частка ростверку при збільшенні опору ґрунту по бічній поверхні та граничного опору ґрунту зростає.

VI – моделювання сумісної роботи фундаменту і паль з кроком 3d, 5d, 7d, 9d довжиною 6 м, 9 м та 12 м на неоднорідному ґрунті з наступними характеристиками: суглинок тугопластичний $\gamma=16,5$ кН/м³, $c=5$ кПа, $\varphi=19^\circ$, $E=9,2$ МПа, супісок $\gamma=19,2$ кН/м³, $c=14$ кПа, $\varphi=25^\circ$, $E=9,9$ МПа, пісок $\gamma=20,2$ кН/м³, $c=2$ кПа, $\varphi=39^\circ$, $\nu=0,3$, $E=42$ МПа (рис. 3.9) Програму моделювання наведено в табл. 3.15.

Неоднорідність ґрунту полягає у наступному: під вістрям паль при збільшенні довжини ґрунт міняється, а під подошвою ростверку знаходиться однаковий ґрунт (суглинок).

При моделюванні були прийняті наступні передумови і параметри:

- модель ґрунту основи – пружно-пластична модель Кулона-Мора;
- модель стовпчастого пальового фундаменту – забивні палі поперечним перерізом 30×30 см та ростверк товщиною 500 мм;
- крок паль довжиною 6 м 3d, 5d, 7d та 9d;
- крок паль довжиною 9 м 3d, 5d, 7d та 9d;
- крок паль довжиною 12 м 3d, 5d, 7d та 9d;
- розміри розрахункової області в плані 10×10 м;
- за навантаження, що сприймається фундаментом, приймається значення зовнішнього навантаження без урахування ваги ростверку при деформаціях, що не перевищують допустимого значення, 4 см та 10 см;
- частка навантаження, що сприймається ростверком, визначається як добуток реактивного опору основи на площу ростверку без урахування площі паль;
- частка навантаження, що сприймається палями, визначається як різниця між загальним навантаженням на фундамент і навантаженням, що сприймається ростверком.

На рисунку 3.55 наведено приклад характерного графіку деформування основи стовпчастого пальового фундаменту з 9-ти паль при їх довжині 6 м та різному кроці паль.

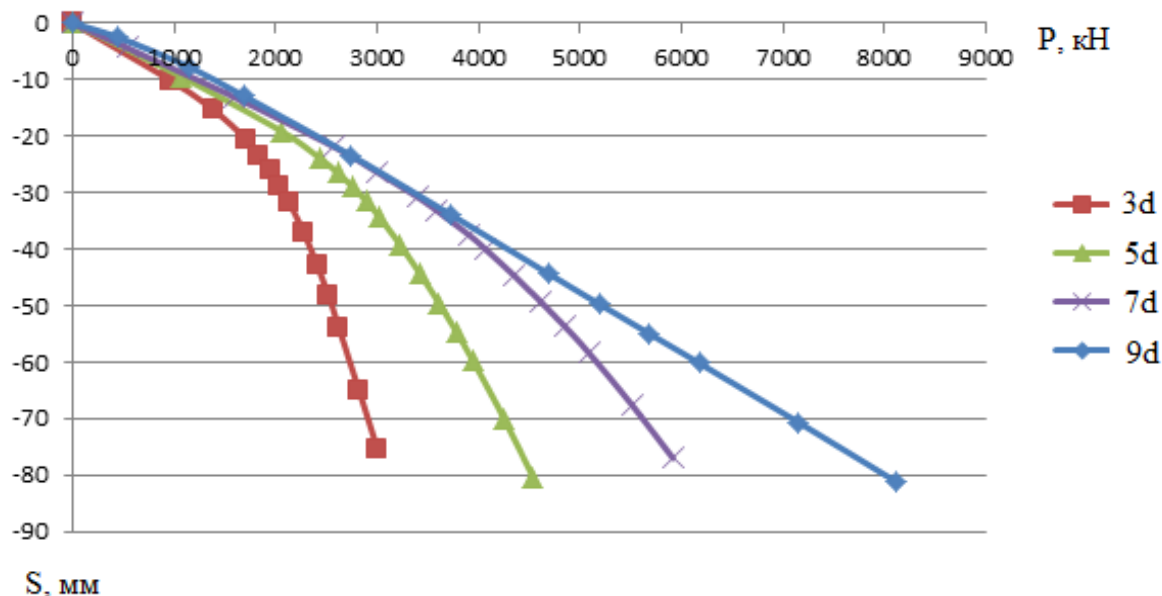


Рис. 3.55 – Графік залежності осідання – навантаження при довжині паль 6 м та різному кроці

На рисунках 3.56 – 3.58 наведені графіки залежності частки навантаження, що сприймають палі довжиною 6, 9 та 12 м ($n = 9$ шт.) стовпчастого пальового фундаменту при різному кроці паль.

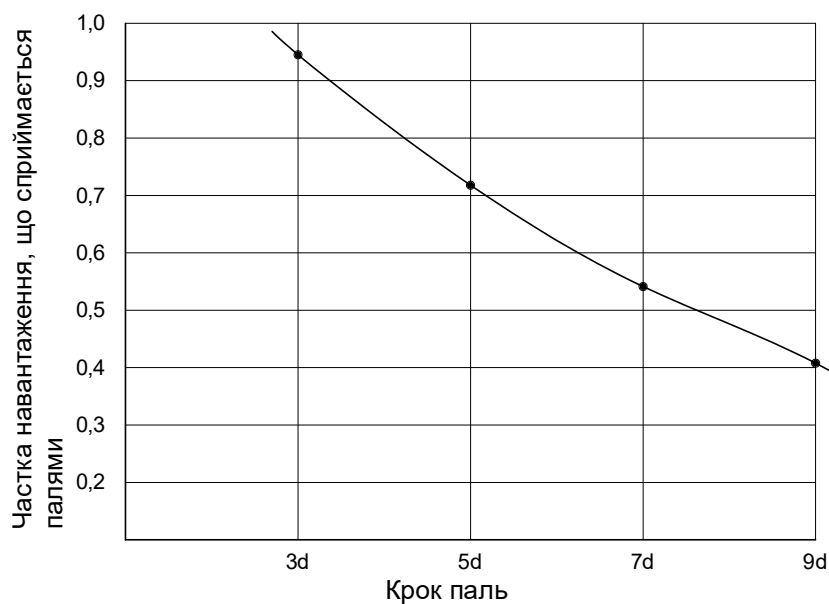


Рис. 3.56 – Залежність частки, що сприймають палі довжиною 6 м ($n = 9$ шт.) стовпчастого пальового фундаменту при різному кроці паль

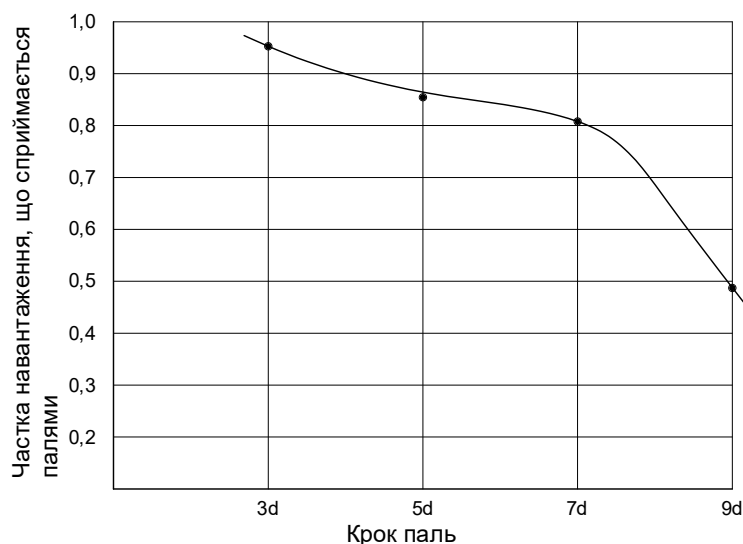


Рис. 3.57 – Залежність частки, що сприймають палі довжиною 9 м ($n = 9$ шт.) стовпчастого пальового фундаменту при різному кроці паль

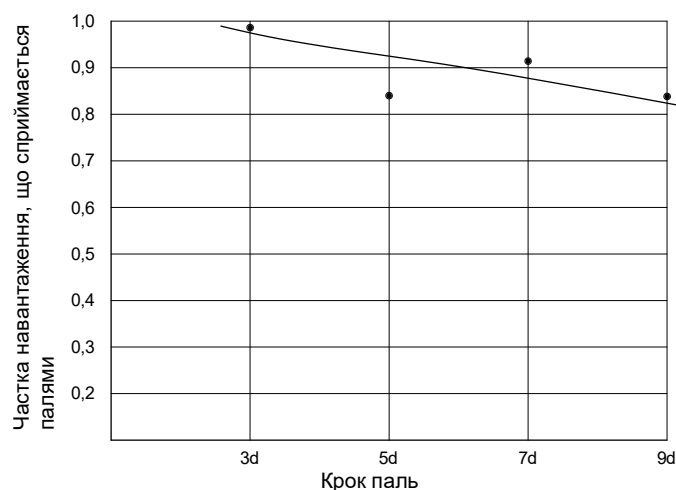


Рис. 3.58 – Залежність частки, що сприймають палі довжиною 12 м ($n = 9$ шт.) стовпчастого пальового фундаменту при різному кроці паль

З рис. 3.56 – 3.58 очевидно, що чим більший крок паль, тим краще включається в роботу ростверк, і, отже, менше навантаження передається на палі. Це обумовлюється збільшенням площі ростверку, яка взаємодіє з основою.

З рис. 3.56 – 3.58 також помітно, що при збільшенні довжини паль від 6 до 12 м частка навантаження, що сприймає ростверк зменшується, а палі приймають на себе більше навантаження.

Отримані результати показують, що зі зменшенням довжини паль крива залежності частки навантаження від кроку стає стрімкішою.

На рис. 3.59 наведено мозаїки деформування системи «палі – ростверк – основа» для пальового фундаменту довжиною паль 6 м та кроці 3d, 5d, 7d, 9d.

При малому кроці паль фундамент працює з основою як єдиний масив, при збільшенні відстані між палями грунт під підшовою ростверку в міжпальовому просторі краще реалізує свою несучу здатність.

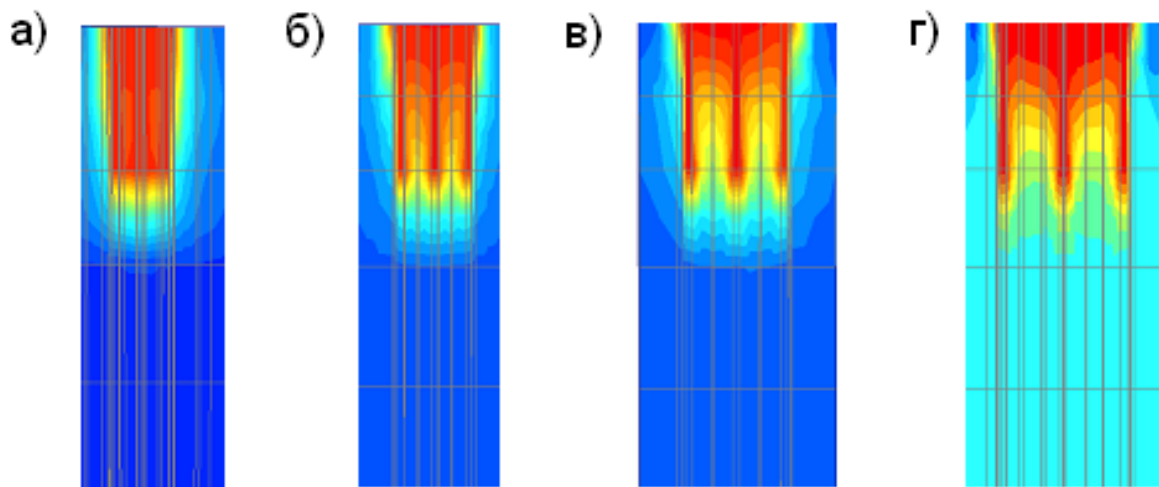


Рис. 3.59 – Мозаїки деформації ґрунту

- а) палі довжиною 6 м, кроком 3d; б) палі довжиною 6 м, кроком 5d;
в) палі довжиною 6 м, кроком 7d; г) палі довжиною 6 м, кроком 9d.

На рис. 3.60 наведено мозаїки деформування системи «паль – ростверк – основа» для пального фундаменту довжиною паль 9 м та кроці 3d, 5d, 7d, 9d.

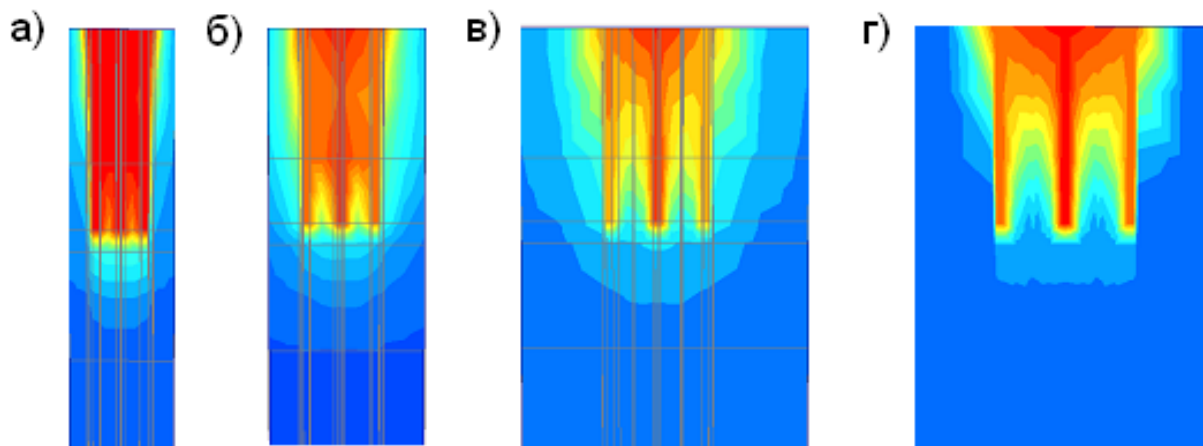


Рис. 3.60 – Мозаїки деформації ґрунту

- а) палі довжиною 9 м, кроком 3d; б) палі довжиною 9 м, кроком 5d;
в) палі довжиною 9 м, кроком 7d; г) палі довжиною 9 м, кроком 9d

При кроці паль 3d та 5d напруження розподіляється по всій довжині паль, включаючи в роботу міжпальовий простір. Із збільшенням кроку паль до 7d та 9d концентрація зусиль переважає під підшовою ростверку та у центральній палі, що свідчить про збільшення частки навантаження, що передається через центральну палю.

На рис. 3.61 (1) наведено мозаїки деформування системи «палля – ростверк – основа» для пального фундаменту довжиною палля 12 м та кроці 3d, 5d, 7d, 9d. Видно, що навантаження від фундаменту сприймається центральною паллю при кроці 7d та 9d.

Якщо розглянути етапи навантаження фундаментів з кроком палля 7d та 9d, то отримаємо наступні мозаїки деформації системи показні на рис. 3.61 (2; 3).

На рис. 3.61 (2) наведено мозаїки деформації ґрунту на стадії влаштування фундаменту, проміжного навантаження, що вдвічі менше за граничне, та граничного навантаження. На стадії влаштування фундаменту з кроком 7d та довжиною палля 12 м, навантаження передається на весь фундамент, хоча більше помітна робота центральної палі. При подальшому навантаженні зусилля збільшуються у центральній палі та під подошвою ростверку. З рис. 3.61 (3) помітно, що зі збільшенням кроку 9d навіть на стадії влаштування фундаменту, значна частина навантаження передається на центральну палю.

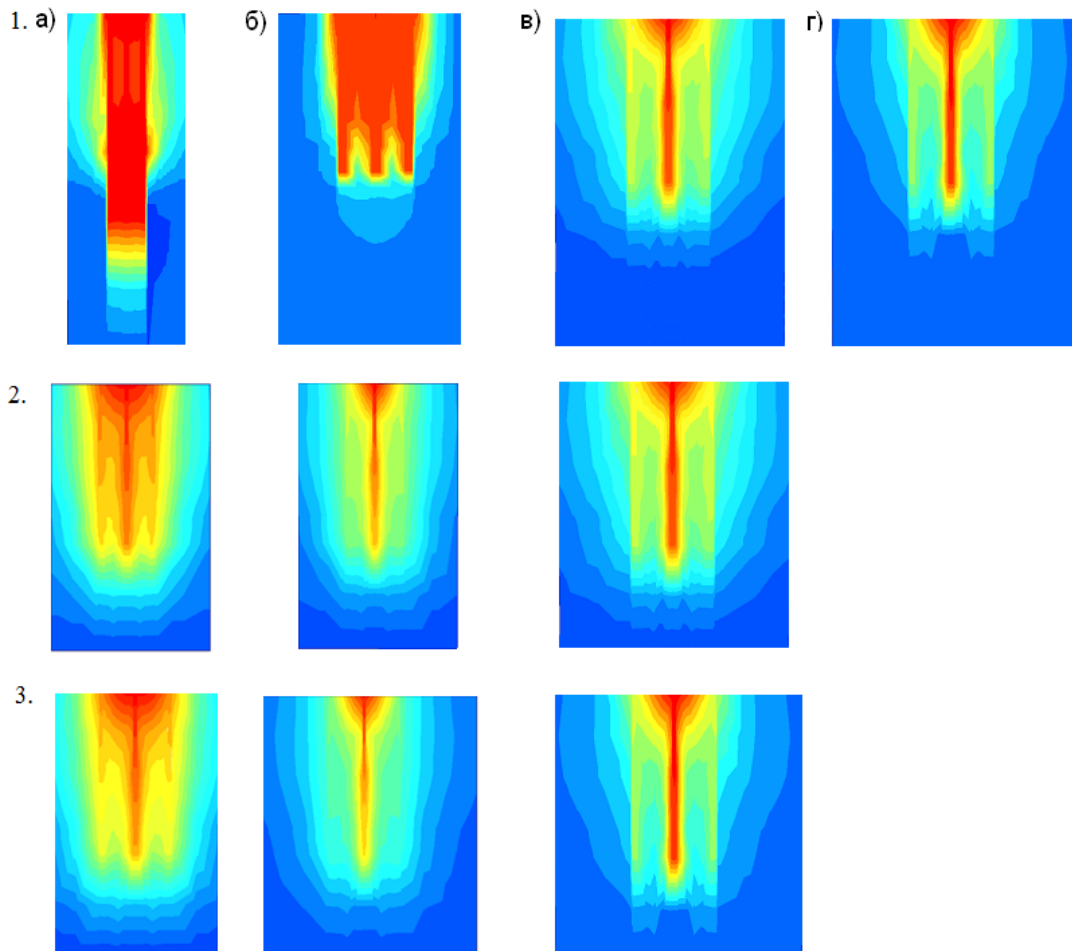


Рис. 3.61 – Мозаїки деформації ґрунту

1. а) палі довжиною 12 м, кроком 3d; б) палі довжиною 12 м, кроком 5d; в) палі довжиною 12 м, кроком 7d; г) палі довжиною 12 м, кроком 9d;
2. палі довжиною 12 м, кроком 7d на різних стадіях навантаження;
3. палі довжиною 12 м, кроком 9d на різних стадіях навантаження.

Розглянувши наведені вище мозаїки деформування системи «паль – ростверк – основа» потрібно сказати, що зі збільшенням кроку паль та їх довжини основна частина навантаження передається на ростверк та центральну палю. При довжині паль 12 м та кроці 7d і 9d крайні палі майже повністю виключаються з роботи.

Отже, у результаті проведених чисельних досліджень з визначення частки навантаження, що сприймається палями та ростверком, у складі стовпчастого пального фундаменту можна зробити такі висновки:

1. При збільшенні кроку паль частка навантаження, що сприймається палями, зменшується. Це обумовлюється збільшенням площі ростверку, яка взаємодіє з основою;

2. Із збільшенням довжини паль збільшується їх частка у загальному навантаженні, оскільки збільшується робота паль по боковій поверхні;

3. Із збільшенням кроку паль збільшується частка навантаження, що передається на центральну палю, що пов'язано із зменшенням жорсткості ростверку.

4. На якісну картину перерозподілу зусиль між палями та ростверком заміна однорідного ґрунту на неоднорідний практично не впливає.

VII – моделювання сумісної роботи фундаменту і паль поперечним перерізом 0,3×0,3 м зі сталим кроком 3d, довжиною 9 м в однорідних ґрунтових умовах та різною кількістю паль. Характеристики однорідного ґрунту розглядаються у двох варіантах:

- пісок дрібний, $\gamma = 18,6 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,67$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 32^\circ$, $E = 28 \text{ Мпа}$;
- суглинок тугопластичний, $\gamma = 18,7 \text{ кН/м}^3$, $c = 23 \text{ кПа}$, $\varphi = 21^\circ$, $\nu = 0,35$, $E = 14 \text{ МПа}$ [5].

Програму моделювання наведено в табл. 3.16.

Схеми розміщення паль в ростверках наведені на рис. 3.62.

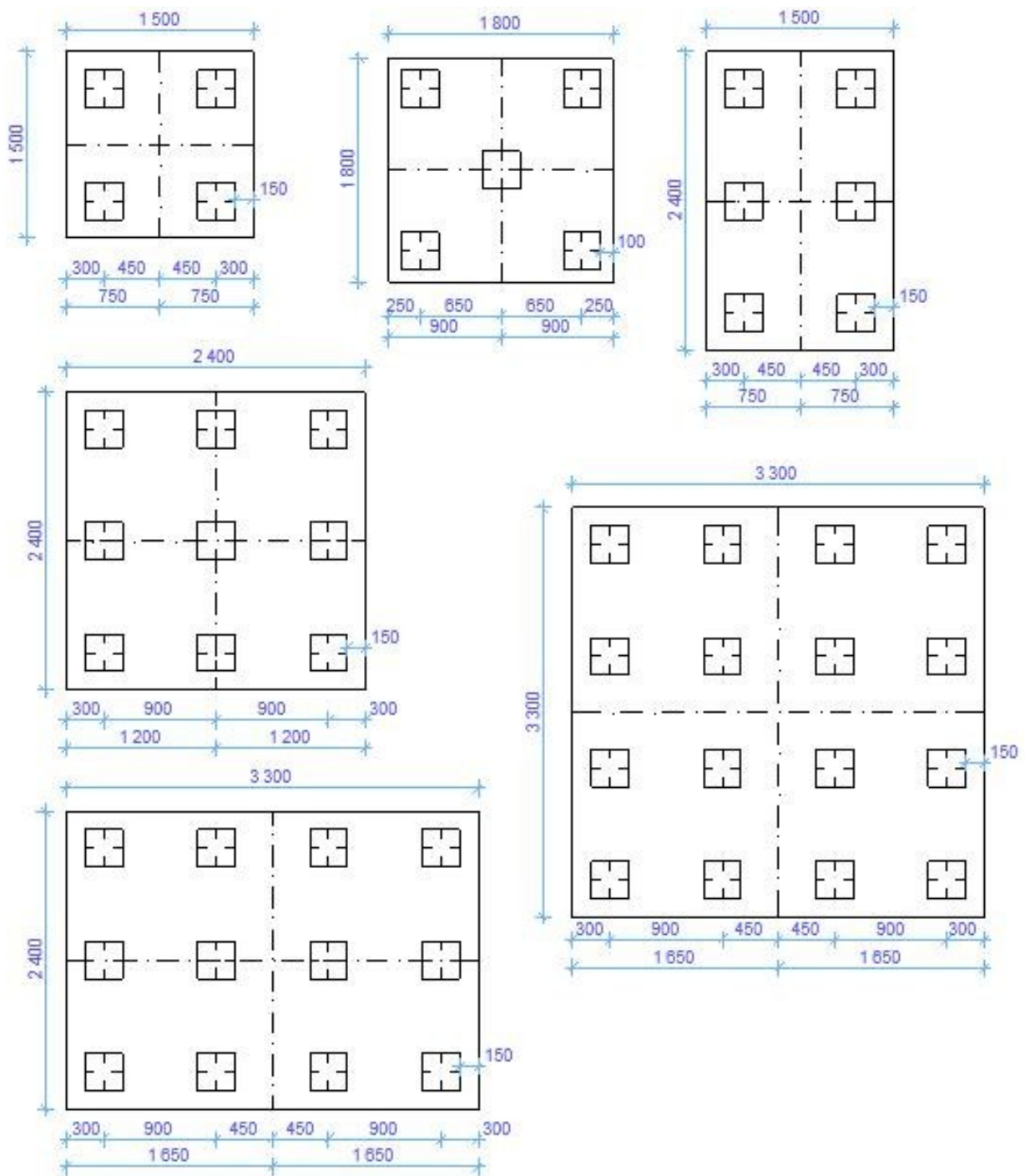


Рис. 3.62 – Схеми розміщення паль в ростверках

Для проведення моделювання були прийняті забивні палі із бетону С20/25 (В25), довжиною 9 м, поперечним перерізом 0,3×0,3 м.

Розміри змодельованого ґрунтового масиву для максимального зменшення впливу крайових ефектів на осідання палювих фундаментів прийняті в плані 30 × 30 м та по глибині 40 м. Одна з побудованих моделей

грунтового масиву та розрахункові моделі стовпчастого пальового фундаменту при різній кількості паль у групі зображені на рисунках 3.63 та 3.64.

При моделюванні роботи пальового фундаменту були враховані наступні фази роботи:

- робота ґрунтової товщі без фундаментів (початкова фаза);
- влаштування стовпчастого пальового фундаменту (перша фаза);
- робота стовпчастого пальового фундаменту під дією вертикального навантаження (друга фаза).

Величина навантаження на моделі збільшувалась до тих пір, поки величина осідання не становила 10 см.

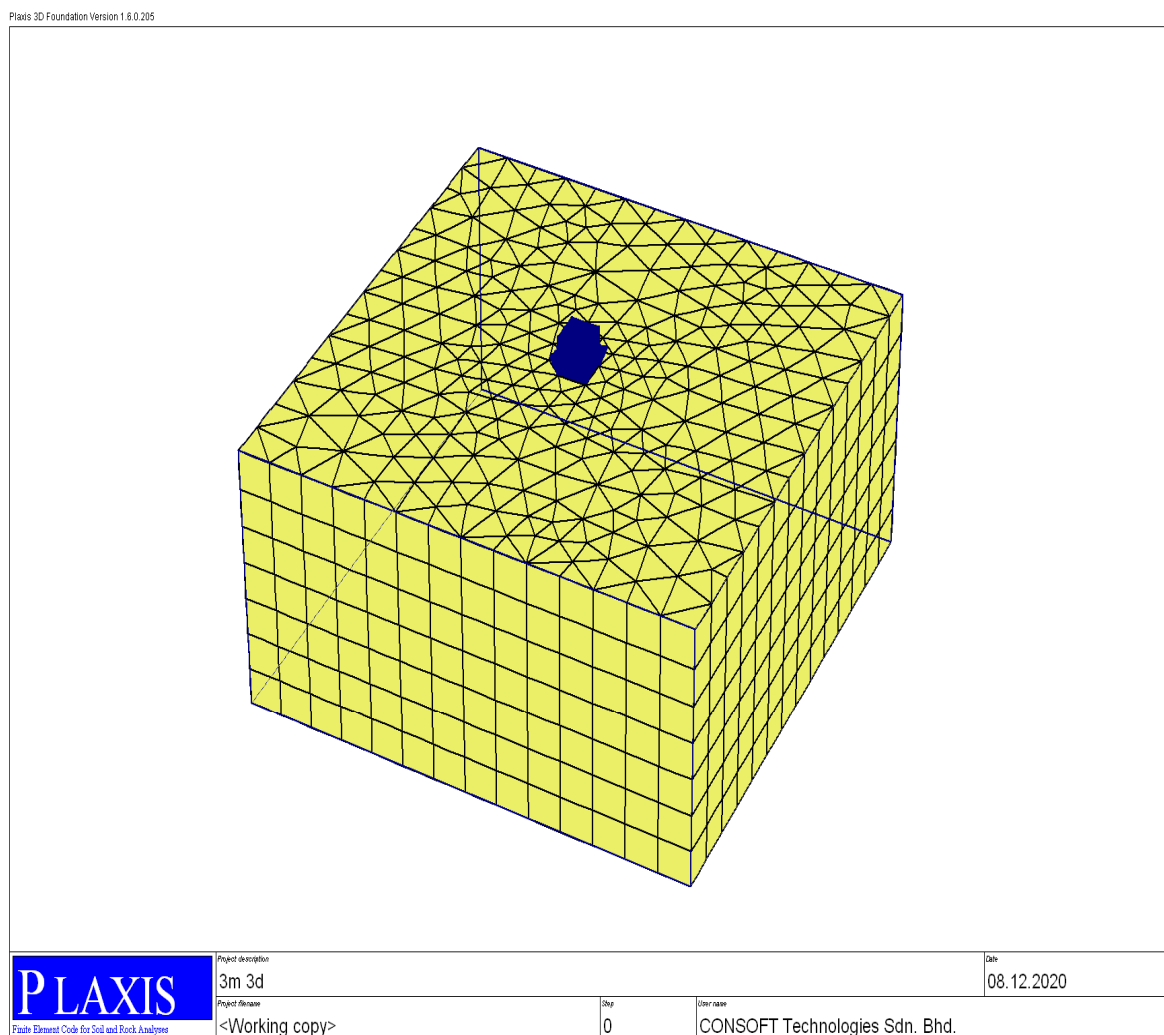


Рис. 3.63 – Розрахункова модель ґрунтового масиву

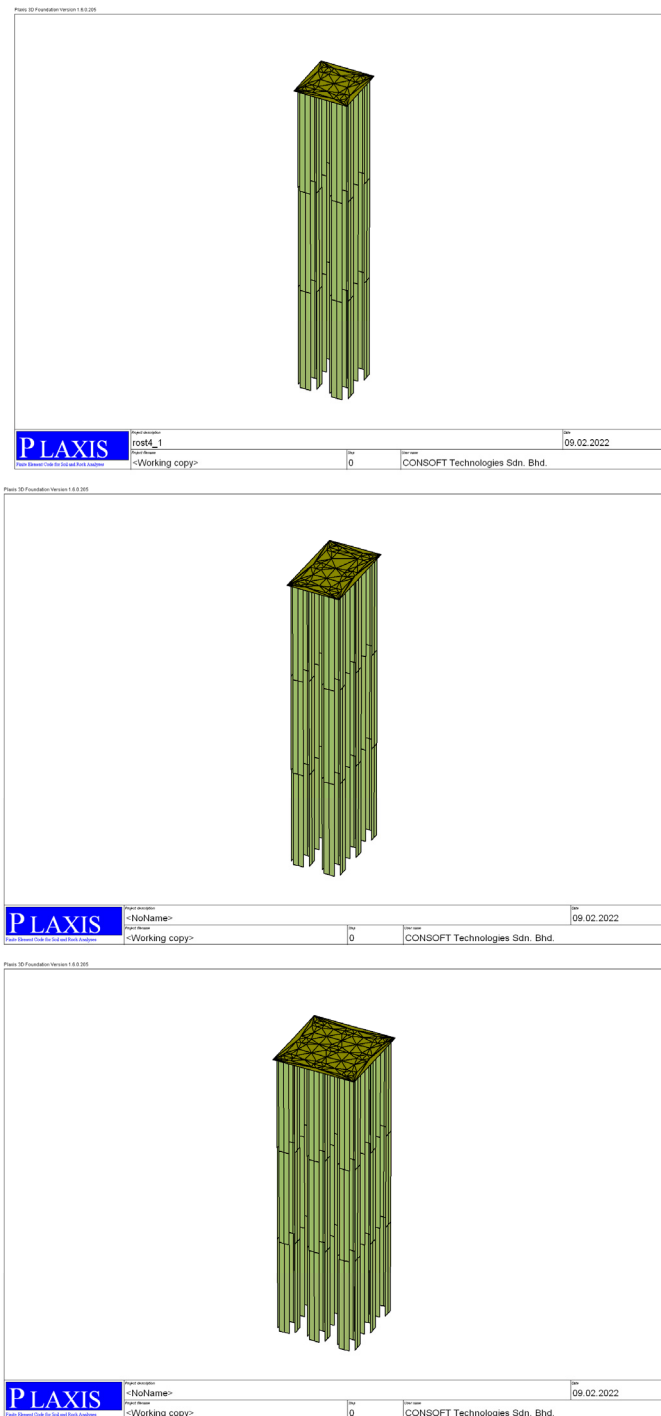
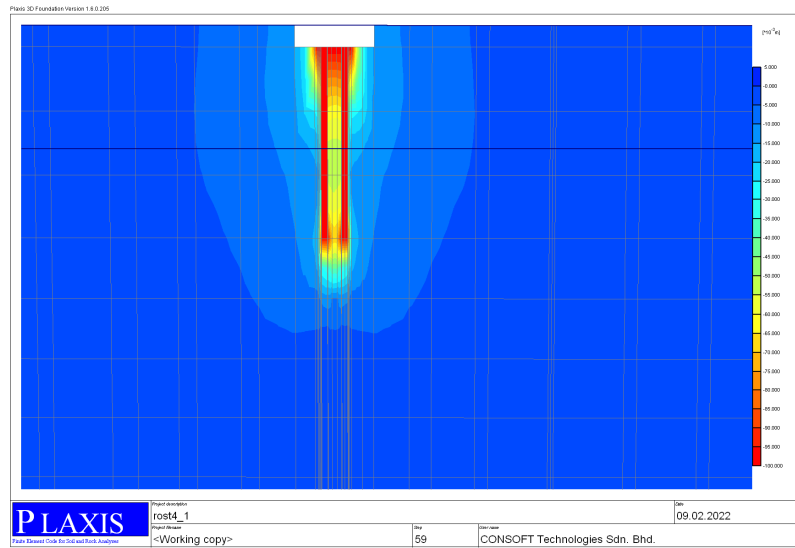


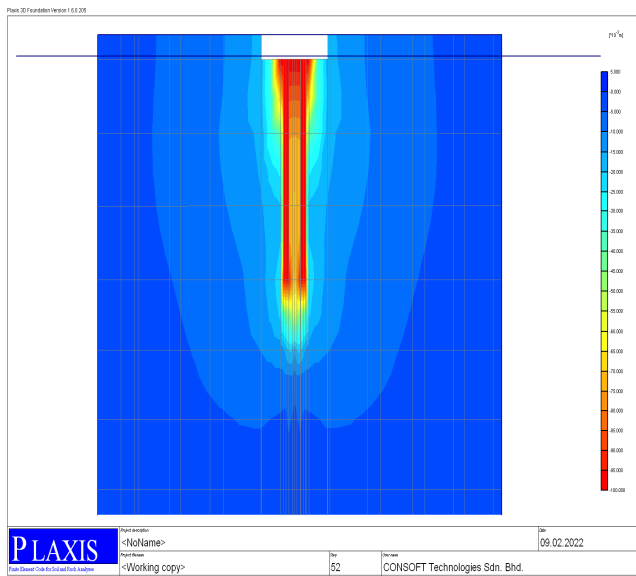
Рис. 3.64 – Розрахункові моделі стовпчастого пальового фундаменту при 4, 6 та 9 паях у групі

На рис. 3.65 – 3.66 для прикладу зображені мозаїки вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні пальових фундаментів з 4, 6 та 9 паль у піщаному та глинистому ґрунтах.

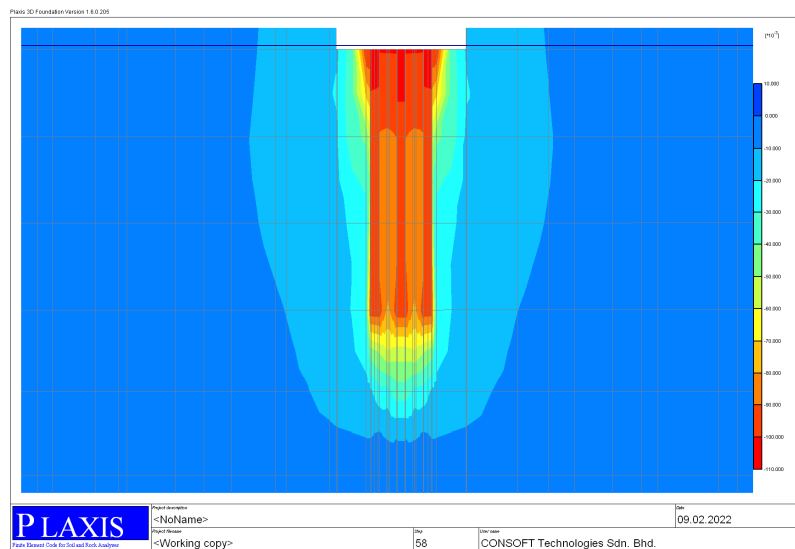
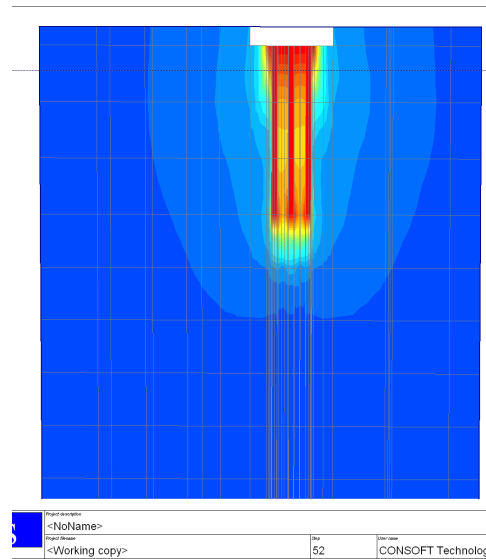
При постійному кроці паль 3d напруження розподіляється по всій довжині паль, включаючи в роботу міжпальовий простір, але це включення залежить від кількості паль у групі. Як бачимо, при малій кількості паль ґрунт міжпальового простору менше включається у роботу.



a)

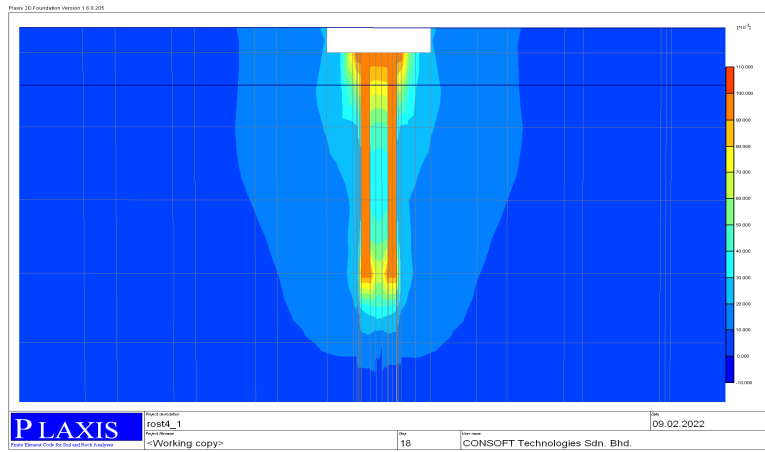


б)

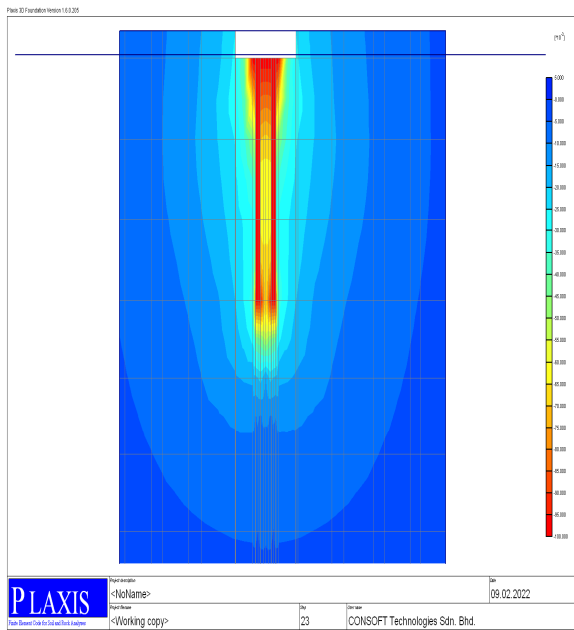


в)

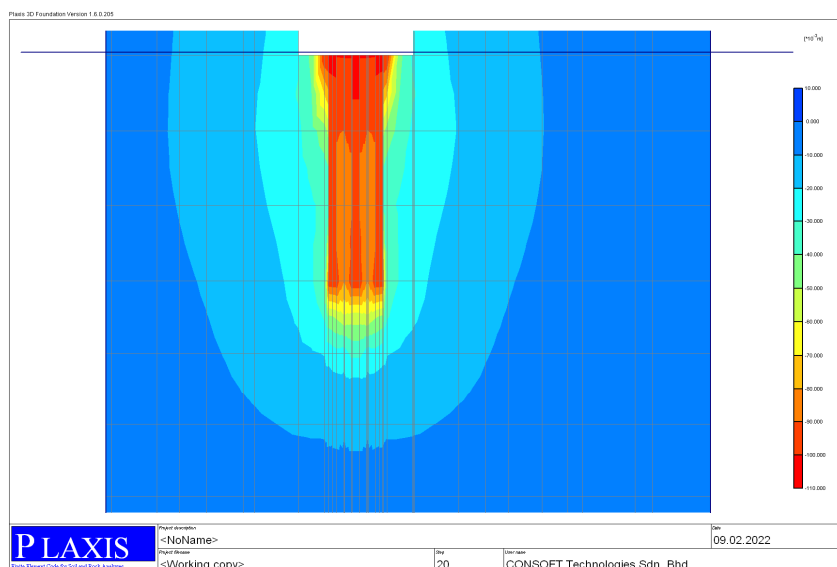
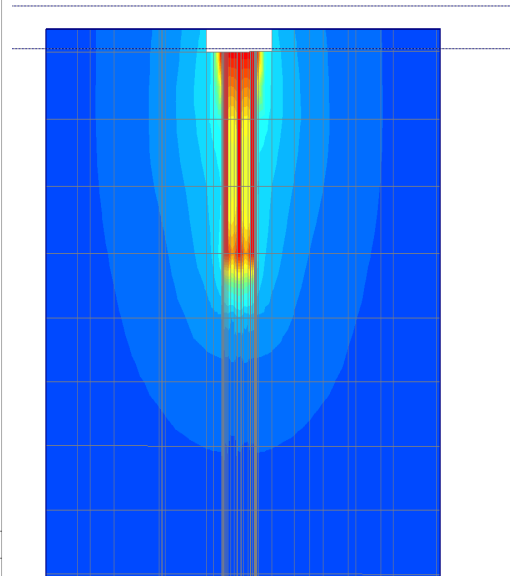
Рис. 3.65 – Мозаїки вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні пальових фундаментів з кількістю паль: а) 4 шт; б) 6 шт; в) 9 шт. для піщаного ґрунту



a)



б)



в)

Рис. 3.66 – Мозаїки вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні пальових фундаментів з кількістю паль: а) 4 шт; б) 6 шт; в) 9 шт. для глинистого ґрунту

Переміщення ґрунту відбувається під ростверком і в зоні нижніх кінців паль. При збільшенні кількості паль інтенсивність переміщення ґрунту в міжпальовому просторі збільшується і наближається до величини переміщень ґрунту під ростверком. Таким чином при великій кількості паль весь ґрунтопальовий починає переміщуватись як єдине ціле. Виходячи з цього можна припустити, що палі в середині куща з великою кількістю паль не можуть повністю реалізувати свою несучу здатність і ефективність роботи паль в групі із збільшенням кількості паль буде знижуватись.

З порівняння мозаїк вертикальних деформацій для піщаних і глинистих ґрунтів на рис. 3.65 та 3.66 свідчить про однаковий якісний характер втягування міжпальового простору в роботу групи. Тобто загальна закономірність зменшення реалізації несучої здатності паль при збільшенні їх кількості в групі залишається незмінною незалежно від виду ґрунту.

На рис. 3.67, 3.68 представлені графіки залежності осідання-навантаження, визначених математичним моделюванням для дослідних пальових фундаментів.

На рис. 3.69 наведена залежність несучої здатності куща від кількості паль в групі при різних ґрунтах (за несучу здатність взяте навантаження при осіданні куща 100 мм).

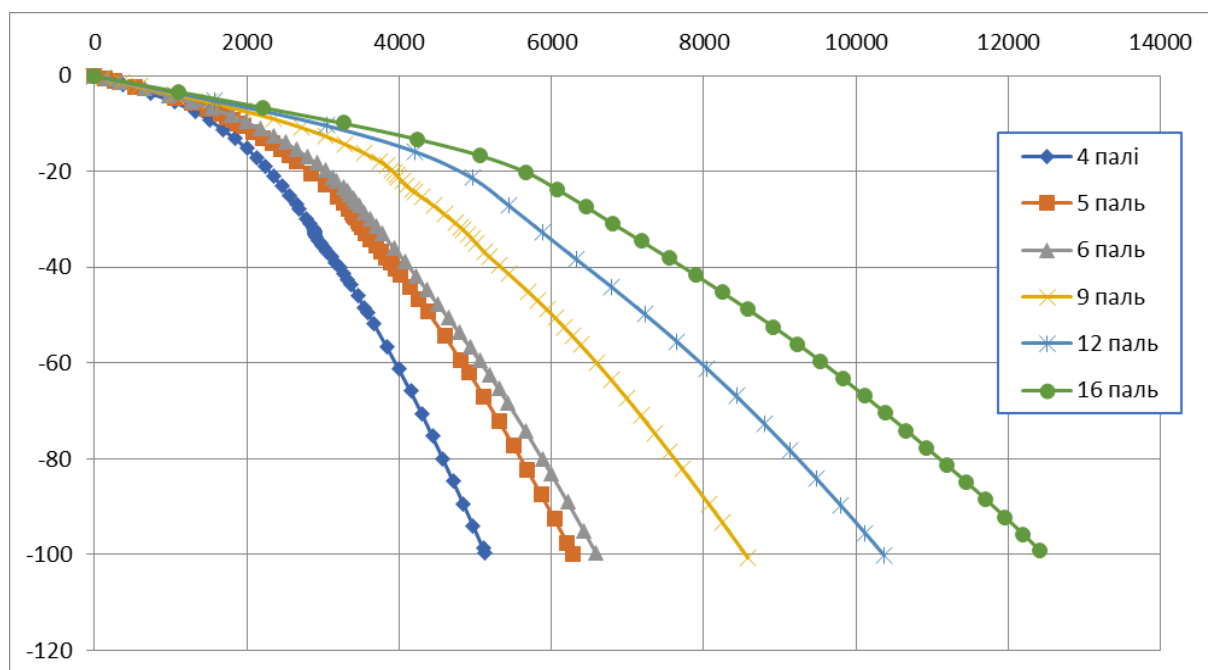


Рис. 3.67 – Графіки залежності навантаження – осідання для пальових фундаментів у піщаному ґрунті при різній кількості паль

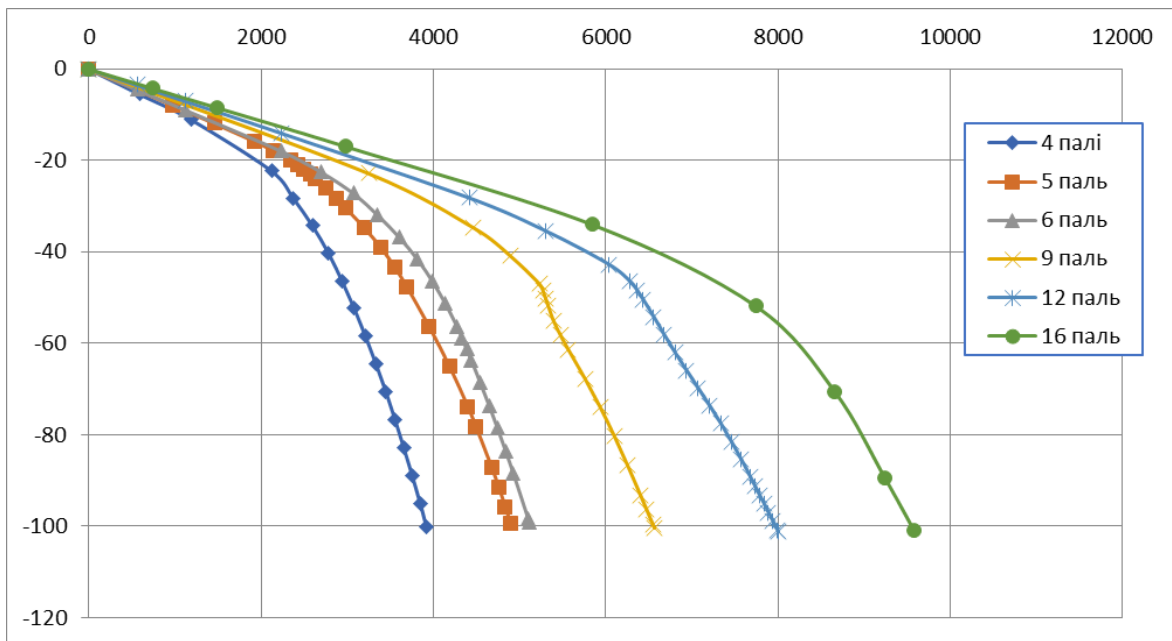


Рис. 3.68 – Графіки залежності навантаження – осідання для палевих фундаментів у глинистому ґрунті при різній кількості паль

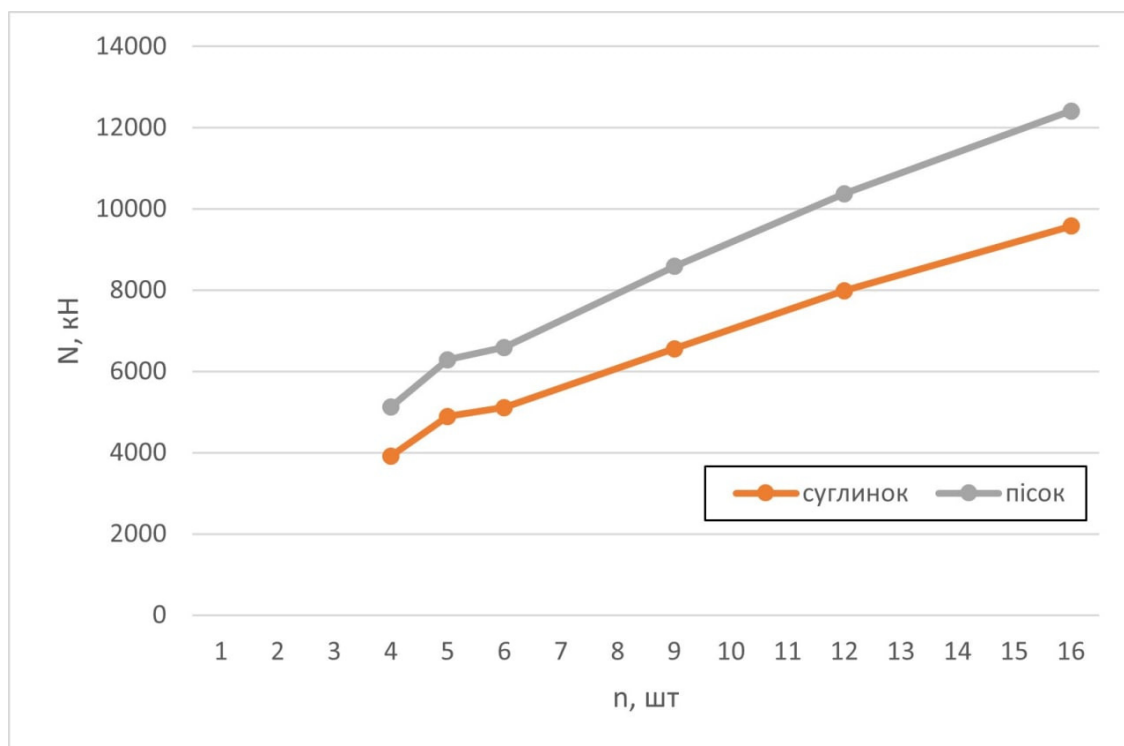


Рис. 3.69 – Графіки залежності несучої здатності куца від кількості паль в групі при різних ґрунтах

З рисунків видно, що збільшення кількості паль в групі призводить до збільшення її несучої здатності, але це збільшення не пропорційне збільшенню кількості паль. Це ще раз підтверджує гіпотезу про неповну реалізацію тертя по бічній поверхні паль у куцах з великою їх кількістю.

Для кращого аналізу перерозподілу зусиль між елементами груп паль, було виконане моделювання одиночних паль та ростверків як фундаментів мілкого закладання.

На рис. 3.70 представлені графіки залежності осідання-навантаження для одиночних паль довжиною 9 м в різних ґрунтових умовах.

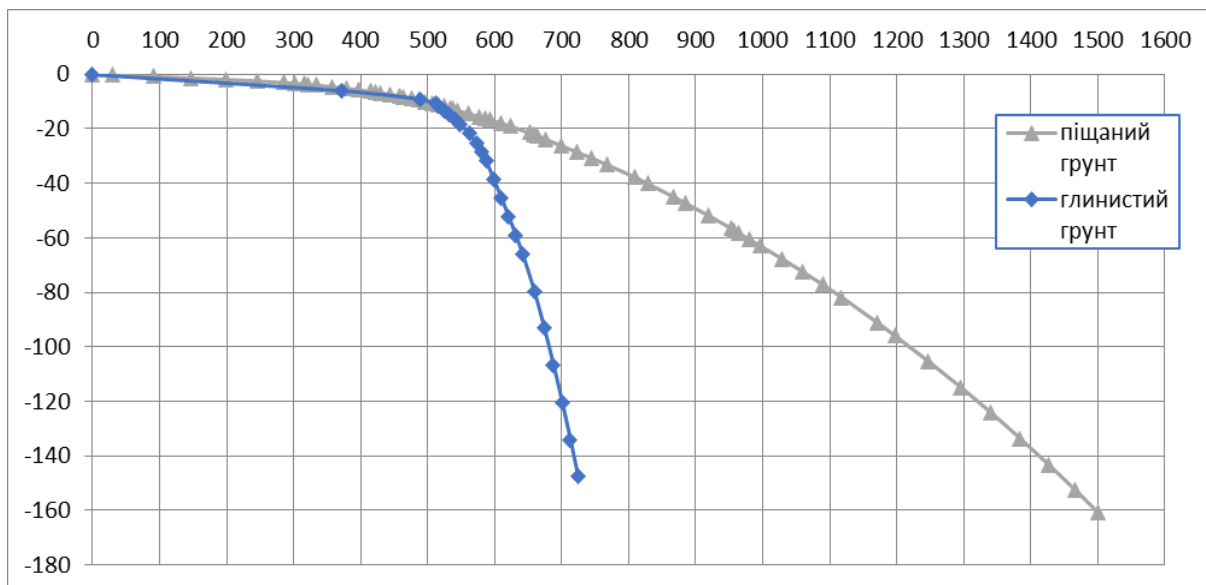


Рис. 3.70 – Графік залежності осідання – навантаження для одиночних паль довжиною 9 м в різних ґрунтових умовах

На рис. 3.71, 3.72 представлені графіки залежності осідання-навантаження для ростверків, як фундаментів мілкого закладання в піщаному та глинистому ґрунтах.

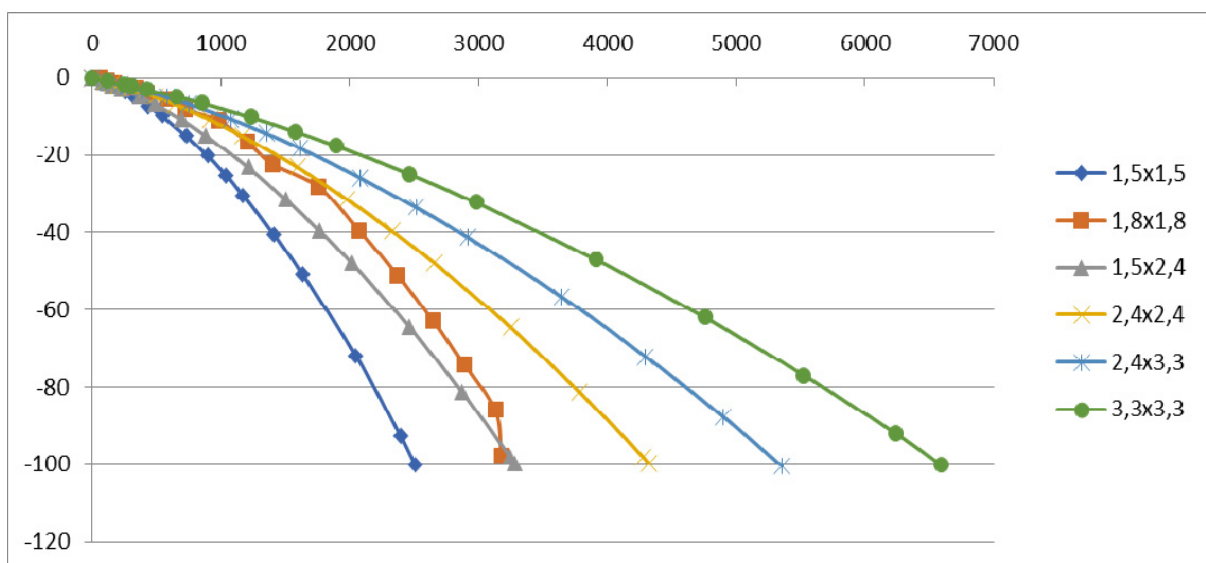


Рис. 3.71 – Графіки залежності осідання – навантаження для ростверків, як фундаментів мілкого закладання, в піщаному ґрунті

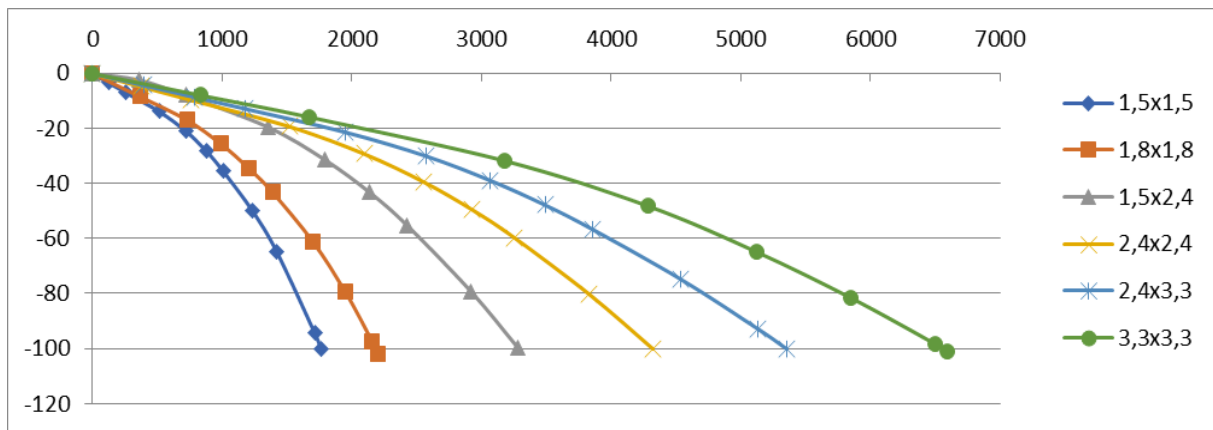


Рис. 3.72 – Графіки залежності осідання – навантаження для ростверків, як фундаментів мілкового закладання, в глинистому ґрунті

Результати моделювання наведено в таблиці 3.17. В останньому стовпчику таблиці 3.17 несуча здатність куща представлена як сума несучих здатностей окремих його елементів. Несуча здатність ростверків як фундаментів мілкового закладання визначена при осіданні 100 мм.

Несуча здатність одиночних паль згідно з рис. 3.70 прийнята на межі пропорційності залежності осідання – навантаження. Отже для палі у піщаному ґрунті несуча здатність $N_{od} = 830$ кН, для палі у глинистому ґрунті $N_{od} = 600$ кН.

Таблиця 3.17 – Результати моделювання стовпчастих пальових фундаментів з різною кількістю паль

Вид ґрунту	Кількість паль	Несуча здатність при $S = 100$ мм					
		Несуча здатність куща, кН	Σ несуча здатність одиночних паль, кН	Кущовий ефект	Несуча здатність ростверку як фундаменту мілкового закладання, кН	Тиск під подошвою ростверку як фундаменту мілкового закладання, кПа	Σ несуча здатність паль+ростверк
Піщаний	4 шт.	5130	3320	1,54	2508	1115	5828
	5 шт.	6286	4150	1,51	3175	980	7325
	6 шт.	6588	4980	1,32	3276	910	8256
	9 шт.	8582	7470	1,15	4320	750	11790
	12 шт.	10375	9960	1,04	5350	675	15310
	16 шт.	12415	13280	0,93	6590	605	19870
Глинистий	4 шт.	3915	2400	1,63	1764	784	4164
	5 шт.	4892	3000	1,63	2200	679	5200
	6 шт.	5112	3600	1,42	3280	911	6880
	9 шт.	6560	5400	1,21	4320	750	9720
	12 шт.	7990	7200	1,11	5350	675	12550
	16 шт.	9580	9600	0,99	6588	607	16188

З таблиці 3.17 видно, що у більшості випадків сума несучих здатностей паль як одиночних менше за несучу здатність групи. Виключення складають лише куці з найбільшою кількістю паль.

Кущовий ефект (відношення несучої здатності групи до суми несучих здатностей паль) складає від 0,93 до 1,63. Для куців з 16 паль як в піщаному, так і в глинистому ґрунті кущовий ефект при кроці паль 3d може бути негативним і складає від 0,93 до 0,99. Кущ несе менше навантаження ніж сума несучих здатностей 9 м паль при їх кількості 16 шт., тобто при частому їх розташуванні у великому масиві.

Дослідження ще раз підтвердили, що визначення несучої здатності куща як суми несучих здатностей паль призводить як правило до неекономічного рішення.

Визначати несучу здатність пального фундаменту як суму несучих здатностей одиночних паль і ростверку як фундаменту мілкового закладання некоректно. Це призводить до завищених результатів і ненадійного рішення.

Для аналізу перерозподілу зусиль між елементами пального фундаменту визначались реакція ростверку у складі пального фундаменту і навантаження, яке припадає на палі за результатами моделювання (визначення виконувались при осіданні групи 100 мм). Між палями групи навантаження розподілялось умовно рівномірно.

Результати таких підрахунків наведені у таблицях 3.18 та 3.19, де можна бачити для кожного куща сумарне навантаження (N , кН), сумарне навантаження на ростверк ($N_{роств}$, кН), тиск під подошвою ростверка ($P_{роств}$, кПа), середнє навантаження на палю в групі (кН). Площа ростверку, яка працює з ґрунтом визначалась за винятком площі паль, що входять у групу.

В таблицях 3.18, 3.19 та на рис. 3.73 наведена також частка ростверку у несучій здатності фундаменту.

Маючи тиск під подошвою ростверку в групі (табл. 3.18, 3.19) і тиск під подошвою ростверку як фундаменту мілкового закладання (табл. 3.17), а також несучу здатність одиночної палі (табл. 3.17) і середнє навантаження на палю в групі (табл. 3.18, 3.19), можна проаналізувати ступінь реалізації несучої здатності окремих елементів пального фундаменту. За ступінь реалізації несучої здатності палі прийняте відношення осередненого навантаження на палю у групі до несучої здатності як одиночної. За ступінь реалізації несучої здатності ростверку прийняте відношення тиску під подошвою ростверка до тиску під подошвою ростверка, як фундаменту мілкового закладання.

Як бачимо частка ростверку у несучій здатності фундаменту зменшується із збільшенням кількості паль. А отже не тільки палі гірше реалізують себе при збільшенні їх кількості у групі, а і ростверк приймає меншу участь у сприйнятті навантаження.

У таблиці 3.18, 3.19 та на рис. 3.74 та 3.75 наведена залежність ступеню реалізації несучої здатності ростверку і паль у складі пального фундаменту.

Таблиця 3.18 – Результати чисельного математичного моделювання роботи стовпчастого пального фундаменту на піщаній основі, при змінній кількості паль ($s = 10$ см) (палі без виймання ґрунту)

Кількість паль	Площа ростверку, м ²	Несуча здатність фундаменту, кН	Реакція ростверку, кН	Середнє зусилля у палі у складі фундаменту, кН	Ступінь реалізації несучої здатності паль	Частка несучої здатності ростверку	Тиск під подошвою ростверку, кПа	Ступінь реалізації несучої здатності ростверку
4 шт.	1,89	5130	1204	982	1,18	0,235	673	0,57
5 шт.	2,79	6286	1413	875	1,17	0,225	506	0,52
6 шт.	3,06	6588	1411	863	1,04	0,214	461	0,506
9 шт.	4,95	8582	1123	829	0,99	0,131	227	0,30
12 шт.	6,84	10375	1077	774	0,93	0,100	157	0,23
16 шт.	9,45	12415	980	715	0,86	0,079	104	0,17

Таблиця 3.19 – Результати чисельного математичного моделювання роботи стовпчастого пального фундаменту на глинистій основі, при змінній кількості паль ($s = 10$ см) (палі без виймання ґрунту)

Кількість паль	Площа ростверку, м ²	Несуча здатність фундаменту, кН	Реакція ростверку, кН	Середнє зусилля у палі у складі фундаменту, кН	Ступінь реалізації несучої здатності паль	Частка несучої здатності ростверку	Тиск під подошвою ростверку, кПа	Ступінь реалізації несучої здатності ростверку
4 шт.	1,89	3915	855	765	1,27	0,218	452,4	0,58
5 шт.	2,79	4892	1053	768	1,28	0,215	377,4	0,55
6 шт.	3,06	5112	936	696	1,16	0,183	305,9	0,34
9 шт.	4,95	6560	697	651	1,08	0,106	140,8	0,19
12 шт.	6,84	7990	578	617	1,03	0,072	84,5	0,125
16 шт.	9,45	9580	609	560	0,93	0,064	64,4	0,106

Ступінь реалізації тиску під ростверком знаходиться в межах 0,1 – 0,58 і практично не залежить від виду ґрунту.

Ступінь реалізації несучої здатності паль знаходиться в межах 0,86 – 1,27 і також мало залежить від виду ґрунту.

Палі у складі куща реалізуються не повністю при кількості паль 12 – 16 шт. (крок 3d), їх зусилля в групі наближається до несучої здатності одиночної палі при кількості паль 9 шт. Для кущів з кількістю паль 4 – 6 шт. ступінь реалізації несучої здатності палі перевищує одиницю. Отже, у групах з незначною кількістю паль вони працюють у кущі краще, ніж одиночні і тим краще, чим менше їхня кількість.

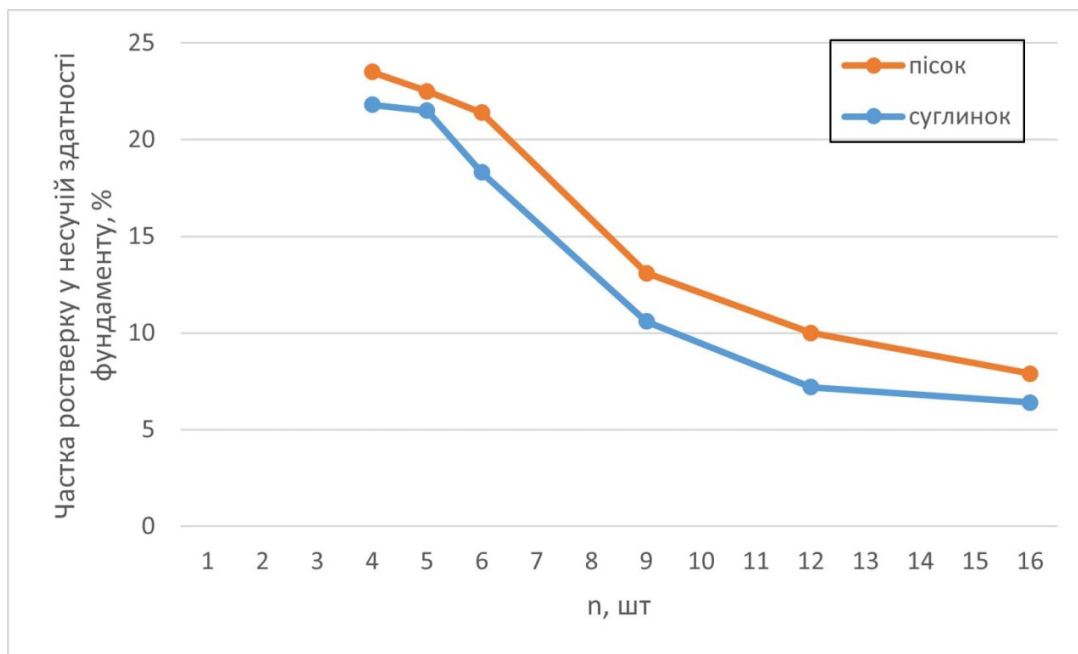


Рис. 3.73 – Залежність частки ростверку у несучій здатності фундаменту від кількості паль і виду ґрунту

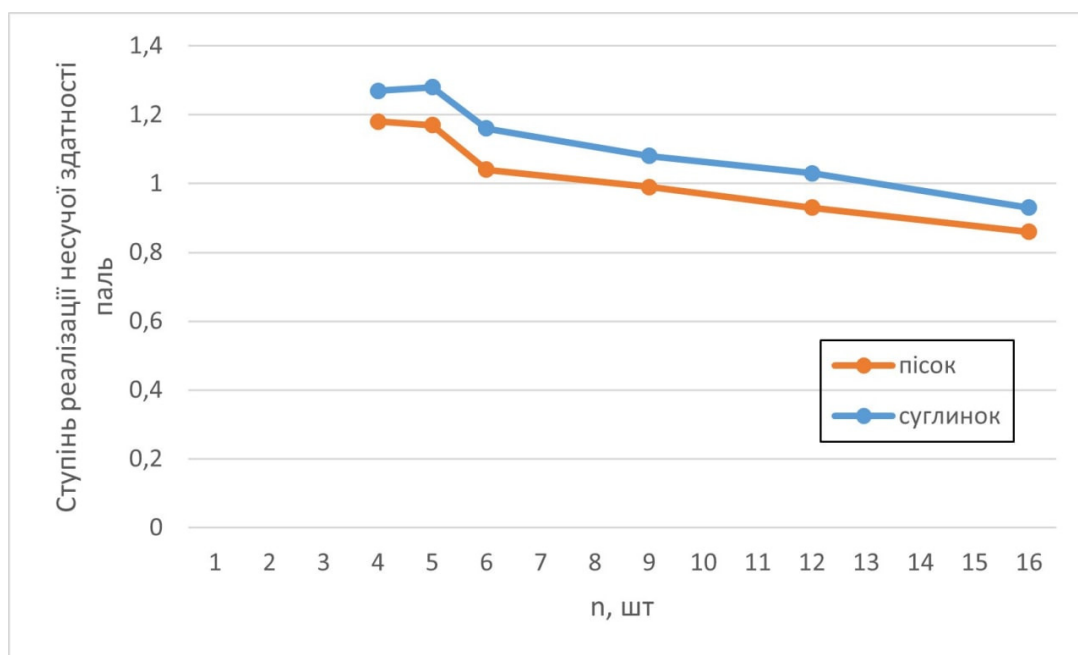


Рис. 3.74 – Залежність ступеню реалізації несучої здатності паль у складі пального фундаменту від кількості паль і виду ґрунту

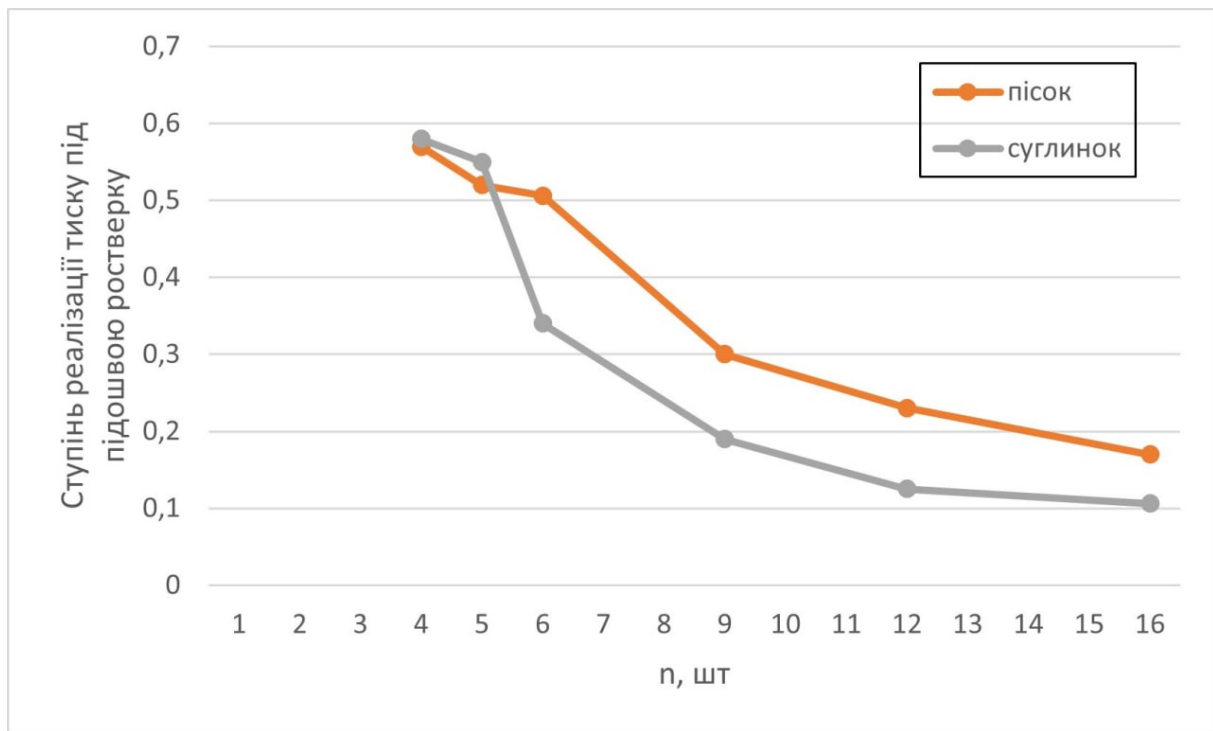


Рис. 3.75 – Залежність ступеня реалізації тиску під подошвою ростверку у складі стовпчастого пальового фундаменту від кількості паль і виду ґрунту

Висновки за підрозділом 3.3

На підставі проведених досліджень впливу фізико-механічних характеристик та однорідності основи на перерозподіл зусиль між елементами палових груп можна зробити наступні висновки:

1. При влаштуванні фундаменту з несучим ростверком потрібно багато уваги приділяти стану ґрунтового масиву, що знаходиться під подошвою ростверку, адже порушення його природного стану може призвести до втрати його фізико-механічних властивостей.

2. Виявлено залежність сумісної роботи ростверку та паль у стовпчастому паловому фундаменті від характеристик ґрунту: кута внутрішнього тертя, питомого зчеплення та модуля деформації:

– при збільшенні питомого зчеплення ґрунту частка навантаження, що сприймається ростверком, зростає на різних етапах навантаження незалежно від виду ґрунту. При цьому ростверк краще включається в роботу при більшому навантаженні;

– у піщаних ґрунтах частка навантаження, що сприймається ростверком, зменшується зі збільшення кута внутрішнього тертя та модуля деформації;

– у глинистих ґрунтах частка навантаження, що сприймається ростверком, зростає зі збільшенням кута внутрішнього тертя та модуля деформації;

- у піщаних ґрунтах частка ростверку при збільшенні опору ґрунту по бічній поверхні та граничного опору ґрунту зменшується;
- у глинистих ґрунтах частка ростверку при збільшенні опору ґрунту по бічній поверхні та граничного опору ґрунту зростає;
- отримано, що ростверк краще включається в роботу при більшій деформації фундаменту (зокрема при спіранні нижніх кінців паль на більш піддатливі ґрунти);

3. На якісну картину перерозподілу зусиль між палями та ростверком заміна однорідного ґрунту на неоднорідний практично не впливає.

На підставі проведених досліджень перерозподілу зусиль між елементами палевих груп з різною кількістю забивних паль можна зробити наступні висновки:

1. Із збільшенням кількості паль у групі гірше реалізують себе як палі, так і ростверк. Ступінь реалізації тиску під ростверком знаходиться в межах 0,1–0,58, а ступінь реалізації несучої здатності паль в межах 0,86–1,27.

2. Палі у складі куща реалізуються не повністю при кількості паль 12–16 шт. (крок 3d), осереднене навантаження, яке вони сприймають в групі, наближається до несучої здатності одиночної палі при кількості паль 9 шт. Для кущів з кількістю паль 4–6 шт. ступінь реалізації несучої здатності палі перевищує одиницю. Отже, у групах з незначною кількістю паль вони працюють у кущі краще, ніж одиночні і тим краще, чим менше їхня кількість.

3. Визначати несучу здатність палевого фундаменту як суму несучих здатностей одиночних паль та плити ростверка як фундамента мілкового закладання некоректно, це призводить до завищення несучої здатності групи і ненадійного рішення.

4. Частка роботи ростверка у складі палевого фундаменту збільшується із зменшенням кількості паль.

5. Вид ґрунту (піщаний або глинистий) суттєво не впливає на перерозподіл зусиль між елементами групи паль.

4 АНАЛІЗ ЗМІНИ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ЗУСИЛЬ МІЖ ЕЛЕМЕНТАМИ ПАЛЕВОГО ФУНДАМЕНТУ ПРИ ЗРОСТАННІ НАВАНТАЖЕННЯ

Для аналізу досліджень у всіх вищенаведених підрозділах приймалися значення кількісних параметрів ступенів реалізації елементів палевого фундаменту при сталому значенні його осідання. За таке осідання в більшості випадків приймалось найбільше значення осідання фундаменту, а саме $s = 100$ мм. Але з літератури та результатів власних досліджень відомо, що по мірі зростання навантаження на фундамент і відповідно його осідання палі та ростверк поступово включаються у роботу і характер цього включення не є лінійним. Тобто на різних етапах навантаження ступінь реалізації несучої здатності елементів палевого фундаменту може змінюватись.

Метою даного дослідження [3] є аналіз зміни перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту при поступовому зростанні навантажень на нього. Це дозволить обґрунтувати вибір критичного значення осідання, для якого доцільно визначати ступені реалізації несучої здатності елементів пальового фундаменту, що можуть пропонуватись для використання при проектуванні.

В даному дослідженні такий аналіз виконаний на прикладі стовпчастого пальового фундаменту.

Аналіз зміни перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту при поступовому зростанні навантажень на нього був виконаний для кущового пальового фундаменту на підставі фізичного моделювання, проведеного Малишевим О. М. (див. підрозділ 2.1) та Кременської Ю. О. (див. підрозділ 2.2) на маломасштабних моделях, а також математичного моделювання за допомогою програмного комплексу Plaxis.

4.1 Аналіз розвитку перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту по мірі зростання навантаження при фізичному моделюванні

У досліджах Малишева О. М. пісок в лоток насипався з досягненням щільності, що відповідала коефіцієнту пористості $e = 0,6$ (близько до нижньої межі діапазону середньої щільності). Це не дозволило при випробуваннях пальових кущів довести їх до втрати несучої здатності внаслідок обмеженості можливостей упорної системи. Максимальні значення досягнутих осідань при випробуваннях склали близько 14 мм.

В зв'язку з цим у досліджах Кременської Ю. О. пісок в лоток насипався з досягненням щільності, що відповідала коефіцієнту пористості $e = 0,7$ (близько до верхньої межі діапазону середньої щільності). Це дозволило при менших значеннях навантаження досягти практичної втрати стійкості основи при випробуваннях при осіданнях, близьких до 30 мм.

Для аналізу розвитку перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту по мірі зростання навантаження при фізичному моделюванні використовувались результати випробувань кущів паль з 9 шт. з кроком 3d (ростверк 200×200 мм) з різною довжиною паль. Проаналізовані результати випробувань для піску з коефіцієнтом пористості $e = 0,7$ за дослідями Кременської Ю. О. та для піску з коефіцієнтом пористості $e = 0,6$ за дослідями Малишева О. М.

В результаті проведення експериментів були одержані графіки залежності осідання – навантаження куща в цілому та графіки залежності сумарної несучої здатності паль від його осідання. Також були одержані графіки осідання – навантаження за результатами випробування одиночних паль різної довжини, графік осідання – навантаження при випробуванні плити ростверку розміром 200×200 мм як штампа без паль.

В роботі Бартоломея А. О. наведені результати натурних досліджень груп паль. Будувались порівняльні графіки розвитку деформацій пальових груп та одиночних паль по мірі зростання навантаження (рис. 4.1).

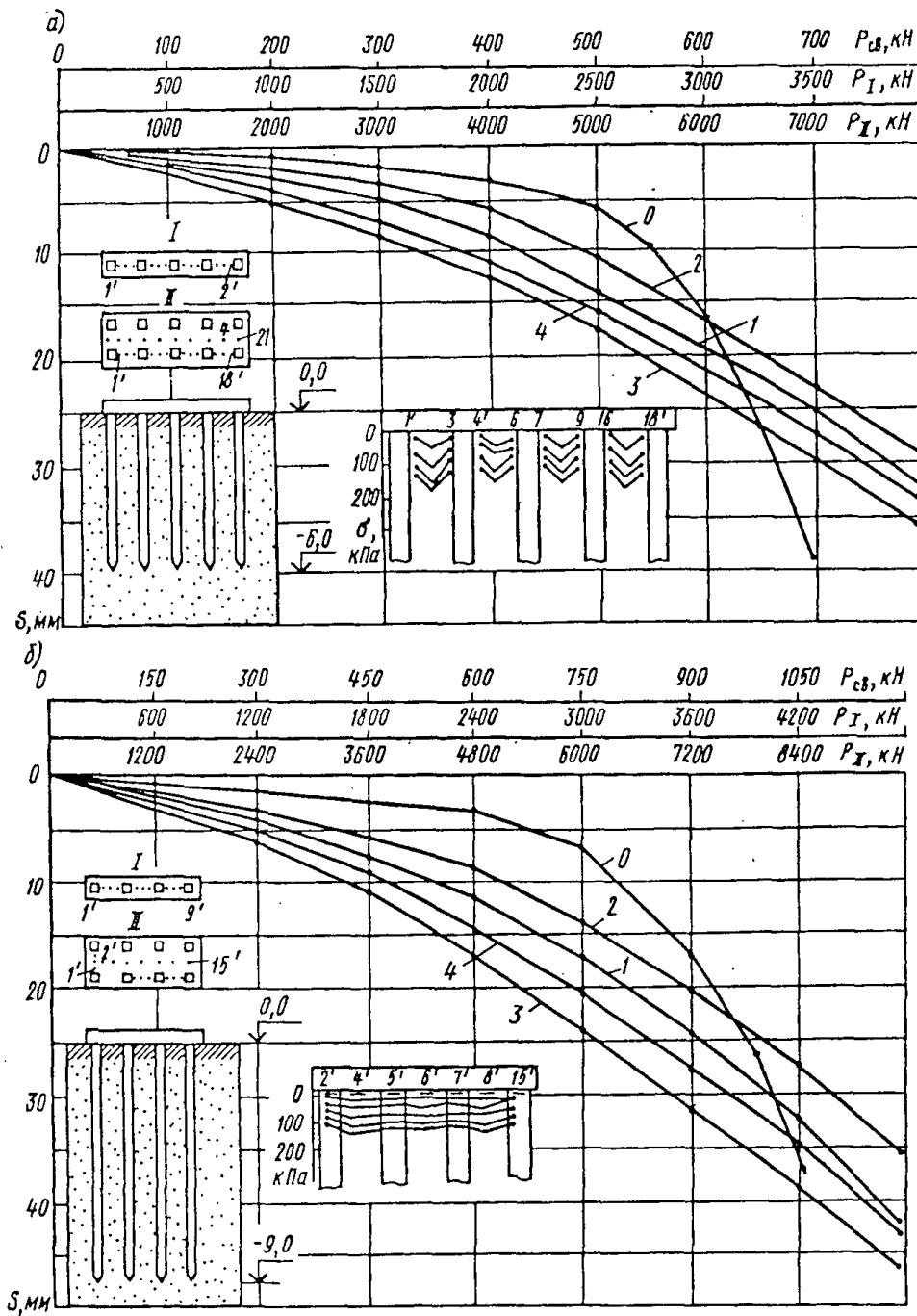


Рис. 4.1 – Результати натурних досліджень осідань і несучої здатності однорядних і дворядних пальових фундаментів з паль довжиною 6 м (а) і 9 м (б) у піщаних грунтах за дослідями Бартоломея А. О.: 1 і 2 – для однорядних пальових фундаментів при високому і низькому ростверках; 3 і 4 – для дворядних пальових фундаментів при високому і низькому ростверках; 0 – для одиночної палі

Бартоломей А. О. відзначає, що осідання пальових фундаментів при дворядному розміщенні паль у 3,5 – 4,5 рази перевищує осідання одиночних паль. Осідання пальових фундаментів зростають плавно, при осіданнях 25 – 40 мм криві «навантаження – осідання» стрічкових пальових фундаментів перетинають криві «навантаження – осідання» одиночних паль, при цьому для пальових фундаментів не досягнуте граничне навантаження.

Аналогічні графіки розвитку деформацій пальових груп та одиночних паль по мірі зростання навантаження були побудовані за результатами фізичного моделювання для піску з коефіцієнтом пористості $e = 0,7$ за дослідями Кременської Ю. О. та для піску з коефіцієнтом пористості $e = 0,6$ за дослідями Малишева О. М. (рис. 4.2 – 4.5).

Проведені дослідження дозволили додати до цих графіків ще графік розвитку деформацій осередненого навантаження на палю у складі пального куща, що дозволяє проаналізувати розвиток реалізації несучої здатності палі при роботі у групі.

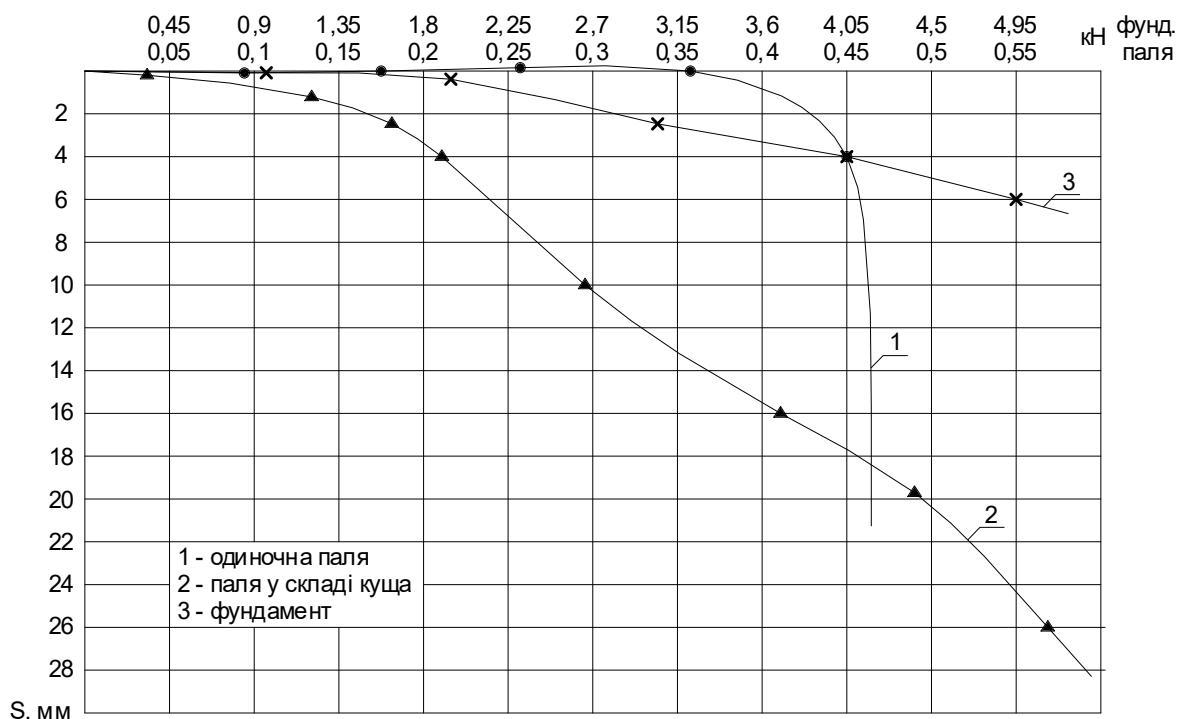


Рис. 4.2 – Результати натурних досліджень осідань і несучої здатності паль і пальових фундаментів з 9 паль довжиною 200 мм у піщаному ґрунті з $e = 0,7$ за дослідями Кременської Ю. О.

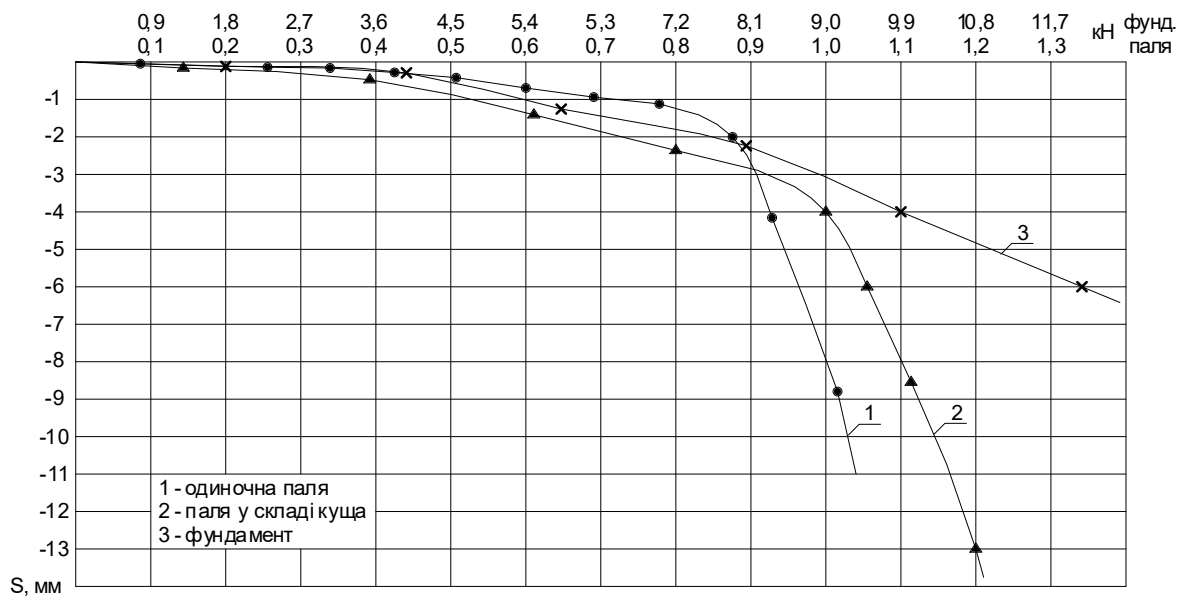


Рис. 4.3 – Результати натурних досліджень осідань і несучої здатності паль і паливових фундаментів з 9 паль довжиною 400 мм у піщаному ґрунті з $e = 0,7$ за дослідями Кремінської Ю. О.

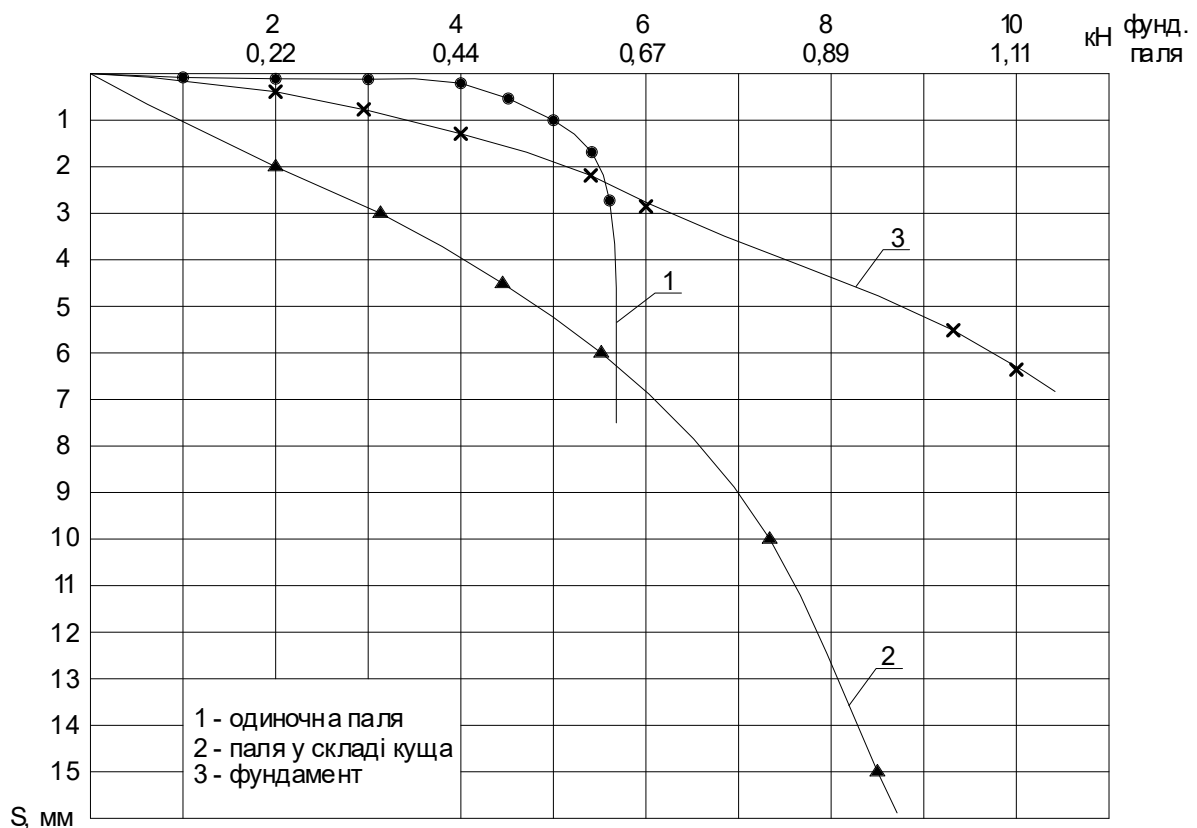


Рис. 4.4 – Результати натурних досліджень осідань і несучої здатності паль і паливових фундаментів з 9 паль довжиною 200 мм у піщаному ґрунті з $e = 0,6$ за дослідями Малишева О. М.

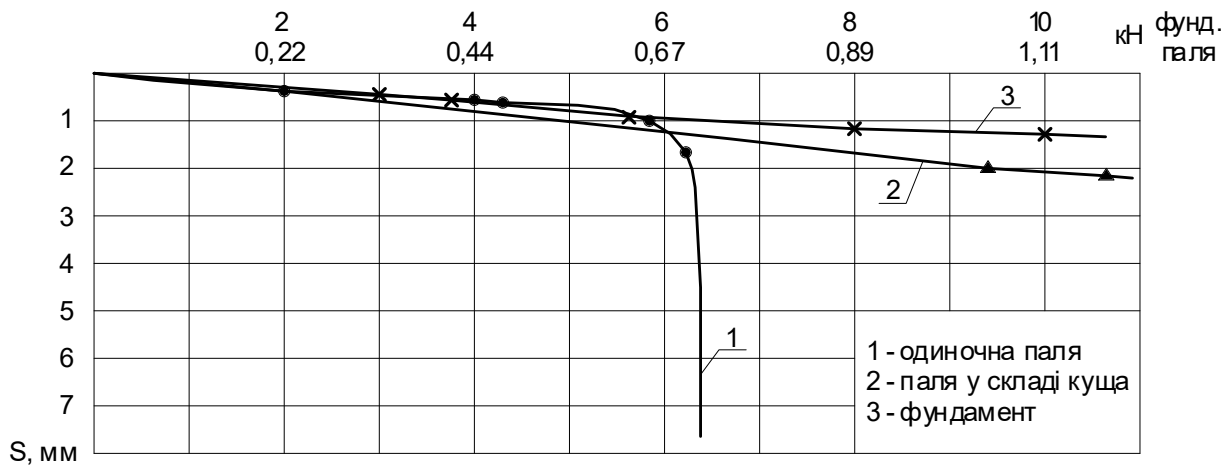


Рис. 4.5 – Результати натурних досліджень осідань і несучої здатності палей і палевих фундаментів з 9 палей довжиною 400 мм у піщаному ґрунті з $e = 0,6$ за дослідями Малишева О. М.

Як бачимо результати фізичного моделювання підтверджують висновки Бартоломея А. О., що осідання палевих фундаментів зростають плавно, а при певних осіданнях, які відповідають приблизно граничним осіданням одиночних палей, криві «навантаження – осідання» палевих фундаментів перетинають криві «навантаження – осідання» одиночних палей, при цьому для палевих фундаментів не досягнуте граничне навантаження.

Палей у складі куца поступово реалізує свою несучу здатність і при значних значеннях осідання сприймає навантаження, більше за граничне навантаження одиночної палі. Отже на певному етапі навантаження ступінь реалізації несучої здатності палі починає перевищувати одиницю.

Одержані результати дозволяють для кількісної оцінки характеру перерозподілу зусиль між елементами палевого фундаменту при обробці результатів досліджень проаналізувати такі параметри:

- частка ростверку у навантаженні на палевий фундамент;
- ступінь реалізації несучої здатності палей при роботі у групі;
- ступінь реалізації тиску під ростверком.

Означені параметри аналізувались на різних етапах навантаження. результати обробки даних експериментів наведені на рис. 4.6 – 4.8.

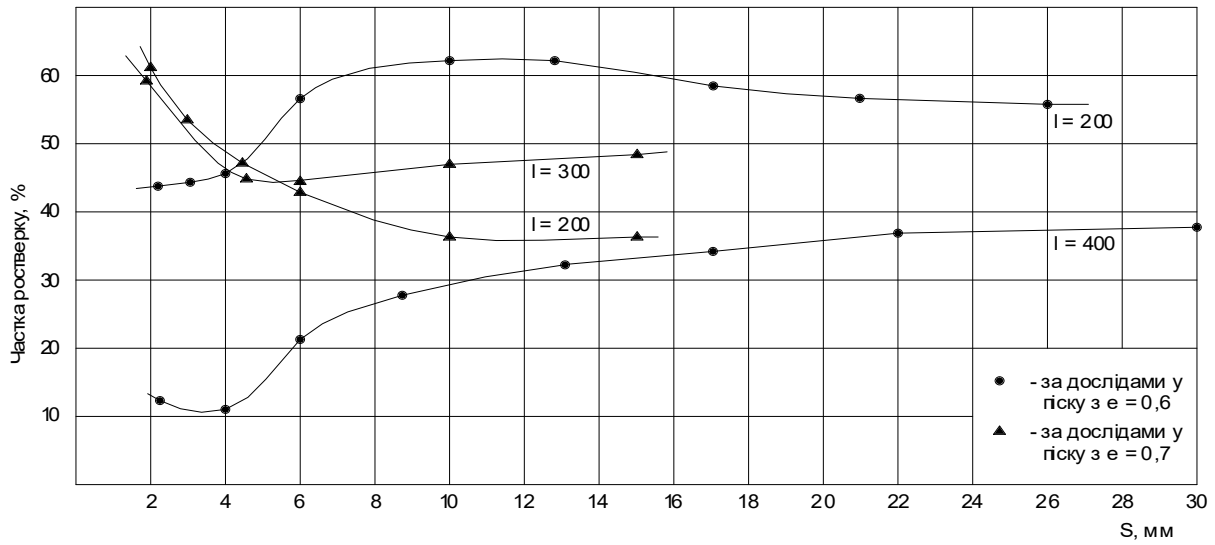


Рис. 4.6 – Графік залежності частки ростверку у навантаженні на пальовий фундамент від його осідання по мірі зростання навантаження

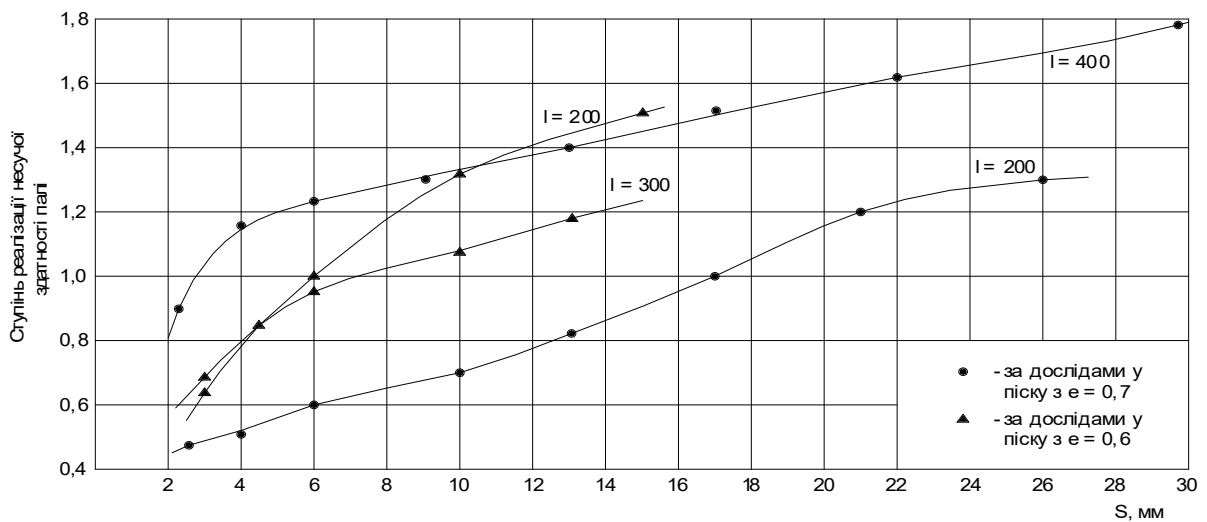


Рис. 4.7 – Графік залежності ступеню реалізації несучої здатності палі у складі фундаменту від його осідання по мірі зростання навантаження

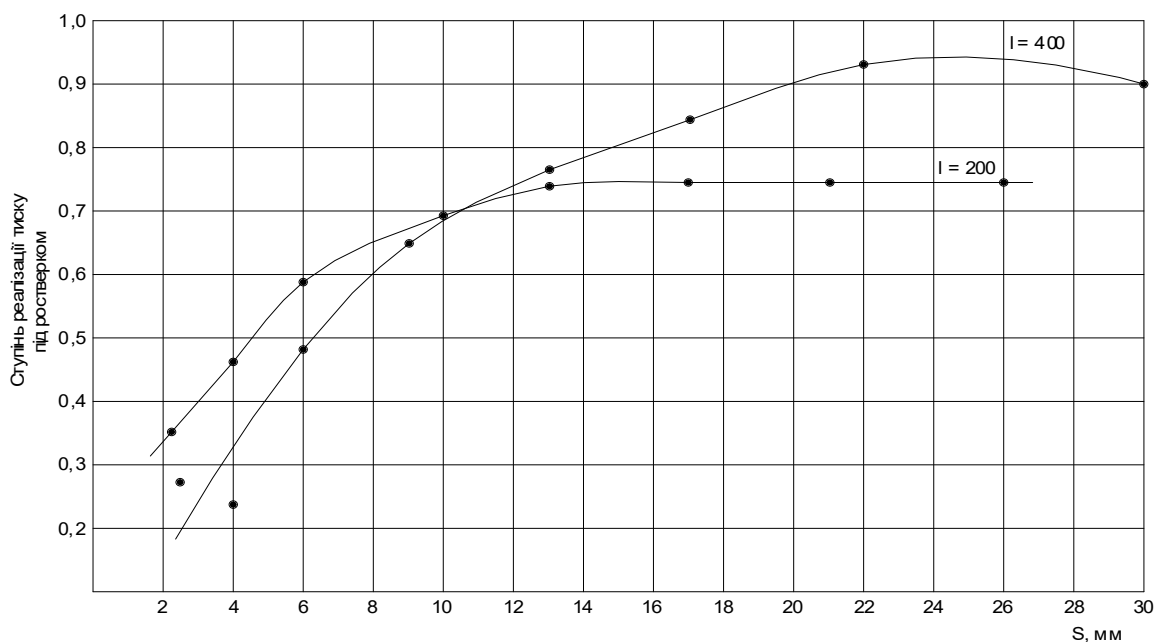


Рис. 4.8 – Графік залежності ступеня реалізації тиску під ростверком у складі фундаменту від його осідання по мірі зростання навантаження для основи з піску з коефіцієнтом пористості $e = 0,7$

Дослідження частки навантаження, що припадає на ростверк, показали, що ростверк включається у роботу при осіданні 0,5 мм. По мірі зростання осідань напруження під подошвою ростверка зростають і досягають максимальних значень при осіданнях 10 – 20 мм. При цьому потенційна можливість ростверка сприймати навантаження реалізується не повністю. В подальшому тиск під ростверком залишається сталим і подальше збільшення несучої здатності пальового фундаменту відбувається за рахунок збільшення навантаження, яке сприймають палі.

4.2 Аналіз розвитку перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту по мірі зростання навантаження при математичному моделюванні

При математичному моделюванні, так само як при фізичному, досліджувався розвиток перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту по мірі зростання навантаження на нього. Дослідження виконувались за допомогою програмного комплексу Plaxis. Розглядався куц з 6 паль довжиною 9,0 м з поперечним перерізом $0,3 \times 0,3$ м, розміщених з кроком $3d$ (рис. 4.9).

При математичному моделюванні для початкової експериментальної моделі пальового фундаменту були прийняті такі параметри:

- модель ґрунту – пружно-пластична модель Кулона-Мора;
- модель пальового фундаменту під колону – ростверк розміром в плані $1,5 \times 2,4$ м, товщиною 0,9 м і палі поперечного перерізу $0,3 \times 0,3$ м;
- палі довжиною 9,0 м з кроком $3d$;

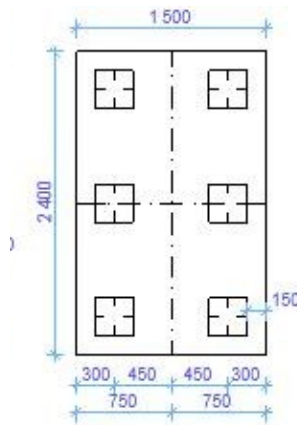


Рис. 4.9 – Схема розміщення палей у ростверку

– величина навантаження, яке сприймається плитою ростверку, розраховується як добуток реактивного опору ґрунту, який знаходиться під подошвою ростверку, на площу ростверку (без врахування площі палей). Ця величина визначалась на декількох етапах навантаження і відповідних осіданнях;

– величина навантаження, яка сприймається палями, розраховується як різниця загального навантаження на стовпчастий палевий фундамент і величини навантаження, яка сприймається плитою ростверку (також визначалась на декількох етапах навантаження і відповідних осіданнях).

Моделювання сумісної роботи ростверку і палей виконане на однорідній піщаній та глинистій основі.

Характеристики піщаного ґрунту: пісок дрібний, $\gamma = 18,6 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,67$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 32^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$.

Характеристики глинистого ґрунту: суглинок, $\gamma = 18,5 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,75$, $c = 23 \text{ кПа}$, $\varphi = 21^\circ$, $E = 14 \text{ МПа}$.

Додатково до програми моделювання включені такі дослідження:

– моделювання роботи одиночних палей довжиною 9 м з поперечним перерізом $0,3 \times 0,3 \text{ м}$;

– моделювання роботи ростверку розмірами $1,5 \times 2,4 \text{ м}$ як фундаменту мілкого закладання.

Для проведення моделювання були прийняті забивні палі із бетону С20/25 (В25).

Розміри змодельованого ґрунтового масиву для максимального зменшення впливу крайових ефектів на осідання палей прийнята в плані $30 \times 30 \text{ м}$, та завтовшки 40 м. Побудована модель ґрунтового масиву показана на рис. 4.10. На рис.4.11 показана розрахункова модель фундаменту.

Величина навантаження на моделі збільшувалась до тих пір, поки величина осідання не становила 10 см.

В результаті проведення експериментів були одержані графіки залежності осідання – навантаження куца в цілому та графіки залежності

сумарного навантаження на палі у складі пального куща від його осідання. Також були одержані графіки осідання – навантаження за результатами випробування одиночної палі, графік осідання – навантаження при випробуванні плити ростверку розміром 1500 × 2400 мм як штампа без палей.

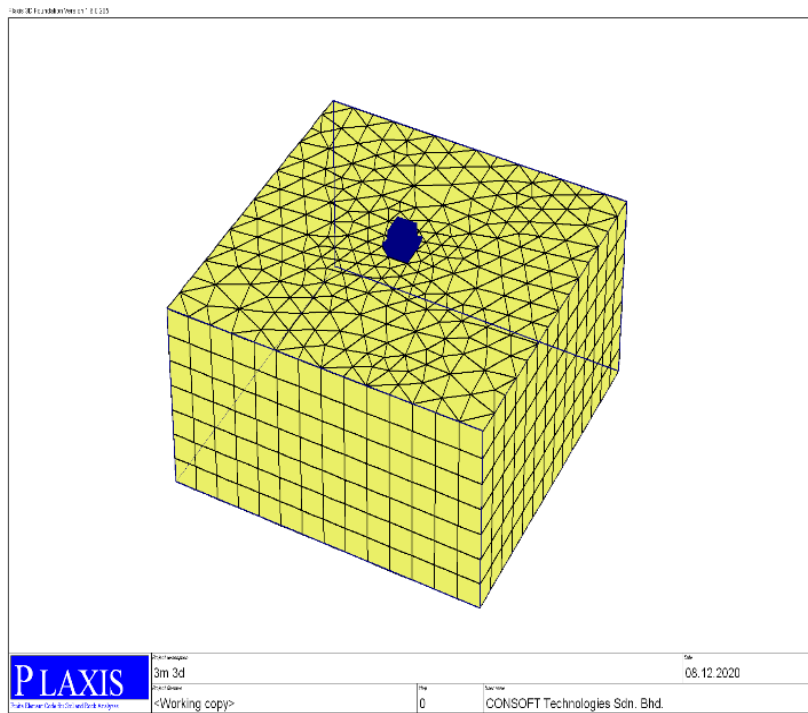


Рис. 4.10 – Розрахункова модель ґрунтового масиву

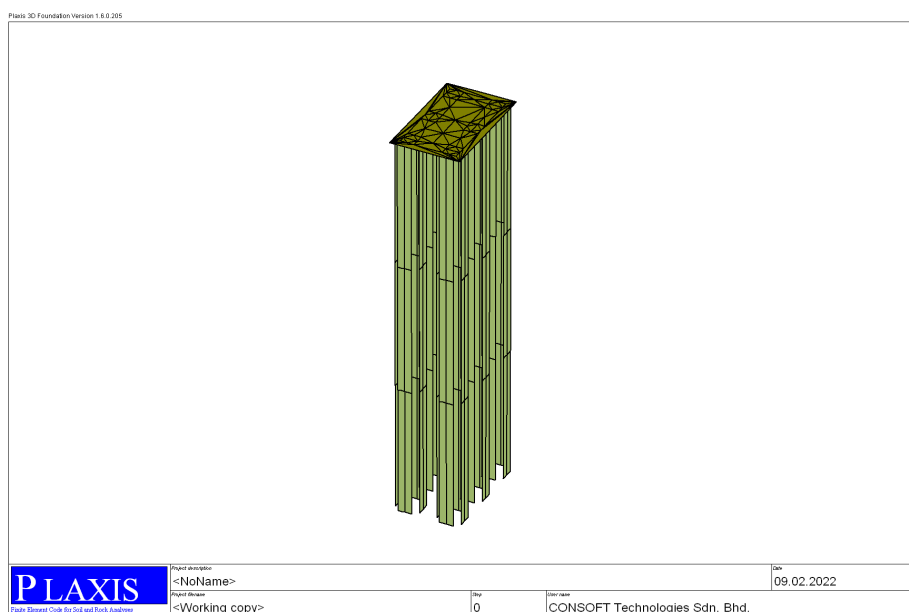


Рис. 4.11 – Розрахункова модель стовпчастого пального фундаменту з 6 палей у групі

Для аналізу зміни перерозподілу зусиль між елементами пального фундаменту були побудовані графіки розвитку деформацій паливових груп, осередненого навантаження на палю у складі паливового куща та одиночних палей по мірі зростання навантаження для двох видів ґрунтів (рис. 4.12, 4.13).

Як бачимо результати математичного моделювання дають картину, якісно аналогічну результатам фізичного моделювання, що осідання паливових фундаментів зростають плавно, а при певних осіданнях, які відповідають приблизно граничним осіданням одиночних палей, криві «навантаження – осідання» паливових фундаментів перетинають криві «навантаження – осідання» одиночних палей, при цьому для паливових фундаментів не досягнуте граничне навантаження.

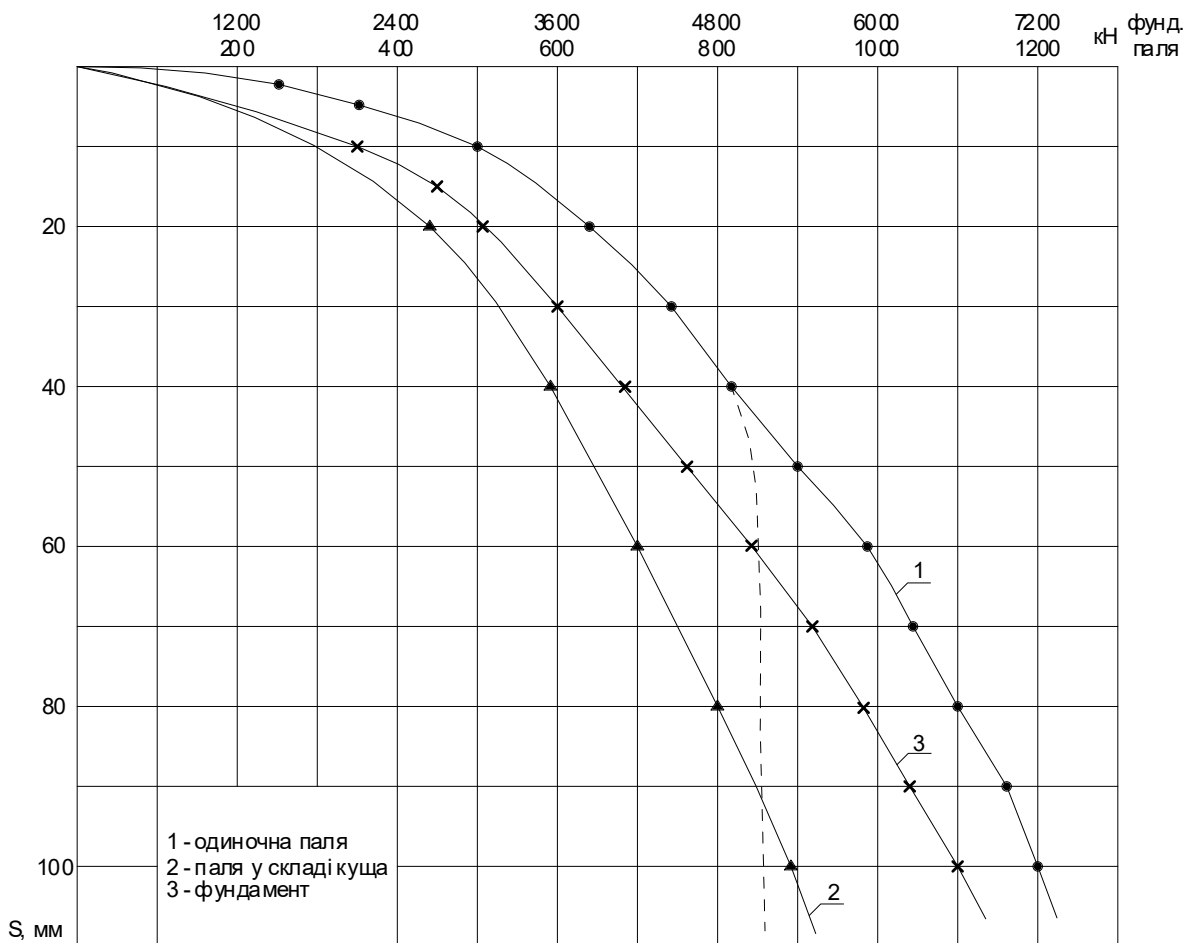


Рис. 4.12 – Графіки розвитку деформацій паливової групи, осередненого навантаження на палю у складі паливового куща та одиночних палей по мірі зростання навантаження для піщаної основи

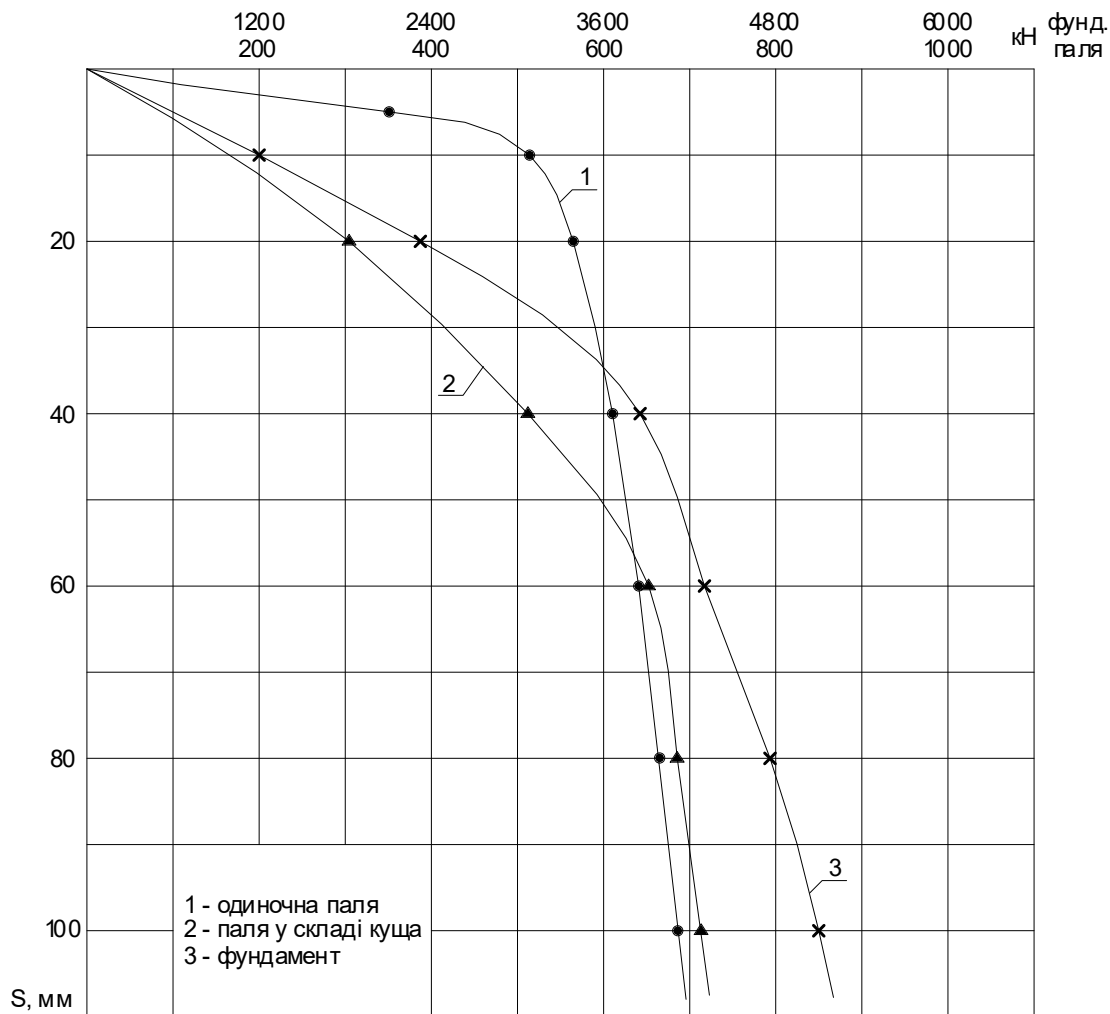


Рис. 4.13 – Графіки розвитку деформацій пальових груп, осередненого навантаження на палю у складі пального куща та одиночних паль по мірі зростання навантаження для глинистої основи

Палля у складі куща поступово реалізує свою несучу здатність і при значних значеннях осідання сприймає навантаження, більше за граничне навантаження одиночної палі. Отже на певному етапі навантаження ступінь реалізації несучої здатності палі починає перевищувати одиницю.

Для кількісної оцінки характеру перерозподілу зусиль між елементами пального фундаменту по мірі зростання навантаження при обробці результатів досліджень аналізувались такі ж параметри, що і при фізичному моделюванні:

- частка ростверку у навантаженні на паливий фундамент;
- ступінь реалізації несучої здатності палі при роботі у групі;
- ступінь реалізації тиску під ростверком.

Результати обробки даних досліджень представлені у таблицях 4.1 та 4.2 та на рис. 4.14 – 4.16.

Таблиця 4.1 – Результати досліджень перерозподілу зусиль між елементами пального фундаменту по мірі зростання навантаження для піщаного ґрунту

Осідання s , мм	Навантаження на куцц, кН	Осереднене навантаження на палю у складі фундаменту, кН	Несуча здатність одиночної палі, кН	Навантаження, що сприймає ростверк, кН	Навантаження, що сприймає плита ростверку без паль, кН	Ступінь реалізації несучої здатності паль	Ступінь реалізації несучої здатності ростверку	Частка несучої здатності ростверку
20	3060	438	830	428	1065	0,53	0,40	0,14
40	4140	578	830	673	1768	0,70	0,38	0,16
60	5076	701	830	872	2180	0,84	0,40	0,172
80	5886	808	830	1037	2800	0,97	0,37	0,176
100	6588	898	830	1200	3276	1,08	0,366	0,182

Таблиця 4.2 – Результати досліджень перерозподілу зусиль між елементами пального фундаменту по мірі зростання навантаження для глинистого ґрунту

Осідання s , мм	Навантаження на куцц, кН	Осереднене навантаження на палю у складі фундаменту, кН	Несуча здатність одиночної палі, кН	Навантаження, що сприймає ростверк, кН	Навантаження, що сприймає плита ростверку без паль, кН	Ступінь реалізації несучої здатності паль	Ступінь реалізації несучої здатності ростверку	Частка несучої здатності ростверку
20	2322	364	600	135	1360	0,607	0,100	0,058
40	3744	563	600	364	2000	0,938	0,182	0,097
60	4356	631	600	572	2500	1,052	0,229	0,131
80	4770	678	600	701	2920	1,13	0,240	0,147
100	5112	719	600	796	3276	1,20	0,240	0,156

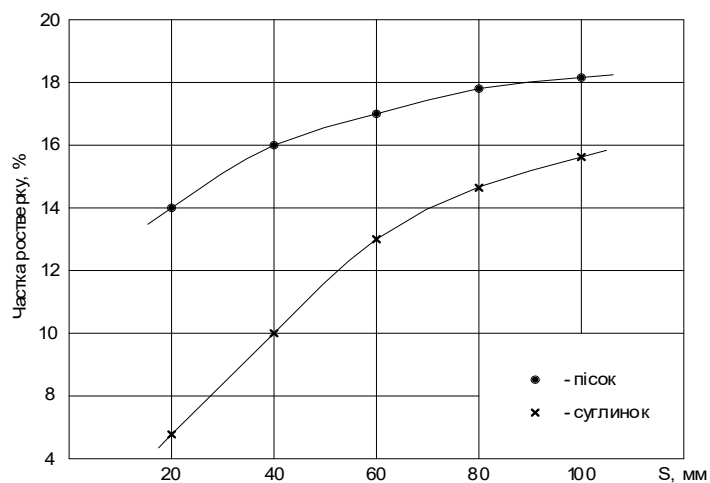


Рис. 4.14 – Графік залежності частки ростверку у навантаженні на пальовий фундамент від величини осідання

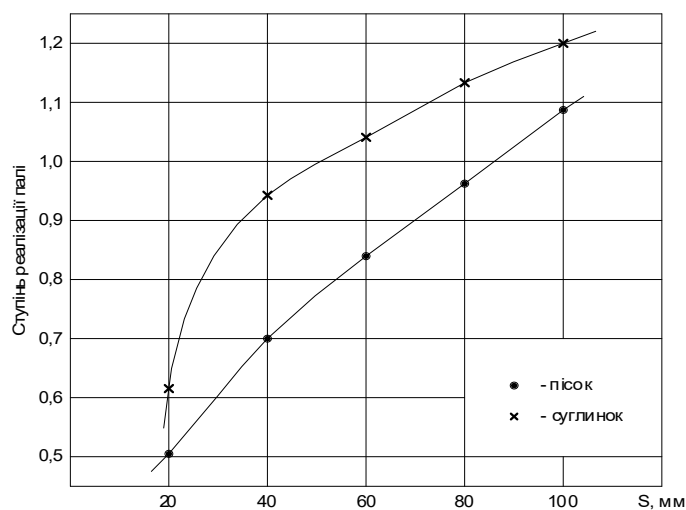


Рис. 4.15 – Залежність ступеня реалізації несучої здатності паль у складі пального фундаменту від величини осідання

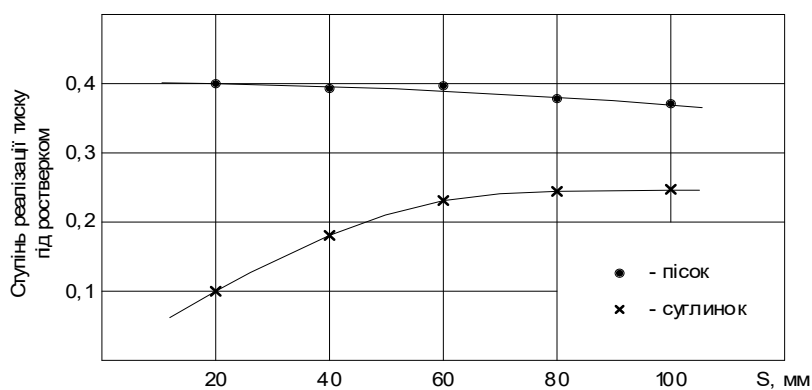


Рис. 4.16 – Залежність ступеня реалізації тиску під подошвою ростверку у складі стовпчастого пального фундаменту від величини осідання

Як бачимо, частка ростверку у несучій здатності фундаменту збільшується по мірі зростання навантаження, оскільки збільшується тиск під подошвою ростверка. Ступінь реалізації ростверка практично не змінюється для піщаної основи і несуттєво зростає для глинистої. Отже, ростверк поступово включається у роботу, але потенційна можливість ростверка сприймати навантаження реалізується не повністю і при певному значенні осідання залишається сталою.

Паля у складі куща, як і при фізичному моделюванні, поступово реалізує свою несучу здатність і при значних значеннях осідання сприймає навантаження, більше за граничне навантаження одиночної палі. Отже на певному етапі навантаження ступінь реалізації несучої здатності палі починає перевищувати одиницю.

Ростверк краще реалізує себе у піщаному ґрунті, а палі – у глинистому, але якісний характер зміни ступеня реалізації палі і ростверку по мірі зростання навантаження для піщаних і глинистих ґрунтів аналогічний.

За критичне значення осідання, для якого доцільно визначати ступені реалізації несучої здатності елементів пального фундаменту, що можуть пропонуватись для використання при проєктуванні, можна приймати максимальне значення осідання фундаменту, але при цьому до визначення ступеня реалізації палі треба ставитись з обережністю, без надмірного його завищення.

Висновки за розділом 4

Результати чисельного математичного моделювання підтвердили результати, отримані під час проведення фізичного випробування фундаментів на маломасштабних моделях.

1. Паля у складі куща, як за результатами фізичного моделювання, та і за результатами математичного моделювання, поступово реалізує свою несучу здатність по мірі зростання навантаження і при значних значеннях осідання сприймає навантаження, більше за граничне навантаження одиночної палі. Отже на певному етапі навантаження ступінь реалізації несучої здатності палі починає перевищувати одиницю.

2. Частка ростверку у несучій здатності фундаменту збільшується по мірі зростання навантаження, оскільки збільшується тиск під подошвою ростверка. Ступінь реалізації ростверка практично не змінюється для піщаної основи і несуттєво зростає для глинистої. Отже, ростверк поступово включається у роботу, але потенційна можливість ростверка сприймати навантаження реалізується не повністю і при певному значенні осідання залишається сталою.

3. Для аналізу характеру перерозподілу зусиль між елементами пального фундаменту може бути використане моделювання у програмному комплексі Plaxis 3D Foundation.

4. За критичне значення осідання, для якого доцільно визначати ступені реалізації несучої здатності елементів пальового фундаменту, що можуть пропонуватись для використання при проектуванні, можна приймати максимальне значення осідання фундаменту, але при цьому до визначення ступеня реалізації палі треба ставитись з обережністю, без надмірного його завищення.

5 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ПАЛЬОВИХ КУЩІВ З КОРОТКИХ ПАЛЬ

Особливості роботи пальових кущів з коротких палей досліджувались шляхом фізичного моделювання на маломасштабних моделях, результати якого викладені у підрозділі 2.2.

Встановлено, що у випадку застосування коротких палей можна з метою економії матеріалів зменшити кількість палей в групі при збереженні розмірів ростверку з незначною втратою несучої здатності.

Фізичне моделювання на маломасштабних моделях не дозволяє досліджувати вплив виду ґрунту на роботу пальної групи. Крім того при фізичному моделюванні обмежена довжина палей, що пов'язане з можливостями упорної системи.

В зв'язку з цим було проведене математичне моделювання за допомогою програмного комплексу Plaxis 3D Foundation роботи пальових кущів з забивних палей з варіюванням кількості палей в межах ростверку сталих розмірів, аналогічне проведеному фізичному моделюванню, але додатково розглядались палі різної довжини у різних ґрунтах.

5.1 Програма та методика математичного моделювання роботи палей різної довжини в умовах різних ґрунтових умов

Дослідженнями розглядається однорідний піщаний та глинистий ґрунт основи.

При математичному моделюванні за початкову експериментальну модель пального фундаменту були прийняті такі параметри:

- модель ґрунту – пружно-пластична модель Кулона-Мора;
- модель пального фундаменту під колону – ростверк розміром в плані $2,4 \times 2,4$ м, товщиною 0,9 м і палі забивні поперечного перерізу $0,3 \times 0,3$ м;
- палі довжиною 3,0 м з кроком 3d, 4,2 d і 6d;
- палі довжиною 10,0 м з кроком 3d, 4,2d і 6d;

Моделювання сумісної роботи ростверку і палей виконане на однорідній піщаний та глинистій основі. Характеристики піщаного ґрунту:

пісок дрібний, $\gamma = 18,6$ кН/м³, $e = 0,67$, $c = 2$ кПа, $\varphi = 32^\circ$, $E = 28$ МПа.

Характеристики глинистого ґрунту:

суглинок, $\gamma = 18,5$ кН/м³, $e = 0,75$, $c = 23$ кПа, $\varphi = 21^\circ$, $E = 14$ МПа.

Варіювання кількістю палей здійснюється в межах сталих габаритів ростверка.

Програму моделювання наведено в табл. 5.1.

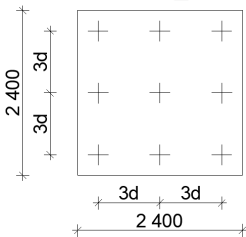
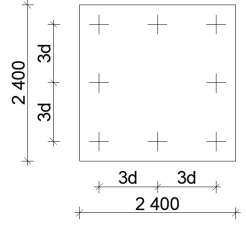
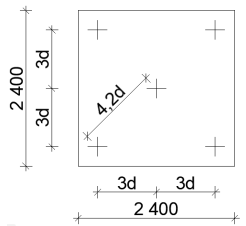
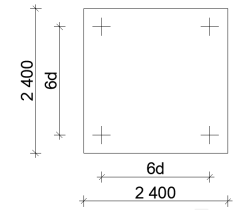
Додатково до програми моделювання включені такі дослідження:

- моделювання роботи одиночних паль довжиною 3 та 10 м;
- моделювання роботи ростверку розмірами $2,4 \times 2,4$ м як фундаменту мілко закладання;
- моделювання роботи умовного фундаменту мілко закладання при довжині паль 3 та 10 м.

При моделюванні умовного фундаменту він представляється як суцільний фундамент призматичної форми з розмірами в плані і по глибині, що відповідають розмірам умовного фундаменту, визначеними за рекомендаціями норм [24] для розрахунку осідання пального фундаменту.

Для проведення моделювання були прийняті забивні палі із бетону C20/25 (B25), довжиною 3 м та 10 м, поперечним перерізом $0,3 \times 0,3$ м.

Таблиця 5.1 – Програма математичного моделювання роботи пального фундаменту

Група дослідів	Довжина та поперечний розмір паль	Крок і кількість паль
1	$L = 3 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	
	$L = 10 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	
2	$L = 3 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	
	$L = 10 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	
3	$L = 3 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	
	$L = 10 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	
4	$L = 3 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	
	$L = 10 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	

Розміри змодельованого ґрунтового масиву для максимального зменшення впливу крайових ефектів на осідання палі прийнята в плані 20×20 м, та завтовшки 20 м. Одна з побудованих моделей ґрунтового масиву та розрахункова модель стовпчастого пальового фундаменту зображені на рис. 5.1 та 5.2.

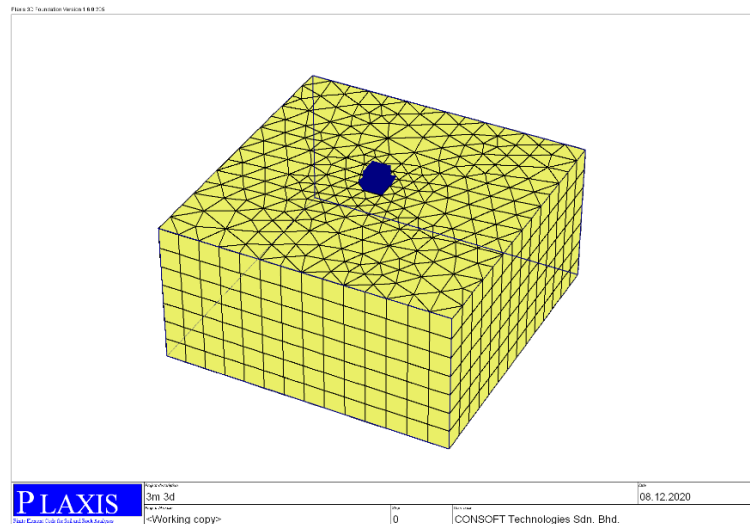


Рис. 5.1 – Розрахункова модель ґрунтового масиву

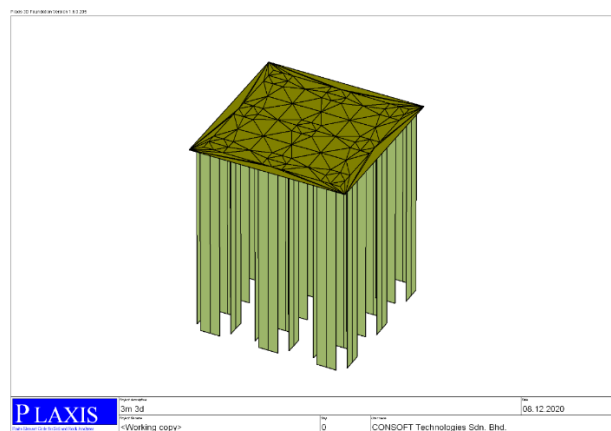


Рис. 5.2 – Розрахункова модель стовпчастого пальового фундаменту, палі довжиною 3 м при кроці 3d

5.2 Результати математичного моделювання роботи стовпчастого пальового фундаменту з коротких та довгих палей

Результати математичного моделювання роботи стовпчастого пальового фундаменту з коротких та довгих палей висвітлені в роботах [46, 51].

На рис. 5.3 та 5.4 для прикладу зображені мозаїки вертикальних деформацій піщаного ґрунту при навантаженні пальового фундаменту розмірами ростверка $2,4 \text{ м} \times 2,4 \text{ м}$.

На рис. 5.5 представлений результат побудови мозаїки вертикальних деформацій піщаного ґрунту при навантаженні умовного фундаменту, довжина паль 3 м та 10 м відповідно.

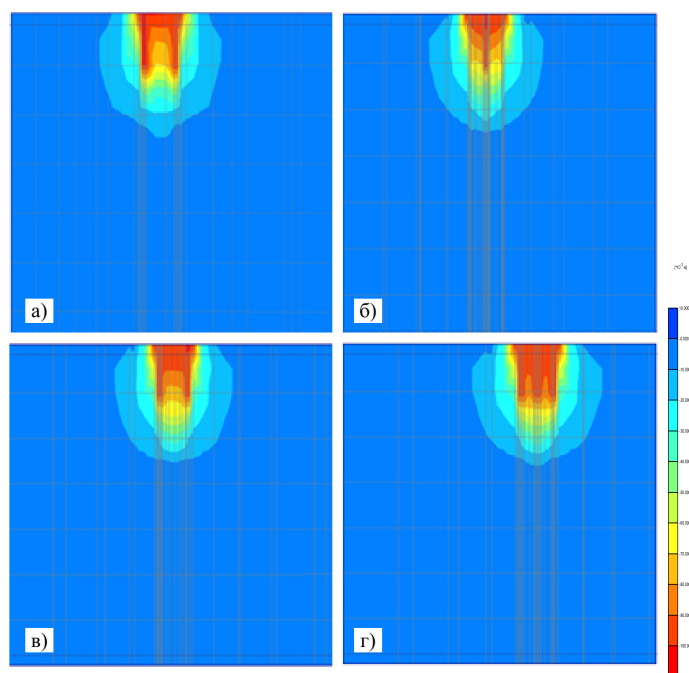


Рис. 5.3 – Мозаїка вертикальних деформацій піщаного ґрунту при навантаженні пальового фундаменту з розмірами ростверка 2,4 м × 2,4 м; довжина паль 3 м; кількість паль: а) 4 шт; б) 5 шт; в) 8 шт; г) 9 шт.

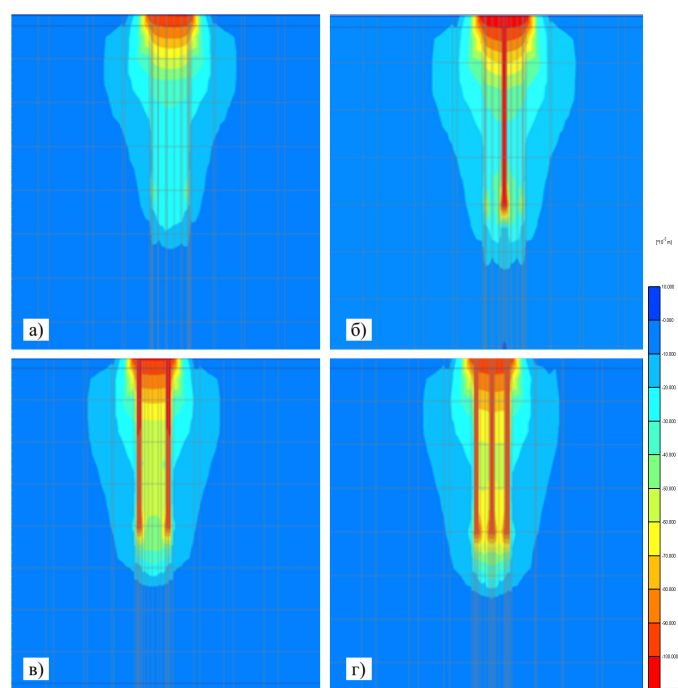


Рис. 5.4 – Мозаїка вертикальних деформацій піщаного ґрунту при навантаженні пальового фундаменту з розмірами ростверку 2,4 м × 2,4 м; довжина паль 10 м; кількість паль: а) 4 шт; б) 5 шт; в) 8 шт; г) 9 шт.

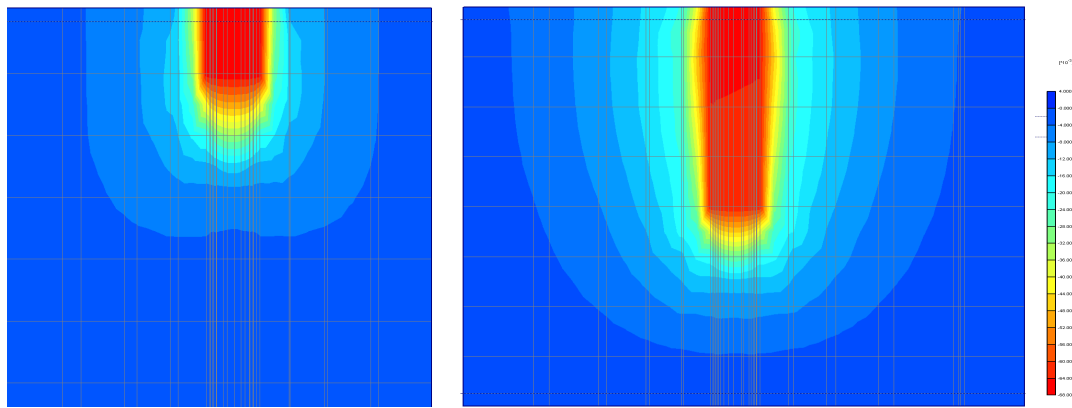


Рис. 5.5 – Мозаїка вертикальних деформацій піщаного ґрунту при навантаженні умовного фундаменту при довжині паль 3 м та 10 м

На рис. 5.6 та 5.7 представлені результати графіків залежності осідання-навантаження, визначених математичним моделюванням для дослідних пальових фундаментів. Також на графіках наведена крива, що відображає умовний фундамент.

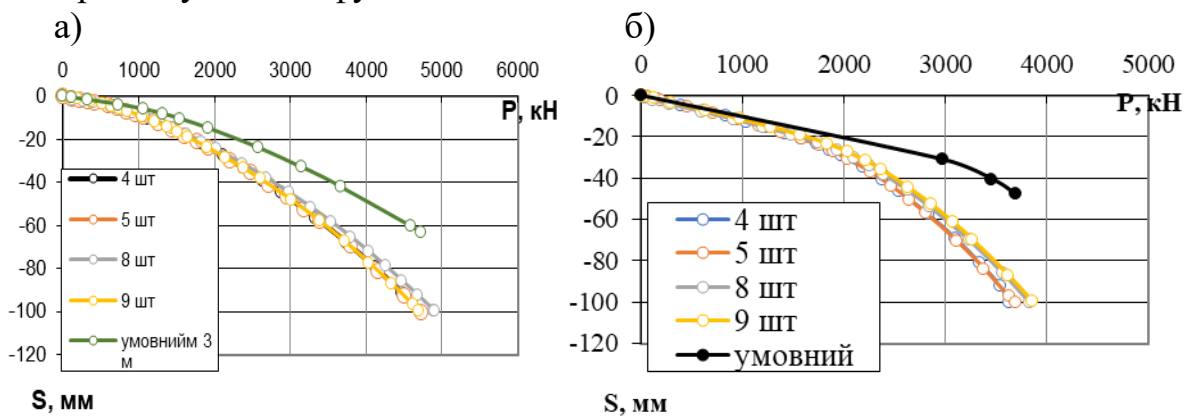


Рис. 5.6 – Графіки залежності навантаження – осідання для пальових фундаментів з палі довжиною 3 м:
а – піщаний ґрунт; б – глинистий ґрунт

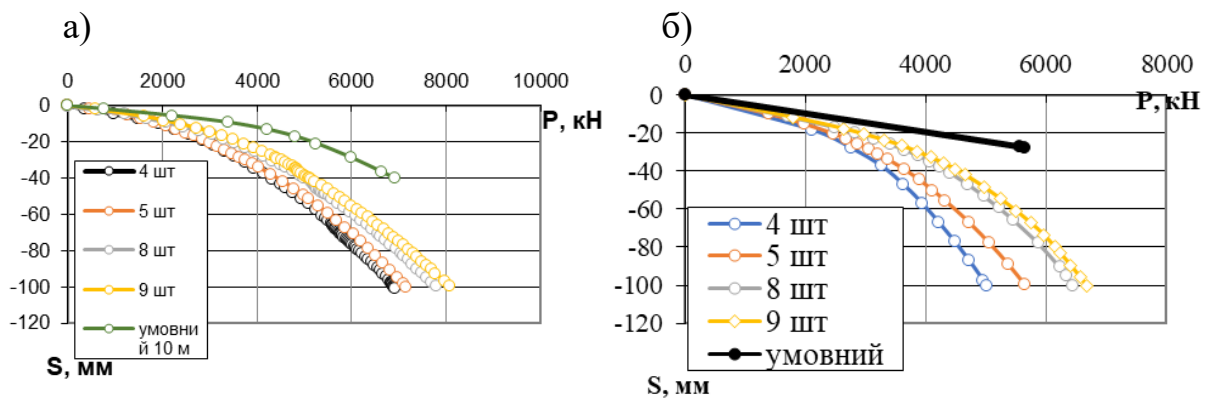
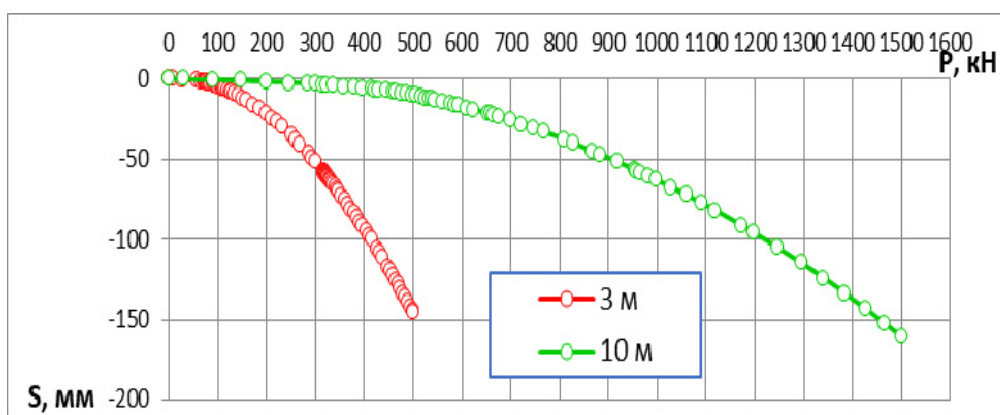


Рис. 5.7 – Графіки залежності навантаження – осідання для пальових фундаментів з палі довжиною 10 м:
а – піщаний ґрунт; б – глинистий ґрунт

З рисунків видно, що для коротких паль зменшення кількості паль в групі не призводить до суттєвої втрати несучої здатності, тоді як для довгих паль такі втрати є значними, особливо для глинистих ґрунтів. Заміна куша з коротких паль умовним ґрунто-пальовим масивом призвела до незначного збільшення несучої здатності групи, для довгих паль поведінка умовного фундаменту суттєво відрізняється від поведінки пальового фундаменту, оскільки в роботу втягується ґрунтовий масив нижче нижніх кінців паль.

На рис. 5.8 представлені графіки залежності осідання-навантаження для одиночних паль довжиною 3 м та 10 м.

а)



б)

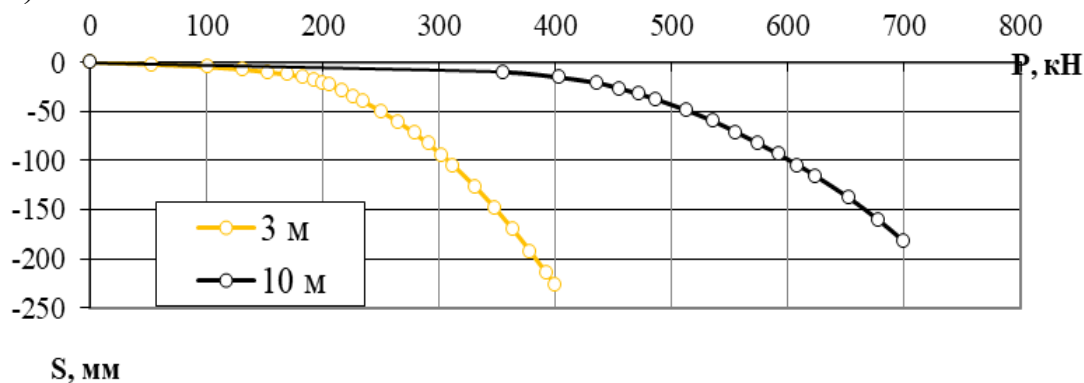


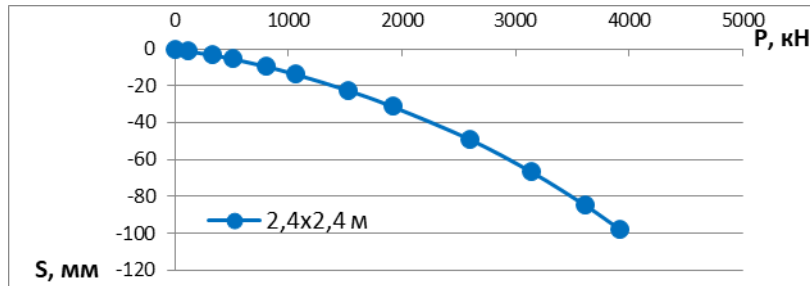
Рис. 5.8 – Графік залежності осідання – навантаження для одиночних паль різної довжини: а – піщаний ґрунт; б – глинистий ґрунт

На рис. 5.9 представлений графік залежності осідання-навантаження для ростверку, як фундаменту мілкого закладання.

Для більш детального аналізу була визначена несуча здатність груп паль за результатами моделювання в Plaxis при осіданні 100 мм. Також було визначено навантаження, що сприймається ростверком у складі пальового фундаменту. Для порівняння наведені значення сумарної несучої здатності паль як одиночних, несучої здатності ростверку як фундаменту мілкого закладання розмірами 2,4 × 2,4 м при такому ж осіданні.

Результати моделювання наведено в табл. 5.2, 5.3. В останньому стовпчику несуча здатність куща представлена як сума несучих здатностей окремих його елементів.

а)



б)

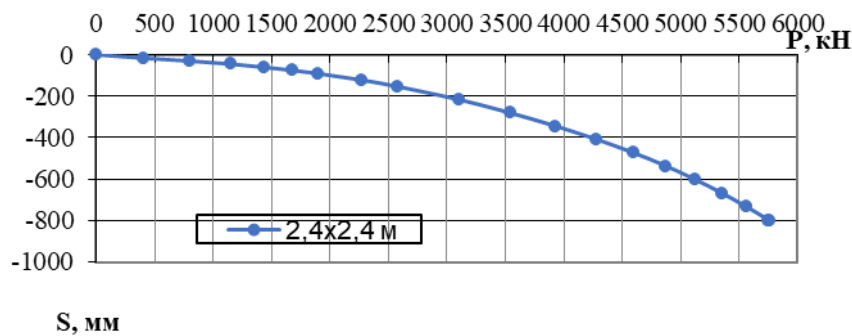


Рис. 5.9 – Графік залежності осідання – навантаження для ростверку:
а – піщаний ґрунт; б – глинистий ґрунт

Таблиця 5.2 – Порівняння роботи пальового фундаменту з плитою ростверку $2,4 \times 2,4$ м з роботою його окремих елементів при осіданні куща $s = 100,0$ мм у піщаному ґрунті

Довжина палі, мм	Кількість палі в кущі, шт	При роботі у складі фундаменту					При роботі кожного з елементів як окремого			
		Осереднене навантаження на палю фундаменту, кН	Сума зусиль в палях куща, кН	Навантаження, що сприймається ростверком, кН	Навантаження на кущ, кН	Частка ростверку, %	Несуча здатність одиночної палі, кН	Сума зусиль в палях, кН	Навантаження, що сприймається плитою ростверку без палі, кН	Навантаження на кущ, як сума окремих елементів кН
3 м	4	744,75	2979	1744	4723	37	415	1660	4000	5660
	5	589,4	2947	1776	4723	38		2075		6070
	8	508,75	4070	826	4896	17		3320		7320
	9	447,22	4025	669	4694	14		3735		7735
10 м	4	978,0	3912	3000	6912	43	1220	4880	4000	8880
	5	875,8	4379	2763	7142	39		6100		10100
	8	704,75	5638	2224	7862	28		9760		13760
	9	683,33	6150	1914	8064	24		10980		14980

Таблиця 5.3 – Порівняння роботи пальового фундаменту з плитою ростверку $2,4 \times 2,4$ м з роботою його окремих елементів при осіданні куща $s = 100,0$ мм у глинистому ґрунті

Довжина палі, мм	Кількість палі в кущі, шт	При роботі у складі фундаменту					При роботі кожного з елементів як окремого			
		Осереднене навантаження на палю фундаменту, кН	Сума зусиль в палях куща, кН	Навантаження, що сприймається ростверком, кН	Навантаження на кущ, кН	Частка ростверку, %	Несуча здатність одиночної палі, кН	Сума зусиль в палях, кН	Навантаження, що сприймається плитою ростверку без палі, кН	Навантаження на кущ, як сума окремих елементів кН
3 м	4	665,5	2662	967	3629	27	310	1240	2000	3240
	5	511,0	2555	1131	3686	31		1550		3550
	8	418,8	3351	479	3830	13		2480		4480
	9	392,7	3534	325	3859	8		2790		4790
10 м	4	826,25	3305	1706	5011	34	600	2400	2000	4400
	5	791,6	3958	1687	5645	30		3000		5000
	8	624,6	4997	1454	6451	23		4800		6800
	9	595,2	5357	1325	6682	20		5400		7400

Аналіз результатів показує, що в випадку застосування коротких палей можна з метою економії матеріалів зменшити кількість палей в групі при збереженні розмірів ростверку з незначною втратою несучої здатності, що підтверджує результати фізичних досліджень. Але перетворення пального фундаменту на умовний з метою визначення несучої здатності доречно лише при кроці палей $3d$, тобто при доволі частому їх розташуванні. Для довгих палей навіть при частому кроці палей умовний фундамент працює краще, ніж паливий.

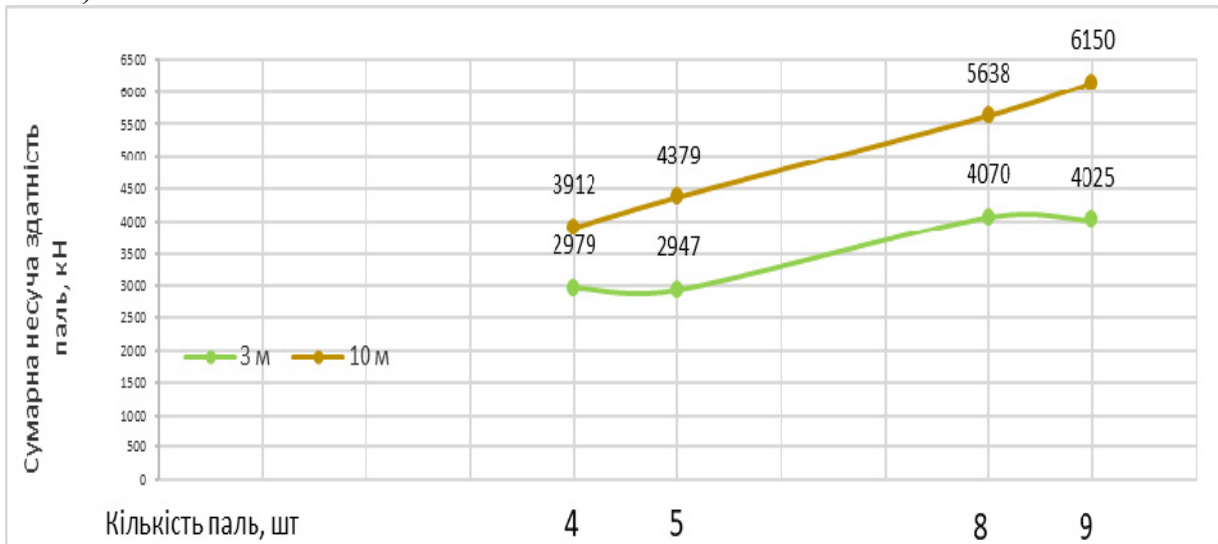
На рис. 5.10 та 5.11 наведені графіки залежності суми зусиль у палях та ростверку від кількості палей в групі.

На графіках 5.10 та 5.11 спостерігаємо, що сума зусиль у палях у складі групи зростає при збільшенні кількості палей, але непропорційно збільшенню кількості, а реакція ростверку, навпаки, зменшується.

Для кількісної оцінки характеру перерозподілу зусиль між елементами пального фундаменту при обробці результатів досліджень аналізувались такі параметри:

- частка ростверку у навантаженні на паливий фундамент;
- ступінь реалізації несучої здатності палей при роботі у групі;
- ступінь реалізації тиску під ростверком.

а)



б)

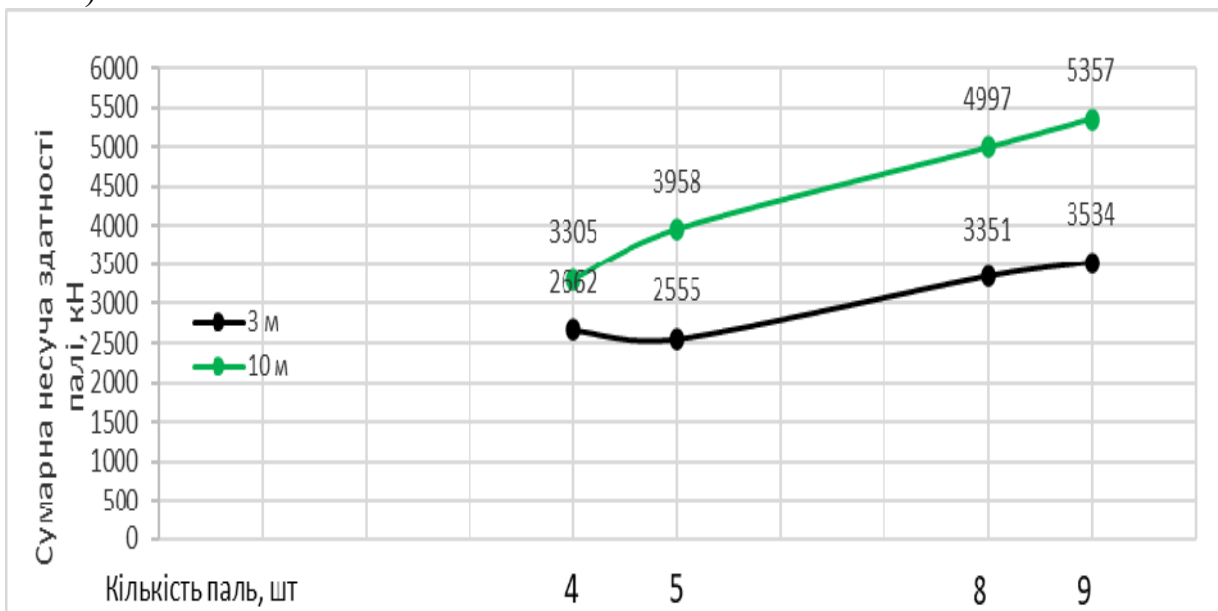
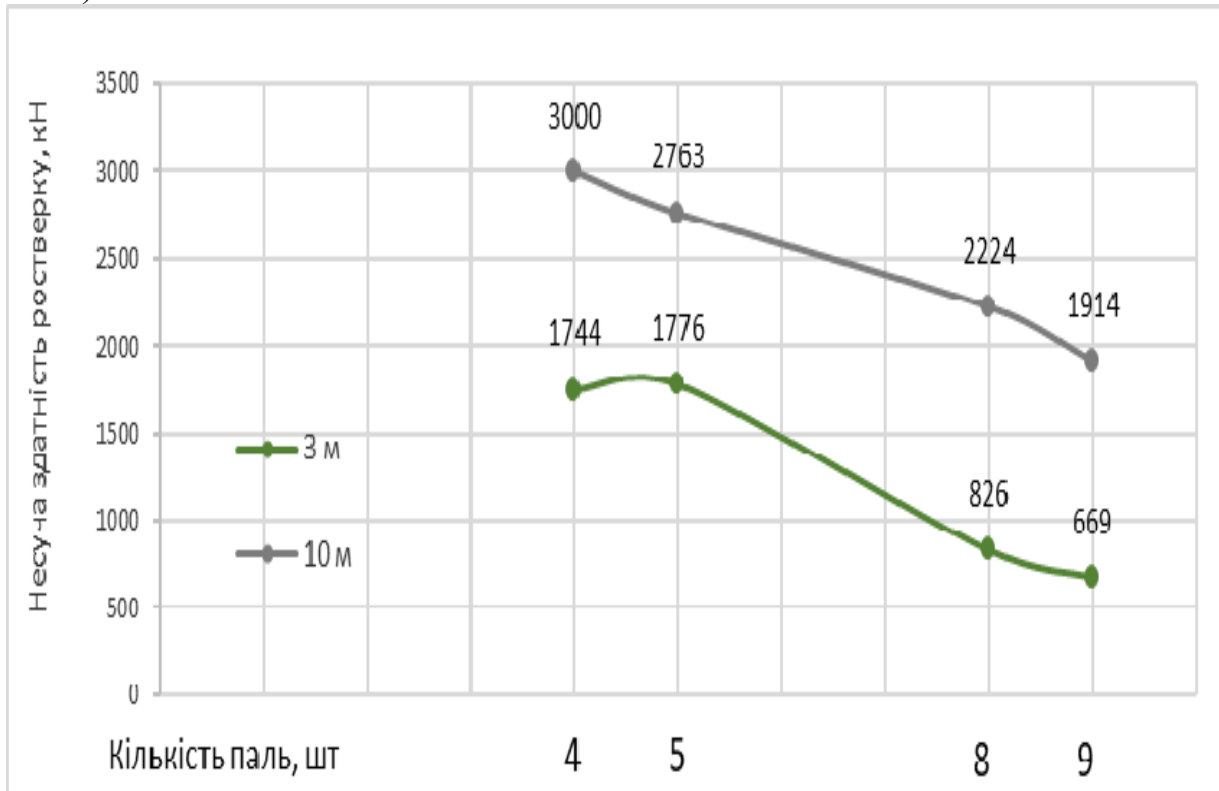


Рис. 5.10 – Графік залежності суми зусиль у палях у складі фундаменту від кількості і довжини палей:
а – піщаний ґрунт; б – глинистий ґрунт

Ступінь реалізації несучої здатності палей визначався як відношення осередненого навантаження на палю у групі до несучої здатності одиночної палі. Ступінь реалізації тиску під ростверком – як відношення реактивного зусилля, яке сприймає ростверк у складі фундаменту, до навантаження, яке сприймає плита ростверку, працюючи без палей.

На рис. 5.12 – 5.14 наведені результати обробки параметрів математичного експерименту.

а)



б)

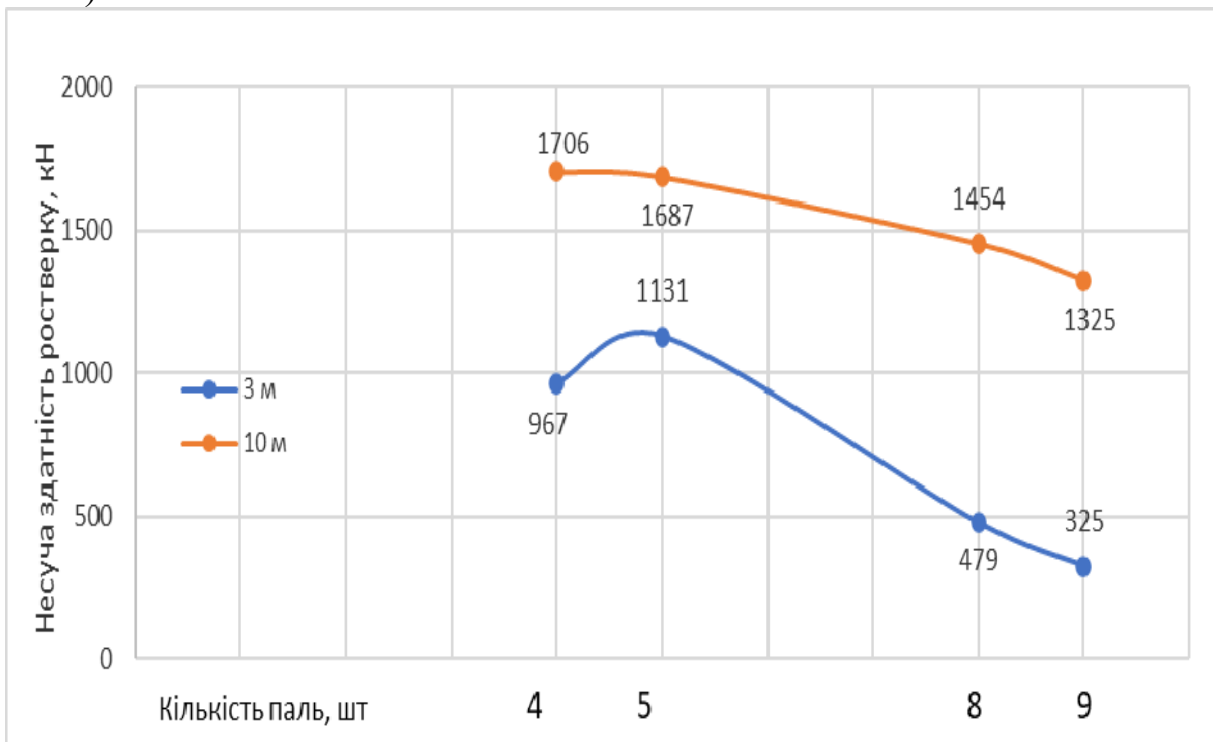


Рис. 5.11 – Графік залежності реактивного зусилля ростверку від кількості та довжини палей:
а – піщаний ґрунт; б – глинистий ґрунт

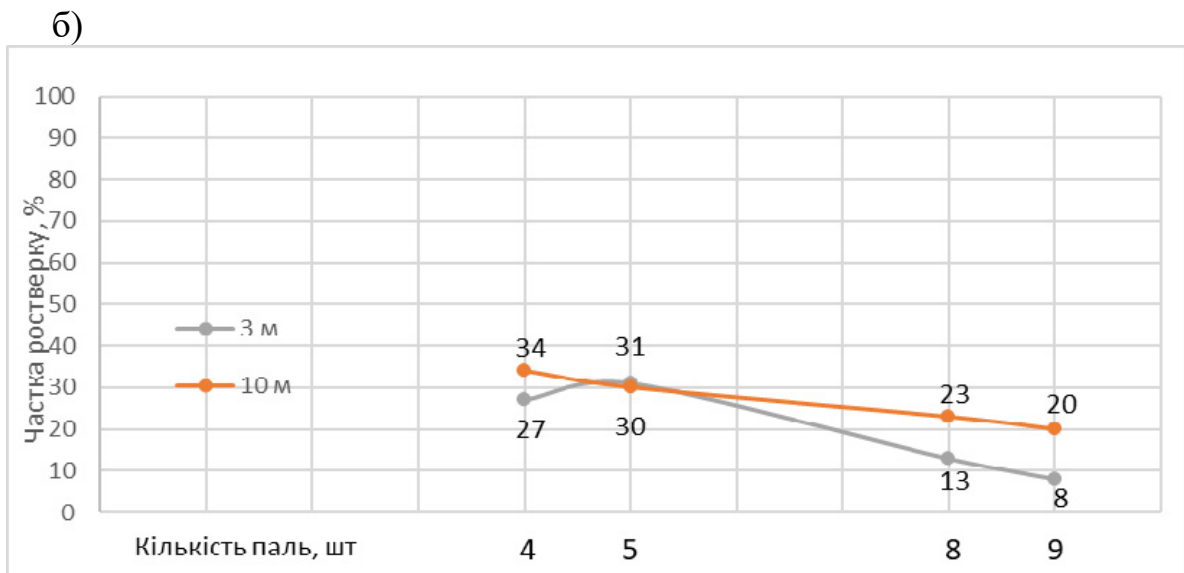
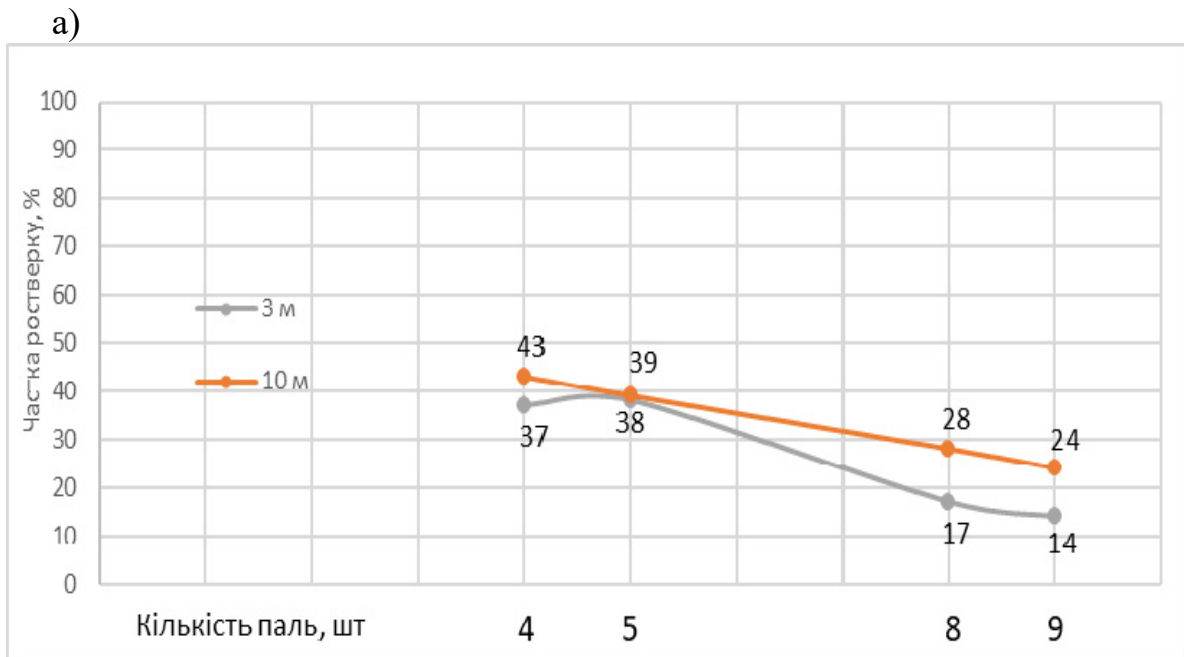


Рис. 5.12 – Графік залежності частки ростверку у навантаженні на паливий фундамент від довжини та кількості палей:
а – піщаний ґрунт; б – глинистий ґрунт

Як бачимо частка ростверку у несучій здатності фундаменту зменшується із збільшенням кількості палей. Довжина палей впливає на частку ростверку несуттєво. При малій кількості палей частка ростверку практично не залежить від їх довжини.

Маючи тиск під подошвою ростверку в групі і несучу здатність ростверку як фундаменту мілкового закладання, а також несучу здатність одиночної палі і середнє навантаження на палю в групі, можна проаналізувати ступінь реалізації несучої здатності окремих елементів паливого фундаменту (рис. 5.13, 5.14).

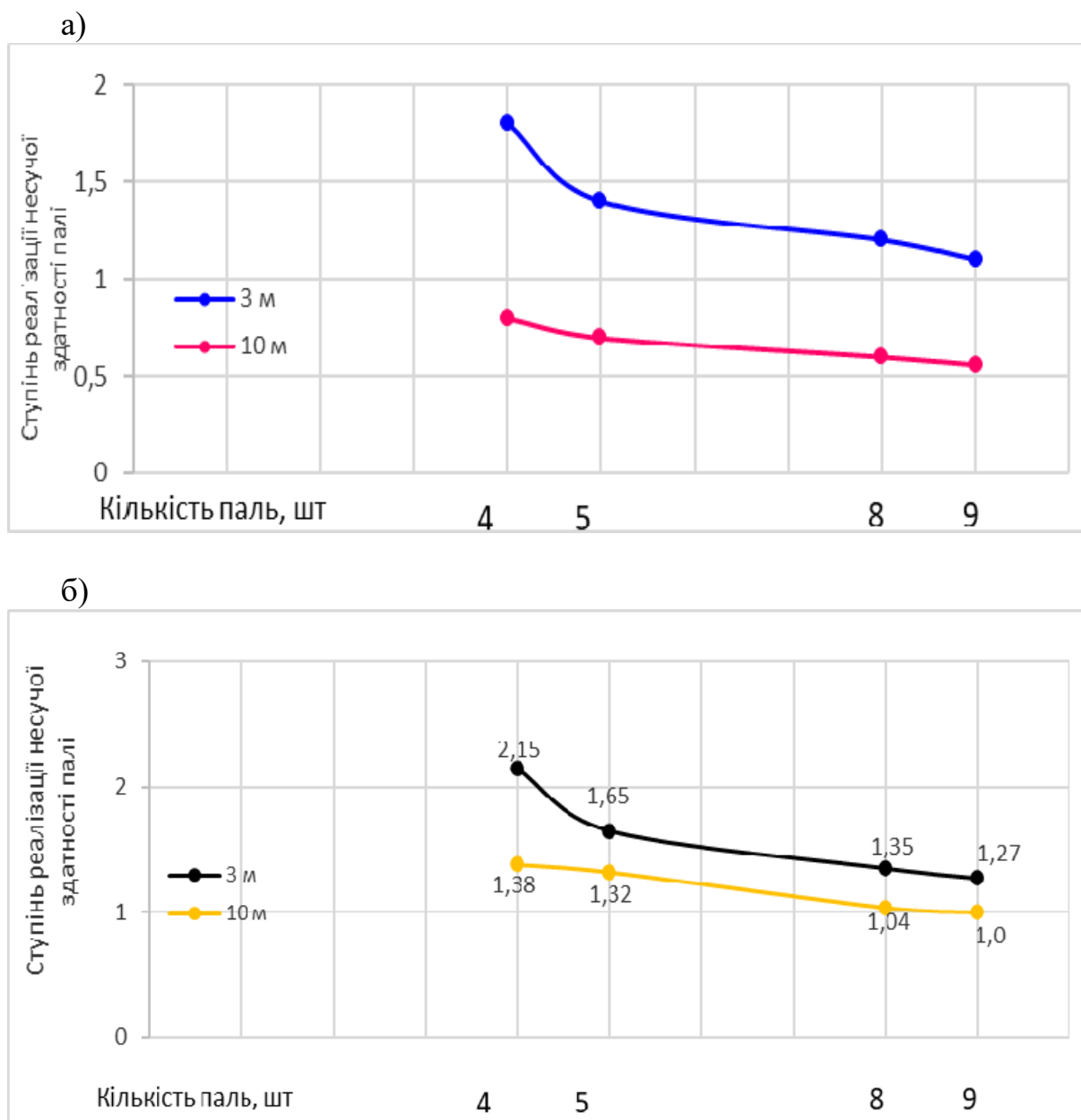


Рис. 5.13 – Залежність ступеня реалізації несучої здатності палей у складі пального фундаменту від кількості і довжини палей:
а – піщаний ґрунт; б – глинистий ґрунт

Із зменшенням кількості палей у групі краще реалізують себе як палі, так і ростверк. Ступінь реалізації тиску під ростверком знаходиться в межах 0,2 – 0,8 (рис. 5.14), а от ступінь реалізації несучої здатності палей суттєво відрізняється для коротких і довгих палей (рис. 5.13). Довгі палі у складі куща або реалізуються не повністю при кількості палей 9 шт. (крок 3d), або їх осереджене зусилля в групі наближається до несучої здатності одиночної палі. Для коротких палей ступінь реалізації несучої здатності палей перевищує одиницю. Отже, короткі палі працюють у кущі краще, ніж одиночні і тим краще, чим менше їхня кількість (і відповідно більша відстань між ними).

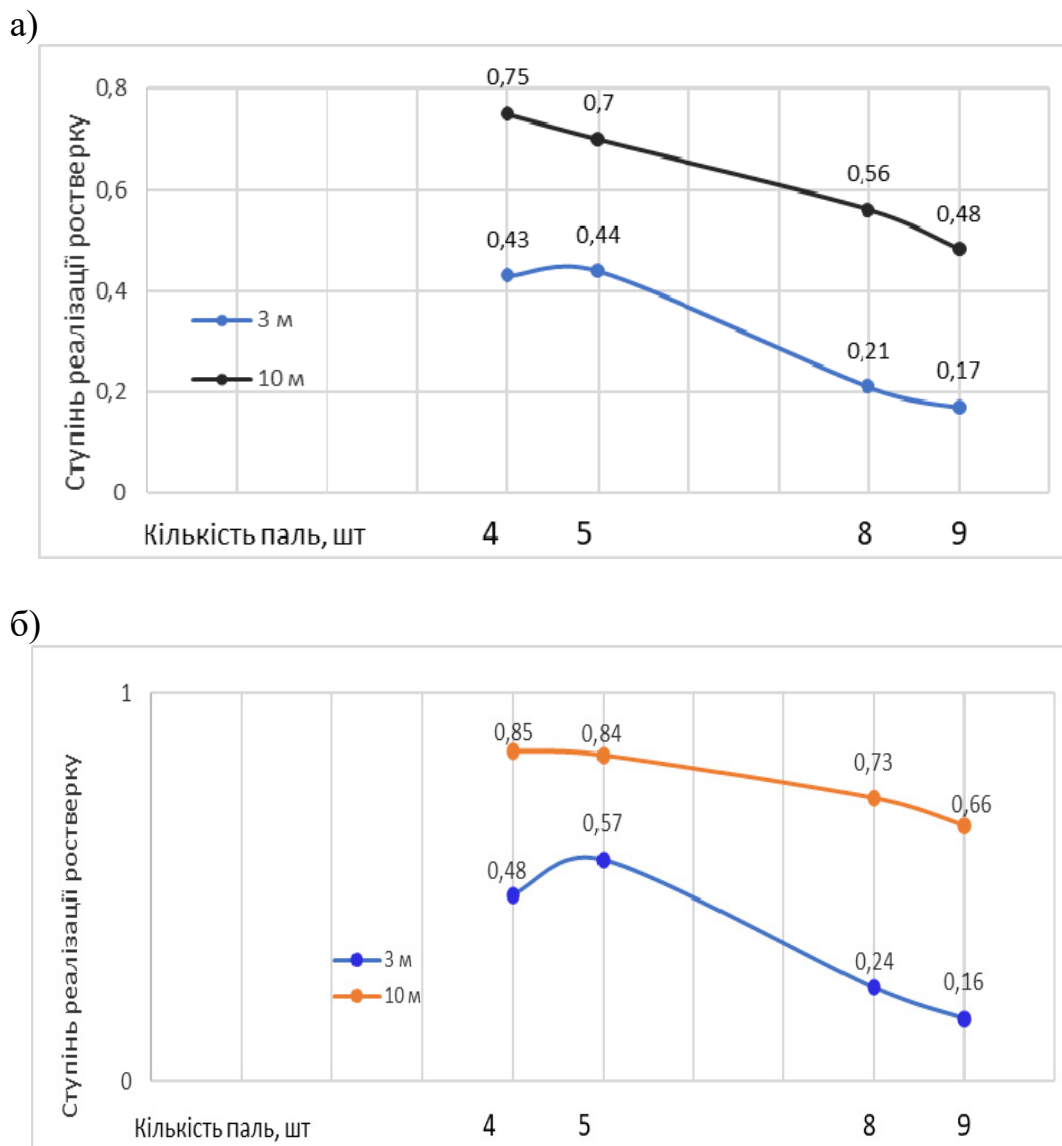


Рис. 5.14 – Залежність ступеня реалізації тиску під подошвою ростверку у складі стовпчастого пальового фундаменту від кількості і довжини паль:
а – піщаний ґрунт; б – глинистий ґрунт

Висновки за підрозділом 5.2

1. Зменшення кількості паль в межах єдиного зовнішнього контуру призводить до несуттєвого зменшення несучої здатності куца. Отже, при відносній довжині паль (l/d) 15 і менше можна зменшувати кількість паль при сталих габаритах ростверку без втрати несучої здатності групи.

2. Неврахування роботи ростверку у складі фундаменту дає занижені значення навантажень на куц, а врахування роботи ростверку без коригування на перерозподіл зусиль між елементами куца при кучному розміщенні паль призводить до завищення несучої здатності куца.

Таким чином, при оцінці несучої здатності куща через несучі здатності його окремих елементів потрібно виходити із ступеня реалізації цих несучих здатностей у складі куща.

3. Заміна пальового фундаменту на умовний фундамент мілкого закладання не дає адекватних результатів ні за деформаціями, ні за несучою здатністю.

4. Частка ростверку у навантаженні на пальовий фундамент зменшується із збільшенням кількості паль і з збільшенням їх довжини.

5. При використанні коротких паль реалізація їх несучої здатності в групі перевищує одиницю (тобто вони працюють краще у кущі, ніж як одиночні).

6. Короткі та довгі палі у складі куща в глинистому ґрунті працюють більш ефективно, ніж в піщаному.

7. Короткі палі у складі куща працюють більш ефективно, ніж довгі. Для коротких паль ступінь реалізації несучої здатності перевищує одиницю і знаходиться в межах 1,27 – 2,15, для довгих паль відповідний показник 0,6–1,38, збільшуючись по мірі зменшення кількості паль у групі.

8. При використанні коротких паль потенційна можливість ростверку сприймати навантаження не використовується в повній мірі, але збільшується при зменшенні кількості паль.

9. У випадку застосування коротких паль можна з метою економії матеріалів зменшити кількість паль в групі при збереженні розмірів ростверку з незначною втратою несучої здатності.

10. Результати визначення несучої здатності паль у програмному комплексі Plaxis 3D Foundation доцільно використовувати у проектній практиці для корегування значень, визначених теоретичним шляхом за рекомендаціями норм.

6 МЕТОДИКА ВРАХУВАННЯ СУМІСНОЇ РОБОТИ ПАЛЬ І РОСТВЕРКУ У СКЛАДІ ПАЛОВОГО КУЩА

Згідно з рекомендаціями [12] при проектуванні пальового фундаменту повинна виконуватись умова

$$N_{\min}^{\max} = \frac{N_{d,m}}{n} \pm \frac{M_{x,m} \cdot y}{\sum_1^n y_i^2} \pm \frac{M_{y,m} \cdot x}{\sum_1^n x_i^2} \leq \frac{F_d}{\gamma_k}, \quad (6.1)$$

де N_d – розрахункове граничне значення вертикального навантаження на фундамент, враховуючи вагу ростверку з ґрунтом на його уступах та вагу паль;

$M_{x,m}$, $M_{y,m}$ – розрахункові граничні значення згинальних моментів відносно головних центральних осей відповідно x та y ;

x, y – відстань від головних осей фундаменту до осі палі, для якої обчислюється розрахункове навантаження;

x_i, y_i – відстань від головних осей до осі кожної палі.

F_d – несуча здатність палі;

γ_k – коефіцієнт надійності ($\gamma_k = 1,4$, якщо несуча здатність визначається розрахунком).

За результатами досліджень пропонується враховувати спільну роботу паль та ростверку таким чином:

– зменшувати зовнішнє навантаження на величину складової, яку приймає на себе подошва ростверка;

– несучу здатність палі корегувати коефіцієнтом, що враховує ступень реалізації несучої здатності палі.

В результаті гранична нерівність перевірки несучої здатності палі набуває вигляду

$$N_{\min}^{\max} = \frac{(N_{d,e} - R \cdot \alpha_1 \cdot A_p) \cdot \gamma_{f,mt}}{n} \pm \frac{M_{x,m} \cdot y}{\sum_1^n y_i^2} \pm \frac{M_{y,m} \cdot x}{\sum_1^n x_i^2} \leq \frac{F_d \cdot \alpha_2}{\gamma_k}, \quad (6.2)$$

де $N_{d,e}$ – розрахункове експлуатаційне значення вертикального навантаження на фундамент, враховуючи вагу ростверка з ґрунтом на його уступах та вагу паль;

R – розрахунковий опір ґрунту основи під подошвою ростверка;

α_1, α_2 – ступінь реалізації тиску під ростверком та ступінь реалізації несучої здатності палі відповідно;

A_p – площа подошви ростверка за винятком площі поперечних перерізів паль;

$\gamma_{f,mt}$ – коефіцієнт надійності за навантаженням, що визначається за формулою

$$\gamma_{f,mt} = \frac{\sum N_m}{\sum N_e}, \quad (6.3)$$

де $\sum N_m, \sum N_e$ – сумарні розрахункові вертикальні навантаження відповідно для першої та другої груп граничних станів на рівні подошви фундаменту.

Оскільки вплив дії моментних зусиль, які діють на фундамент, у монографії не розглядався, пропонується застосовувати цю методику з урахуванням незначних моментних навантажень.

Приклад розрахунку.

Необхідно запроєктувати пальовий фундамент з бурових паль під колону з навантаженнями в рівні обрізу, що наведені у табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Навантаження на фундаменти колон середнього ряду

Фундамент	N_e , кН	N_m , кН	$M_{y,e}$, кНм	$M_{y,m}$, кНм
По осі 3с (внутрішній)	1173,1	1567,4	-	-

Визначення потрібної кількості паль за методикою норм [12].

Приймаємо бурові палі з діаметром 0,4 м, що влаштовуються під захистом обсадної труби. Для першого наближення приймаємо довжину палі з умови занурення у несучий шар ІГЕ 10 на 2 м, тобто 13,0 м. Положення палі у ґрунті наведене на рисунку 6.1.

Несуча здатність F_d набивної палі з розширенням і без нього, а також палі-оболонки, заглиблюваної з вийманням ґрунту і заповнюваної бетоном, визначають за формулою [12]

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{cR} \cdot R \cdot A + u \sum \gamma_{cf} \cdot f_i \cdot h_i), \quad (6.4)$$

де γ_c – коефіцієнт умов роботи палі в ґрунті ($\gamma_c = 1$, крім паль, що спираються на лесоподібні ґрунти, тоді $\gamma_c = 0,8$);

γ_{cR} – коефіцієнт умов роботи ґрунту під нижнім кінцем палі (його значення залежить від способу улаштування розширення, для паль без розширення $\gamma_{cR} = 1$);

R – розрахунковий опір ґрунту під нижнім кінцем палі, кПа;

u – периметр поперечного перерізу ствола палі, м;

A – площа спірання палі, м², що приймається рівною: для набивних і бурових паль без розширення – площі поперечного перерізу палі; для набивних і бурових паль з розширенням – площі поперечного перерізу розширення;

γ_{cf} – коефіцієнт умов роботи ґрунту на боковій поверхні палі, який залежить від способу утворення свердловини і умов бетонування і визначається за табл. Н.3.1 [12];

f_i – розрахунковий опір i -го шару ґрунту основи по боковій поверхні палі, що приймається за табл. Н.2.2 [12], кПа;

h_i – товщина i -го шару ґрунту, що прорізається боковою поверхнею палі, м.

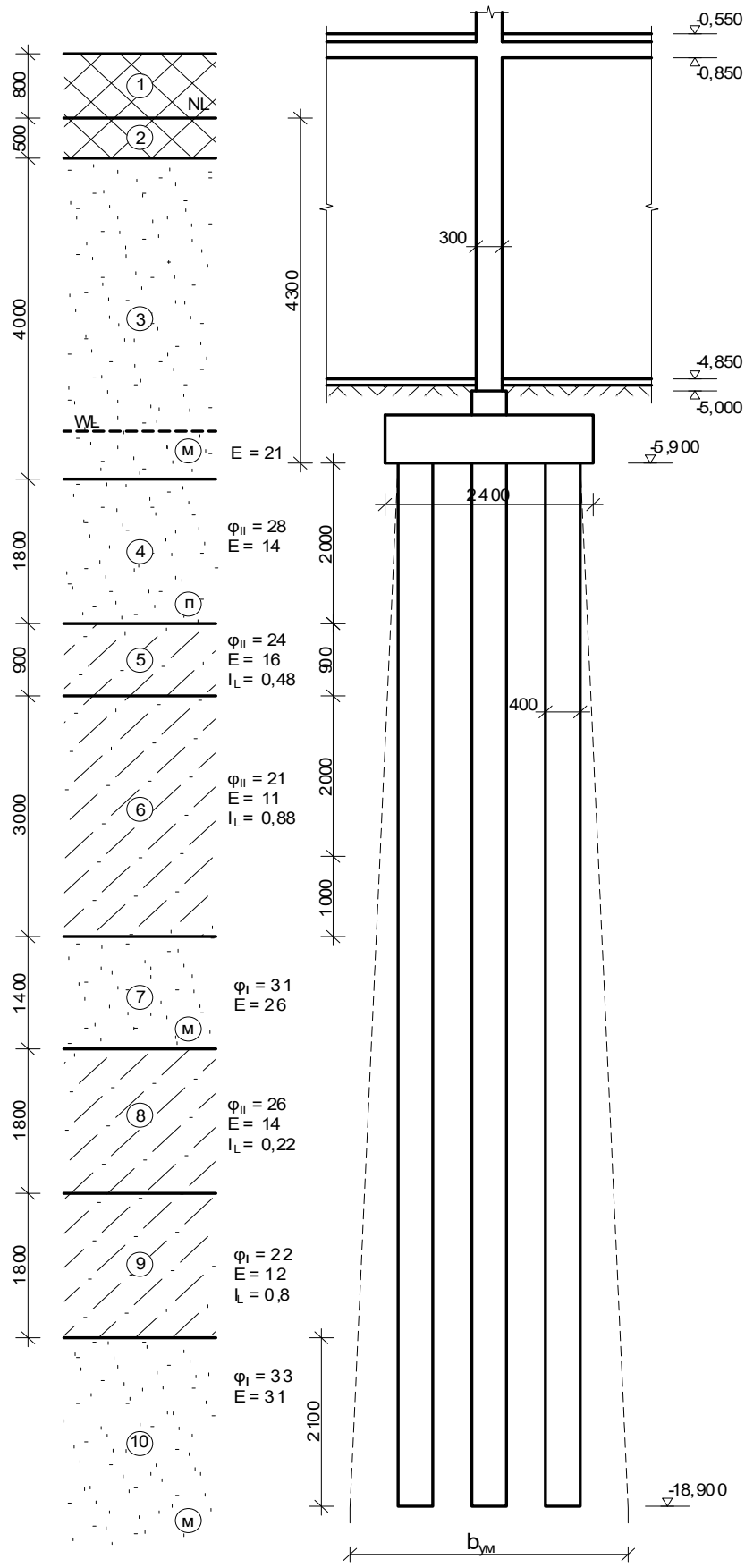


Рис. 6.1 – Положення бурової палі у ґрунті

Для прийнятої палі:

$$\gamma_c = 1[12]; \quad \gamma_{CR} = 1[12]; \quad \gamma_{cf} = 0,7 [12]; \quad A = \pi(d/2)^2 = 0,1256 \text{ (м}^2\text{)}.$$

$$U = \pi d = 1,256 \text{ (м)}.$$

Розрахунковий опір під нижнім кінцем палі для піщаного ґрунту [12]

$$R = 0,75\alpha_4(\alpha_1\gamma'_I d + \alpha_2\alpha_3\gamma_I h), \quad (6.5)$$

де $\alpha_1 = 29,5$; $\alpha_2 = 54,75$; $\alpha_4 = 0,265$ при $\varphi_I = 30^\circ$ за табл. Н.3.2 [12];

$\alpha_3 = 0,61$ при $h/d = 18,1/0,4 = 45,3 > 25$ за табл. Н.3.2 [12].

$\gamma'_I = 10,0 \text{ кН / м}^3$ – питома вага ґрунту в основі палі з урахуванням виважувальної дії води;

$$\gamma_I = \frac{18,0 \cdot 4,8 + 9,59 \cdot 0,5 + 9,8 \cdot 1,8 + 10,24 \cdot 0,9 + 10,09 \cdot 3,0 + 9,9 \cdot 1,4 + 10,05 \cdot 1,8 + 10,03 \cdot 1,8 + 10 \cdot 2,1}{18,1}$$

$$= 12,1 \text{ (кН / м}^3\text{)}.$$

осереднене значення питомої ваги ґрунту вище нижнього кінця палі.

Отже розрахунковий опір під нижнім кінцем палі

$$R = 0,75 \cdot 0,265 (29,5 \cdot 10,0 \cdot 0,4 + 54,75 \cdot 0,61 \cdot 12,1 \cdot 18,1) = 1475 \text{ (кПа)}.$$

Розрахунок опору по бічній поверхні представлений у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Розрахунок опору по бічній поверхні бурової палі

H_i , м	Показник текучості	f_i , м	h_i , м	$f_i \cdot h_i$, кН/м
5,3	Пилув.сер щільн	29,8	2,0	59,6
6,75	0,48	27,5	0,9	24,75
8,2	0,88	7	2,0	14
9,7	0,88	7	1,0	7
10,9	Дрібн.сер.щільн	47	1,4	65,8
12,5	0,22	68	1,8	122,4
14,3	0,8	8	1,8	14,4
16,2	Дрібн.сер.щільн	52	2,1	109,2

$$\Sigma = 417,2$$

Несуча здатність бурової палі

$$F_d = 1(1 \cdot 1475,0 \cdot 0,1256 + 1,256 \cdot 0,7 \cdot 417,2) = 552,0 \text{ (кН)}.$$

Допустиме навантаження на палю

$$N = \frac{552,0}{1,4} = 394,3 \text{ (кН)}.$$

Потрібна кількість палей $n = 1567,4 \cdot 1,2 / 394,3 = 4,77$ (шт.). Приймаємо 5 палей.

Перевірка навантаження на палі

Законструюємо ростверк і підрахуємо фактичне навантаження на палю з урахуванням ростверку і ґрунту.

Допустима відстань між палями $3d = 1,2$ м. Положення палей у ростверку показано на рисунку 6.2.

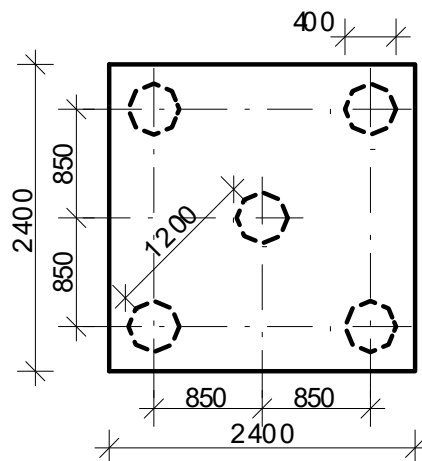


Рис. 6.2 – Розміщення бурових палей у ростверку

Виконуємо перевірку розрахункових навантажень на палі.

Вага палі $G_{пали} = 0,25 \pi 0,4^2 \cdot 13,0 \cdot 25 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 49,4$ (кН).

Вага ростверку, $G_p = 2,4 \cdot 2,4 \cdot 1,05 \cdot 23 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 168,3$ (кН). Загальне розрахункове навантаження на палю

$$N_{\min}^{\max} = \frac{N_d}{n} \pm \frac{M_x \cdot y}{\sum_1^n y_i^2} = \frac{1567,4 + 168,3 + 5 \cdot 49,4}{5} \pm \frac{0 \cdot 0,85}{4 \cdot 0,85^2} = 396,5 \pm 0 \text{ (кН)} \approx$$

$$F_d / 1,4 = 394,3 \text{ (кН)}.$$

Отже, несуча здатність палей при обраному їх розташуванні забезпечена.

Визначення потрібної кількості палей з урахуванням результатів досліджень.

Виконаємо перерахунок потрібної кількості прийнятих палей діаметром 400 мм довжиною 13 м, враховуючи сумісну роботу палей і ростверку у складі палевого фундаменту за результатами досліджень.

З врахуванням впливу кількості палей у групі (рис. 3.74, 3.75) $\alpha_1 = 0,5, \alpha_2 > 1$.

За рис. 3.41 та 3.42 для бурових палей у піщано-глинистому ґрунті з відносною довжиною $l/d = 9/0,3 = 30$ при кроці палей $3d$ $\alpha_1 = 0,54, \alpha_2 > 1$.

Для палей з відносною довжиною $l/d = 13/0,4 = 32,5$ при кроці палей $(3-4)d$ ступінь реалізація несучої здатності палей може бути прийнятим виходячи з обережності оцінок $\alpha_2 = 1,0$, а ступінь реалізації тиску під подошвою ростверка $\alpha_1 = 0,4$.

Визначимо розрахунковий опір ґрунту під подошвою ростверка.

Осереднене значення питомої ваги ґрунту вище подошви ростверку:

$$\gamma'_{II} = \frac{16,5 \cdot 3,8 + 17 \cdot 0,5}{4,3} = 16,64 \left(\frac{\text{кН}}{\text{м}^3} \right).$$

Осереднене значення питомої ваги ґрунту нижче подошви фундаменту:

$$\gamma_{II} = \frac{9,59 \cdot 0,2 + 9,8 \cdot 1,0}{1,2} = 9,75 \left(\frac{\text{кН}}{\text{м}^3} \right).$$

Розрахунковий опір ґрунту під подошвою ростверку:

$$R = \frac{1,1 \cdot 1,16}{1,1} (0,98 \cdot 1 \cdot 1,8 \cdot 9,75 + 4,93 \cdot 1,05 \cdot 16,64 + (4,93 - 1) \cdot 2 \cdot 16,64 + 7,4 \cdot 3,0) = 300,0 (\text{кПа}).$$

Навантаження, що може взяти на себе ростверк в першому наближенні

$$N_{\text{роств}} = 300,0 \times 1,8 \times 1,8 \times 0,4 \times 1,3 = 505 (\text{кН}).$$

Необхідна кількість палей:

$$n = N_d / N = (1567,4 - 505,0) \cdot 1,2 / (394,3 \cdot 1,0) = 3,23 (\text{шт.})$$

Приймаємо куц із чотирьох палей.

Розміщення палей у плані показане на рисунку 6.3. Розміри ростверку приймаємо 1800×1800 мм з урахуванням звисів не менше, ніж по 100 мм з кожної сторони.

Перевірка навантаження на палі

Виконуємо перевірку розрахункових навантажень на палі за формулою (6.2).

Вага палі $G_{\text{пали}} = 0,25 \pi 0,4^2 \cdot 13,0 \cdot 25 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 49,4$ (кН).

Вага ростверку, $G_p = 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,05 \cdot 23 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 94,7$ (кН).

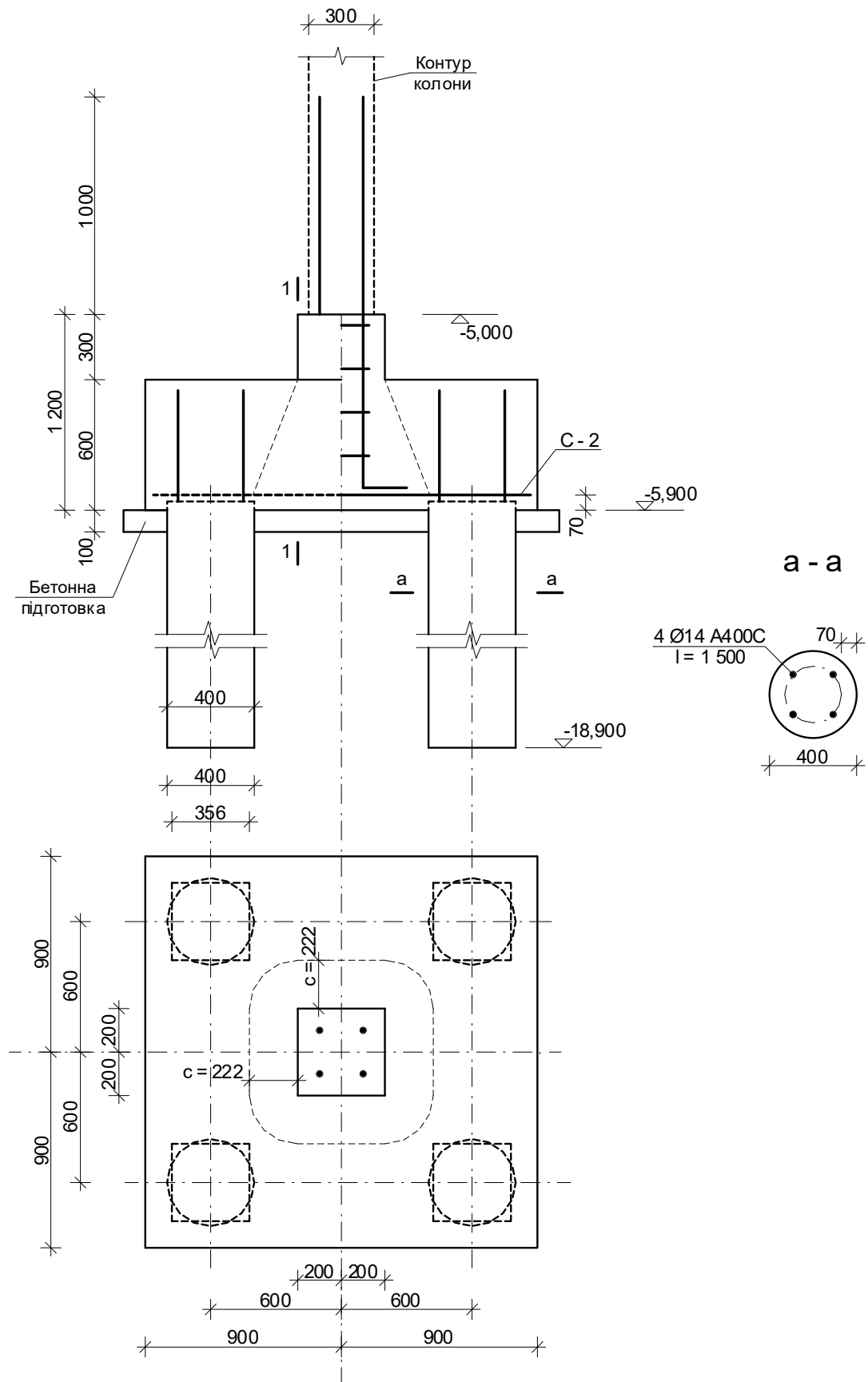


Рис. 6.3 – Конструктивне рішення пального фундаменту з врахуванням сумісної роботи паль і ростверку у куці

Коефіцієнт надійності за навантаженням

$$\gamma_{f,mt} = \frac{\sum N_m}{\sum N_e} = \frac{1567,4 + 94,7}{1173,1 + 94,7 / 1,21} = 1,328.$$

Загальне розрахункове навантаження на палю

$$N_{\min}^{\max} = \frac{(N_{d,e} - R \cdot \alpha_1 \cdot A_p) \cdot \gamma_{f,mt}}{n} \pm \frac{M_{x,m} \cdot y}{\sum_1^n y_i^2} \pm \frac{M_{y,m} \cdot x}{\sum_1^n x_i^2} =$$

$$= \frac{[1173,1 + 94,7 / 1,21 + 49,4 \cdot 4 / 1,21 - 300,0 \cdot 0,4 \cdot (1,8 \cdot 1,8 - 0,126 \cdot 4)] \cdot 1,328}{4} = 394,2 \leq$$

$$\leq \frac{F_d \cdot \alpha_2}{\gamma_k} = \frac{394,3 \cdot 1,0}{1,4} = 394,3 \text{ (кН)}.$$

Отже, несуча здатність паль при обраному їх розташуванні забезпечена.

Таким чином при врахуванні сумісної роботи елементів пального фундаменту з'явилась можливість скоротити кількість бурових паль у куці з 5 до 4.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підставі виконаних досліджень шляхом фізичного та чисельно-математичного моделювання стовпчастих пальових фундаментів встановлено:

1. Неврахування роботи ростверку у складі фундаменту дає занижені значення навантажень на куш, а врахування роботи ростверку без коригування на перерозподіл зусиль між елементами куща при кучному розміщенні паль призводить до завищення несучої здатності куща.

Таким чином, при оцінці несучої здатності куща через несучі здатності його окремих елементів потрібно виходити із ступеня реалізації цих несучих здатностей у складі куща.

2. Паля у складі куща, як за результатами фізичного моделювання, та і за результатами математичного моделювання, поступово реалізує свою несучу здатність по мірі зростання навантаження і при значних значеннях осідання може сприймати навантаження, більше за граничне навантаження одиночної палі. Отже на певному етапі навантаження ступінь реалізації несучої здатності палі починає перевищувати одиницю.

3. Несуча здатність пальового фундаменту з низьким ростверком як правило перевищує суму несучих здатностей одиночних паль. Виключення складають кущі з забивних паль при кроці 3d. При частому розміщенні забивних паль навіть включення у роботу ростверку не забезпечує позитивний кущовий ефект, оскільки палі в таких кущах частково виключаються з роботи. Фундаменти з бурових паль завжди показують більшу несучу здатність, ніж сума несучих здатностей одиночних паль.

4. Несуча здатність низького ростверку в системі пальового фундаменту:

- у пальових фундаментах з бурових паль майже вдвічі більша ніж у пальових фундаментах з забивних паль;
- збільшується, при збільшенні кроку між палями;
- збільшується, при збільшенні довжини паль в системі пальового фундаменту;
- характер залежності частки навантаження низького ростверку при роботі фундаменту в піщаному та глинистому середовищах, в залежності від довжини та кроку паль, змінюється не суттєво.

5. Робота палі в групі з низьким ростверком суттєво відрізняється від роботи одиночної палі. По мірі зростання навантаження осереднене навантаження на палю у складі фундаменту зростає.

6. Ступінь реалізації несучої здатності палі у складі пального фундаменту суттєво більший для фундаментів з бурових паль у порівнянні з фундаментами з забивних паль.

7. Для фундаментів з забивних паль при кроці 3d палі у складі куща у піщаних ґрунтах реалізують свою несучу здатність не повністю, у глинистих ґрунтах при кроці 3d зусилля в палях наближаються до їх несучої здатності. Кущі з бурових паль підвищують свою несучу здатність, працюючи у групі, навіть при мінімальному кроці.

8. Ступінь реалізації несучої здатності палі у складі пального фундаменту залежить від довжини і кроку паль. Реалізація несучої здатності паль у складі фундаменту зменшується із збільшенням їх довжини. При збільшенні кроку паль реалізація несучої здатності палі збільшується. Характер включення паль у роботу аналогічний при роботі у різних ґрунтах.

9. Перерозподіл навантаження між палями фундаменту залежить від етапу навантаження і жорсткості ростверку. На початкових етапах завантаження при жорстких ростверках найбільше зусилля сприймають кутові палі, найменше – центральні, при подальшому збільшенні навантаження і наближенні його до граничного значення виникає перерозподіл зусиль з кутових і крайніх паль до центральної внаслідок вичерпання несучої здатності кутових паль. Для гнучких ростверків навантаження між палями групи спочатку розподіляється рівномірно, а по мірі зростання навантаження найбільше зусилля бере на себе центральна паля.

10. Вид ґрунту (піщаний або глинистий) суттєво не впливає на перерозподіл зусиль між елементами групи паль.

11. Ростверк краще включається в роботу при більшій деформації фундаменту (зокрема при спіранні нижніх кінців паль на більш піддатливі ґрунти);

12. На якісну картину перерозподілу зусиль між палями та ростверком заміна однорідного ґрунту на неоднорідний практично не впливає.

13. Із збільшенням кількості паль у групі гірше реалізують себе як палі, так і ростверк. Ступінь реалізації тиску під ростверком знаходиться в межах 0,1-0,58, а ступінь реалізації несучої здатності паль в межах 0,86 – 1,27.

14. Палі у складі куща реалізуються не повністю при кількості паль 12 – 16 шт. (крок 3d), навантаження, яке вони сприймають у групі, наближається до несучої здатності одиночної палі при кількості паль 9 шт. Для кущів з кількістю паль 4 – 6 шт. ступінь реалізації несучої здатності

палі перевищує одиницю. Отже, у групах з незначною кількістю паль вони працюють у кущі краще, ніж одиночні і тим краще, чим менше їхня кількість.

15. Частка роботи ростверка у складі пальового фундаменту збільшується із зменшенням кількості паль.

16. Заміна пальового фундаменту на умовний фундамент мілкого закладання не дає адекватних результатів ні за деформаціями, ні за несучою здатністю.

17. При відносній довжині паль (l/d) менше 15 (короткі палі) їх розміри сумірні з розмірами ростверків в плані і такі пальові фундаменти краще розглядати як єдиний ґрунто-пальовий масив.

18. У випадку застосування коротких паль можна з метою економії матеріалів зменшити кількість паль в групі при збереженні розмірів ростверку з незначною втратою несучої здатності.

19. Запропонована методика врахування сумісної роботи елементів пальового фундаменту через їх ступені реалізації несучої здатності. Врахування реальної роботи паль і ростверку у складі пальового фундаменту дозволяє підвищувати несучу здатність пальового фундаменту в цілому і відповідно економити матеріальні та трудові ресурси під час проведення будівельних робіт. Оскільки вплив дії моментних зусиль, які діють на фундамент, у монографії не розглядався, пропонується застосовувати цю методику з урахуванням незначних моментних навантажень.

20. Оскільки пальові фундаменти з бурових паль значно більш інтенсивно підвищують свою несучу здатність за рахунок спільної роботи їх елементів під навантаженням у порівнянні з пальовими фундаментами з забивних паль, то при врахуванні цієї спільної роботи пальові фундаменти з бурових паль стають конкурентоспроможними з аналогічними фундаментами з забивних паль.

21. Результати визначення несучої здатності паль у програмному комплексі Plaxis 3D Foundation доцільно використовувати у проєктній практиці для корегування значень, визначених теоретичним шляхом за рекомендаціями норм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Beresnev A. S., Bolshakov A. Yu., Gusev G. N., Korkodinov V. V., Pishenov B. N. On the distribution of a given load between the slab and piles in a slab-pile foundation.. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. Volume 4, Issue 2. 2008. P. 33.

2. Блащук Н.В., Маєвська І.В. Вплив способу влаштування паль на граничний опір пальового куща. Матеріали конференції «L Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2021)», Вінниця, 2021. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2021/paper/view/12183>

3. Блащук Н. В., Маєвська І. В. Зміна перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту. «LI Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2022)», Вінниця, 2022. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2022/paper/view/15653>.

4. Блащук Н.В., Маєвська І.В., Попович М.М. Перерозподіл зусиль між елементами стовпчастого пальового фундаменту. *Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві*: зб. наук. пр. № 1(24). Вінниця, 2018. С. 36-44.

5. Блащук Н. В., Ткачук А. А., Шевчук Є. О. Перерозподіл зусиль між елементами кущового пальового фундаменту в залежності від кількості паль. Матеріали конференції «LI Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2022)», Вінниця, 2022. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2022/paper/view/15454>.

6. Бойко І. П., Носенко В. С. Напружено-деформований стан пальових фундаментів багатосекційних будинків. «Будівельні конструкції», Том 2. Київ: НДІБК, 2011. № 75. С. 159-163.

7. Бойко І. П., Підлуцький В. Л. Дослідження влаштування паль у фундаменті різної довжини. Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво), вип.4 (34), ПолтНТУ, 2012. С. 42-48.

8. ВБН В.2.1-1-97 Підсилення фундаментів будівель та споруд, побудованих на лесових ґрунтах, буроін'єкційними палями [Чинні від 1998-05-01]. Київ : Українська державна корпорація по виконанню монтажних і спеціальних будівельних робіт, 1997. 44 с. (Відомчі будівельні норми України).

9. Винников Ю. Л., Левченко В. П., Пащенко А. М. Математичне моделювання влаштування та роботи буроін'єкційних паль. «Будівельні конструкції», Том 2. Київ : НДІБК. 2011. № 75. С. 140-149.

10. Винников Ю. Л. Моделювання процесів ущільнення ґрунту при вісесиметричному напружено-деформованому стані основ : дис. ...докт. техн. наук : 05.23.02. Полтава, 2004. 440 с.

11. Гембарська М. О. Робота паль у кущі, об'єднаних ростверком з певною жорсткістю. Зб. наук. праць (галузеве машинобудування, будівництво). Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип. 3 (38). Полтава: ПНТУ, 2013. С. 58-63.

12. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування зі зміною № 1 та № 2. [Чинний від 2012-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 161 с. (Об'єкти будівництва та промислова продукція будівельного призначення).

13. ДСТУ Б В.2.1-17:2009 Основи та підвалини будинків і споруд. Грунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 23 с.

14. Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Зоценко В. М. Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом: монографія. Харків: «Друкарня Мадрид», 2016. 94 с.

15. Зоценко М. Л., Лапін М. І., Петраш Р. В. Порівняльне оцінювання ефекту армування основи за даними штапових випробувань і математичного моделювання. «Будівельні конструкції», Том 1. Київ : НДІБК. 2008. № 71. С. 443-451.

16. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: [підручник]/ М. Л. Зоценко та ін. Полтава : ПНТУ, 2004. 568 с.

17. Ковальський Р. К. Дослідження роботи ґрунту під низьким ростверком пальового фундаменту. «Світ геотехніки». 2007. № 1. С. 17-21.

18. Колібаба В. В., Маєвська І. В. Робота бурових паль і ростверку у складі стовпчастого пальового фундаменту // Тези Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2021)», Вінниця, ВНТУ, 2021 URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2021/paper/view/11114>.

19. Корнієнко М. В., Карпенко Д. А. Чисельне моделювання роботи стовпчастих пальових фундаментів з розширенням в лесових ґрунтах. «Будівельні конструкції», Том 1. Київ : НДІБК. 2008. № 71. С. 406-415.

20. Кремінська Ю. О., Маєвська І. В. Особливості роботи пальових кущів з коротких паль. Тези Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2022)», Вінниця, ВНТУ, 2022 URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2022/paper/view/14240>.

21. Кремінська Ю. О., Маєвська І. В. Різниця в роботі коротких і довгих паль у складі стовпчастого пальового фундаменту. І науково-технічна конференція факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання: збірн. доповідей, м. Вінниця, 10-12 березня 2021 р. Вінниця, 2021. С. 1912-1921. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fritzp/index/pages/view/zbirn2021>

22. Кремінська Ю. О., Маєвська І. В. Фізичне моделювання пальових кущів з короткими та довгими палями. Енергоефективність в галузях економіки України-2021: міжнар. наук.-техн. конф., м. Вінниця, 23-25 листопад 2021 р. Вінниця, 2021. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2021/paper/view/13939>
23. Кримняк Я. М., Маєвська І. В. Робота забивних паль і ростверку у складі стовпчастого пальового фундаменту. Тези Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2021)», Вінниця, ВНТУ, 2021 URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2021/paper/view/11077>.
24. Кураш С. Ю., Сазонова І. Р., Калюх Ю. І., Каргопольцева Т. Г. Вплив глибокого котлована на зміну напружено-деформованого стану ґрунтового масива в умовах щільної міської забудови м. Києва. «Будівельні конструкції». Київ : НДІБК. 2008. № 71. Том 1. С. 434-442.
25. Маєвська І. В., Блащук Н. В. Урахування роботи ростверку у складі стрічкових пальових та підсилених палями фундаментів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 168 с.
26. Маєвська І. В., Блащук Н. В., Кремінська Ю. О. Особливості роботи пальових кущів з коротких паль за даними числового моделювання. Основи та фундаменти: науково-технічний збірник. Київ, КНУБА, 2021. Вип.43. С. 30-39.
27. Маєвська І. В., Блащук Н. В., Чобанова К. А. Вплив виду ґрунту на сумісну роботу паль і ростверка в кущовому пальовому фундаменті. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Науково-технічний збірник ВНТУ. Вінниця: УНІВЕРСМ-Вінниця. 2013. № 2. С. 40-47.
28. Малишев О.М., Цимбал С.О., Маєвська І.В., Блащук Н.В. Сумісна робота паль і ростверку у стовпчастому пальовому фундаменті. *Молодь в науці: тез. регіон. наук.-практ. інтернет-конф. студентів, аспірантів та молодих науковців ВНТУ, м. Вінниця, 2 січ. 2018. Вінниця, 2018.* – URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2018/paper/viewFile/3694/31033103>.
29. Маркова М. А. Аналіз напружено-деформованого стану конструкцій з урахуванням впливів просадочних основ. «Будівельні конструкції», Том 1. Київ : НДІБК. 2008. № 71. С. 421-428.
30. Матеріали семінару: «Основи, фундаменти та підземні споруди. Проектування, будівництво та надійна та безпечна експлуатація». м. Київ, 25-26 лютого 2009 р.
31. Носенко В., Кашоїда О. Визначення напружено-деформованого стану групи паль шляхом числового моделювання їх взаємодії з основою за даними польових досліджень. Основи та фундаменти: науково-технічний збірник. Київ, КНУБА, 2021. Вип.43. С. 87-100.

32. Петраков А. А. До питання удосконалення методів розрахунку основ і фундаментів. «Будівельні конструкції». Київ : НДІБК. 2001. № 54. С. 534-539.
33. Підлуцький В.Л. Взаємодія фундаментної плити з палями різної довжини з ґрунтовою багатощаровою основою. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02. Київ, 2013. 24 с.
34. Ручківський В. Взаємодія ґрунтової основи та групи паль, об'єднаних рострекком. Основи та фундаменти: науково-технічний збірник. Київ, КНУБА, 2021. Вип.43. С. 79-86.
35. Самородов О. В. Розвиток наукових основ вибору раціональних параметрів комбінованих палевих і плитних фундаментів багатоповерхових будівель: дис. ... докт техн. наук: 05.23.02. Харків, 2017. 322 с.
36. Самородов О. В., Дитюк О. Є., Табачников С. В. Натурні дослідження початкових осідань паль, які не з'єднані з плитою, у складі комбінованого плитно-пального фундаменту. Український журнал будівництва та архітектури. № 6 (012). Дніпро : ПДАБА, 2022. С. 90-98. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.271222.90.915.
37. Sernov, V. A. The increase of bearing capacity of pile foundations taking into account soil-raft interaction. Modern Building Materials, Structures and Techniques: The 10th International Conference. Lithuania, 2010. – P. 1153–1160.
38. Трегуб А. С., Шокарев В. С. Дослідження взаємодії палевих фундаментів і ростверка з основою. «Світ геотехніки». 2005. № 4. С. 19-24.
39. Трофимчук О. М., Глебчук Г. С. Математичне моделювання зміни напруженого стану схилів внаслідок одночасного впливу підйому рівня ґрунтових вод та зміни сейсмічних умов. «Будівельні конструкції», Київ : НДІБК. 2011. № 75. Том 2. С. 469-476.
40. Червинський І. Й., Дмитрієв Д. А., Шуминський В. Д., Данилюк О. М. Чисельне моделювання улаштування котлована і оцінка напружено-деформованого стану оточуючого ґрунтового масива на прикладі будівництва офісного центра по вул. С. Струтинського, 13-15 в Печерському районі м. Києва. «Будівельні конструкції», Том 2. Київ : НДІБК. 2011. № 75. С. 178-184.
41. Шапіро Д. М. Курс лекцій з розрахунку моделювання геотехнічних об'єктів. «Будівельні конструкції», Том 2. Київ : НДІБК. 2011. № 75. С. 643-647.
42. Abdolrezayi A., Khayat N. Comparative Three-Dimensional Finite Element Analysis of Piled Raft Foundations. Computational Engineering and Physical Modeling 4-1 (2021) 19-36.
43. Ahner C., Sukhov D. Combined piled-raft foundation (CPRF), safety concept [Electronic resource] /. The Leipzig Annual Civil Engineering Report Laser № 1, 1996.

44. Deb P, Pal SK. Numerical analysis of piled raft foundation under combined vertical and lateral loading. *Ocean Eng* 2019;190:106431. doi:10.1016/j.oceaneng.2019.106431.
45. Deb P, Pal SK. Analysis of Load Sharing Response and Prediction of Interaction Behaviour in Piled Raft Foundation. *Arab J Sci Eng* 2019;44:8527–43. doi:10.1007/s13369-019-03936-1.
46. Elwakil A. Z., Azzam W. R. Experimental and numerical study of piled raft system. *Alexandria Engineering Journal*. Volume 55, Issue 1, March 2016, Pages 547-560.
47. Hewitt P., Gue SS. Piled Raft Foundation in a weathered sedimentary formation. *Proc Geotropica* 1994:1–11.
48. Katzenbach R., Arslan U., Moormann C. Piled Raft Foundation Projects in Germany: Design Applications of Raft Foundations. J. A. Hemsley (Ed.), Thomas Telford, London (2000), pp. 323-391.
49. Kull T., Mets M., Leppik V. Interaction of piles and raft. Proceedings of 13th Baltic Sea Geotechnical Conference. «Historical Experience and Challenges of Geotechnical Problems in Baltic Sea Region, 22-24 September. Lithuania. 2016. P. 192-195.
50. Mali S, Singh B. Behavior of large piled-raft foundation on clay soil. *Ocean Eng* 2018;149:205– 16. doi:10.1016/j.oceaneng.2017.12.029.
51. Poulos H. G. An approximate numerical analysis of pile raft interaction. *Int J Numer Anal Method Geomech* 1994; 18:73–92.
52. Poulos, H. G. (2005). «Pile Behavior – Consequences of Geological and Construction Imperfections». 40th Terzaghi Lecture, *Jnl. Geotech. & Geoenviron. Eng.*, ASCE, Vol. 131 (5): P. 538-563.
53. Poulos, H. G. (2005). «Piled Raft and Compensated Piled Raft Foundations for Soft Soil Sites» *Advances in Designing and Testing Deep Foundations*, ed. C. Vipulanandan & F.C. Townsend, ASCE Geot. Spec. Pub. No. 129, P. 214-234.
54. Poulos, H. G. and Davis, E. H., (1980) "Pile Foundation Analysis and Design". John Wiley and Sons, New York. 394 p.
55. Pressley J. S., Poulos H. G. Finite element analysis of mechanisms of pile group behaviour. *Int J Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1986; 10(2): 213-221.
56. Randolph M. F. Design method for pile groups and piled rafts. 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 5-10 January, New Delhi, India, 1994. Vol. 5. P. 61-82.
57. Reul O., Randolph M. F. Design Strategies for Piled Rafts Subjected to Nonuniform Vertical Loading. *J Geotech Geoenviron Eng ASCE* 2004;1(1): 130.

58. Samorodov O.V. Experience of Instrumental Monitoring of the Stress State for the Soil Base – Piled Raft Foundation System: [text] / O. Samorodov, A. Ubiyvovk, O. Dytiuk, S. Tabachnikov, E. Shchuchyk // Proceedings of the 11th International Symposium on Field Monitoring in Geomechanics – Dr. Andrew M. Ridley (Eds). London, United Kingdom, 4-7 September 2022: Online library ISSMGE, pp. 1-7.

59. Samorodov, O. New design of a combined pile raft foundation for a multi-storey building with determination of its main parameters: [text] / O. Samorodov, D. Muliar, S. Tabachnikov, O. Krotov, Y.Vynnykov, M. Zotsenko, V. Shapoval // Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – Rahman and Jaksa (Eds). Sydney, Australia: 2022. – P. 3493-3497. ISBN 978-0-9946261-4-1.

60. Sheil BB, McCabe BA. Numerical modelling of pile foundation angular distortion. *Soil Found.* 2015;55(3):614-625.

61. Sheil, B. B., McCabe, B. A. (2016). An analytical approach for the prediction of single pile and pile group behaviour in clay. *Computers and Geotechnics*, vol. 75, pp. 145-158.

62. Sinha A, Hanna AM. 3D numerical model for piled raft foundation. *Int J Geomech* 2017;17:1–9. doi:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000674.

63. Whitaker T. Experiments with model piles in groups. *Geotechnic*, London, England. Vol. 7. № 4, 1977. P. 147-167.

Навчальне видання

Маєвська Ірина Вікторівна

Блащук Наталя Вікторівна

**РОБОТА ПАЛЬ І РОСТВЕРКУ У СКЛАДІ
СТОВПЧАСТИХ ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТІВ:**

Монографія

Рукопис оформила *Н. Блащук*

Оригінал-макет підготовлено в *редакційно-видавничому відділі ВНТУ*

Підписано до друку 28.09.2023 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Ум. др. арк. 10,92.
Наклад 20 пр. Зам. № В2023-06.

Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114

press.vntu.edu.ua; email: irvc.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.,
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.