

# ОСОБЛИВОСТІ ПІДСИЛЕННЯ ФУНДАМЕНТУ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ КОРОТКИМИ ПАЛЯМИ

Вінницький національний технічний університет

## *Анотація*

У даній роботі виконано фізичне та математичне моделювання, досліджено розподіл навантаження та роботу підсиленого палями стрічкового фундаменту мілкового закладання, варіюючи при цьому відносну довжину палей та їх крок. Також досліджено роботу моделей одиночних палей різної довжини, ростверку без палей та фундаменту у варіанті умовного. Проаналізовано отримані результати, відмінності коротких та довгих палей при підсиленні з порівнянням усіх варіантів.

**Ключові слова:** короткі палі, паля, підсилення, моделювання, ростверк, модель.

## *Abstract*

In this work, physical and mathematical modeling is performed, the load distribution and the work of the pile-reinforced strip foundation of shallow foundation are investigated, varying the relative length of piles and their pitch. The work of models of single piles of different lengths, grille without piles and foundation in the conditional variant is also studied. The obtained results, differences of short and long piles at strengthening with comparison of all variants are analyzed.

**Keywords:** short piles, pile, strengthening, modeling, grillage, model.

## Вступ

Сьогодні все частіше виникає потреба у підсиленні та реконструкції елементів основ та фундаментів.

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. Зокрема відомі з практики пропозиції щодо використання коротких палей підсилення, не підкріплені жодними рекомендаціями стосовно методики їх розрахунку.

Так як будь-яке дослідження потребує практики та перевірки дійсності, у даній роботі передбачено скласти план та виконати експеримент у лабораторному лотку, а також математичне моделювання у Plaxis 3D. Проаналізувати отримані дані моделювання підсилення фундаментів короткими палями у порівнянні з довгими.

## Постановка задач та виконання дослідження фізичного моделювання

Як показує досвід, фізичне моделювання для виявлення характеру сприйняття та розподілу зусиль у елементах палевого фундаменту в залежності від геометричних параметрів найкраще виконувати на маломасштабних моделях. Даний метод дозволяє одержувати достатньо достовірну картину поведінки палевих фундаментів під їх навантаженням.

При моделюванні ґрунтового середовища використовувався металевий лоток з геометричними розмірами 1800x1200x1000 мм (рис. 1).

В якості упорної системи для передачі навантаження на моделі використовується металева рама з прокатних профілів, що дозволяє передавати навантаження на модель до 30 кН.

За ґрунтову основу прийнято - пісок середньої крупності. Основа створювалась шляхом пошарового засипання у лоток піску заданої вологості з ущільненням кожного шару до заданої щільності. Щільність контролювалась методом ріжучого кільця у трьох точках кожного шару товщиною 20 см.



Рис. 1 – Лоток з ущільненим піском, що імітує ґрунтову основу під фундамент

Для моделювання натурних паль довжиною 1 м та 5 м використано дерев'яні моделі з поперечним перерізом 20x20 мм, довжиною 200 і 400 мм.

Переміщення паль буде визначатись за допомогою прогиномірів, а для визначення навантаження, що приходить на кожну палю, виготовлено спеціальні наголовники.

Для заміру частки навантаження, що припадає на кожну окрему палю фундаменту, були використані тензометричні датчики для паль, зображені на рис. 2.



Рис. 2 – Тензометричні датчики

Від кожного тензометричного датчика відходить два провідники: один з'єднується з іншим тензометричним датчиком, а до іншого припаюється провід, який після того, як всі наголовники готові, з'єднують між собою і підключають до ІДЦ-1 (вимірювач деформацій числовий).

У даному експерименті було виконано три групи серії дослідів (п'ять випробувань), при різному кроці паль у ростверку, а також при змінній довжині паль для кожної моделі підсиленого палями стрічкового фундаменту. В таблиці 1 наведено програму модельних випробувань [1].

Таблиця 1 – Програма модельних випробувань

Група дослідів	Крок паль у поперечений напрямку (a)	Крок паль у повздовжньому напрямку	Довжина паль, мм
1	3d	7d	200
			400
2	6d	7d	200
			400
3	Умовний фундамент мілкового закладання глибиною закладання 20 см	-	-

Модель фундаменту являє собою жорстку металеву плиту (рис. 3) з отворами, що розміщені з кроком 3d. Це дає можливість використання плити для експерименту при кроці паль 3d і 6d. Дана модель якісно імітує існуючий стрічковий фундамент мілкового закладання, що буде підсилюватись палями крізь його тіло, розрахований на 14 паль.



Рис. 3 – Експериментальна модель фундаменту

Для передачі і вимірювання навантаження використовувалися відповідно автомобільний домкрат і динамометр, які розраховані на максимальне навантаження 5 т. В якості опорної системи для домкрата було використано існуючу металеву раму, що закріплена до лотка.

Важливим моментом є система для замірювання переміщень фундаменту - система прогиномірів, встановлена на незалежній упорній частині, що закріплена до стінки лотка.

Дослідна конструкція, у готовому до випробування стані, показана на рис. 4.

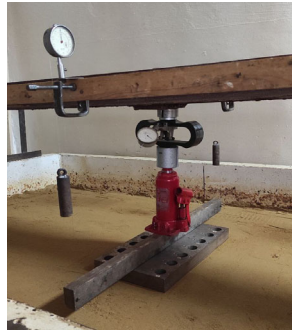


Рис. 4 – Дослідна конструкція для виконання експерименту

При виконанні підсилення фундаменту, після занурення паль із тензометричними датчиками у відповідності із прийнятою послідовністю, конструкція має наступний вигляд (рис.5).

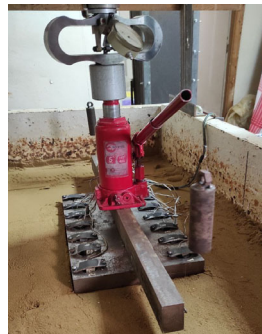


Рис. 5 – Конструкція моделювання підсилення фундаменту

Під час досліду для порівняння виконано моделювання одиночних паль довжиною 200 мм та 400 мм та плити ростверку без урахування паль на поверхні ґрунтового масиву (рис. 6 (а, б)) та у варіанті умовного фундаменту (рис. 6 (в)). Навантаження одиночних паль здійснювалось за допомогою важеля, що шарнірно кріпиться до стінки лотка. В залежності від місця розміщення палі у лотку співвідношення плечей важеля становить: для палі довжиною 200 мм -  $150/33=4,54$ ; для палі довжиною 400 мм -  $150/35=4,28$ . Модель випробування одиночної палі зображена на рис. 12.

#### **Аналіз отриманих результатів фізичного моделювання з підсилення фундаменту мілкою закладання палями**

В результаті проведення групи запланованих п'яти дослідів за програмою експериментального дослідження були одержані значення несучої здатності підсиленого фундаменту, його осідання, а також окремо навантаження, що сприймають палі і ростверк у складі підсиленого фундаменту.

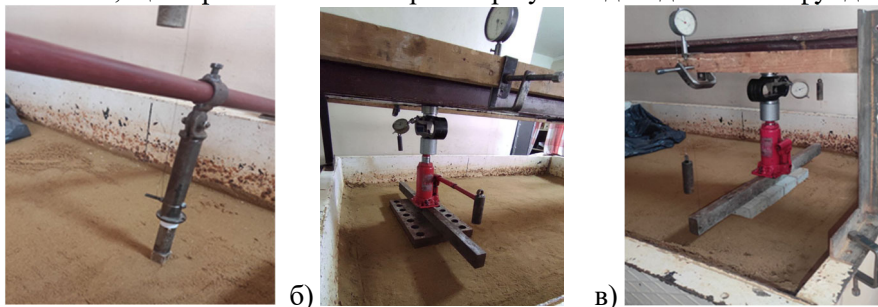


Рис. 6 – Модель випробування а) одиночної палі; б) плити ростверку без паль; в) плити ростверку у варіанті умовного фундаменту

На рис. 7 наведено графіки залежності осідання – навантаження фундаменту до підсилення - I стадія та після підсилення - II стадія при кроці 3d і 6d з різними довжинами паль (20 і 40 см) до втрати несучої здатності. Крива осідання-навантаження для I стадії роботи фундаменту до підсилення для розглянутих випадків практично співпадає. Також на рис. 7 для порівняння наведено одержаний графіки осідання фундаменту у варіанті умовного.

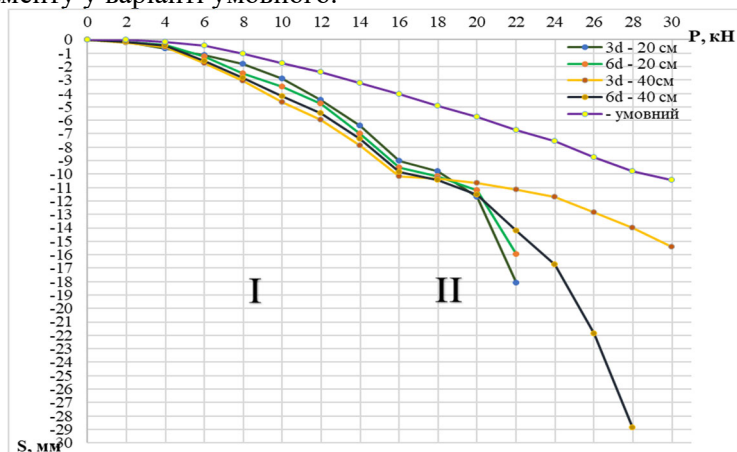


Рис. 7 – Графіки залежності осідання – навантаження фундаменту з кроком паль 3d та 6d: I стадія – робота фундаменту до підсилення; II стадія – робота підсиленого палями фундаменту

Оскільки в рамках експерименту є певні обмежені можливості, з графіків залежності осідання від навантаження видно, що не усі моделі були доведені до зриву. Несуча здатність підсиленого фундаменту при кроці 3d склала 22 і 30 кН при довжині паль відповідно 20 і 40 см; при кроці 6d – 22 і 30 кН.

Умовний фундамент показав, що заміна пальового фундаменту умовним не дає бажаного результату, хоч і в ході експерименту, через стиснені можливості він також не був доведений до зриву. Отже, замінювати пальовий фундамент на умовний фундамент мілкого закладання з метою визначення його несучої здатності некоректно.

На рис. 8 (а, б) наведені такі графіки для одиночних паль, на рис. 8 (в) – для плити ростверку, як штампу без паль.

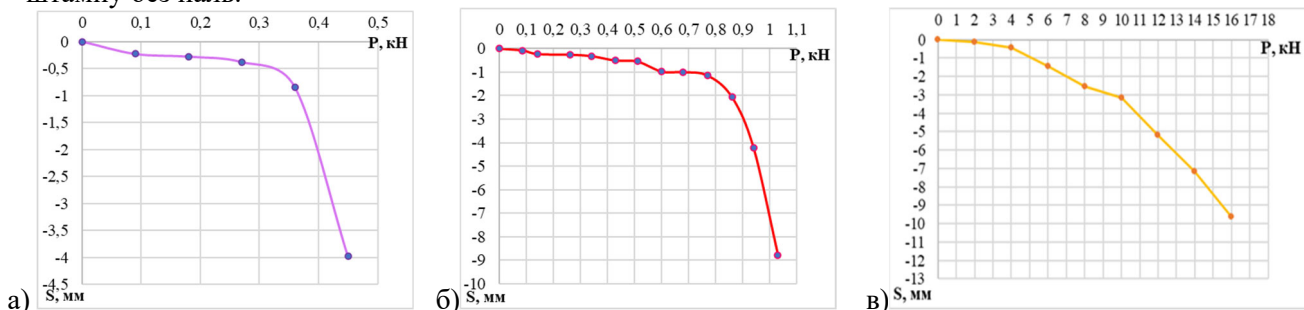


Рис. 8 – Графіки залежності навантаження – осідання: а) для паль довжиною 200 мм; б) для паль довжиною 400 мм; в) для плити ростверку без паль

Частка навантаження, яке сприймають палі підсилення, визначалась як сума зусиль в кожній палі, що були виміряні тензометричними датчиками, дані занесено до таблиці 2.

Таблиця 2 - Сума зусиль в палях при різному ступені навантаження

Навантаження на фундамент, кг	Довжина та крок палі			
	Палі 20 см крок 3d	Палі 20 см крок 6d	Палі 40 см крок 3d	Палі 40 см крок 6d
1600	4,22	1,54	5,3	3,2
1800	5,06	1,82	5,7	4,06
2000	5,28	2,04	6,91	4,7
2200	5,87	2,51	7,2	5,32
2400	-	2,81	8,18	5,96
2600	-	3,37	9,95	6,76
2800	-	3,75	10,85	7,24
3000	-	3,74	11,52	-

По отриманих результатах експерименту було зроблено порівняння роботи пальового фундаменту з плитою ростверку з роботою його окремих елементів при обраному осіданні 12 мм (табл. 3).

Таблиця 3 – Порівняння роботи пальового фундамента з плитою ростверку з роботою його окремих елементів при осіданні фундаменту  $s = 12,0$  мм

Довжина паль, см	Крок паль	При роботі у складі фундаменту					При роботі кожного з елементів як окремого			
		Осереднене навантаження на палю фундаменту, кН	Сума зусиль в палях підсилення, кН	Навантаження, що сприймається ростверком, кН	Навантаження на фундамент кН	Частка ростверку, %	Несуча здатність одиночної палі, кН	Сума зусиль в палях, кН	Навантаження, що сприймається плитою ростверку без паль, кН	Навантаження як сума окремих елементів кН
20	3d	0,38	5,31	14,79	20,10	74	0,405	5,67	16	21,67
	6d	0,27	2,12	18,21	20,33	90		3,24		19,24
40	3d	0,62	8,6	15,88	24,48	65	0,872	12,21	16	28,21
	6d	0,6	4,81	15,55	20,36	76		6,98		22,98

Графік залежності несучої здатності фундаменту в цілому, ростверку окремо та палі в залежності від довжини паль при кроці паль 3d(а) та 6d(б) зображено на рис. 9.

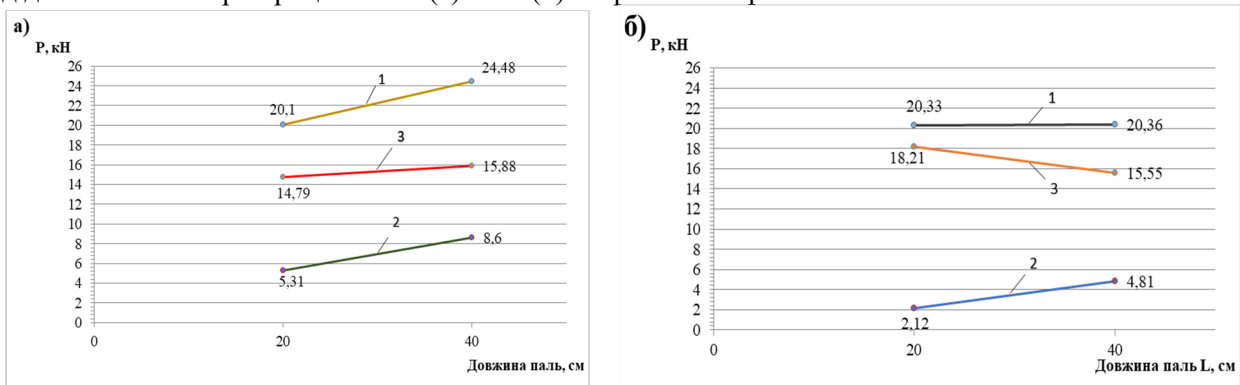


Рис. 9 – Графік залежності несучої здатності фундаменту в залежності від довжини паль при кроці паль 3d(а) та 6d(б): 1 – несуча здатність фундаменту в цілому; 2 – несуча здатність паль; 3 – несуча здатність ростверку

Визначена частка ростверку наведена в таблиці 4.

Таблиця 4 – Частка ростверку у несучій здатності фундаменту, %

Крок паль	Довжина паль, см	
	20	40
3d	74	65
6d	90	76

Графік залежності частки, яку складає несуча здатність ростверку у складі підсиленого фундаменту, від довжини паль при кроці паль 3d і 6d зображено на рис. 10.

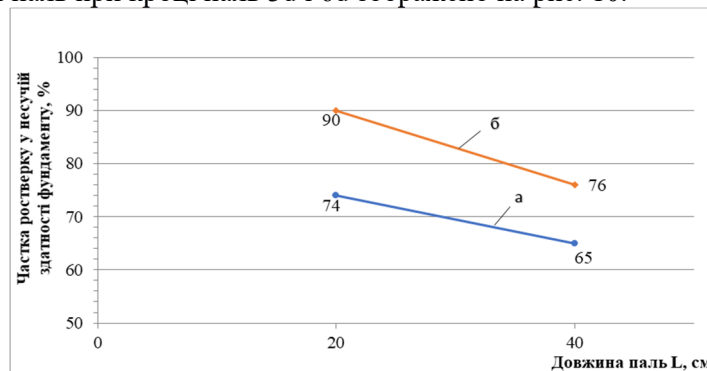


Рис. 10 – Графік залежності частки, яку складає несуча здатність ростверку у складі підсиленого фундаменту, від довжини паль: а і б – при кроці паль 3d і 6d відповідно

Ступінь реалізації несучої здатності паль визначався як відношення осередненої несучої здатності палі у складі фундаменту 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 5 та на рис. 11-12 наведені результати обробки параметрів фізичного експерименту.

Таблиця 5 – Ступінь реалізації несучої здатності паль та ростверку

Довжина, см	Крок паль	Ступінь реалізації несучої здатності палі	Ступінь реалізації несучої здатності ростверку
1	2	3	4
L=20 см	3d	0,93	0,92
L=20 см	6d	0,65	1,14
L=40 см	3d	0,72	1,0
L=40 см	6d	0,69	0,97

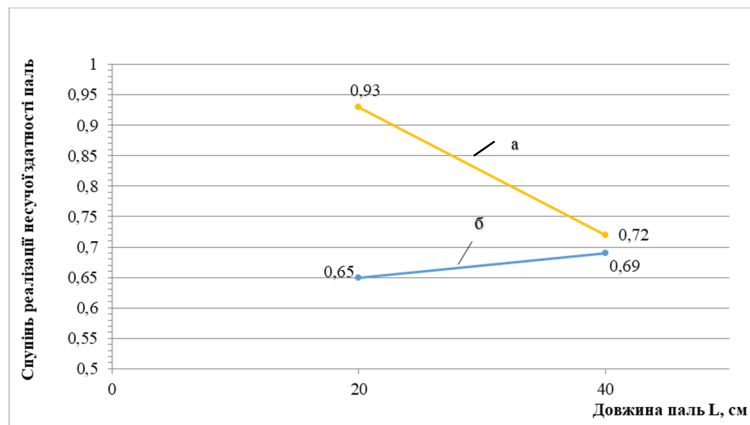


Рис. 11 – Залежність ступеню реалізації несучої здатності палі у складі фундаменту від кроку і довжини паль: а і б – при кроці паль 3d і 6d відповідно

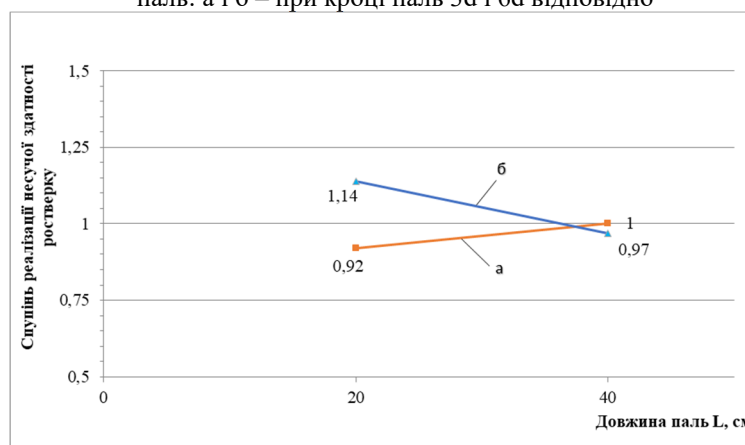


Рис. 12 – Графік залежності ступеня реалізації ростверку: а і б – при кроці паль 3d і 6d відповідно

Ступінь реалізації несучої здатності паль складає від 0,65 до 0,93, а реалізація несучої здатності ростверка змінюється від 0,92 до 1,14 при найменшій кількості паль найменшої довжини.

### Постановка задач та виконання дослідження математичного моделювання

При моделюванні передбачено виконати підсилення фундаментів мілкового закладання у двох різних ґрунтових умовах з варіюванням кроку, довжини, а також зміною виду розташування голови палі відносно подошви фундаменту, що дозволить з'ясувати доцільність використання коротких паль при підсиленні фундаментів.

Ставилась також задача з'ясувати, при якому кроці і довжині паль підсилення робота пального фундаменту може бути прирівняна до роботи ґрунто-пального масиву.

Прийнятою початковою експериментальною моделлю є фундамент мілкового закладання висотою 300 мм, шириною 1 м, глибиною закладання 1 м та постійне навантаження, яке задаємо - 200 кН. Схема стрічкового фундаменту зображено на рис. 13 [2].



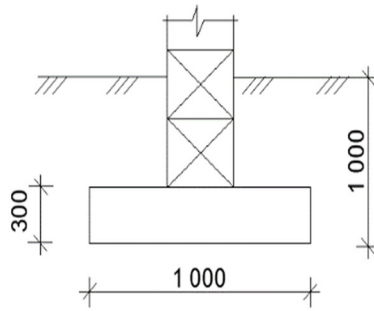


Рис.13 – Схема стрічкового фундаменту, що підлягає підсиленню

У першому варіанті плануємо підсилення існуючого фундаменту короткими палями з головою у рівні підшви.

До розрахунку приймаємо такі параметри:

- тип палі – вдавлюванні з металевих труб;
- модель ґрунту – пружно-пластична модель Кулона-Мора;
- фундамент, що підсилюються – стрічковий мілкого закладання;
- палі довжиною 1,0 м з кроком 600 та 1200 мм;
- палі довжиною 5,0 м з кроком 600 та 1200 мм;
- діаметр палі 0,2 м;
- висота ростверку – 600 мм;
- ростверк – 2,6 м x 10 м;
- характеристики ґрунту: пісок дрібний, щільний  $\gamma = 19,2 \text{ кН/м}^3$ ,  $e = 0,59$ ,  $c = 4 \text{ кПа}$ ,  $\phi = 31^\circ$ ,  $E = 28 \text{ МПа}$  та суглинок  $\gamma = 18,5 \text{ кН/м}^3$ ,  $e = 35$ ,  $c = 23 \text{ кПа}$ ,  $\phi = 21^\circ$ ,  $E = 14 \text{ МПа}$  [3].

Графічна модель підсилення фундаменту у рівні підшви та модель підсилення фундаменту методом заглиблення зображена на рис. 14.

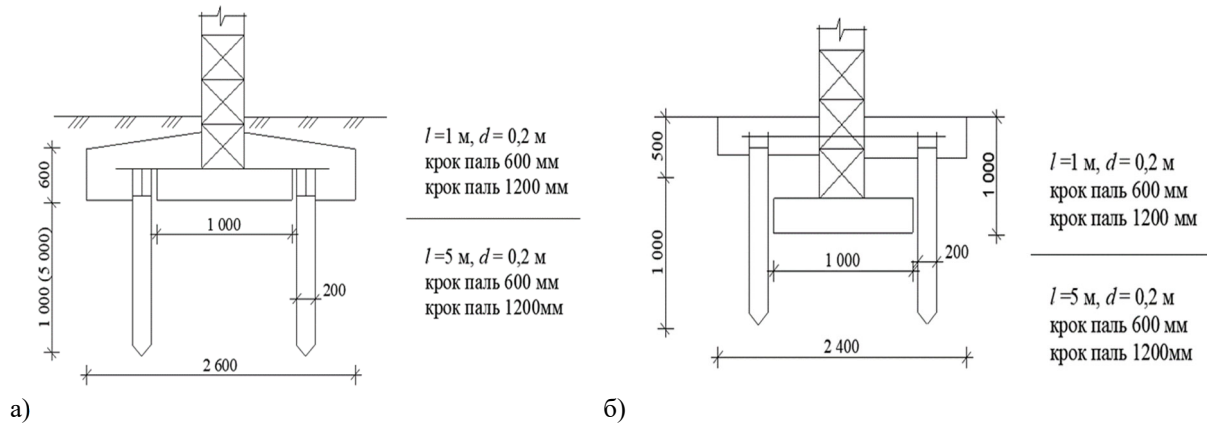


Рис. 14 – Моделі підсилення фундаменту: а) у рівні підшви, б) методом заглиблення

Також варто розглянути програму моделювання підсилення роботи фундаменту у рівні підшви наведеної у таблиці 6.

Таблиця 6 – Програма математичного моделювання підсилення роботи фундаменту у рівні підшви

Група дослідів	Довжина та поперечний розмір палі	Крок палі
1	L = 1 м, d = 0,2 м	600 мм
2		1200 мм
3	L = 5 м, d = 0,2 м	600 мм
4		1200 мм

Третім етапом математичного моделювання планується виконати перевірку підсиленого фундаменту, як умовного фундаменту мілкого закладання з глибиною закладання в рівні нижніх кінців палі (відповідно 2,0 м та 6,0 м). Схема суцільного фундаменту, що моделює умовний фундамент, зображено на рис. 15.

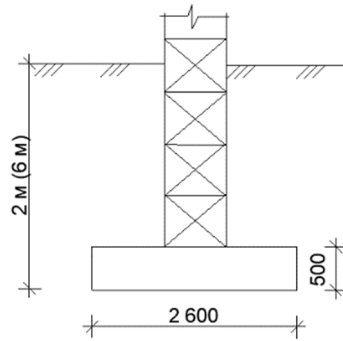


Рис. 15 – Схема фундаменту, що прийнята для моделювання суцільного ґрунто-пального масиву в межах умовного фундаменту

Для виконання математичного моделювання роботи існуючого стрічкового фундаменту, підсиленого вдавненими палями різних довжин та варіантів виконання, за основу було взято програмний продукт Plaxis 3D Foundation, який базується на використанні чисельного методу скінчених елементів [4].

Для чисельного моделювання сумісної роботи існуючого фундаменту і палі при його підсиленні було прийнято такі вихідні дані:

- палі підсилення (поперечний розмір  $d=0,2$  м, довжиною 1 та 5 м) з кроком  $3d$  (34 шт.) та  $6d$  (18 шт.) при варіанті підсилення фундаменту палями від рівня підшови (рисунок 3.5), ростверк розмірами  $2,6 \times 10$  м;
- палі підсилення (поперечний розмір  $d=0,2$  м, довжиною 1 та 5 м) з кроком  $3d$  (34 шт.) та  $6d$  (18 шт.) при варіанті підсилення фундаменту палями з рівня поверхні ґрунту (рисунок 3.6), ростверк розмірами  $2,6 \times 10$  м.

Модель підсиленого палями стрічкового фундаменту мілкого закладання в програмі Plaxis 3D Foundation при кроці  $3d$  та  $6d$  для палі підсилення довжиною 1 м, у варіанті закладання палі у рівні підшови приведена на рис.16.

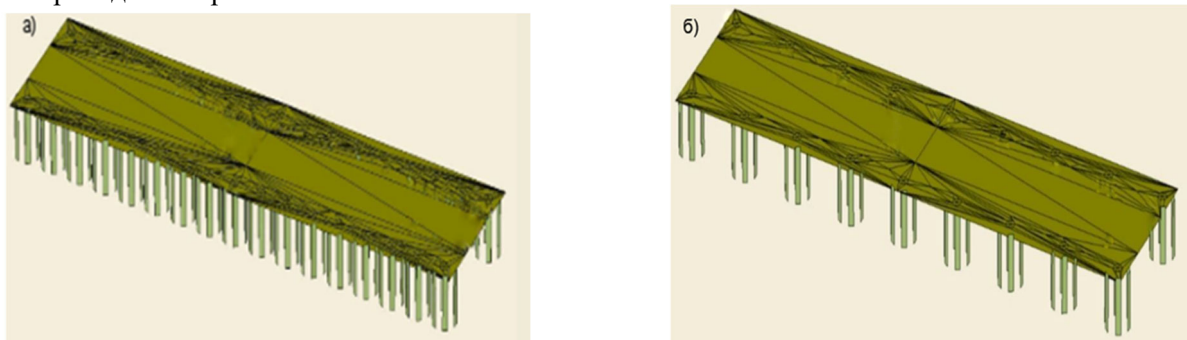


Рис.16 – Розрахункова модель підсиленого палями фундаменту у варіанті закладання палі довжиною 1 м від рівня підшови при кроці палі: а)  $3d$ , б)  $6d$

Розташування моделі під дією вертикального навантаження в масиві ґрунту зображено на рис.17.

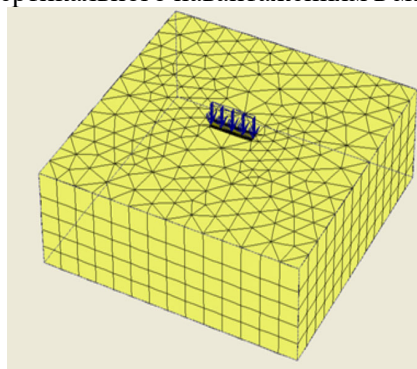


Рис.17 – Розташування моделі під дією вертикального навантаження в масиві ґрунту

Модель підсиленого палями стрічкового фундаменту мілкого закладання при кроці  $3d$  та  $6d$  для палі підсилення довжиною 1 м, у варіанті закладання палі від поверхні ґрунту приведена на рис.18. Модель підсиленого фундаменту у варіанті умовного приведено на рис. 19.



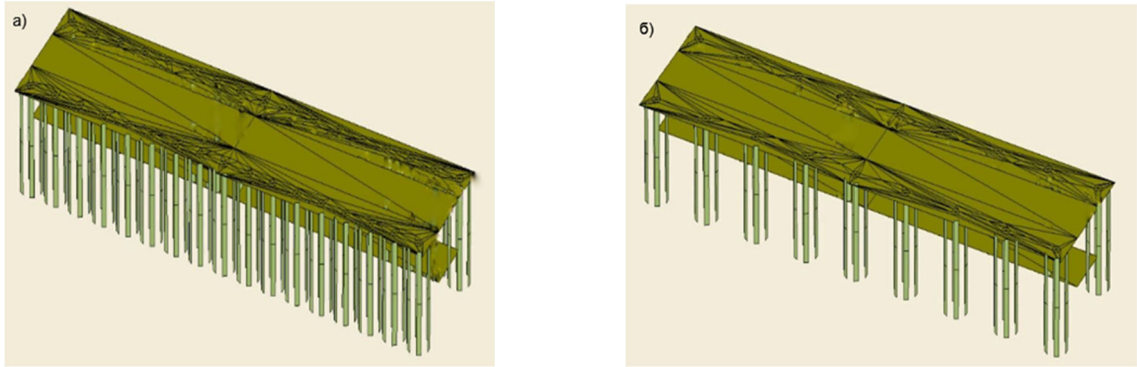


Рис.18 – Розрахункова модель підсиленого палями фундаменту у варіанті закладання паль довжиною 1 м від поверхні ґрунту при кроці паль: а) 3d, б) 6d

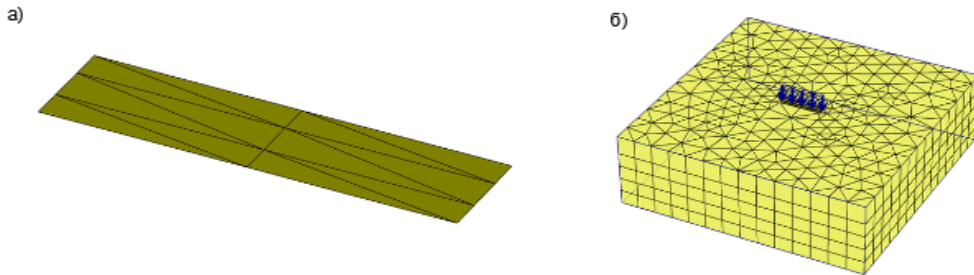


Рис.19 – Розрахункова модель підсиленого фундаменту у варіанті умовного фундаменту (а) та розташування моделі під дією вертикального навантаження в масиві ґрунту (б)

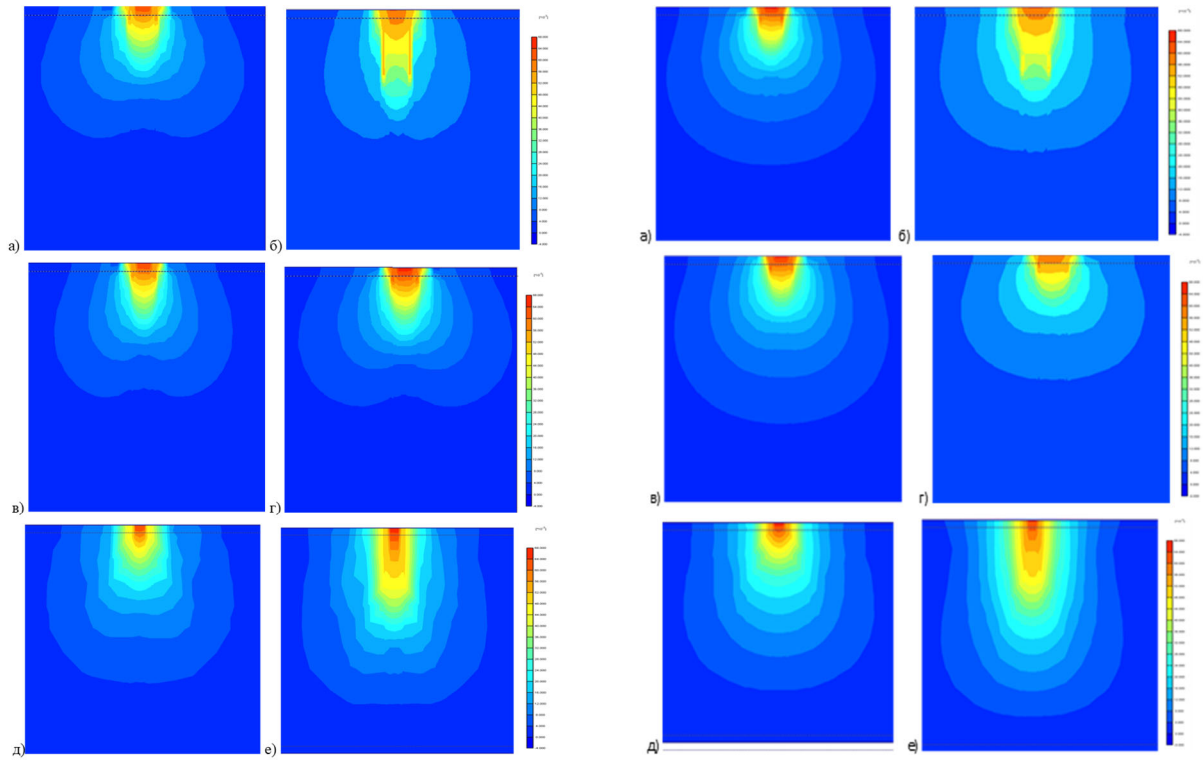
### **Аналіз отриманих результатів математичного моделювання з підсилення фундаменту мілкого закладання палями**

На рис. 20 наведено отриманий результат мозаїки деформацій ґрунтової основи для паль підсилення довжиною 1 та 5 м при поздовжньому кроці 3d для двох варіантів підсилення, у рівні підшви фундаменту та від поверхні ґрунту, у піщаній та глинистій основі та моделювання підсиленого фундаменту як умовного з варіюванням значень глибини закладання.

З мозаїк деформацій видно, що для коротких паль зона впливу напруженого стану для підсиленого палями фундаменту і умовного фундаменту практично однакові. Для більш довгих паль моделювання умовного фундаменту призводить до переміщення напруженої зони на значно більшу глибину. Таким чином підхід до розгляду пального фундаменту як умовного фундаменту мілкого закладання при підсиленні стрічкових фундаментів може бути прийнятним лише для варіанту коротких паль.

Порівнюючи ґрунтові масиви глинистого та піщаного виду, з побудованих графіків та мозаїк деформацій ґрунту, можна чітко спостерігати, що піщаний ґрунтовий масив набагато краще передає навантаження та дає значно менші осідання при однаковому навантаженні.

На рис. 21 наведено графіки залежності осідання – навантаження фундаменту до - I стадія та після підсилення - II стадія при кроці паль 3d, довжиною паль 1 та 5 м у піщаному та глинистому ґрунті. Крива осідання-навантаження для I стадії роботи фундаменту до підсилення для розглянутих випадків практично співпадає.



піщаний ґрунт

глинистий ґрунт

Рис. 20 – Мозаїки деформації ґрунту в основі підсиленого фундаменту палями з кроком 3d: а) паля 1 м – підсилення від поверхні ґрунту; б) паля 5 м – підсилення від поверхні ґрунту; в) паля 1 м – підсилення від рівня підшови фундаменту; г) паля 5 м – підсилення від рівня підшови фундаменту; д) умовний фундамент 1 м; е) умовний фундамент 5 м

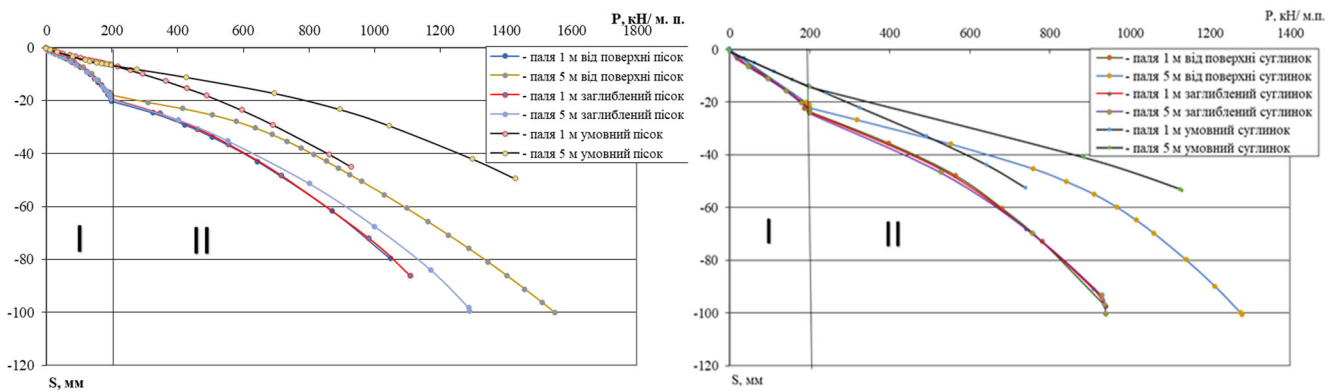


Рис. 21 – Графіки залежності осідання – навантаження фундаменту з кроком паль 3d I стадія – робота фундаменту до підсилення; II стадія – робота підсиленого палями фундаменту: а) у піщаному ґрунті; б) у глинистому ґрунті

На рис. 22 наведено отриманий результат мозаїки деформацій ґрунтової основи для паль підсилення довжиною 1 та 5 м при поздовжньому кроці бд для двох варіантів підсилення, у рівні підшови фундаменту та від поверхні ґрунту, у піщаній та глинистій основі.

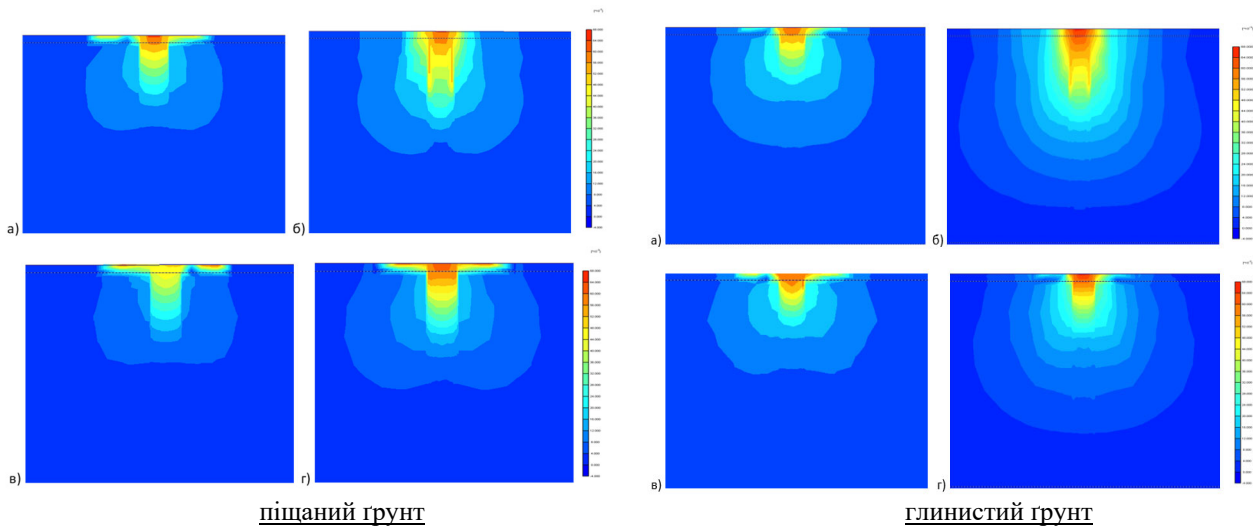


Рис. 22 – Мозаїки деформації ґрунту в основі підсиленого фундаменту палями з кроком 6d у піщаному та глинистому ґрунті: а) паля 1 м – підсилення від поверхні ґрунту; б) паля 5 м – підсилення від поверхні ґрунту; в) паля 1 м – підсилення від рівня підшви фундаменту; г) паля 5 м – підсилення від рівня підшви фундаменту

На рис. 23 наведено графіки залежності осідання – навантаження фундаменту до I стадії та після підсилення - II стадії при кроці паль 6d, довжиною паль 1 та 5 м у піщаному та глинистому ґрунті. Крива осідання-навантаження для I стадії роботи фундаменту до підсилення для розглянутих випадків практично співпадає.

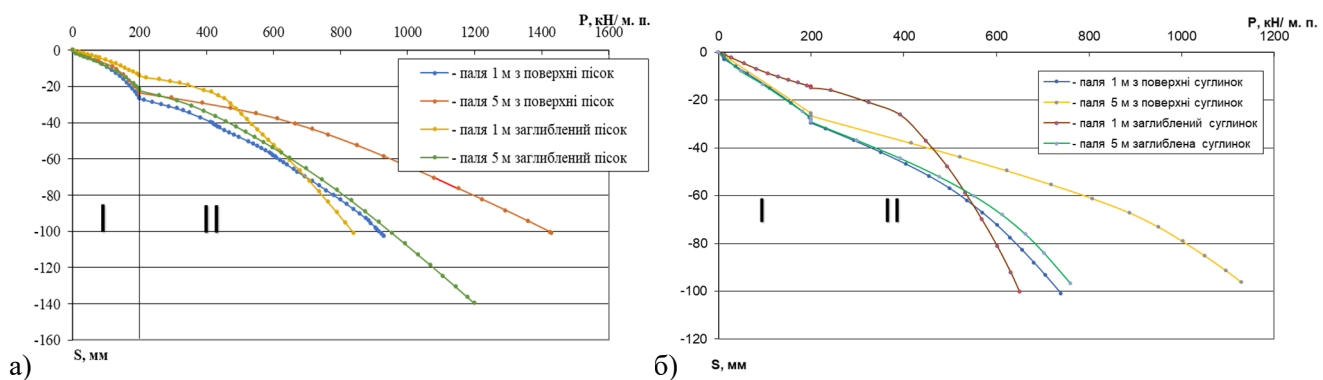


Рис.23 – Графіки залежності осідання – навантаження фундаменту з кроком паль 6d I стадії – робота фундаменту до підсилення; II стадії – робота підсиленого палями фундаменту: а) у піщаному ґрунті; б) у глинистому ґрунті

В результаті виконання моделювання одинокої палі у двох різних ґрунтових умовах було визначено її несучу здатність. По отриманих даних побудовано графіки осідання – навантаження зображені на рис. 24 за результатами випробування одиночних паль довжиною 1 та 5 м та плити ростверку без паль.

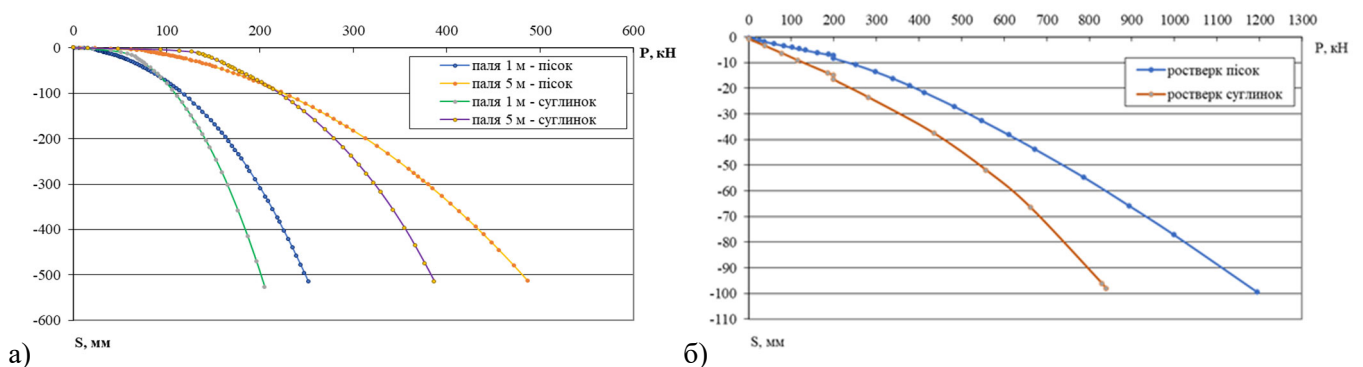


Рис. 24 – Графік осідання – навантаження: а) одиночних паль; б) плити ростверку без паль

По отриманих результатах експерименту було зроблено порівняння роботи пального фундаменту з плитою ростверку та роботою його окремих елементів у розрахунку на довжину ростверку 2,4 м

(таблиця 7). Частка навантаження, яку сприймають палі фундаменту, визначається за результатами розрахунку у програмному комплексі Plaxis, частка навантаження, яку сприймає ростверк, визначалась як різниця між навантаженням на фундамент та сумою зусиль в палях.

Таблиця 7 – Порівняння роботи пальового фундаменту з плитою ростверку з роботою його окремих елементів

Довжина паль, см	Крок паль	При роботі у складі фундаменту					При роботі кожного з елементів як окремого			
		Осереднене навантаження на палю фундаменту, кН	Сума зусиль в палях підсилення, кН	Навантаження, що сприймається ростверком, кН	Навантаження на фундамент кН	Частка ростверку, %	Несуча здатність одиночної палі, кН	Сума зусиль в палях, кН	Навантаження, що сприймається плитою ростверку без палі, кН	Навантаження фундамент, як сума окремих елементів кН
Паля від поверхні (пісок)										
1 м	3d	113,4	907,2	1612,8	2520	64	119,4	955,2	2238,4	3193,6
	6d	206,46	825,8	1406,2	2232	63		477,6		2716,0
5 м	3d	274,35	2194,8	1525,2	3720	41	231,9	1855,2	2238,4	4093,6
	6d	592,02	2368,1	1063,9	3432	31		927,6		3166,0
Паля від підшови фундаменту (пісок)										
1 м	3d	86,58	692,64	1971,4	2664	74	119,4	955,2	2238,4	3193,6
	6d	100,8	403,2	1612,8	2016	80		477,6		2716,0
5 м	3d	85,14	681,1	2414,9	3096	78	231,9	1855,2	2238,4	2087,7
	6d	85,5	342,0	1938,0	2280	85		927,6		3166,0
Паля від поверхні (суглинок)										
1 м	3d	84,6	676,8	1579,2	2256	70	111,7	893,6	1642,9	2536,5
	6d	102,12	408,5	1367,5	1776	77		446,8		2089,7
5 м	3d	218,9	1751,1	1320,9	3072	43	221,7	1773,6	1642,9	3416,5
	6d	401,7	1606,8	865,2	2472	35		886,8		2529,7
Паля від підшови фундаменту (суглинок)										
1 м	3d	76,14	609,12	1646,9	2256	73	111,7	893,6	1642,9	2536,5
	6d	74,1	296,4	1263,6	1560	81		446,8		2089,7
5 м	3d	62,04	496,3	1759,7	2256	78	221,7	1773,6	1642,9	3416,5
	6d	123,12	492,48	1331,5	1824	84		886,8		2529,7

Визначена частка ростверку наведена в таблиці 8.

Таблиця 8 – Частка ростверку у несучій здатності фундаменту, %

Крок паль	Довжина паль, м	
	1м	5м
Паля від поверхні (пісок)		
3d	64	41
6d	63	31
Паля від підшови фундаменту (пісок)		
3d	74	78
6d	80	85
Паля від поверхні (суглинок)		
3d	70	43
6d	77	35
Паля від підшови фундаменту (суглинок)		
3d	73	78
6d	81	84

Ступінь реалізації несучої здатності паль визначався як відношення осередненої несучої здатності палі у складі фундаменту 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 палі. У таблиці 9 наведені результати обробки параметрів математичного експерименту.

Таблиця 9 – Ступінь реалізації несучої здатності паль та ростверку

Довжина, см	Крок паль	Ступінь реалізації несучої здатності палі	Ступінь реалізації несучої здатності ростверку
1	2	3	4
<b>Паля від поверхні (пісок)</b>			
L=1м	3d	0,95	0,73
	6d	1,73	0,63
L=5м	3d	1,18	0,68
	6d	2,55	0,48
<b>Паля від підшви фундаменту (пісок)</b>			
L=1м	3d	0,73	0,88
	6d	0,84	0,72
L=5м	3d	0,34	1,08
	6d	0,34	0,87
<b>Паля від поверхні (суглинок)</b>			
L=1м	3d	0,76	0,96
	6d	0,92	0,83
L=5м	3d	0,98	0,8
	6d	1,82	0,53
<b>Паля від підшви фундаменту (суглинок)</b>			
L=1м	3d	0,68	1,0
	6d	0,66	0,77
L=5м	3d	0,28	1,07
	6d	0,56	0,81

За результатами математичного моделювання у програмному комплексі Plaxis 3d, побудовано графіки (рис. 25, 26) залежності ступеню реалізації несучої здатності паль та ростверку у складі фундаменту.

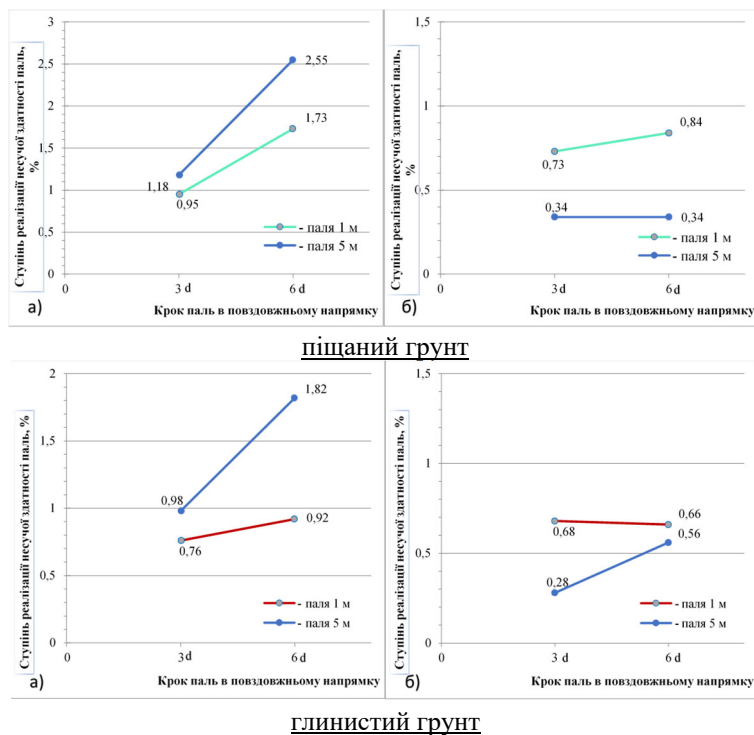


Рис.25 – Залежність ступеню реалізації несучої здатності палі у піщаному та глинистому ґрунті у складі фундаменту від кроку і довжини паль: а) підсилення від поверхні, б) підсилення від підшви фундаменту

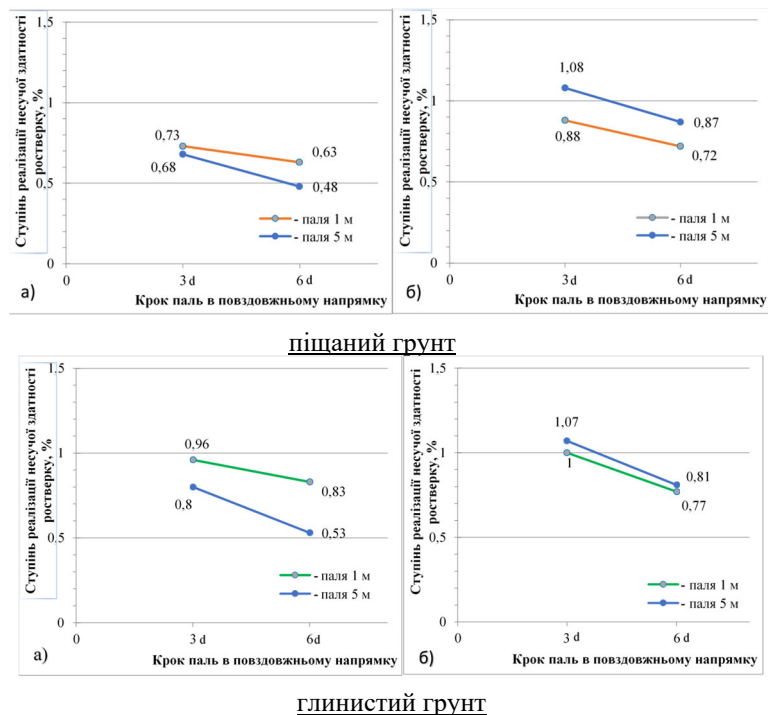


Рис. 26 – Графік залежності ступеня реалізації ростверку у піщаному та глинистому ґрунті у складі фундаменту від кроку і довжини палі: а) підсилення від поверхні, б) підсилення від підшви фундаменту

### Висновки

Виходячи із фізичного моделювання застосування коротких палі при підсиленні стрічкових фундаментів (довжина палі сумірна з шириною ростверка підсиленого фундаменту) дає достатньо ефективний результат. Перехід від коротких до довгих палі, що мають на 50% більшу довжину, збільшує несучу здатність підсиленого фундаменту лише на 10-15%.

Найбільш оптимальним варіантом розміщення палі підсилення є розміщення їх з кроком, який відповідає розміру підшви умовного фундаменту навколо одиночної палі. Замінювати пальовий фундамент на умовний фундамент мілкового закладання з метою визначення його несучої здатності некоректно.

З одержаних залежностей математичного моделювання видно, що в випадку підсилення фундаменту короткими палями різниці в поведінці підсиленого фундаменту при улаштуванні їх від рівня підшви або від рівня поверхні ґрунту практично не спостерігається. При підсиленні ж більш довгими палями ця різниця є доволі суттєвою. Збільшення глибини закладання нижнього кінця палі при підсиленні від рівня підшви мало б призводити до покращення роботи фундаменту, але переважає включення у роботу додаткового ростверку в рівні поверхні ґрунту (при однакових осіданнях фундамент з підсиленням від поверхні може сприйняти більше навантаження).

Порівнюючи ґрунтові масиви глинистого та піщаного виду, з побудованих графіків та мозаїк деформацій ґрунту, можна чітко спостерігати, що піщаний ґрунтовий масив набагато краще передає навантаження та дає значно менші осідання при більшому навантаженні, але якісна картина перерозподілу зусиль між елементами підсиленого фундаменту зберігається.

Збільшення кроку коротких палі підсилення незначно впливає на несучу здатність підсиленого фундаменту, що дає можливість економити витрати на палі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Масєвська І. В., Городнік Л. А. Планування експерименту дослідження підсилення фундаменту мілкового закладання короткими палями. *Інноваційні технології в будівництві: тези міжнар. наук.-техн. конф. м. Вінниця, 10-12 лист. 2020 р. Вінниця, 2020.* URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2020/paper/view/10847>
2. Масєвська І. В., Городнік Л. А. Планування експерименту дослідження підсилення фундаменту мілкового закладання короткими палями. *Інноваційні технології в будівництві: тези міжнар. наук.-техн. конф. м. Вінниця, 10-12 лист. 2020 р. Вінниця, 2020.* URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2020/paper/view/10847>



3. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. [Чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2019. 42 с.

4. Патронова О.С. PLAXIS - інструмент інженера-геотехніка. Приклади розрахунків Вишукування, генплан і транспорт. CADmaster №3 (13), 2002.С.62-65

**Городнік Лілія Анатоліївна** — студентка групи Б-20м, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця; e-mail: 1b.16b.zabashanska@gmail.com

Науковий керівник: **Маєвська Ірина Вікторівна** — к. т. н, доцент, кафедра будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, Вінниця. e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com, maevska@vntu.edu.ua

**Horodnik Liliia** — Department of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. E-mail: 1b.16b.zabashanska@gmail.com

Supervisor: **Irina V. Mayevska** — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Construction, Municipal Economy and Architecture, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. E-mail: irina.mayevskaja@gmail.com maevska@vntu.edu.ua