

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Будівництва, цивільної та екологічної інженерії
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра будівництва, міського господарства та архітектури
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

«ВПЛИВ ВЗАЄМОДІЇ ПАЛЬ СТІЧКОВОГО ПАЛЬОВОГО
ФУНДАМЕНТУ НА ЙОГО ОПІР ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ»

Виконав: студент 3-го курсу, групи Б-22мс
спеціальності 192 – «Будівництво та
цивільна інженерія»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Кротов О. О.
(прізвище та ініціали)

Керівник д.т.н., проф., каф. БМГА

Моргун А. С.
(прізвище та ініціали)

« 10 » 06 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доцент каф. ІСБ

Слободян Н.М.
(прізвище та ініціали)

« 10 » 06 2025 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри БМГА

В. В. Швель
(прізвище та ініціали)

« 10 » 06 2025 року

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет

Факультет Будівництва, цивільної та екологічної інженерії

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра Будівництва, міського господарства та архітектури

(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 19 Архітектура та будівництво

(шифр і назва)

Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

Освітньо-професійна програма Промислове та цивільне будівництво

(назва освітньо-професійної програми)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Швець В.В.

(підпис) (прізвище та ініціали)

“ ” 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кротов Олег Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Вплив взаємодії паль стрічкового пальового фундаменту на його опір за методом граничних елементів

Керівник роботи: Моргун Алла Серафимівна, дтн., професор,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від 18.02. 2025 року № 29

2. Термін подання студентом роботи 23.05.2025

3. Вихідні дані до роботи:

- Експериментальні дослідження проф. А.О. Бартоломія.
- Теоретичні основи розрахунку паль за числовим МГЕ.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

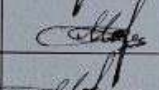
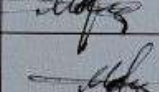
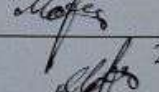
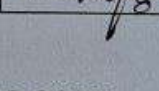
- Розділ 1. Аналітичний огляд стану питання.
- Розділ 2. Дослідження опору однорядних стрічкових пальових фундаментів вертикальним навантаженням за МГЕ.

- Розділ 3. Порівняння результатів числових досліджень за МГЕ з експериментальними для перевірки можливості реалізації результатів наукових досліджень.
- Розділ 4. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

- Розрахункові схеми визначення зон ущільнення ґрунту стрічкових пальових фундаментів (одне креслення).
- Блок-схема програми визначення опору одиночних паль за МГЕ (одне креслення).
- Результати числового моделювання за МГЕ взаємодії паль стрічкового пальового фундаменту (21 креслення).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Виконання прийняв
1	Моргун А.С. проф. каф. БМГА	 18.02.2025	 23.05.2025
2	Моргун А.С. проф. каф. БМГА	 18.02.2025	 23.05.2025
3	Моргун А.С. проф. каф. БМГА	 18.02.2025	 23.05.2025
4	Моргун А.С. проф. каф. БМГА	 18.02.2025	 23.05.2025

7. Дата видачі завдання 18.02.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

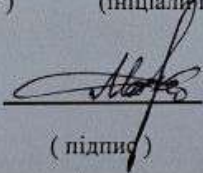
№ Чч	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітка
		початок	закінчення	
Р.1	Аналітичний огляд літературних джерел.			
1.1	Особливості сумісної роботи паль, пальових фундаментів з їх основами	18.02	3.03	Виконано
1.2	Методи визначення осідань СПФ	3.03	17.03	Виконано
Р.2	Дослідження опору однорядних стрічкових пальових фундаментів вертикальним навантаженням за числовим МГЕ			

2.1	Основні етапи прикладання МГЕ до розрахунків однорядних стрічкових пальових фундаментів	17.03	24.03	Виконано
2.2	Структура програми розрахунку на ЕОМ стрічкових пальових фундаментів	24.03	30.03	Виконано
2.3	Результати досліджень особливостей опору стрічкових пальових фундаментів вертикальним навантаженням	30.03	15.04	Виконано
Р.3	Порівняння результатів числових досліджень за МГЕ з експериментальними для перевірки можливості реалізації результатів наукових досліджень	15.04	2.05	Виконано
Р. 4	Висновки. Виклад основних результатів	2.05	14.05	Виконано
	Список використаних джерел	14.05	22.05	Виконано

Студент  О. О. Кротов

(підпис)

(ініціали і прізвище)

Керівник роботи  А.С. Моргун

(підпис)

(ініціали і прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 54 сторінок формату А4, на яких є 20 рисунків, 2 таблиць, список використаних джерел містить 20 найменувань.

В бакалаврській кваліфікаційній роботі на тему «Вплив взаємодії паль стрічкового пальового фундаменту на його опір за методом граничних елементів» об'єктом дослідження були деформаційні процеси навколофундаментної ґрунтової основи від дії споруд та визначення несучої спроможності стрічкових пальових фундаментів.

Мета бакалаврської кваліфікаційної роботи присвячена розв'язанню завдання наукового та прикладного характеру моделювання поведінки стрічкових пальових фундаментів та обґрунтування методики розрахунку паль в пружній стадії їх роботи з використанням сучасного числового методу граничних елементів (МГЕ). Використано числові дослідження.

Розроблено принципові підходи до розв'язання задачі поведінки стрічкових пальових фундаментів в ґрунтовій основі. Проаналізовано питання використання потенційних можливостей МГЕ при розв'язанні задач геомеханіки на базі моделі лінійно-деформованого півпростору. Запропоновано методику аналізу напружено-деформованого стану та визначення несучої спроможності стрічкових пальових фундаментів.

Використання в прогностичних розрахунках нових дилатансійних пружнопластичних моделей ґрунтових основ та сучасного числового методу граничних елементів дає можливість ще на стадії проектування прогнозувати НДС основ, варіювати вхідними параметрами для отримання найбільш економічного рішення, та отримання картини роботи фундаменту та ґрунтової основи під тисками сучасних висотних будівель.

Ключові слова: стрічковий пальовий фундамент, метод граничних елементів, взаємодія паль, опір пальового поля.

ABSTRACT

The bachelor's qualification work consists of 54 pages of A4 format, which contain 20 figures, 2 tables, the list of used sources contains 20 names.

In the bachelor's qualification work on the topic "The influence of the interaction of piles of a strip pile foundation on its resistance using the boundary element method", the object of research was the deformation processes of the soil base around the foundation from the action of structures and the determination of the bearing capacity of strip pile foundations.

The purpose of the bachelor's qualification work is devoted to solving the problem of scientific and applied nature of modeling the behavior of strip pile foundations and substantiating the methodology for calculating piles in the elastic stage of their operation using the modern numerical method of boundary elements (MGE). Numerical studies were used.

Principled approaches to solving the problem of the behavior of strip pile foundations in the soil base were developed. The issue of using the potential capabilities of MGE in solving geomechanics problems based on the linearly deformed half-space model is analyzed. A method for analyzing the stress-strain state and determining the bearing capacity of strip pile foundations is proposed.

The use of new dilatancy elastoplastic models of soil foundations and the modern numerical method of boundary elements in predictive calculations makes it possible to predict the foundation load-bearing capacity of foundations at the design stage, vary the input parameters to obtain the most economical solution, and obtain a picture of the operation of the foundation and soil foundation under the pressures of modern high-rise buildings.

Keywords: strip pile foundation, boundary element method, pile interaction, pile field resistance.

Зміст

Вступ.	8
Розділ 1. Аналітичний огляд стану питання.	10
1.1. Аналітичний огляд літературних джерел. Особливості сумісної роботи паль, пальових фундаментів з їх основами.	12
1.2. Методи визначення осідань СПФ.	15
Розділ 2. Дослідження опору однорядних стрічкових пальових фундаментів вертикальним навантаженням за числовим методом граничних елементів (МГЕ).	19
2.1 Основні етапи прикладання МГЕ до розрахунків однорядних стрічкових пальових фундаментів. Сутність, етапи створення та перспективи.	19
2.2. Структура програми розрахунку стрічкових пальових фундаментів на ЕОМ.	31
2.3. Результати досліджень особливостей опору стрічкових пальових фундаментів вертикальним навантаженням.	38
Розділ 3. Порівняння результатів числових досліджень за МГЕ з експериментальними для перевірки можливості реалізації результатів наукових досліджень.	45
Розділ 4. Висновки. Виклад основних результатів.	51
Список використаних джерел.	52
Додатки.	54

Вступ

В БКР проведено моделювання, аналіз та узагальнення результатів досліджень визначення несучої спроможності стрічкового пальового фундаменту в залежності від величини взаємодії паль в стрічці. Здійснено опис результатів. БКР – робота науково-дослідницького напрямку, присвячена вдосконаленню розрахунку фундаментних конструкцій, розвитку їх математичного моделювання. Надійність основ залежить від вміння оцінити інженерно – геологічні умови основ, їх гідрогеологічну ситуацію, зміну цих властивостей в процесі будівництва та експлуатації, тому є потреба залучення для розрахунку надійності основ останні досягнення механіки ґрунтів, сучасних числових методів та ЕОМ. Великий розкид інженерно – геологічних умов, різноманіття конструкцій споруд виключає стандартний підхід до проектування основ і фундаментів і потребує творчого осмислення.

Всі споруди в кінцевому рахунку передають навантаження на ґрунт. В деяких випадках ця передача здійснюється через багаточисленні послідовно розташовані елементи споруди, в інших випадках, як в дорожніх покриттів, контакт є безпосереднім. Та у всіх випадках основне значення має реакція ґрунту на дію прикладеного навантаження. Одним з головних завдань при проектуванні споруд є технічна та економічна доцільність влаштування конкретних видів фундаментів з урахуванням специфічних природніх умов будівельного майданчика. Адже кошторисна вартість підземної частини споруд при складних інженерно-геологічних умовах складає 40-45 % загальної вартості. Для вибору найкращого варіанту використовується варіантне проектування.

Для сьогодення математичне прогнозування – одне із головних і найбільш економічних прийомів теоретичних і прикладних досліджень актуальних проблем фундаментобудування. Прогнозування осідань основ фундаментів являє одну із найбільш складних задач механіки ґрунтів.

Результати досліджень опубліковано у статтях:

1. Моргун А. С., Меть І. М., Лебідь Р. І., Кротов О. О. «Контактна задача взаємодії паль-оболонок з основами за методом граничних елементів» в науковому журналі ФБЦЕІ №1 «Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві» за 2025р.

2. Моргун А.С., Меть І.М., Колесник А.В., Кротов О.О. «МГЕ в механіці гранульованого середовища ґрунту» в науковому журналі ФБЦЕІ №2 «Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві» за 2024р.

Розділ 1. Аналітичний огляд стану питання

Розрахунок по деформаціях підвалин (обчислення опору паль при заданій величині осідання) має важливу роль в питанні проектування фундаментів будівель і споруд промислового та цивільного призначення. Аналіз сучасного стану питання, аналіз існуючих теорій та концепцій обґрунтовує авторську позицію.

Дослідження питання про розподіл навантаження між боковою поверхнею та вістрям виявили, що більша частина зовнішнього навантаження від наземних конструкцій передається через бокові грані палі і менша через вістря.

При цьому навколо вістря та бокової поверхні палі формується активна (буферна) зона основи, через яку навантаження передається на нижні шари, розташовані на рівні вістря палі та глибше. Тому актуальне значення набирає питання прогнозування стану ґрунту біля палі та моделювання механізму трансформації зовнішнього навантаження на палю, а від неї на підвалину.

Підвищення ефективності будівництва потребує раціонального використання матеріальних та фінансових ресурсів. Однорядні стрічкові пальові фундаменти (СПФ) під несучі стіни будівлі, споруди, які широко використовуються в будівництві, в змозі забезпечити ці вимоги. Їх проектування потребує удосконалення методів розрахунку по граничних станах з урахуванням визначальних факторів і ця задача є актуальна та має значне народногосподарче значення.

В роботі поведінку СПФ під навантаженням здійснено із залученням числового методу граничних елементів (МГЕ).

Для вірного вибору розрахункової схеми при визначенні напружено-деформованого стану (НДС) необхідні дані результатів досліджень розподілу сил тертя по бокові поверхні паль при їх роботі в складі однорядних СПФ в залежності від:

- завантажень,
- ґрунтових умов,
- довжини палі,
- відстані між ними.

Велике значення має удосконалення методів розрахунку СПФ, кошторисна вартість яких складає 16 – 22% загальної вартості будівлі. Широке використання прогресивних конструкцій фундаментів, удосконалення методів розрахунку та спорудження, врахування факторів, що визначають роботу фундаментів в різних ґрунтових умовах, дозволяють отримати значний економічний ефект.

Пальові фундаменти є найбільш економічними та індустріальними видами фундаментів. На теперішній час в Україні рівень застосування пальових фундаментів в житловому будівництві сягає 80-90%, в промисловому будівництві – до 70%.

Подальше удосконалення пальових фундаментів та зниження їх кошторисної вартості можливо на основі повного врахування факторів, які визначають сумісну роботу паль в складі фундаменту, напрацювання більш точних методів проектування та розрахунку по граничних станах.

ДБН В.2.1-10-2009 Основи та фундаменти споруд [1,6] рекомендують розраховувати осідання пальових фундаментів як умовних фундаментів на натуральній основі. Аналіз свідчить, що при розрахунку фундаментів по даному методу осідання в багатьох випадках в 1.5-1.8 рази перебільшує фактичні. Тому напрацювання методу розрахунку СПФ є рішенням проблеми і має важливе значення. В роботі для розв'язку цієї задачі використано метод граничних елементів, наведено результати числових експериментів про розподіл сил тертя по бокові поверхні паль та нижньому кінці паль при зростанні числа паль в стрічці від 2 до 6, що дозволяє виявити вплив основних факторів, які визначають сумісну роботу паль і основ.

1.1. Аналітичний огляд літературних джерел. Особливості сумісної роботи паль, пальових фундаментів з їх основами

Пальові фундаменти знайшли широке використання в житловому та промисловому будівництві, що пояснюється цілим рядом їх переваг в порівнянні з фундаментами на натуральні основи:

- індустріалізація робіт нульового циклу,
- скорочення об'єму земляних робіт,
- зниження витрат бетону,
- зниження кошторисної вартості фундаменту,
- зменшення нерівномірності осідань будівлі.

Подальше удосконалення пальових фундаментів та пониження їх вартості можливо лише на основі більш повного урахування дійсної роботи паль в складі фундаментів, напрацюванні нових методів їх розрахунку.

По призначенню, умовам роботи та характеру передачі навантаження палями на ґрунт їх можна розподілити на групи:

- одиначні палі,
- кущі паль,
- стрічкові пальові фундаменти з розташуванням в один, два, три ряди.

Не дивлячись на широке їх застосування ще недостатньо вивчені багаточисленні фактори впливу, що впливають на їх несучу спроможність і осідання. Це пояснюється складністю проведення натурних досліджень та залежністю від багатьох факторів:

- ущільнення ґрунту,
- утворенням щілин між палею і ґрунтом,
- зміна тиску в порові воді і скелеті ґрунту,
- збільшення сил тертя по боковій поверхні палі в часі (ефект затягування),
- розподіл сил між боковою поверхнею і вістрям,
- розподіл напружень і переміщень в активній зоні ґрунту,
- зміни фізичних і механічних властивостей ґрунту,

–розподіл навантажень між палями та рості осідання пальових фундаментів.

Дослідження питання розподілу зусиль між палями стрічкового фундаменту були виконані Бабічевим З.В.[5] та Бартоломієм А.О.[3,4]. Результати випробувань дозволили виявити, що :

- I – фактичні навантаження на палі менше проектних на 30%,
- II – зусилля, що сприймається палями в складі СПФ розподіляються нерівномірно і в процесі розвитку осідання будівлі проходить перерозподіл зусиль між палями.

Експериментальні дослідження Бартоломія А.А. [3,4] встановили, що розподіл сил тертя по бокові поверхні палі залежить від ґрунтових умов, довжини палі і відстані між палями. Було встановлено, що при роботі паль в складі однорядних пальових фундаментів сили тертя значно менші ніж у одиночних , та для однорядних пальових фундаментів з кроком 3d складають 70% сил тертя одиночної палі, а для дворядних – 43%.

В зв'язку з неоднаковим зниженням сил тертя по бокові поверхні паль при їх роботі в складі фундамента проходить нерівномірний розподіл навантаження між палями при завантаженні фундаментів. Дослідження про розподіл навантажень між палями показали, що крім торцевих паль в складі однорядних і дворядних пальових фундаментів навантаження між палями розподіляється рівномірно. Бабічев З.В. [5] виявив нерівномірність розподілу навантаження між палями в складі стрічкового фундаменту житлової будівлі і фактичні навантаження, які значно менше розрахункових.

Проведено ряд експериментальних робіт з метою виявлення фактичного розподілу навантаження між палями. Розглянуто кущ із 15 паль при їх роботі в слабких і глинистих ґрунтах. Експерименти показали що найбільше навантаження сприймають кутові палі і палі, розташовані в крайніх рядах. Найменше навантаження отримують палі в середині куща.

Крива розподілу навантаження між палями стрічкового пальового фундаменту має сідлоподібний характер, тобто крайні палі несуть найбільше навантаження, а середня паля - найменше. Така залежність характерна для

випадку коли ростверк має нескінченну жорсткість $EI = \infty$ і завантажений зосередженою силою або рівномірно розподіленим навантаженням. Тобто, коли $EI = \infty$ умови завантаження фундаменту не чинять впливу на характер розподілу зусиль між палями.

Аналізуючи численні дослідження, можна відмітити, що в реальних умовах експлуатації СПФ їх згинальна жорсткість, враховуючи жорсткість будівлі, ближче до абсолютно жорсткої і тому їх спільну роботу потрібно урахувати по результатах розрахунку, коли ростверк абсолютно жорсткий.

Як відомо, при заглибленні паль навколо них утворюються області деформації ґрунту з зонами ущільнення поблизу бокової поверхні та нижче площини вістря. Розміри зони ущільнення ґрунту стрічкових пальових фундаментів залежать від числа рядів паль, відстані між палями, розмірів поперечних перетинів паль, коефіцієнта пористості $\varepsilon_{\min}$ ґрунту, затиснутого між палями, рис.1.1.

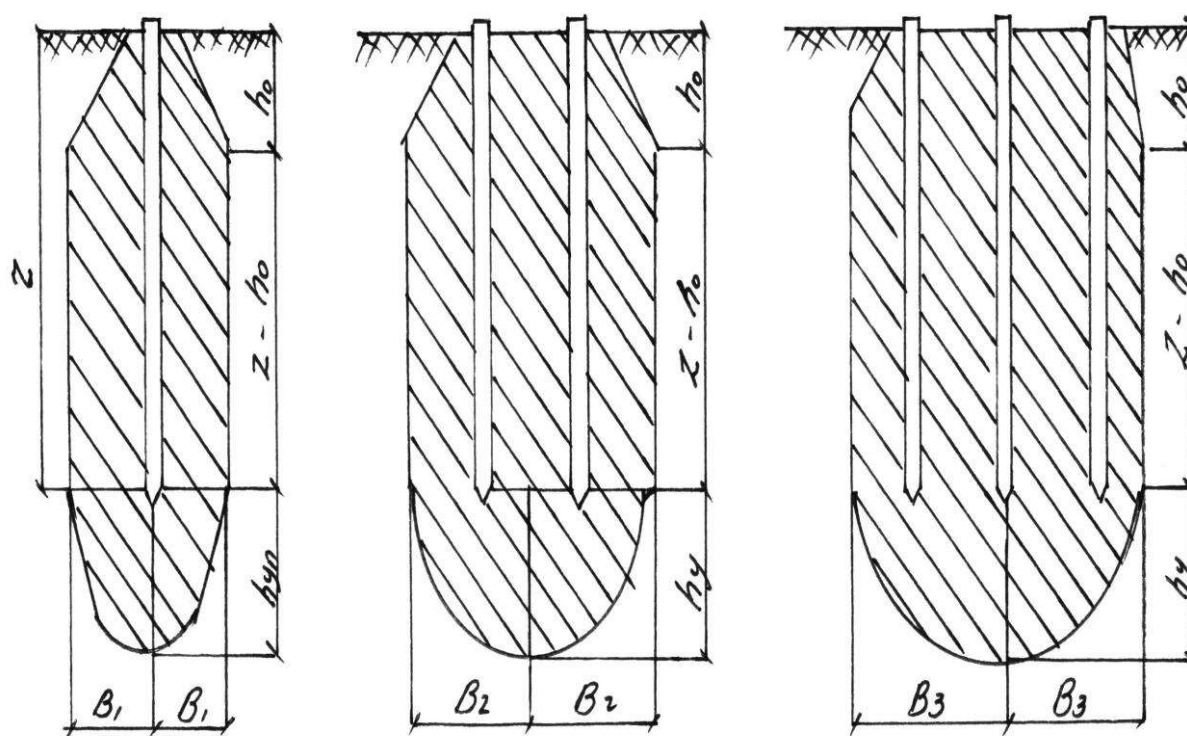


Рис. 1.1 . Розрахункові схеми визначення зон ущільнення ґрунту стрічкових пальових фундаментів [12]

1.2. Методи визначення осідань СПФ

В роботі метод розрахунку осідань стрічкового пальового фундаменту зводиться до розв'язку плоскої задачі з урахуванням прикладання навантаження всередині півпростору. Враховуються такі важливі фактори, як:

- глибина прикладення навантаження,
- передача її через бокову поверхню фундаменту і в площині вістря палі,
- розміри фундаменту,
- коефіцієнт бокового розширення ґрунту,
- напруження і деформації у всій активній зоні.

При розв'язанні задачі прийнято наступні вихідні положення:

1. ґрунт рахується лінійно деформованим тілом;
2. палі та затиснутий між ними ґрунт розглядаються як єдиний масив;
3. навантаження передається ґрунту по боковій поверхні стрічкових пальових фундаментів і в площині нижніх кінців паль;
4. границя активної зони знаходиться на глибині, де напруження від пальового фундаменту не викликають залишкових деформацій ґрунту.

Практично границю активної зони можна прийняти на глибині, де напруження не перевищують структурної міцності ґрунту. Ущільнення ґрунту при заглибленні паль враховується через модуль деформації ущільненої зони, який можна визначити по:

- даних досліджень палі-штампу,
- статичного зондування
- чи у відповідності з рекомендаціями у нормативних довідниках.

Існує наступна формула для визначення осідань однорядних та багаторядних пальових фундаментів [1,6]:

$$S = \frac{P}{\pi \cdot E_1} \cdot \{ \sum_{n=1}^3 [a_n \cdot W_n(z) + b_n \cdot \overline{W}_n(z)] - \sum_{n=1}^3 [a_n \cdot W_n(z_0) + b_n \cdot \overline{W}_n(z_0)] \},$$

(1.1)

де a_n, b_n – коефіцієнти, залежать від виду епюр передачі навантаження по бокові поверхні і в площині вістря паль;

компоненти W_n та $\overline{W}_n$ викликані силами тертя по бокові поверхні і силами тертя в площині нижніх кінців паль;

P – діюче навантаження;

$$E_1 = E / (1 - \mu^2);$$

E - модуль деформації ґрунту;

μ - коефіцієнт бокового розширення ґрунту.

Розрахунок осідань стрічкових пальових фундаментів необхідно виконувати в тому випадку, якщо палі прорізають глинисті ґрунти різної консистенції та спираються нижніми кінцями на піски середньої щільності і глинисті ґрунти м'якопластичної, тугопластичної і напів твердої консистенції.

При опира́ні нижніх кінців паль на великообломочні та щільні пісчані ґрунти та глинисті ґрунти твердої консистенції розрахунок осідань пальових фундаментів цивільних будівель можна не проводити, так як осідання в цих випадках будуть незначними.

Щоб розрахувати по формулі (1.1) осідання стрічкового пальового фундаменту шириною d_0 , довжиною палі L і з навантаженням на палю P необхідно визначити:

–нормативне навантаження на пальовий фундамент;

–границю активної зони;

–приведену ширину пальового фундаменту;

–значення $v_n(i/m), v_n(z_0)$ при $i=1,2,3 \dots 10$, $n_i=10$ і компоненти переміщення W_n по формулі:

$$W_n = \frac{3+2 \cdot v_1 - v_1^2}{4} \cdot v_{n1} + \frac{5-2 \cdot v_1 + v_1^2}{4} \cdot v_{n2} + \frac{(1+v_1)^2}{2} \cdot v_{n3} \quad (1.2)$$

$$\text{де } v_1 = \frac{\mu}{1-\mu}; \quad n_{1-3} = 1, 2, \dots, 6.$$

Для практичного використання формула розрахунку осідань (1.1) приведена до виду:

$$S = \frac{P}{\pi \cdot E_1} \cdot \delta_0, \quad (1.3)$$

де S – осідання пальового фундаменту, см;

P – навантаження на пальовий фундамент, кН/см;

$E_1 = E / (1 - \mu^2)$;

E – модуль деформації ґрунту активної зони з урахуванням ущільнення ґрунту під палями в результаті їх заглиблення.

Значення безрозмірної компоненти перміщення δ_0 табуліровані для різних випадків передачі навантаження по бокові поверхні і в площині вістря палі в залежності від:

– коефіцієнта бокового розширення:

$\mu = 0.1; 0.3; 0.35; 0.4; 0.5$;

– приведеної ширини пальового фундаменту

$d_0/L = \beta = 0.025; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2 \dots 0.4$; тобто для одно, двох і трьохрядних палевих фундаментів з довжиною палі 6-24 м;

– приведеної глибини розташування границі активної зони $z_0/L = 1.1; 1.2; \dots 3$. Для проміжних значень β , μ , z_0/L значення δ_0 знаходиться шляхом інтерполяції.

В двох і трирядних пальових фундаментах відстань між палями, як правило, $3d$, тому осідання цих фундаментів можна розраховувати по цьому методу.

В однорядних пальових фундаментах відстань між палями часто складає $6d$ і більше. В такому випадку пальовий фундамент і ґрунт не можна розглядати як єдиний масив і рішення плоскої задачі стають неприйнятними до розрахунку осідань. Взаємовплив можна визначити по напрацьованому практичному методу (Бартоломій А.А., 1964 р.)[3,4].

Формула для розрахунку осідань стрічкових пальових фундаментів з урахуванням взаємовпливу палі при різній відстані між палями має вигляд (перша складова - осідання ущільненої зони, друга - осідання ґрунту нижче ущільненої зони):

$$S = \frac{\beta \cdot h_y}{0.5 \cdot (E_y + E_0)} \cdot \frac{P_0 + P_1}{2} + (1 + R_0) \cdot \sum_1^n \frac{\beta}{E_i} \cdot P_i \cdot h_i \quad (1.4)$$

де $\beta = 1 - \frac{2 \cdot \mu^2}{1 - \mu}$ – коефіцієнт, що корегує спрощену схему розрахунку;

E_y – модуль деформацій ґрунту ущільненої зони;

E_0 – природній модуль деформацій ґрунту;

P_0, P_1 – напруження на кінці і на границі ущільненої зони.

У великопанельних будівлях і в спорудах підвищеної поверховості відстань між внутрішніми поперечними рядами паль часто рівна 2.6-3.2 м.

В такому випадку буде здійснюватись взаємовплив рядів паль, який можна визначити

$$\sigma_{zk} = \frac{P}{\pi \cdot L} \cdot a_n, \quad (1.5)$$

де P – навантаження на стрічковий пальовий фундамент, Н/см;

L – довжина палі в см.;

a_n – коефіцієнт, приймається по таблицях ДБН В.2.1-10-2009 Основи та фундаменти споруд [1].

Розділ 2. Дослідження опору однорядних стрічкових пальових фундаментів вертикальним навантаженням за числовим методом граничних елементів (МГЕ)

2.1 Основні етапи прикладання МГЕ до розрахунків однорядних стрічкових пальових фундаментів. Сутність, етапи створення та перспективи

Математичне моделювання – процес створення моделі та оперування з нею з метою отримання відомостей про реальний об'єкт.

Розрахунок осідань стрічкових пальових фундаментів зводиться до розв'язання плоскої задачі з урахуванням прикладання навантаження всередині півпростору.

Математичним описом об'єктів проектування на мікрорівні слугують, як правило, диференційні рівняння в частинних похідних, точне рішення яких вдається отримати лише в небагатьох часткових випадках. Тому для аналізу об'єктів в САПР напрацьовано наближені моделі – МСЕ, МГЕ. В роботі використано МГЕ.

Складність достовірного визначення фізико-механічних властивостей ґрунтів, та множина визначальних факторів, що впливають на механічну поведінку ґрунтів були бар'єром, перед яким безсилі сучасні математичні методи суцільних середовищ. З появою числового МГЕ та механіки дисперсних матеріалів картина змінилась.

В ряді інженерних наук МГЕ швидко завоював позиції, одна із таких наук – фундаментобудування, в якій МГЕ успішно використовується для дослідження найбільш складних процесів, що характеризують особливості взаємодії основ і фундаментів.

При розв'язку краєвих задач наближені моделі технічних об'єктів (в тім числі і будівельних об'єктів та конструкцій) можна будувати на основі інтегральних рівнянь.

При цьому перший крок на шляху до розв'язку складається в переході від диференціальних рівнянь в частинних похідних до еквівалентних

інтегральних рівнянь, а результатом переходу є система лінійних алгебраїчних рівнянь, яка включає значення змінних лише на границі дослідної області, що потребує дискретизації лише границі дослідного об'єкта.

Коли такий перехід є успішним (а для задач фундаментального проектування він є успішним), розв'язок вихідної задачі можна отримати з мінімальними обчислювальними затратами та високою степінню точності. Крім того, розмірність вихідної задачі понижується на одиницю, так як тривимірні задачі перетворюються у двовимірні.

МГЕ використовує принцип суперпозицій, тому область його прикладання обмежено класом лінійних чи лінійних відносно приростів задач. До такого класу саме і відносяться задачі фундаментобудування та ще багато технічних задач.

В МГЕ використовується та обставина, що для більшості рівнянь в частинних похідних існують сингулярні (фундаментальні) рішення, які відповідають одиничним збуджуючим впливам в необмеженому просторі.

Для задач фундаментобудування таким фундаментальним рішенням є розв'язки Р. Міндліна для півпростору (адже фундаменти передають навантаження від будівель в глибині півпростору ґрунту).

Основний етап розрахунку методу скінчених елементів (МСЕ) – побудова матриці жорсткості досліджуваного об'єкта. В числовому МГЕ – компонується матриця піддатливості (матриця впливу з точки зору будівельної механіки) матриця, обернена до матриці жорсткості.

Матриця впливу в МГЕ будується на основі аналітичних рішень Р. Міндліна для пружного півпростору [9]. МГЕ не потребує ніякого диференціювання числових величин. Всю розрахункову систему теорії пружності із 15 диференціальних рівнянь в частинних похідних (рівняння статички, геометричні, фізичні) зведено [16, 8] до еквівалентного інтегрального граничного рівняння МГЕ (2.2). Значення інтегралів по границі фундаментної конструкції та осередках ґрунту в активній зоні визначаються числовими

методами, а числове інтегрування завжди являє собою більш стійкий процес ніж числове диференціювання.

Похибки в МГЕ виникають в результаті дискретизації і числової апроксимації лише на границі досліджувального об'єкта через неможливість провести інтегрування в замкненій формі (тобто точними аналітичними методами).

Рішення задачі про дію зовнішніх сил на деяке тіло має задовільняти:

- рівнянням рівноваги,
- геометричним рівнянням,
- фізичним рівнянням.

Ці 15 рівностей включають 15 невідомих:

- шість компонент тензора напружень,
- шість компонент тензора деформацій,
- 3 компоненти переміщень.

Точний розв'язок цієї системи настільки громіздкий, що до цих пір було отримано лише декілька точних рішень, тому приходится звертатись до числових підходів, в даній роботі це МГЕ, а використання МГЕ залежить від можливості побудови фундаментальних рішень. На щастя, ряд задач, що мають велике значення для механіки ґрунтів відносяться до цієї групи.

До таких задач відноситься задача дії в півпросторі зосередженої нахиленої сили, прикладеної в середині півнескінченного масиву, яка розв'язана в 1936 р. Р. Міндлінім.

Задача відповідає умовам будівництва фундаментів. Нахилену силу можна розкласти на нормальну і горизонтальну складові. Отримані Р. Міндлінім [9] графіки напружень і переміщень для нормальної до поверхні зосередженої сили наведено на рис. 2.1.

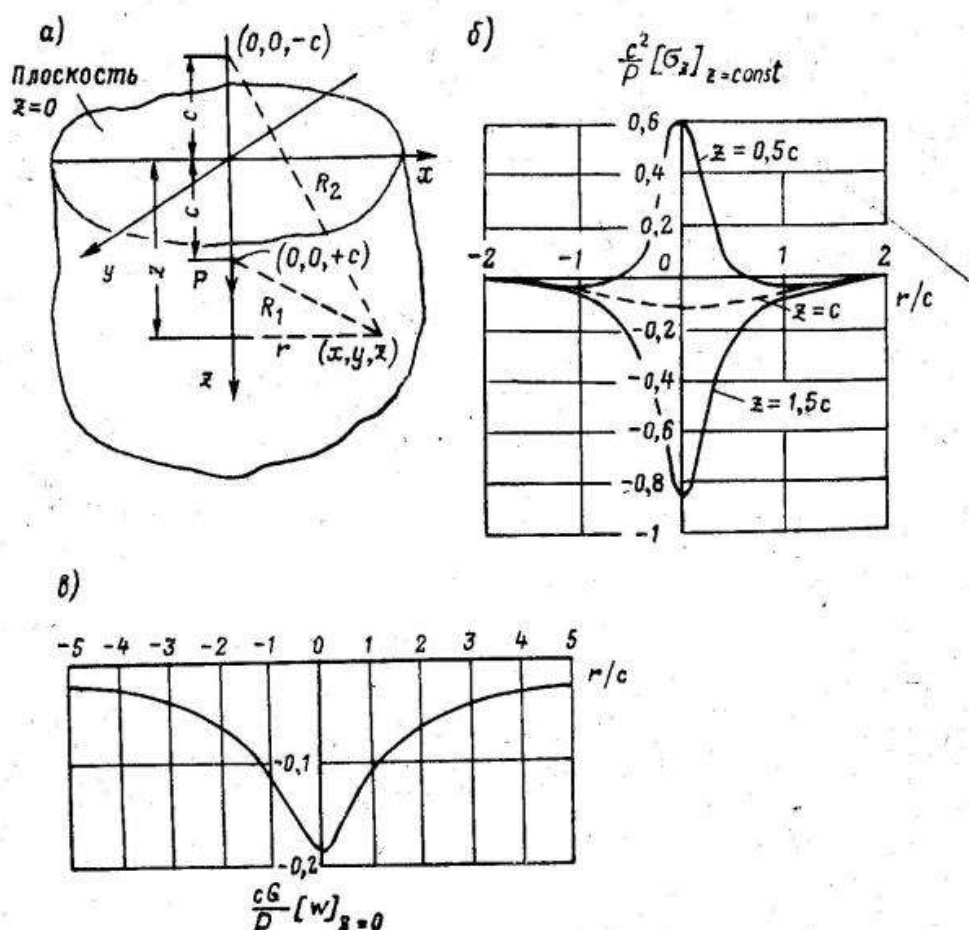


Рис. 2.1.— Зосереджена сила, що діє в середині півпростору нормально до його границі (рішення Р. Міндліна, 1936 р.[9]); а) прийняті позначення; б) епюра вертикальних стискаючих напружень; в) епюра граничних переміщень граничної поверхні

Числова реалізація МГЕ передбачає попередній перехід від вихідної краєвої задачі до основного еквівалентного інтегрального рівняння рівноваги МГЕ, яке отримане К. Бреббія [8, 16] шляхом перетворення системи вихідних розрахункових диференціальних рівнянь до інтегрального рівняння, рішення якого набагато простіше.

К. Бреббія [16] було використано метод зважених нев'язок, який заснований на точному задоволенні граничних умов і розподілені похибки по області Ω у відповідності з видом вагової функції w та теорему про взаємність

робіт Бетті. Функція похибки була розподілена по області множенням її на вагову функцію w та інтегруванням цього добутку по області Ω :

$$\int_{\Omega} R w d\Omega = 0. \quad (2.1)$$

Інтегральне співвідношення (2.2) є синтезом статичних, геометричних і фізичних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij,j} + b_j &= 0 \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \\ \sigma_{ij} &= C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \end{aligned} \right\} \Rightarrow C_{ij}(\xi) u_j(\xi) + \int_{\Gamma} q_{ij}^*(\xi, x) u_j(x) d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} u_{ij}^*(\xi, x) q_j(x) d\Gamma(x), \quad (2.2)$$

де $\sigma_{ij,j} + b_j = 0$ – статичні рівняння рівноваги;

$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$ – геометричні рівняння;

$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$ – фізичні рівняння середовища.

Запис приведено в позначеннях Ейнштейна (похідні по змінних позначаються комою). Наступні викладки ідеї числового МГЕ відносяться до задач механіки ґрунтів та фундаментабудування. В (2.2):

U – заданий вектор переміщень на границі фундаментної конструкції;

q_{ij} – вектор напружень на цій границі;

U^*, q^*, σ^* – ядра граничного рівняння – розв’язки Р. Міндліна для $P = 1$ у півпросторі для переміщень, напружень і похідних від напружень відповідно [9].

Саме вони (розв’язки Р. Міндліна) є ваговими функціями. В МГЕ за вагові функції вибирають систему базисних функцій, які обертають в нуль інтеграл по області, зводячи таким чином задачу до визначення лише граничних функцій;

C_{ij} – матриця яка визначається із умов руху тіла як цілого;

Γ , ξ , X – відповідно, гранична поверхня фундаментної конструкції, точка прикладання $P=1$, точка спостереження. $s = 1/2$ у точках на гладкій границі.

Оскільки фундаментальне рішення (розв’язки Р. Міндліна) задовільняє граничним умовам рівності нулю напружень на вільній поверхні півпростору, потрібно дискретизувати **лише граничну поверхню** стикання фундаментної поверхності та ґрунту.

Зведення краюї задачі до еквівалентного інтегрального рівняння дає можливість **розмірність вихідної задачі знизити на одиницю**, оскільки в інтегральне рівняння входять значення змінних лише на границі дослідної області. Тому наступна дискретизація задачі проводиться тільки на границі дослідної області.

Це обумовлює більш високу в порівнянні з методом скінчених елементів (МСЕ) точність рішень та суттєве зменшення об’єму вхідних даних при реалізації методу на ЕОМ.

Функціональні залежності (2.2) *являють математичну ідеалізацію механізму поведінки ґрунту під навантаженням*.

Інтегральному рівнянню (2.2) можна придати дискретну форму, записавши його для ряду N елементів.

Розглянемо двовимірну область, границю якої розіб’ємо на ряд граничних постійних по довжині елементів (рис. 2.2). Вважаємо, що функції u та q постійні по довжині кожного граничного елемента і рівні їх значенням у вузлі елемента.

Вузли розташовуються посередині граничного елемента.

У загальному випадку u і q можуть змінюватись по лінійному чи більш складному закону. Відмітимо, що для кожного граничного елемента відома одна з двох функцій (u чи q). Рівняння (2.2) можна записати

$$c_i u_i + \int_{\Gamma} u q^* d\Gamma = \int_{\Gamma} q u^* d\Gamma. \quad (2.3)$$

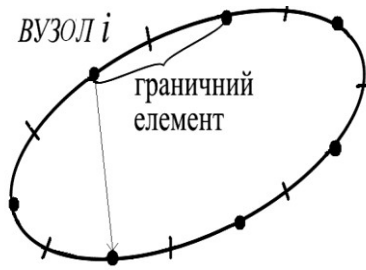


Рисунок 2.2 – Граничні елементи. Зв'язок між фундаментальним рішенням в граничному вузлі та граничними елементами

Дискретна форма для (2.2) для точки i :

$$\frac{1}{2}u_i + \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} u q^* d\Gamma = \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} q u^* d\Gamma \quad (2.4)$$

Для постійного граничного елемента границя завжди гладка, тому $c_i = 1/2$.

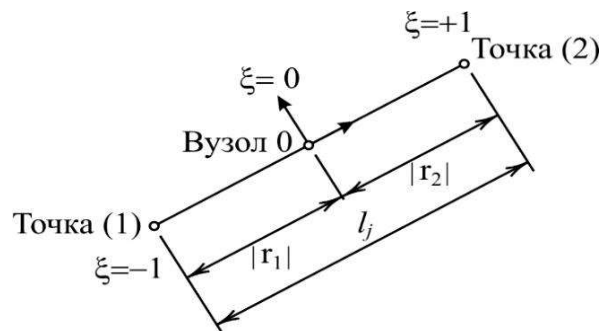


Рисунок 2.3 – Геометрія постійного елемента

Матричний вигляд основного інтегрального рівняння МГЕ (2.2):

$$\vec{F} = |K| \cdot \vec{Y}, \quad (2.5)$$

де (K) – глобальна матриця коефіцієнтів впливу МГЕ, що враховує взаємодію палі і основи (з фізичної точки зору коефіцієнти матриці впливу це переміщення точок бокової поверхні і вістря палі від дії $P = 1$);

Y – вектор стовпець невідомих (дотичні та нормальні напруження граничних елементів бокової поверхні та вістря палі);

F – заданий вектор переміщень.

Для числової реалізації рівняння (2.2) проводиться дискретизація границі області дотику фундаментної конструкції з ґрунтом.

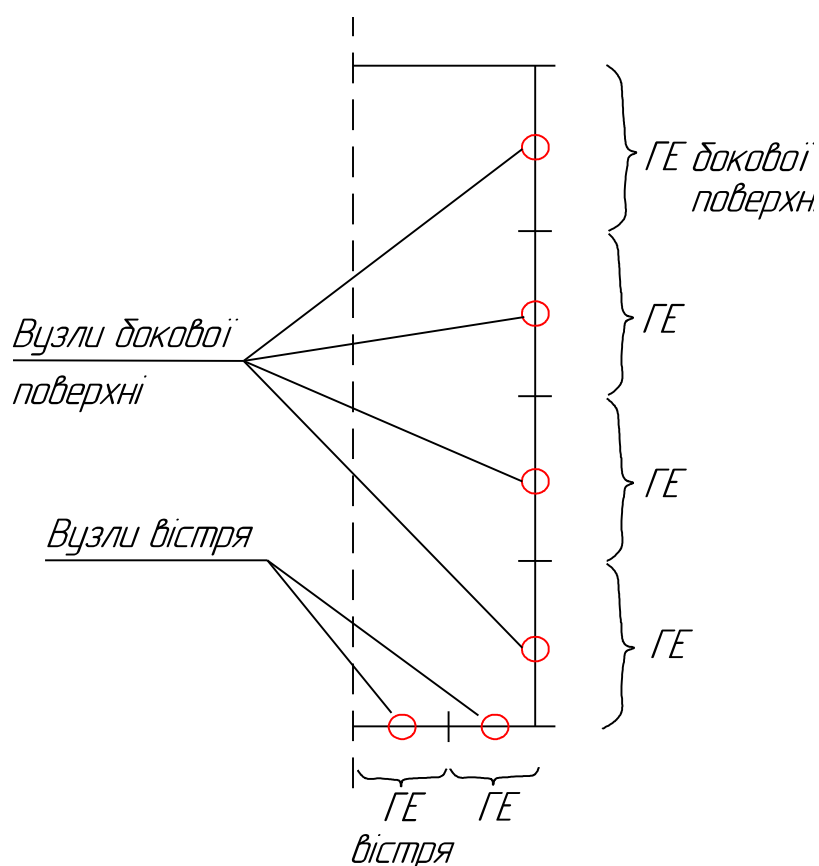


Рисунок 2.4 – Дискретизація бокової поверхні та вістря палі постійними граничними елементами

Рівняння (2.2) записуються в дискретній формі для кожного граничного вузла та обраховуються значення інтегралів за формулами подвійного числового інтегрування Гаусса. В результаті отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) з N невідомими напруженнями в вузлах по контактній з ґрунтом границі фундаменту. Корені СЛАР дають шуканий вектор напружень по боковій поверхні та під вістрям фундаментної конструкції.

В матричній формі основне розрахункове рівняння МГЕ (2.3):

$$KY = F$$

де Y – вектор невідомих функцій u – деформацій та q – напружень по контактній поверхні.

Система перетворюється таким чином, щоб всі невідомі були зліва.

$K = \{G_{ij}\}$ – переміщення тч. j від дії одиночної сили. Коефіцієнти цієї матриці обчислюються шляхом інтегрування розв’язку Р. Міндліна по поверхні палі (тобто, по циліндричних елементах бокової поверхні і по елементах нижнього кінця палі у вигляді кілець).

Y - шуканий вектор напружень на границі палі. Для граничних вузлів по боковій поверхні палі – це дотичні напруження τ , а для вузлів вістря – нормальні напруження σ .

F – вектор вільних членів $[H_{ij}] \cdot \{u_i\}$, у випадку абсолютно жорсткої палі величини складових F приймаються рівними для всіх вузлів бокової поверхні та вістря (при лінійній задачі $f_i = 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м}$).

Було виявлено, що серед різного типу скінчених елементів (СЕ) (постійні, лінійні, квадратичні), які можливі у застосуванні при дискретизації для числового розв’язку дискретного аналога інтегрального рівняння (2.3), постійні елементи можуть забезпечити прийнятну точність [7,8].

Найбільш трудоміською частиною рішення є обчислення коефіцієнтів матриці K – матриці впливу МГЕ. Коефіцієнти цієї підматриці обчислюються числовим інтегруванням розв’язків Міндліна за допомогою квадратур Гаусса. Матрична форма матриці впливу K :

$$\begin{Bmatrix} w_s \\ w_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{ss} & K_{bs} \\ K_{sb} & K_{bb} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \tau_s \\ \sigma_i \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

Перший індекс в (2.6) вказує напрям сили, другий – напрям переміщення. Кожний елемент матриці піддатливості МГЕ – це переміщення по напрямку, що відповідає відповідній стрічці від $P=1$, прикладеної в точці, яка визначається відповідним стовпцем матриці. Матриця піддатливості МГЕ формувалась на основі рішень Р. Міндліна. Результати числових досліджень за МГЕ наведено на рис. 2.11 – 2.16.

В другому розділі розглядається можливість застосування МГЕ до дослідження найбільш складних процесів, що характеризують особливість взаємодії основ та СПФ. Аналізуються результати розрахунку СПФ за

допомогою моделі взаємодії паль та їх основ, яка відображає те, що сили по боковій поверхні та під нижнім кінцем палі прикладені на деякій глибині. В роботі прийнята розрахункова модель взаємодії стрічкового фундаменту, яка має абсолютно жорсткий ростверк ($EI = \infty$).

Крім того, при розрахунку опору СПФ враховується вплив сусідніх паль одна на одну. При формуванні глобальної матриці коефіцієнт впливу, що обчислюється шляхом інтегрування розв'язку Р. Міндліна, здійснюється обхід граничних елементів бокових поверхонь та вістря всіх паль стрічкового фундаменту. При цьому коефіцієнти матриці, що відносяться до i – го елемента палі (q), що розглядається, формуються шляхом додавання розв'язків Р. Міндліна, коли “джерело” переміщається по всіх j – тих елементах всіх паль фундаменту (p).

Метод враховує взаємодію елементів як палі, що розглядається, так і елементів сусідніх паль. Такий метод дозволяє більш повніше відобразити ефект взаємодії паль в складі фундаменту в порівнянні з тими методами, що були запропоновані Бартоломієм А.О. [3,4].

Таким чином, запроєктована методика дозволяє визначити напруження на боковій поверхні і нижнім кінці палі з урахуванням взаємодії її елементів (бокової поверхні та вістря), а також враховує вплив сусідніх паль. На основі отриманих значень напружень можна отримати опір елементів паль, загальний опір пального фундаменту.

Складові матриці впливу K :

K_{ss} – матриця вертикальних переміщень вузлів (точок) бокової поверхні (БП) від дотичних напружень по бокові поверхні τ_s . Точка прикладання одиничних навантажень ξ на бокові поверхні (БП) по вертикалі, тч. спостереження X на бокові поверхні (БП).

K_{bs} – матриця вертикальних переміщень точок бокової поверхні від нормальних напружень вістря σ_i . Точка ξ – на вістрі по вертикалі, тч. спостереження X на БП.

K_{sb} – матриця вертикальних переміщень тч. вістря від τ_s . Точка ξ – на бокові поверхні по вертикалі, тч. спостереження X на вістрі.

K_{bb} – матриця вертикальних переміщень тч. вістря від σ_i . Тч. ξ на вістрі по вертикалі, тч X на вістрі фундаментної конструкції.

Таким чином, несуча спроможність палі визначалась з використанням математичного моделювання, яке складається з процесу створення моделі, оперування нею з метою отримання відомостей про реальний об'єкт.

Математична модель забезпечує:

- зменшення часу на підготовку аналізу,
- зменшує матеріалоемність досліджень, особливо при проектуванні великомасштабних об'єктів,
- дає можливість проведення експериментів на критичних режимах.

Дослідження К. Бреббія, Бенерджи, Баттерфілда [3,7,16] довели, що за МГЕ можна досліджувати складні процеси взаємодії основ та фундаментів.

В роботі виконано дослідження розподілу сил тертя по бокових поверхнях паль та нормальних напружень під нижнім кінцем палі, поздовжених зусиль по довжині палі в складі стрічкового пальового фундаменту, коли число паль змінюється від 2 до 6, та зміну середнього навантаження на палю в складі стрічкового однорядного фундаменту.

Визначення опору палі в півпросторі передбачає виконання наступних основних етапів:

- граничні з ґрунтом поверхні (бокова і нижній кінець палі) розбиваються на ряд граничних елементів, на яких задаються переміщення;
- для кожного граничного елемента визначаються коефіцієнти впливу з використанням відповідних фундаментальних рішень Р. Міндліна [9,12];
- формується глобальна матриця коефіцієнтів впливу та вектор-стовпець вільних членів, який визначається із граничних умов дослідної задачі;
- визначаються невідомі напруження та переміщення на границі;

- шляхом інтегрування визначених напружень обраховується опір кожної палі та стрічкового фундаменту при заданому осіданні.

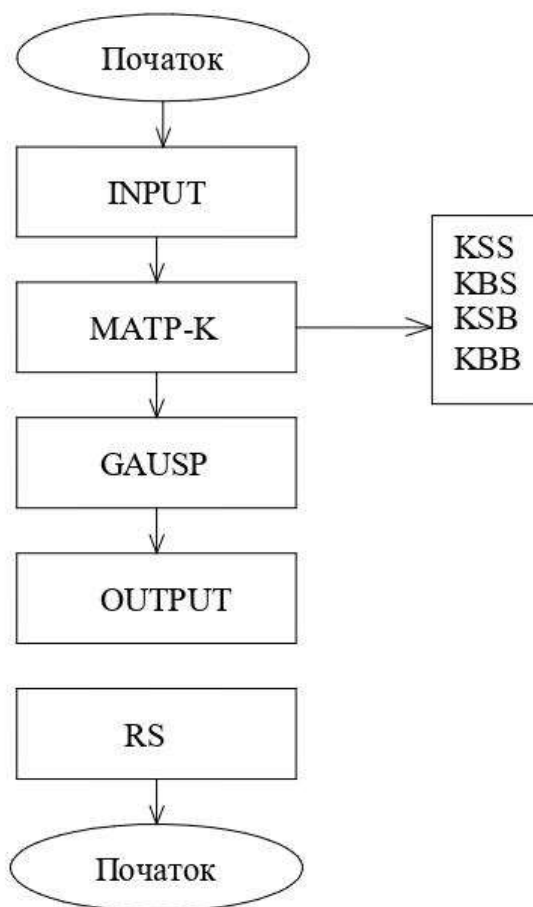


Рисунок 2.5 – Блок-схема програми визначення опору одиночних паль за МГЕ

На практиці інтеграли рівняння (2.2) обраховуються наближено, що є єдиним джерелом погрішності в МГЕ. Для наближеного розв’язку (2.2) проводиться дискретизація границі області, що розглядається (аналогічно МСЕ). В роботі границя апроксимувалась лінійними елементами. Окремий граничний елемент визначався координатою своєї середньої точки.

Інтенсивність шуканих невідомих (напружень) в межах СЕ (скінченного елемента) приймалась постійною. В результаті отримувалась система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), розв’язок якої давав шукані напруження τ по бокові поверхні та нормальні напруження σ по вістрі паль для отримання несучої спроможності фундаментної конструкції.

2.2. Структура програми розрахунку стрічкових пальових фундаментів на EOM

Програма включає наступні процедури:

- INPUT
- KSS
- KBS
- KSB
- KBB
- GAUSP.

В процедурі INPUT здійснюється введення вхідних даних, які:

- характеризують геометрію палі,
- фізико-механічні характеристики ґрунту, оточуючого бокову поверхню та вістря паль,
- відстань між палями,
- осідання паль стрічкового фундаменту.

При розрахунку СПФ призматичні палі замінюються палями циліндричної форми з метою спрощення розрахункової схеми. При цьому задача з тривимірної переходить в циліндричну (асиметричну), що дозволяє значно зменшити об'єм обчислень.

В цьому випадку граничні елементи (ГЕ) по боковій поверхні палі подаються циліндричними елементами постійної висоти h_1 в межах однієї палі. Висота граничних елементів бокової поверхні може бути різною для окремих паль СПФ. Це передбачено з метою розповсюдження розрахунків стрічкового фундаменту при наявності в ньому паль різної довжини. При цьому кількість вузлів на боковій поверхні паль залишається постійним n_1 .

Граничними елементами нижнього кінця паль являються кільця, що мають постійну ширину h_2 , а кількість цих елементів задається параметром n_2 .

При інтегруванні функцій Р. Міндліна по колу в межах зміни кута θ від 0 до $\pi/2$ коло дискретизується на n_3 елементарні ділянки довжиною $h_3 \cdot ar$, де $h_3 = d\theta$ – кут в радіанах, ar – радіус кола. В процедурі INPUT також, визначається відстань між палями ds і кількість паль NS .

В підпрограмі INPUT обчислюються параметри граничних елементів:

- висота граничного елемента бокової поверхні палі: $h_1 = L_s/n_1$;
- ширина елемента нижнього кінця палі: $h_2 = a_m/n_2$;
- довжина елементів по колу і-того елемента: $h_3 = a_{ri} \cdot \pi/n_3$;
- координати точок по довжині палі: $z[i] = z_{i+1} + h_1$;
- координати точок радіуса кола: $a_{ri} = a_{ri-1} - \tan \theta \cdot h_1$;
- координати (кутові) по довжині кола радіусом a_{ri} : $\theta_i = \theta_{i-1} + h_3$;
- координати точок на площині нижнього кінця: $\varepsilon_i = \varepsilon_{i-1} + h_2$;

До механічних характеристик, що визначають опір палі, зануреної в пружне середовище, відносяться модуль деформації ґрунту E і коефіцієнт Пуассона μ , які в програмі є базовими параметрами.

Опір СПФ в роботі визначався при осіданні $edw = 0.02$ м. Величина осідання $edw = 0.02$ м. прийнята для можливості порівняння даних числового моделювання за МГЕ з експериментальними дослідженнями вертикального навантаження СПФ, виконаного в польових умовах А. Бартоломієм [4,3] і З. Бабічевим [5]. Їх досліді показали, що спостерігається лінійна залежність графіка “навантаження- осідання” для цих фундаментів, якщо осідання не більше 2 см.

Довжина паль СПФ в розрахунках може бути різною і вводиться в програмі під символом $ls[g]$, де g – індекс палі. Для кожного вузла на боковій поверхні палі, який рахується розташованим посередині осі симетрії граничного елемента (ГЕ), введено координати $z[g,i]$, де g – індекс палі, i – індекс вузла на цій палі. Аналогічним чином вводяться координати радіуса g -ї палі $ar[g,i]$.

Для середини кожного граничного елемента на колу (бокові поверхні чи нижнього кінця) вводиться значення кута θ під індексом $tt[i]$. Враховуючи, що

на площині нижнього кінця палі розташовані кільцеві елементи, які характеризуються відстанню від центру нижнього кінця палі до середини кільця, вводяться координати вузлів $ep[i]$.

Крім того, враховуючи що на закон розподілення зусиль між палями в процесі осідання СПФ суттєвий вплив здійснює жорсткість ростверка, вводяться прогини ростверка. У випадку абсолютно жорсткого ростверка його згинальна жорсткість $EI = \infty$ і прогини всіх палей однакові та рівні заданому осіданню.

Загальна матриця впливу МГЕ, яка характеризує піддатливість ґрунтової основи, складається із 4 підматриць :

$$[K] = \begin{bmatrix} KSS & KBS \\ KSB & KBB \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

За допомогою процедури KSS визначаються коефіцієнти впливу, коли одиничні сили $P=1$ знаходяться на елементах бокової поверхні палі, і вузли, в яких визначаються дотичні напруження, теж знаходяться на боковій поверхні. В даній процедурі виконується обхід всіх вузлів палей СПФ і враховується вплив всіх палей, що входять в склад стрічкового фундаменту.

Тобто, якщо розглядається перший вузол першої палі, то враховується вплив одиничних сил, розташованих на елементах палі, яка розглядається і всіх елементів на решті палей з урахуванням відстані від цих елементів до вузла, який розглядається. При цьому використовується функція Р. Міндіна [9] для вертикальних переміщень точки пружного півпростору, яка визначається виразом:

$$KW = \frac{P}{16 \cdot \pi \cdot G \cdot (1-\vartheta)} \cdot \left[\frac{3-4\cdot\vartheta}{R_1} + \frac{8\cdot(1-\vartheta)^2 - (3-4\cdot\vartheta)}{R_2} + \frac{(Z-C)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\cdot\vartheta)\cdot(Z+C)^2 - 2\cdot C\cdot Z}{R_2^3} + \frac{6\cdot C\cdot Z\cdot(Z+C)^2}{R_2^5} \right] \quad (2.8)$$

де P – одинична сила;

$G = \frac{E}{2\cdot(1+\vartheta)}$ – модуль зсуву;

E – модуль деформації ґрунту;

ν – коефіцієнт Пуассона.

KW – переміщення у вертикальному напрямку;

$$R_1 = \sqrt{(Z - C)^2 + r^2}$$

$$R_2 = \sqrt{(Z + C)^2 + r^2}$$

(2.9)

Z – проекція відстані від поверхні півпростору до точки спостереження B ;

C – проекція відстані від поверхні півпростору до точки прикладання сили

$P=1$.

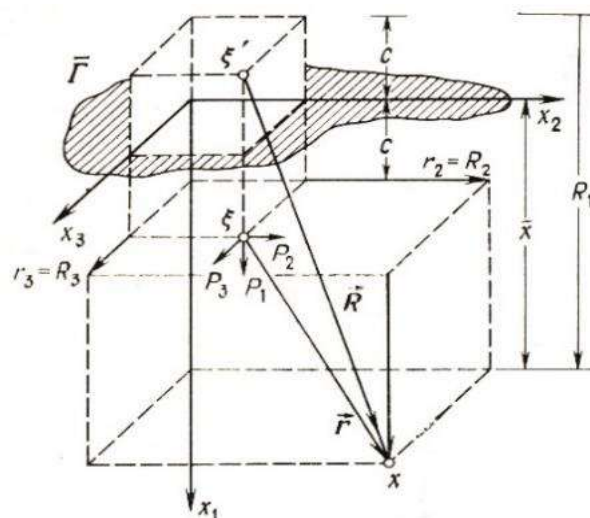
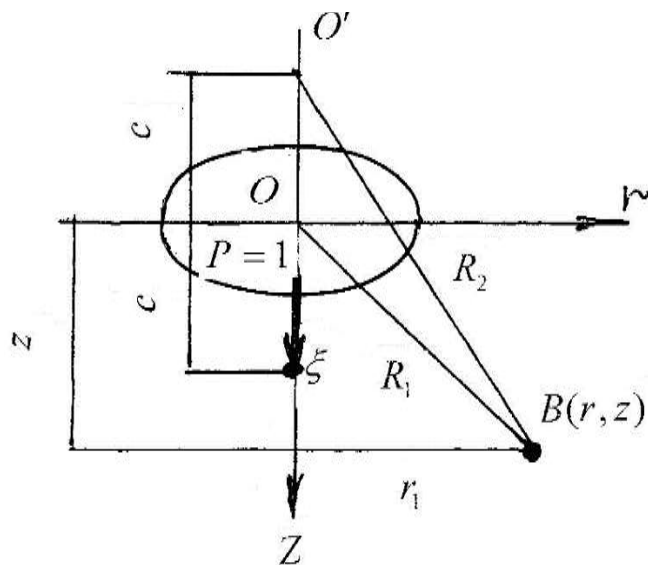


Рис. 2.6 – Схема позначень в формулі Р. Міндліна при дії вертикальної сили $P=1$

В процедурі KBS визначаються коефіцієнти впливу, коли джерело (одиничне зусилля $P=1$) знаходиться на кільцевих елементах нижніх кінців паль, а точки спостережень знаходяться на елементах бокових поверхонь, тобто, тут враховуються вплив $P=1$ під нижнім кінцем паль на розподіл сил тертя по їх бокові поверхні.

В процедурі KSB визначаються коефіцієнти впливу, коли одиничні зусилля розташовані на бокові поверхні палі, а точка спостереження знаходиться на граничних елементах нижнього кінця, тобто, тут враховується вплив напруженого стану по боковій поверхні палі на розподіл нормальних напружень в площині нижнього кінця паль.

В процедурі KBB визначаються коефіцієнти впливу, коли джерело збурення ($P=1$) знаходиться на елементах нижнього кінця і точки спостереження також знаходяться на тих же елементах нижнього кінця.

Після обрахування вказаних 4-х підматриць із них формується *загальна матриця впливу методу граничних елементів*, яка характеризує піддатливість ґрунтової основи (2.7):

$$[K] = \begin{bmatrix} KSS & KBS \\ KSB & KBB \end{bmatrix}$$

Вектор-стовпець вільних членів $wed[i]$ визначається величиною заданого осідання edw , яка задана в процедурі INPUT.

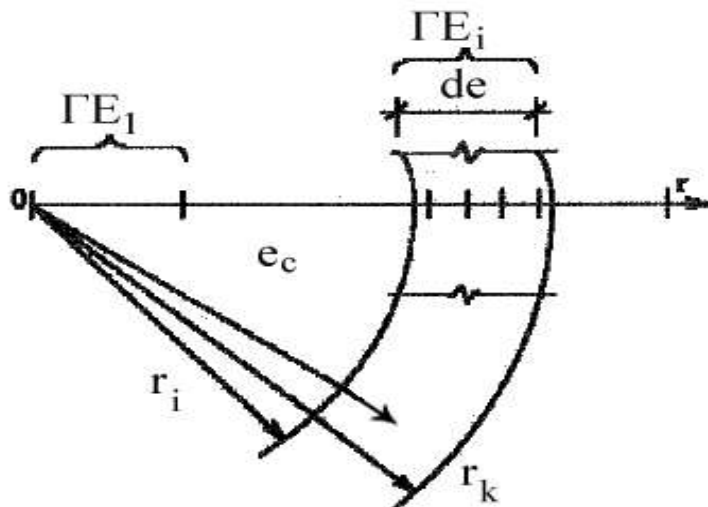


Рисунок 2.7 – Схема до визначення координат точок інтегрування на нижньому кінці палі

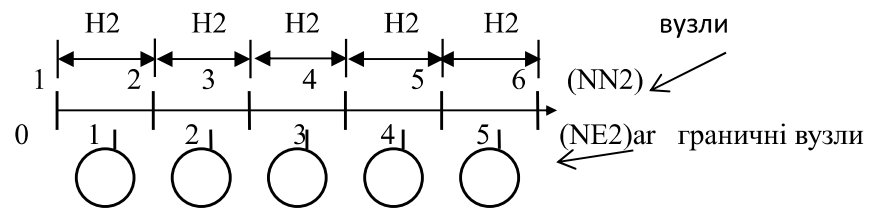


Рисунок 2.8 – Схема дискретизації нижнього кінця палі

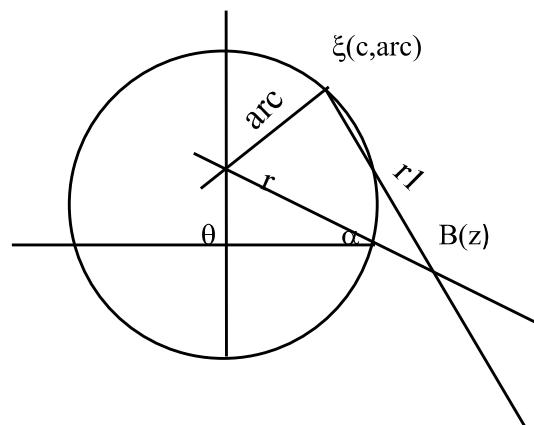


Рисунок 2. 9 – Схема до визначення координат точки прикладення $\xi(c, arc)$ і точки нагляду $B(z, r)$

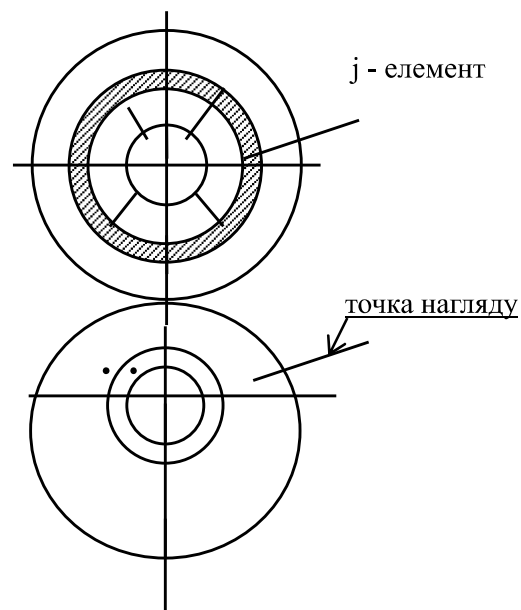
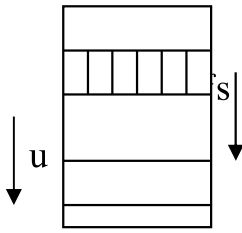
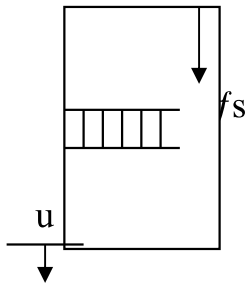


Рисунок 2.10 – Схема до інтегрування розв'язку Р. Міндліна (матриця КВВ)

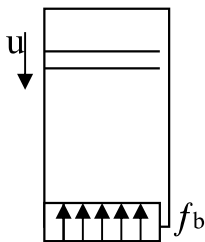
Глобальна матриця K:



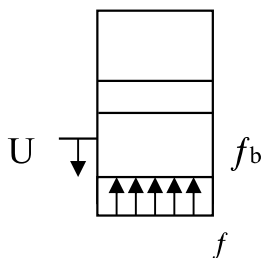
K_{ss} – вертикальні переміщення ґрунту на боковій поверхні палі при дії вертикальних напружень по боковій поверхні палі (f_s).



K_{sb} – вертикальні переміщення ґрунту під нижнім кінцем палі при дії вертикальних напружень на боковій поверхні палі (f_s).



K_{bs} – вертикальні переміщення ґрунту на боковій поверхні палі при дії вертикальних напружень під нижнім кінцем палі;



K_{bb} – вертикальні переміщення ґрунту під нижнім кінцем палі при дії вертикальних напружень під нижнім кінцем палі;



Вільні члени $\{F\}$ системи рівнянь $[K]\{P\} = \{F\}$, як відмічалось раніше, приймаються рівними заданому осіданню палі. Осідання палі W приймається рівним 0.01 м.

Наступним кроком є обчислення шуканих нормальних та дотичних напружень по границі палі, які визначаються із розв'язку СЛАР [8]:

$$[K] \cdot \{X\} = \{wed\}, \quad (2.10)$$

де $[K]$ - загальна матриця коефіцієнтів впливу МГЕ, які визначаються інтегруванням рішень Р. Міндліна.

$\{wed\}$ - вектор стовпець вільних членів, елементи стовпця рівні заданому осіданню. Їх постійна величина обумовлена тим, що нехтується стисливістю паль під дією вертикальної сили та згином ростверку при передачі зовнішнього навантаження на окремі палі.

$\{X\}$ - вектор невідомих напружень по боковій поверхні палі (дотичні напруження τ) і під нижнім кінцем палі (нормальні напруження, σ_1).

Для розв'язку системи рівнянь використано процедуру GAUSP, в якій запрограмовано числовий метод Гаусса для розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Після визначення величини напружень по поверхні палі шляхом інтегрування знаходяться зосереджені сили опору під нижнім кінцем палі $ps[q]$ і по бокові поверхні $pbs[qi]$, а також величини загального опору палі $pp[q]$. Опір стрічкового фундаменту при заданому осіданні рівний сумі опорів паль

$$Pf = \sum_{i=1}^{NS} pp[i]. \quad (2.11)$$

2.3. Результати досліджень особливостей опору стрічкових пальових фундаментів вертикальним навантаженням.

По результатах числових розрахунків за МГЕ побудовано епюри розподілу сил тертя по бокових поверхнях паль, нормальних напружень під нижнім кінцем і подовжених сил по довжині паль, коли кількість паль змінюється $NS = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ (рис. 2.11-2.16).

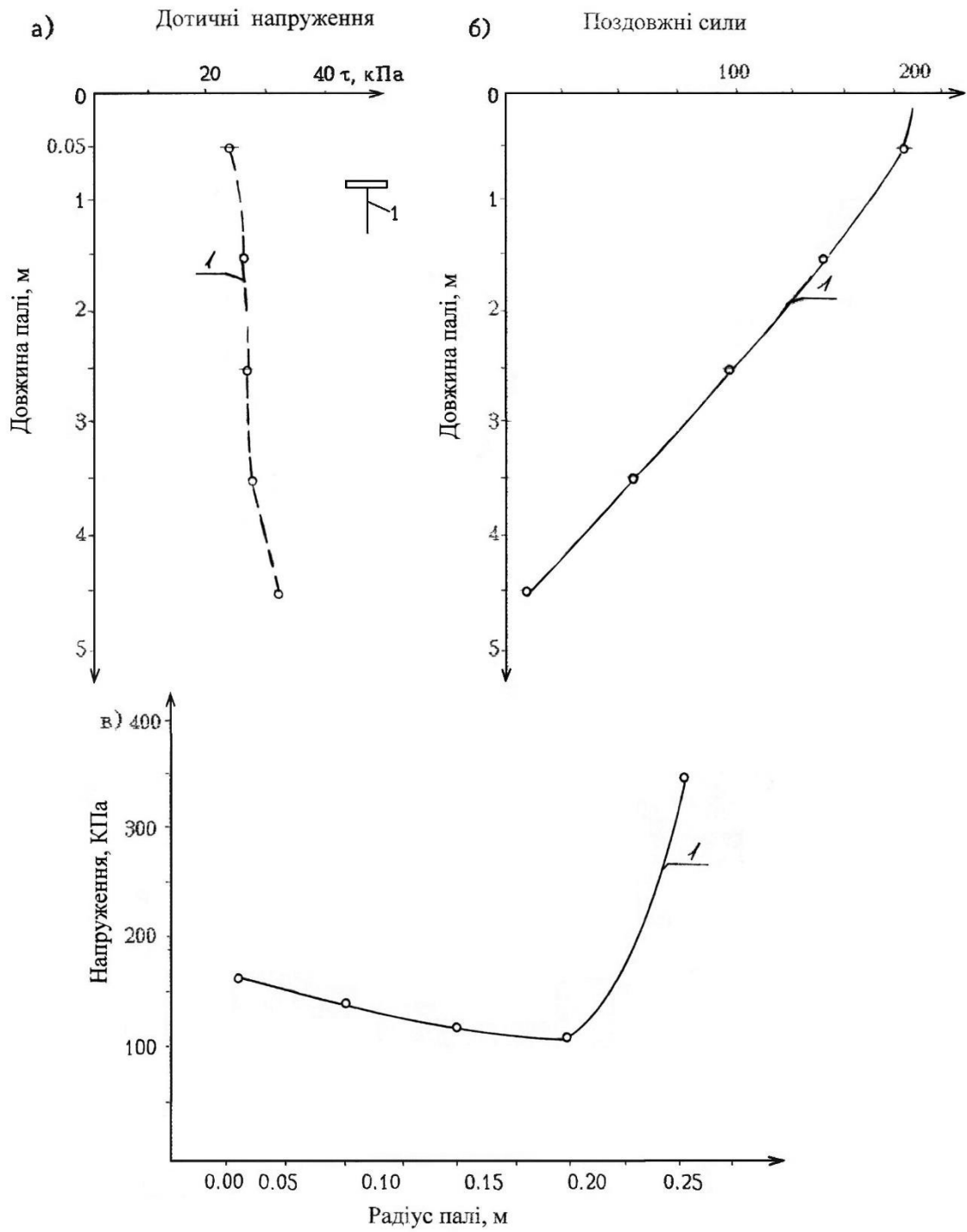


Рис. 2.11 – Розподіл зусиль одиночної палі (NS=1)

а) сили тертя по боковій поверхні;

б) повздовжні сили;

в) нормальні напруження під нижнім кінцем

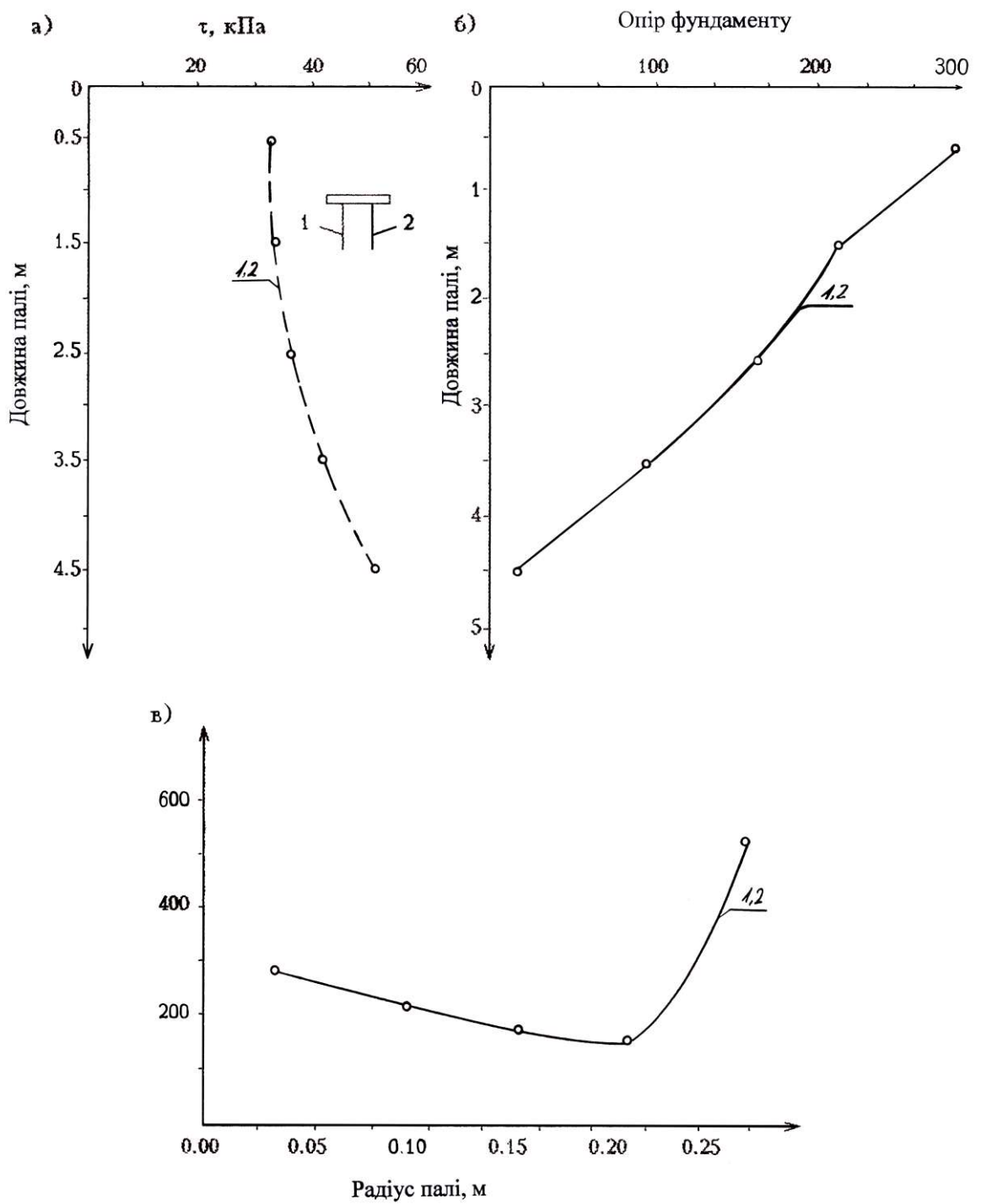


Рис. 2.12 – Розподіл зусиль між елементами групи палей (NS=2)

- а) сили тертя по боковій поверхні;
- б) повздовжні сили;
- в) нормальні напруження під нижнім кінцем

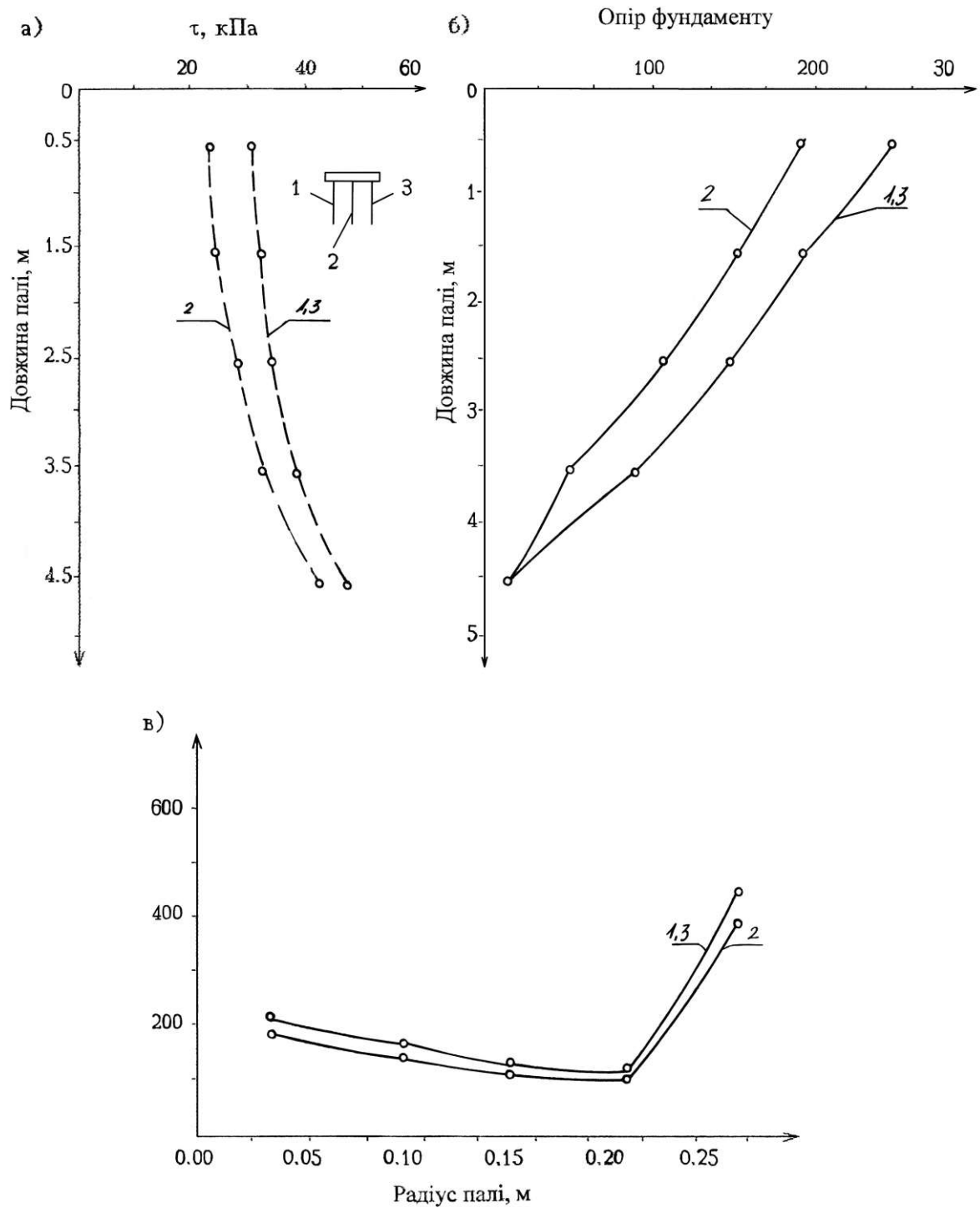


Рис. 2.13 – Розподіл зусиль між елементами групи паль (NS=3)

а) сили тертя по боковій поверхні;

б) повздовжні сили;

в) нормальні напруження під нижнім кінцем

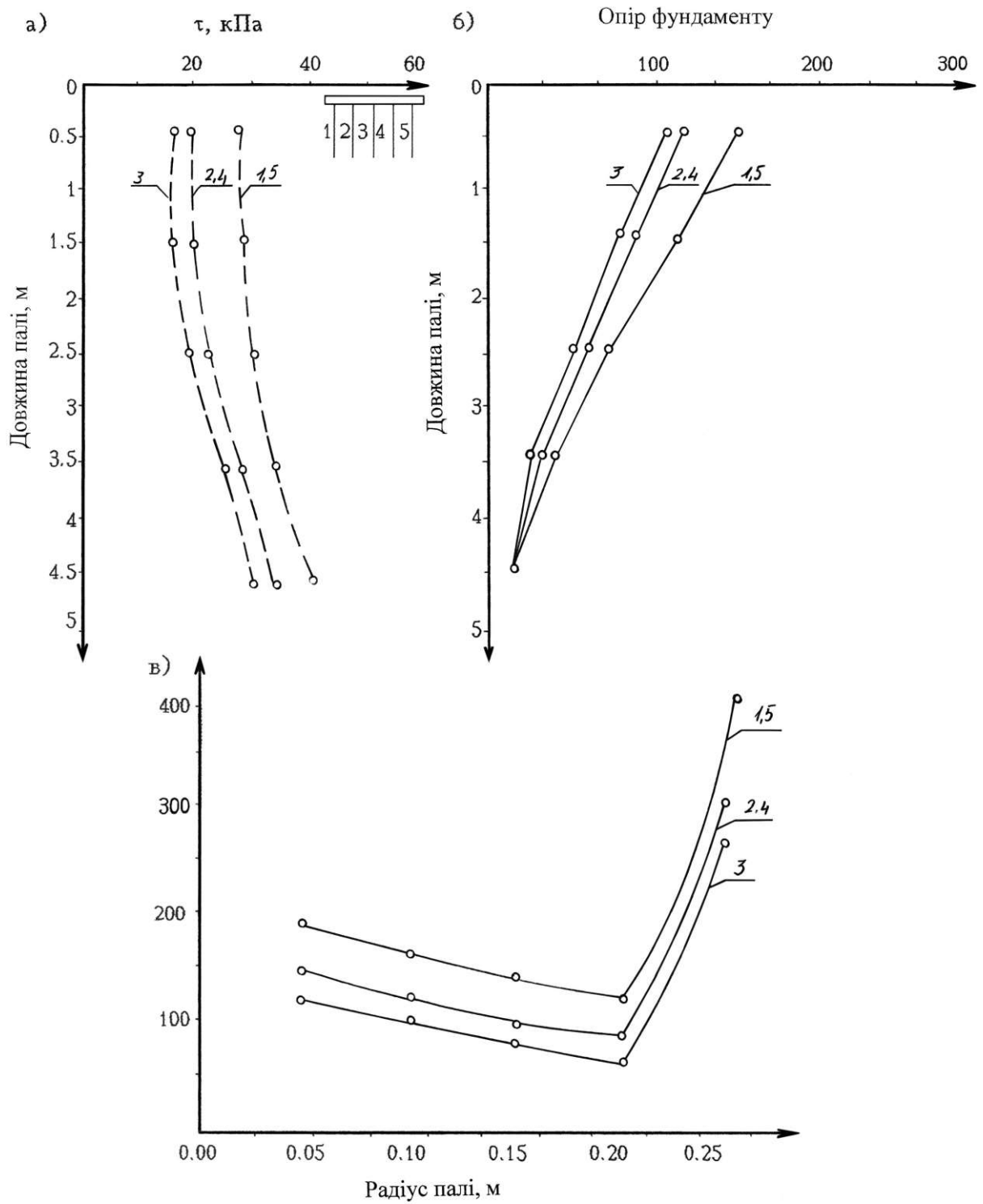


Рис. 2.15 – Розподіл зусиль між елементами групи паль (NS=5)

а) сили тертя по боковій поверхні;

б) повздовжні сили;

в) нормальні напруження під нижнім кінцем

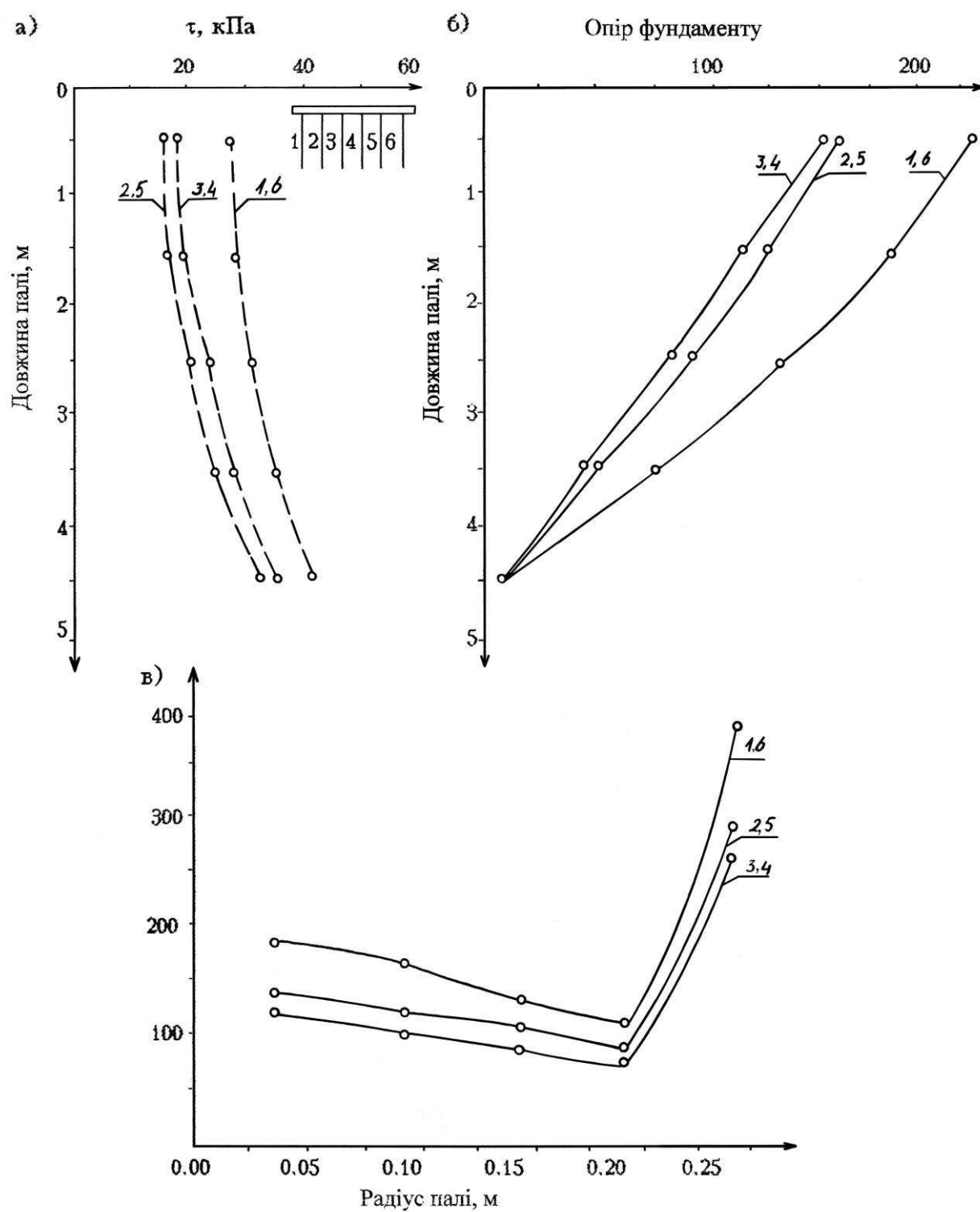


Рис. 2.16 – Розподіл зусиль між елементами групи палей ($NS=6$)

а) сили тертя по боковій поверхні;

б) повздовжні сили;

в) нормальні напруження під нижнім кінцем

Розділ 3. Порівняння результатів числових досліджень за МГЕ з експериментальними для перевірки можливості реалізації результатів наукових досліджень

Аналіз отриманих графіків залежності розподілу дотичних напружень τ по довжині палі показує, що ці напруження розподіляються практично рівномірно по глибині та спостерігається деяке збільшення сил тертя поблизу нижнього кінці палі.

Крім того, при збільшенні кількості паль в складі фундаменту проходить зменшення сил тертя по бокові поверхні паль в складі стрічкового фундаменту в порівнянні з аналогічними величинами одиночної палі ($NS=1$).

Це не протирічить уявленням про характер роботи палі в складі стрічкового фундаменту і підтверджує експериментально виявлене явище зниження опору паль в складі фундаменту за рахунок взаємодії напружених зон сусідніх паль.

Епюри нормальних напружень σ в рівні площини нижнього кінці паль мають криволінійний характер з максимальною ординатою на кромці нижнього кінця.

Такий характер залежності розподілу напружень має деяку аналогію з графіком розподілу контактних напружень по підшві фундаментів мілкового закладання, які відносяться до абсолютно жорстких.

Для них є характерною сідлоподібна форма графіка контактних напружень, з максимальними значеннями напружень біля кромки фундаменту. Ця аналогія слугує непрямим признаком реальності епюри розподілу нормальних напружень в складі фундаменту.

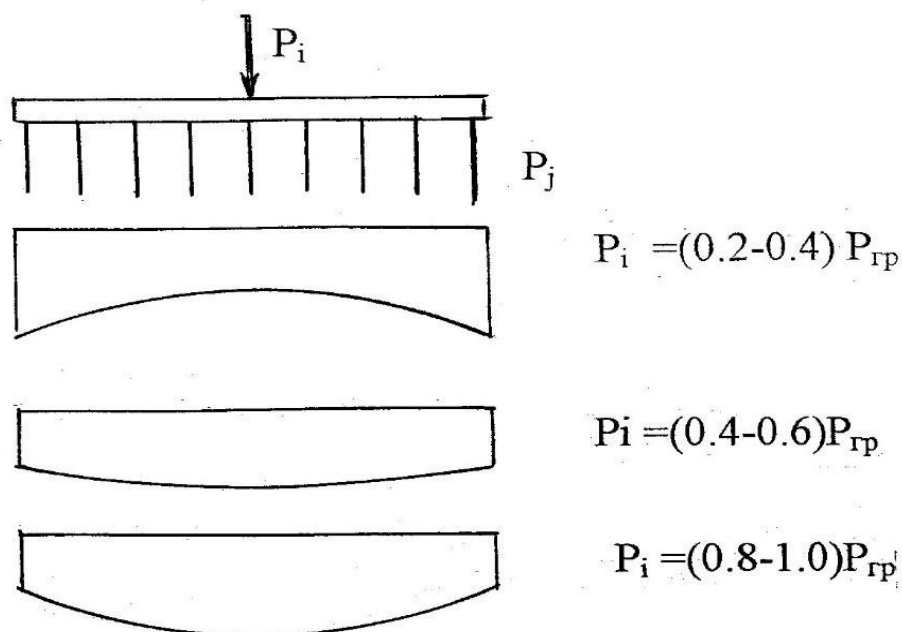


Рисунок 3.1 – Розподіл зусиль між палями в стрічковому пальовому фундаменті

Аналогічну картину викликають навантаження і в розподілі зусиль між палями стрічкового фундаменту, рис. 3.2.

При збільшенні кількості палей до (7-10) штук $\Delta P_{ср}$ стає майже постійною величиною, фундамент перетворюється на стрічковий та починає працювати в плоско-деформованому стані.

Епюри повздовжніх зусиль в стовбурі палі показують, що вони зменшуються з глибиною, що обумовлено реалізацією сил тертя по бокові поверхні палей. При цьому, повздовжні сили в крайніх палях більші, ніж в палях, розташованих в середині стрічкового фундаменту.

Для визначення величини розрахункових навантажень на палі велике значення має виявлення закономірностей розподілу зусиль в СПФ. Для виявлення цих закономірностей проведено числові дослідження за МГЕ характеру розподілу навантажень на СПФ та проведено порівняння з експериментом.

На рис. 3.2 подано графік зміни загального опору стрічкового фундаменту, коли кількість паль зростає з 2 до 6.

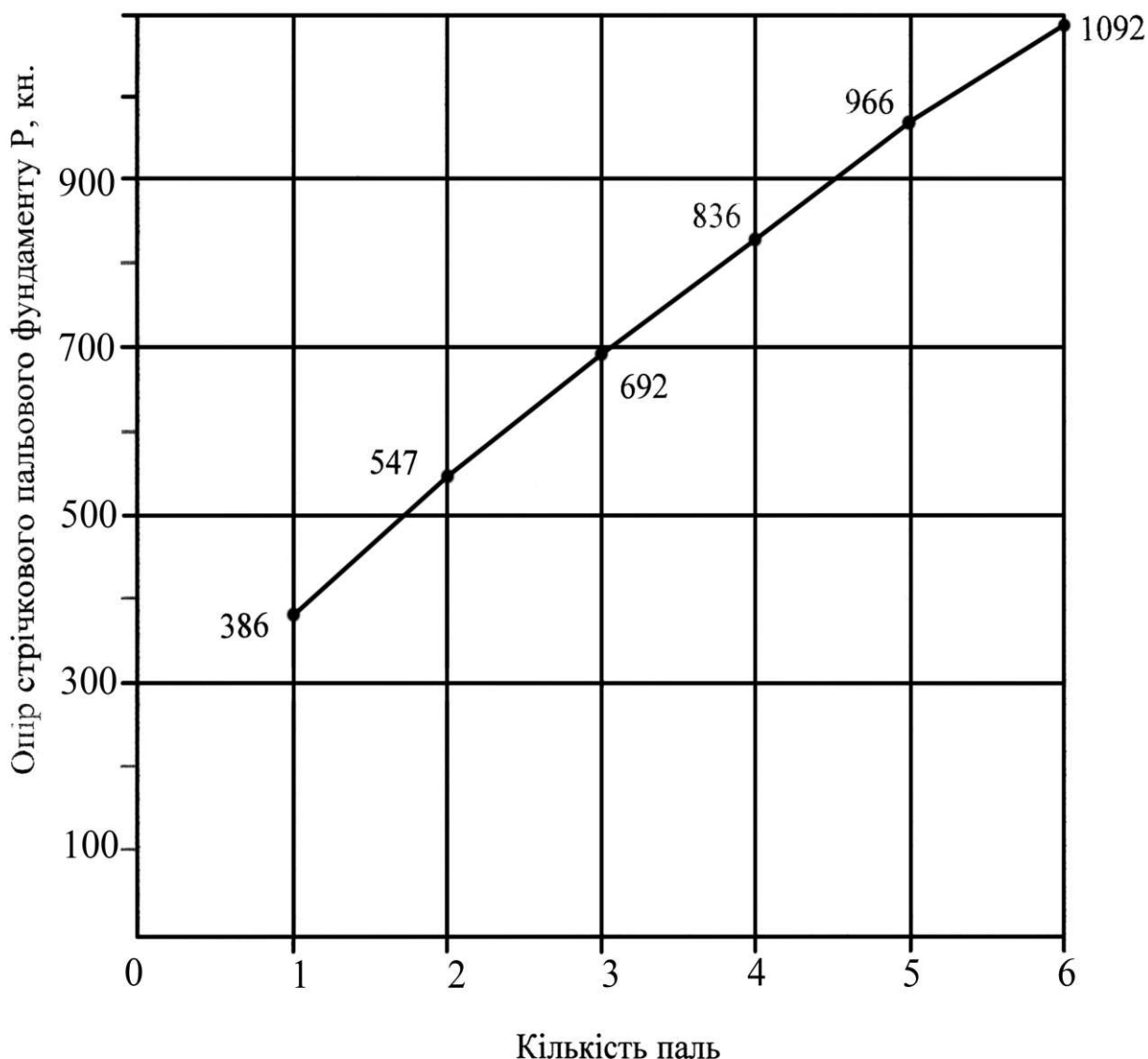


Рис. 3.2 – Залежність опору СПФ при збільшенні кількості паль

З графіка видно, що загальний опір однорядного стрічкового пального фундаменту відповідно зріс від 547 кН до 1029 кН, тобто майже в два рази.

Та, як показує аналіз даних, поданих в табл. 2.1, приріст опору СПФ із збільшення кількості паль зменшується і в даних дослідженнях його мінімальна величина складає 115 кН.

Відомим фактором є те, що середнє значення опору палі в складі фундаменту (в частковому випадку в глинистих ґрунтах) менше опору одиночної палі. Теоретичні дані, подані в таблиці 3.1, відповідають дослідним даним А. Бартоломія [3,4] та З.В. Бабічева [5].

Цікаво відмітити, що приріст середнього значення опору палі в складі СПФ із 6 паль менше аналогічного показника для палі, коли кількість паль $n_s = 5$, на 11 кН. Тобто практично розбіжність наближається до нуля. В практиці будівництва стрічкових пальових фундаментів в стрічці в наявності кількість паль більше 6-ти. І при такій кількості паль проявляється плоско деформований стан основи (коли фундамент стає стрічковим) має важливе практичне значення при розрахунку і проектуванні стрічкових пальових фундаментів. Так, як це дає можливість застосувати більш прості розрахункові схеми. Отримані дані дозволяють запропонувати гіпотезу, що “стрічковість фундаменту” настає при кількості паль $NS \geq 6$, а критерій настання відповідного граничного стану можна прийняти, що приріст опору фундаменту (ΔP) стає постійною величиною, а приріст середнього опору палі в складі СПФ ($\Delta P \rightarrow 0$) прямує до нуля. ΔP_i , кН.

Дослідження розподілу загального зусилля, що сприймається стрічковим фундаментом між палями, розташованими в один ряд показує (рис. 3.2), що крайні палі сприймають більші навантаження, ніж центральні. Це пояснюється лінійною стадією роботи паль з основами, а також жорскістю ростверка. Крім того, із графіків зміни зусиль в палях по відношенню до середнього значення опору однієї палі фундаменту видно, що нерівномірність розподілу залежить від кількості паль. При цьому зусилля на крайні палі перебільшують на 20-14% середні значення, а зусилля на середні палі на 10-15% менше середнього значення ($\overline{P_i}$).

Відносно розподілення дотичних напружень по довжині палі СПФ, як показують теоретичні дані, на крайніх палях їх значення більші, а на внутрішніх менші. Це не суперечить загальним уявленням про взаємодію паль в складі СПФ. Вважають визначеним факт зниження сил тертя по боковій поверхні паль СПФ в порівнянні з силами тертя на боковій поверхні одиночних паль як результат взаємодії напружених зон сусідніх паль через ґрунт основи.

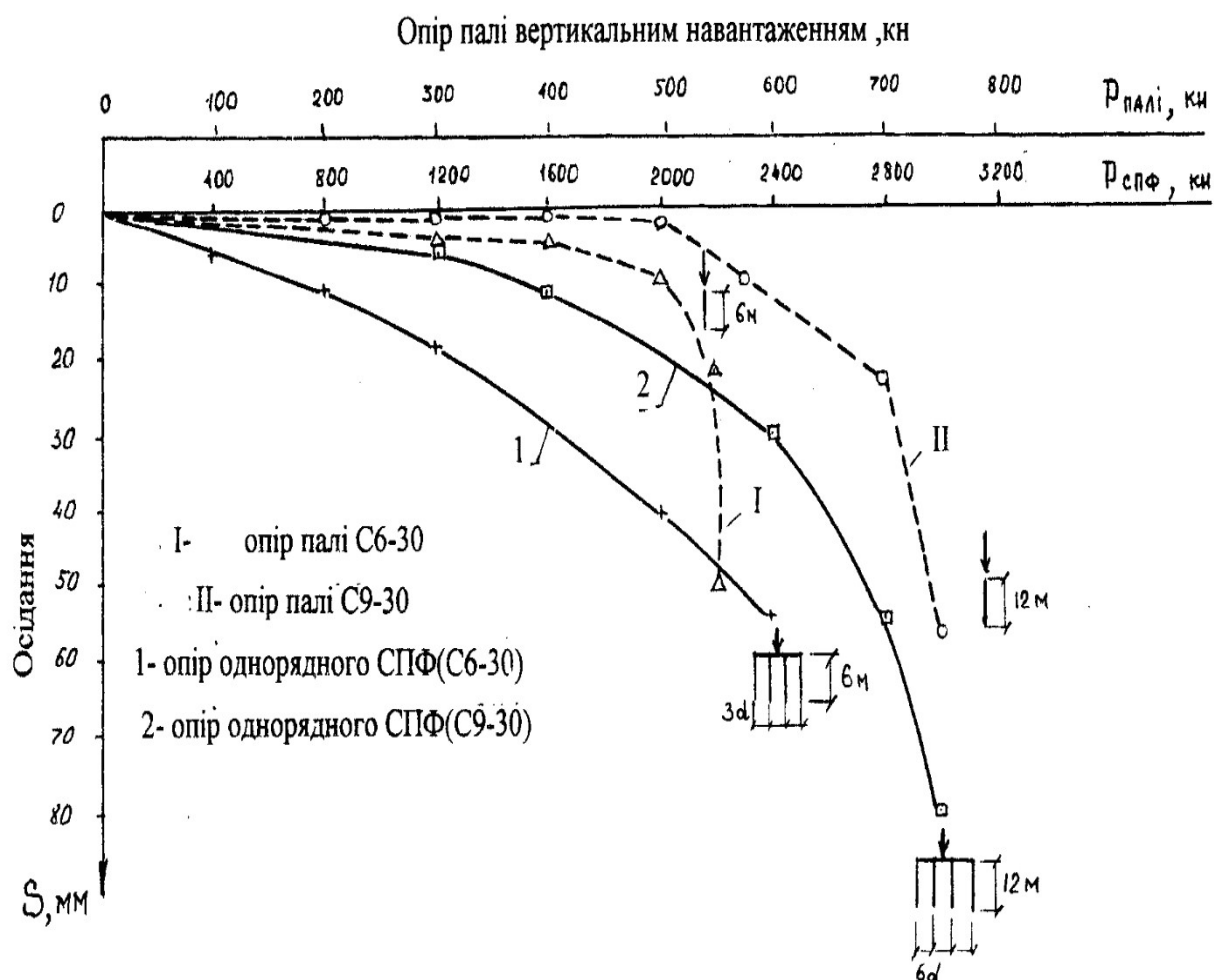


Рисунок 3.3 – Опір паль і стрічкових палевих фундаментів (досліди Бартоломія, 1982 р.)

В наведених вище розрахунках БКР величина осідання $ed_w = 0.02$ м. прийнята для можливості порівняння даних числового моделювання за МГЕ з експериментальними дослідженнями вертикального навантаження СПФ, виконаного в польових умовах А. Бартоломієм [4,3] і З. Бабічевим [5]. Їх досліді показали, що спостерігається лінійна залежність графіка “навантаження- осідання” для цих фундаментів, якщо осідання не більше 2 см.

Таблиця 3.1 Дані про опір СПФ вертикальним навантаженням

Кількість паль в фунда- менті	Загальний опір фундаменту, кН при $S=0.01$ м	Приріст опору ΔP_i , кН		Середнє значення опору палі $P_{i,c}$, кН	Приріст ΔP_i , кН	
		абсолютне ΔP_i	відносне $\Delta P_i / P_1$		відносний $P_{i,c} / P_1$	абсолютний $\Delta P_{i,c}$
1	386	-	1	386	1	-
2	547	161	0.417	273.5	0.708	112.5
3	692	145	0.376	230	0.596	43.5
4	836	144	0.373	209	0.541	21
5	966	130	0.337	193	0.5	16
6	1092	126	0.326	181.9	0.471	11

Дані таблиці 3.1 не протирічать уявленням про характер роботи палі в складі стрічкового фундаменту і підтверджують експериментально виявлене явище зниження опору паль в складі фундаменту за рахунок взаємодії напружених зон сусідніх паль.

Розділ 4.

Висновки

1. В роботі змодельовано механізм трансформації зовнішнього навантаження на призматичну палю, а від неї на підвалину за допомогою МГЕ з використанням фундаментального розв'язку Р. Міндліна для пружної півплощини.
2. Загальний опір стрічкових пальових фундаментів вертикальним навантаженням зростає із збільшенням кількості паль по довжині стрічки, та приріст загального опору стрічкового фундаменту із збільшенням кількості паль прямує до деякої постійної величини.
3. Середнє значення опору в складі СПФ менше опору одиночної палі, що обумовлено взаємовпливом напружених зон основи сусідніх паль.
4. Приріст середнього опору однієї палі стрічкового однорядного фундаменту зменшується при збільшенні кількості паль, і при числі паль $n \geq 6$ стає практично рівним нулю, тобто, при такі кількості паль фундамент стає “стрічковим”.
5. Розподіл загального навантаження фундаменту на окремі палі нерівномірне: крайні палі сприймають більші, а центральні – менші зусилля в порівнянні із середнім значенням опору палі в складі фундаменту.
6. Використання в прогностичних розрахунках нових дилатансійних пружнопластичних моделей дає можливість ще на стадії проектування прогнозувати НДС основ, варіювати вхідними параметрами для отримання найбільш економічного рішення, та отримання картини роботи фундаменту та ґрунтової основи під тисками сучасних висотних будівель.
7. Отримані за МГЕ прогностичні графіки «навантаження – осідання» поведінки СПФ під навантаженням аж до його «зриву» дає можливість визначити несучу здатність СПФ згідно критерія $S \leq S_u$ та при нагоді більш повно (економічніше) використовувати резерви несучої здатності при конкретних граничних умовах.

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд.
2. Бойко І.П., В.Л. Підлуцький. Дослідження взаємодії паль в умовах пальових випробувань. Десята всеукраїнська НТК «Механіка ґрунтів, геотехніка та фундаментобудування» . Полтава. 10.09.2018.
3. Моргун А.С., Меть І.М. Геотехнічні питання дослідження технічного стану споруди на слабких ґрунтах за МГЕ. КНУБА. Збірник Основи та фундаменти № 48. 2024.
4. Бойко І.П. Особливості взаємодії плитних фундаментів значних розмірів з ґрунтовою основою. КНУБА. Збірник Основи та фундаменти № 50. 2025.
5. Моргун А.С., Меть І.М., Підлуцький В.Л. Залишкові деформації ґрунту та розрахункові методи їх визначення за МГЕ : монографія . Вінниця : ВНТУ, 2023. 107 с.
6. ДБН В.2.1–10:2018. Основи та фундаменти споруд. Основні положення. [Чинний від 2019-01.01.] Вид. офіц. Київ, 2019. 42 с.
7. Бенерджі П., Баттерфілд Р. Методи граничних елементів в прикладних науках. 1984, 494 с.
8. Бреббія К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методи граничних елементів .1987, 542с.
9. Mindlin R.D. Force at a point in the interior of a semi – infinite solid, Physics 7, 196-202, 1936.
10. Ніколаєвський В. Н. Дилатансія та закони незворотнього деформування ґрунтів / В. Н. Ніколаєвський // Зб. Основи, фундаменти та механіка ґрунтів. - 1979. - № 5. - С. 29-31.
11. Ніколаєвський В.Н. Механіка пористих і тріщиноватих середовищ. Недра. 1984. 232 с.
12. Бойко І. П. Теоретичні основи проектування пальових фундаментів на пружньо-пластичні основи / І. П. Бойко // Зб. Основи та фундаменти. – К. :Будівельник, 1985. № 18. – С. 11–18.
13. Моргун А.С. Нелінійні проблеми механіки ґрунтів. Монографія / А.С. Моргун // Вінниця, ВНТУ, 2016. – 122 с.

14. Hill R. Mathematical Theory of Plasticity, Clarendon Press, Oxford, 1950.
15. Drucker D. C. Soil mechanic and work – hardening theories of plasticity / D. C. Drucker, R. E. Gibson, D. S. Henkel. – Trans. Amer. Soc. Civ. Eng., 1957.
16. Benerji P., Butterfield R. Boundary element methods in applied sciences. 1984, 494 с.
17. C.A. Brebbia, J.C. F. Telles, L.C. Wrobel. BOUNDARY ELEMENT TECHNIQUES, Theory and Applications in Engineering. New York. 1984.
<http://www.mymanual.ru/ebooks/technicheskaja>
18. Моргун А.С. Деформативність ґрунту при пластичній формозміні та дилатансії: монографія – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 97 с.
19. В'ялов С.С. Реологічні основи механіки ґрунтів. 1978.
20. Кушнір С. Г. Розрахунок деформацій основ будівель і споруд. З. “ПО Запоріжжя”. 2008. 96 с.

ДОДАТКИ

Додаток А
ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Вплив взаємодії паль стрічкового пальового фундаменту на його опір за методом граничних елементів

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ БМГА, ФБЦЕІ, гр. Б-22мс
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 16,31 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

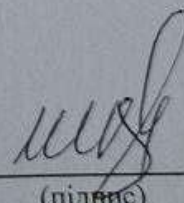
☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

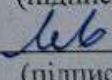
☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

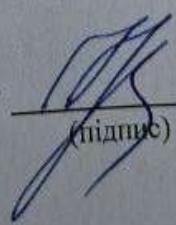
Експертна комісія:

Швець В.В., завідувач кафедри БМГА
(прізвище, ініціали, посада)

Маєвська І.В., доцент кафедри БМГА
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

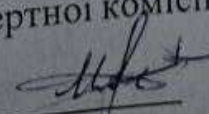

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Блащук Н.В.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник


(підпис)

Моргун А.С., професор кафедри БМГА
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач


(підпис)

Кротов О.О.

(прізвище, ініціали)

Додаток Б
Ілюстративна частина

Вінницький національний технічний університет
Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії
Кафедра будівництва, міського господарства та архітектури

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:
«ВПЛИВ ВЗАЄМОДІЇ ПАЛЬ СТРІЧКОВОГО ПАЛЬОВОГО ФУНДАМЕНТУ НА ЙОГО
ОПІР ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ»

Виконав: ст. групи Б-22мс
Кротов О.О.
Керівник: д.т.н., проф., каф. БМГА
Моргун А. С.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Мета: метою роботи є моделювання поведінки стрічкових пальових фундаментів та обґрунтування методики їх розрахунку в пружній стадії роботи з використанням методу граничних елементів (МГЕ).

Актуальність дослідження:

- Широке використання пальових фундаментів у сучасному будівництві (до 90% в житловому та до 70% в промисловому будівництві).
- Необхідність підвищення точності розрахунків несучої спроможності фундаментів у складних геологічних умовах.
- Недосконалість існуючих методів, які, наприклад, переоцінюють осідання в 1.5–1.8 рази.
- Висока вартість підземної частини будівель, що досягає 40–45% загальної вартості, тому точне проектування має значний економічний ефект.
- Сучасна потреба у використанні числового моделювання (МГЕ) для обґрунтування технічних рішень ще на стадії проектування.

Розрахункові схеми визначення зон ущільнення ґрунту стрічкових пальових фундаментів

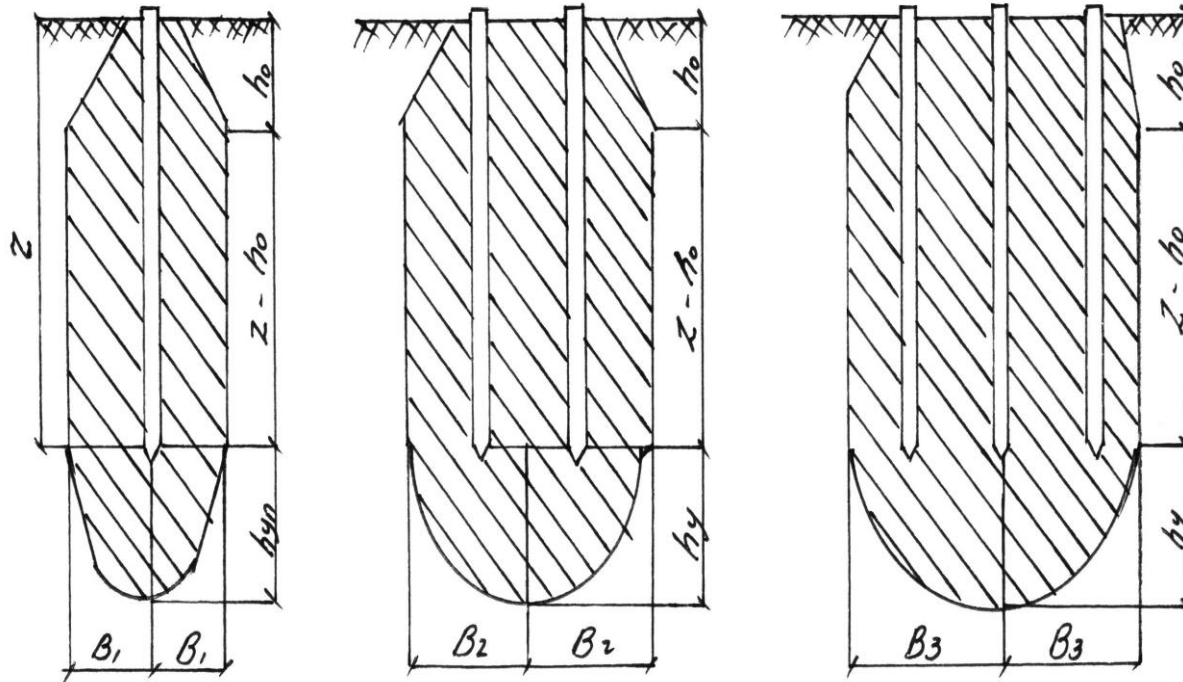


Рис. 1.1

При розв'язанні задачі прийнято наступні вихідні положення:

1. ґрунт рахується лінійно деформованим тілом;
2. палі та затиснутий між ними ґрунт розглядаються як єдиний масив;
3. навантаження передається ґрунту по боковій поверхні стрічкових пальових фундаментів і в площині нижніх кінців паль;
4. границя активної зони знаходиться на глибині, де напруження від пальового фундаменту не викликають залишкових деформацій ґрунту.

Отримані Р. Міндліним графіки напружень і переміщень для нормальної до поверхні зосередженої сили

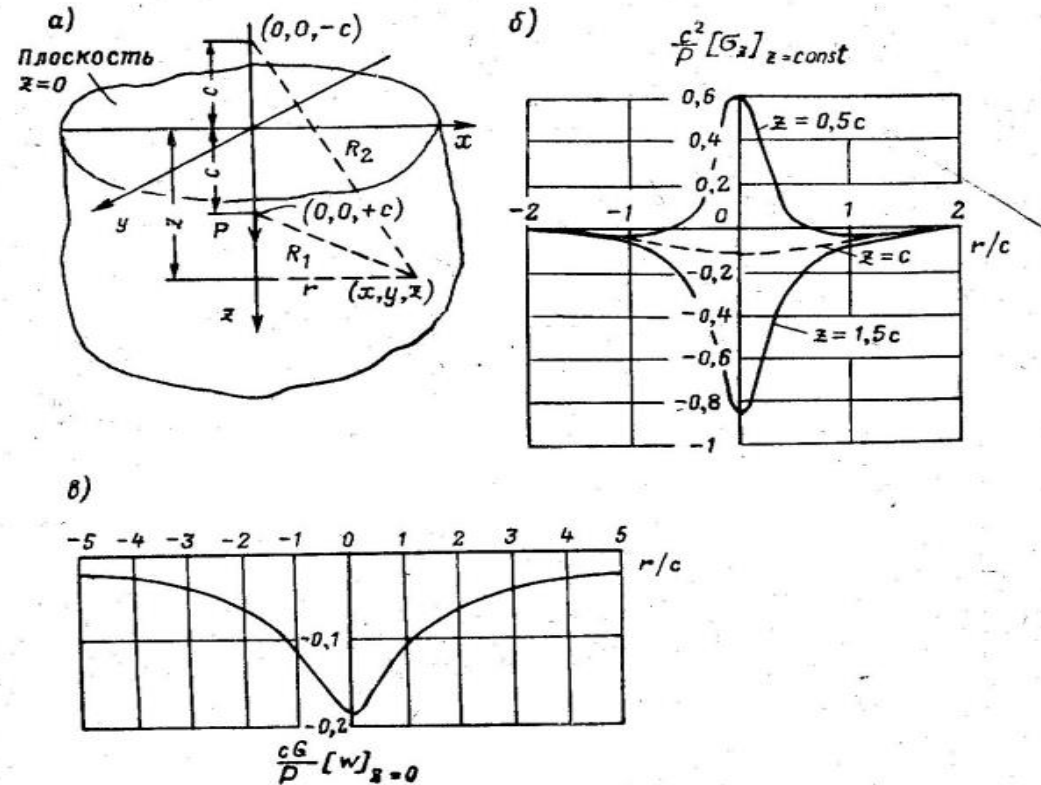


Рис. 2.1.

Зосереджена сила, що діє в середині півпростору нормально до його границі (рішення Р. Міндліна, 1936 р.);

а) прийняті позначення;

б) епюра вертикальних стискаючих напружень;

в) епюра граничних переміщень граничної поверхні

К. Бреббія було використано метод зважених нев'язок. Функція похибки була розподілена по області множенням її на вагову функцію w та інтегруванням цього добутку по області Ω :

$$\int_{\Omega} R w d\Omega = 0. \quad (2.1)$$

Інтегральне співвідношення є синтезом статичних, геометричних і фізичних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij,j} + b_j &= 0 \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \\ \sigma_{ij} &= C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \end{aligned} \right\} \Rightarrow C_{ij}(\xi) u_j(\xi) + \int_{\Gamma} q_{ij}^*(\xi, x) u_j(x) d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} u_{ij}^*(\xi, x) q_j(x) d\Gamma(x), \quad (2.2)$$

де $\sigma_{ij,j} + b_j = 0$ – статичні рівняння рівноваги;

$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$ – геометричні рівняння;

$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$ – фізичні рівняння середовища.

Відмітимо, що для кожного граничного елемента відома одна з двох функцій (u чи q). Рівняння (2.2) можна записати:

$$c_i u_i + \int_{\Gamma} u q^* d\Gamma = \int_{\Gamma} q u^* d\Gamma \quad (2.3)$$

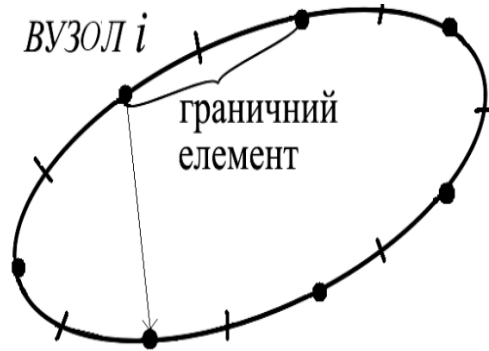


Рис. 2.2 – Граничні елементи. Зв'язок між фундаментальним рішенням в граничному вузлі та граничними елементами

Дискретна форма для (2.2) для точки i :

$$\frac{1}{2} u_i + \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} u q^* d\Gamma = \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} q u^* d\Gamma$$

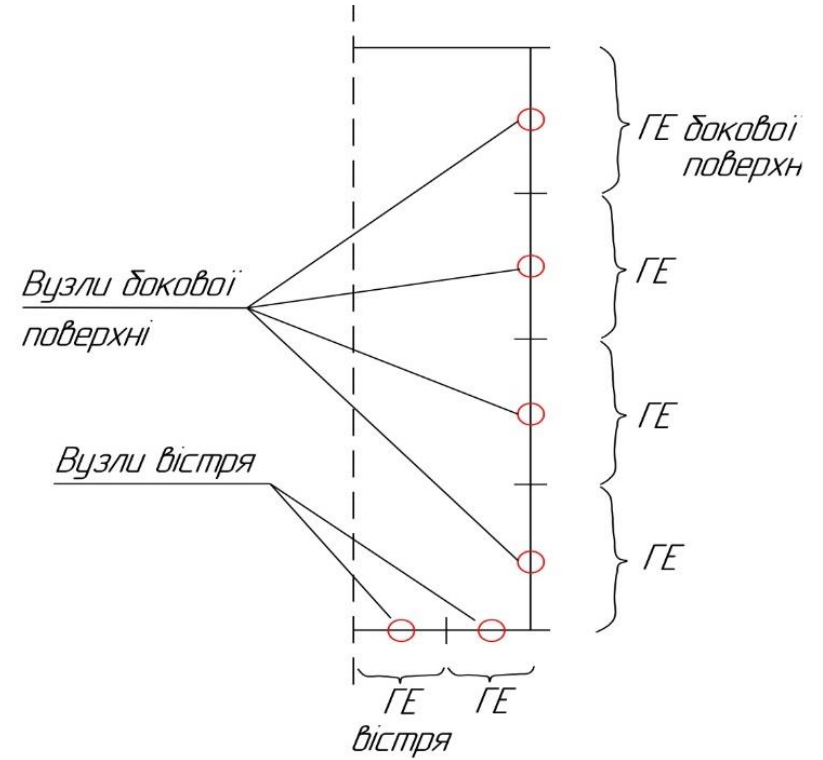


Рисунок 2.4 – Дискретизація бокової поверхні та вістря палі постійними граничними елементами

Матрична форма матриці впливу K :

$$\begin{Bmatrix} w_s \\ w_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{ss} & K_{bs} \\ K_{sb} & K_{bb} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \tau_s \\ \sigma_i \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

По результатах числових розрахунків за МГЕ побудовано епюри розподілу сил тертя по бокових поверхнях паль, нормальних напружень під нижнім кінцем і поздовжніх сил по довжині паль, коли кількість паль змінюється $NS = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ (рис. 2.11-2.16)

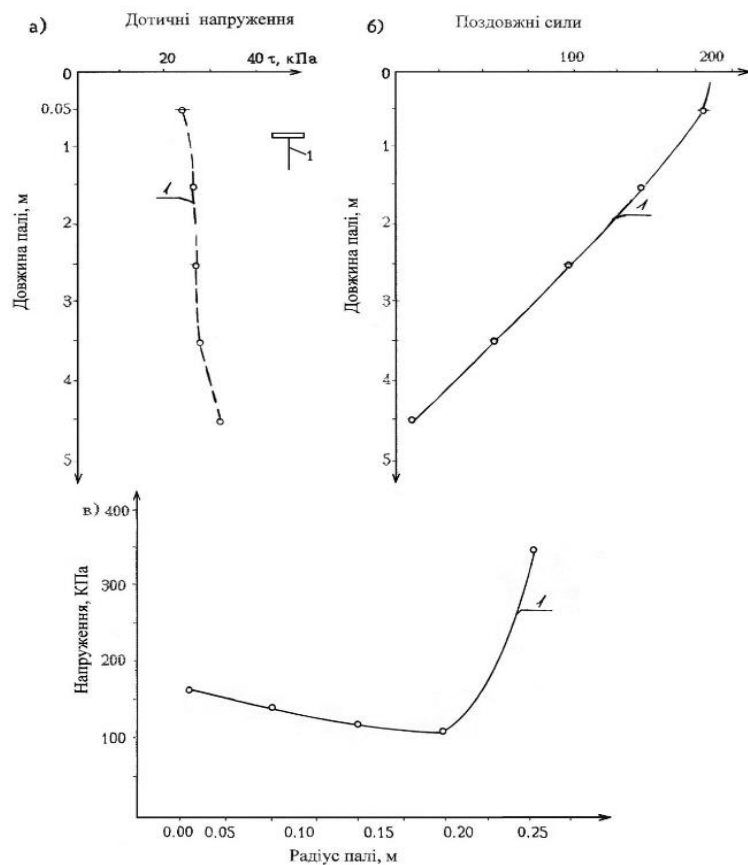


Рис.2.11 – Розподіл зусиль одиначної палі ($NS=1$)

а) сили тертя по бокові поверхні;

б) поздовжні сили;

в) нормальні напруження під нижнім кінцем

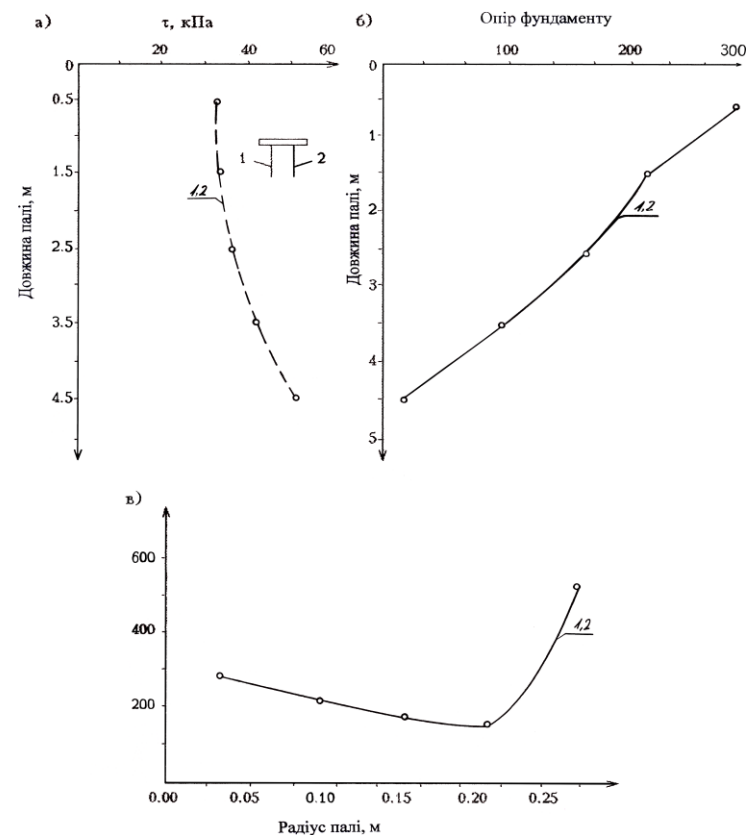


Рис.2.12 – Розподіл зусиль між елементами групи паль ($NS=2$)

а) сили тертя по бокові поверхні;

б) поздовжні сили;

в) нормальні напруження під нижнім кінцем

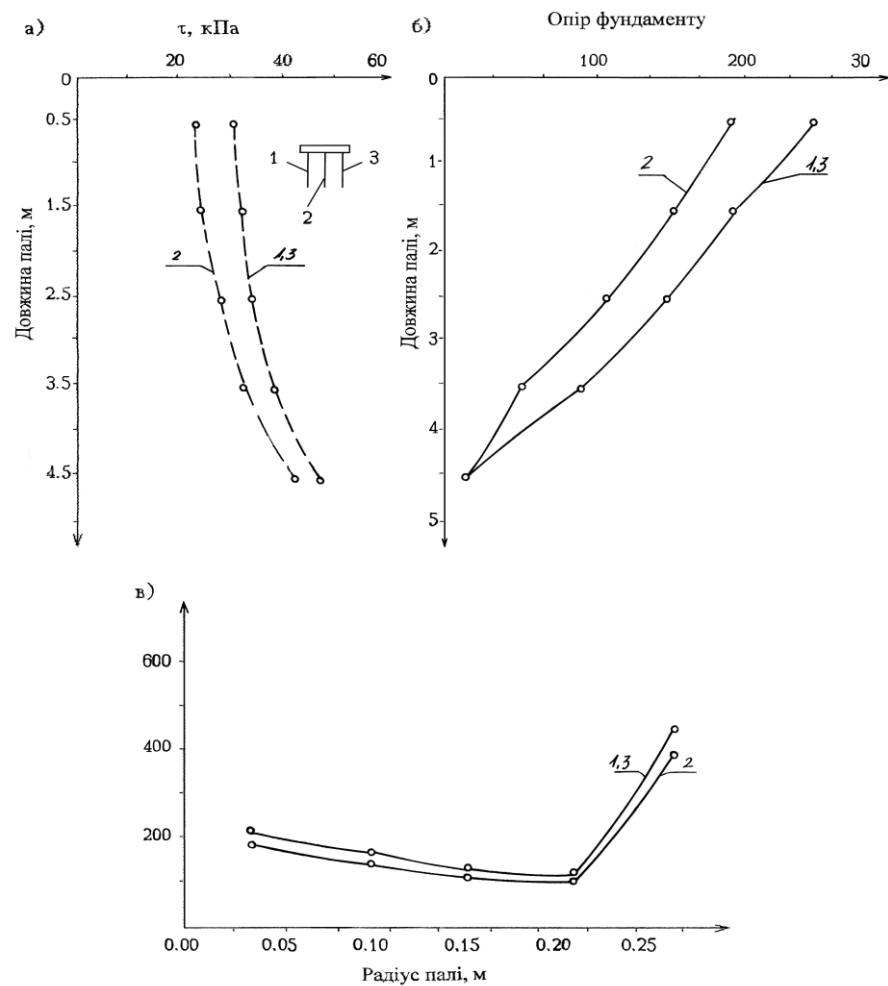


Рис.2.13 – Розподіл зусиль між елементами групи палей (NS=3)

а) сили тертя по бокові поверхні;

б) поздовжні сили;

в) нормальні напруження під нижнім кінцем

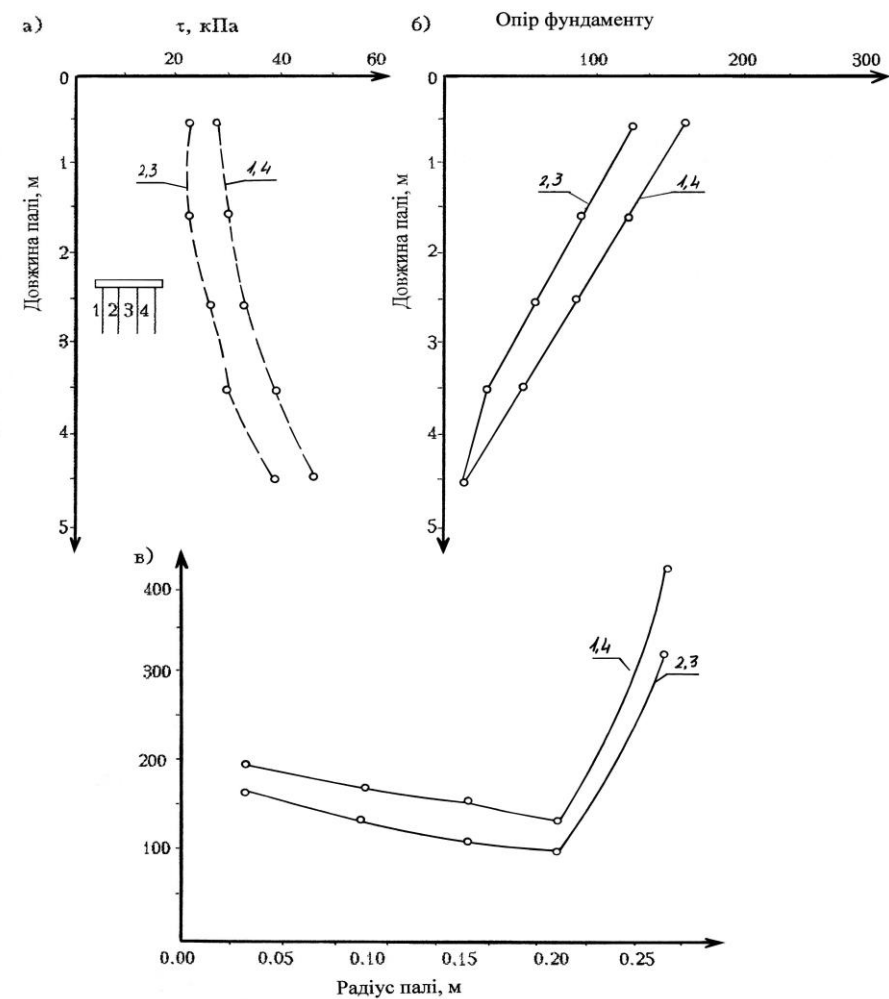


Рис.2.14 – Розподіл зусиль між елементами групи палей (NS=4)

а) сили тертя по бокові поверхні;

б) поздовжні сили;

в) нормальні напруження під нижнім кінцем

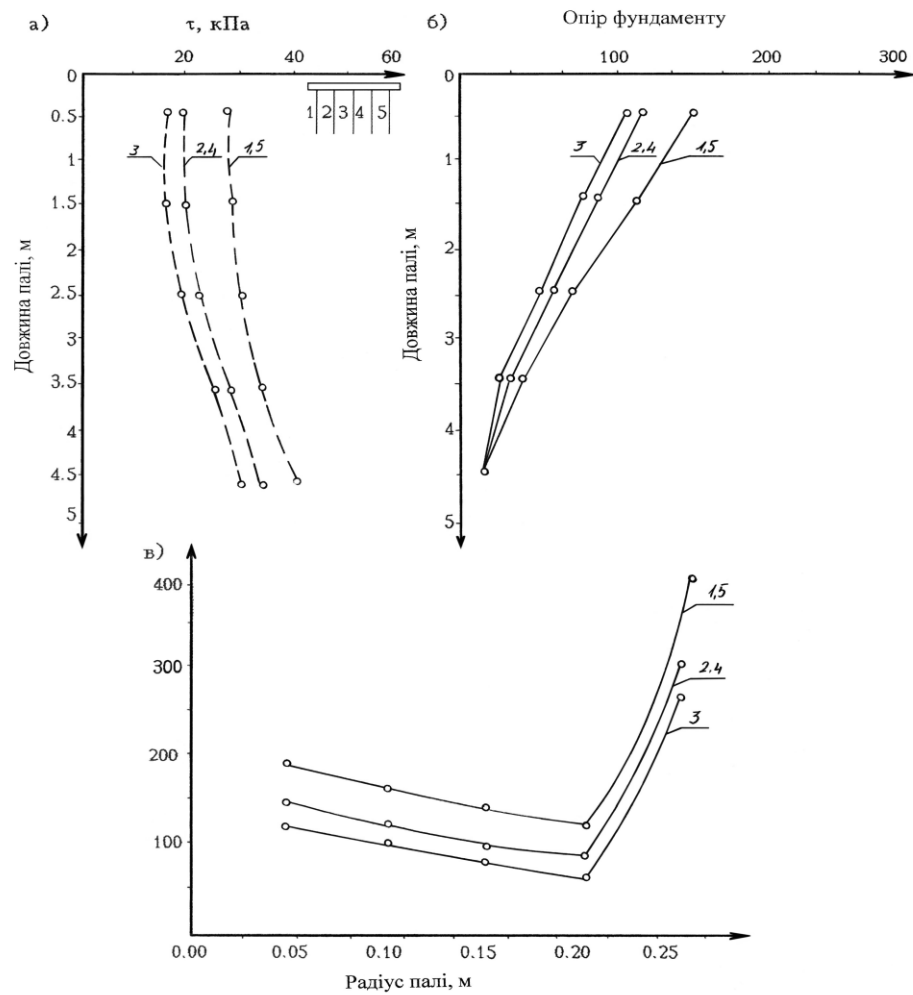


Рис.2.15 – Розподіл зусиль між елементами групи палей (NS=5)

а) сили тертя по бокові поверхні;

б) поздовжні сили;

в) нормальні напруження під нижнім кінцем

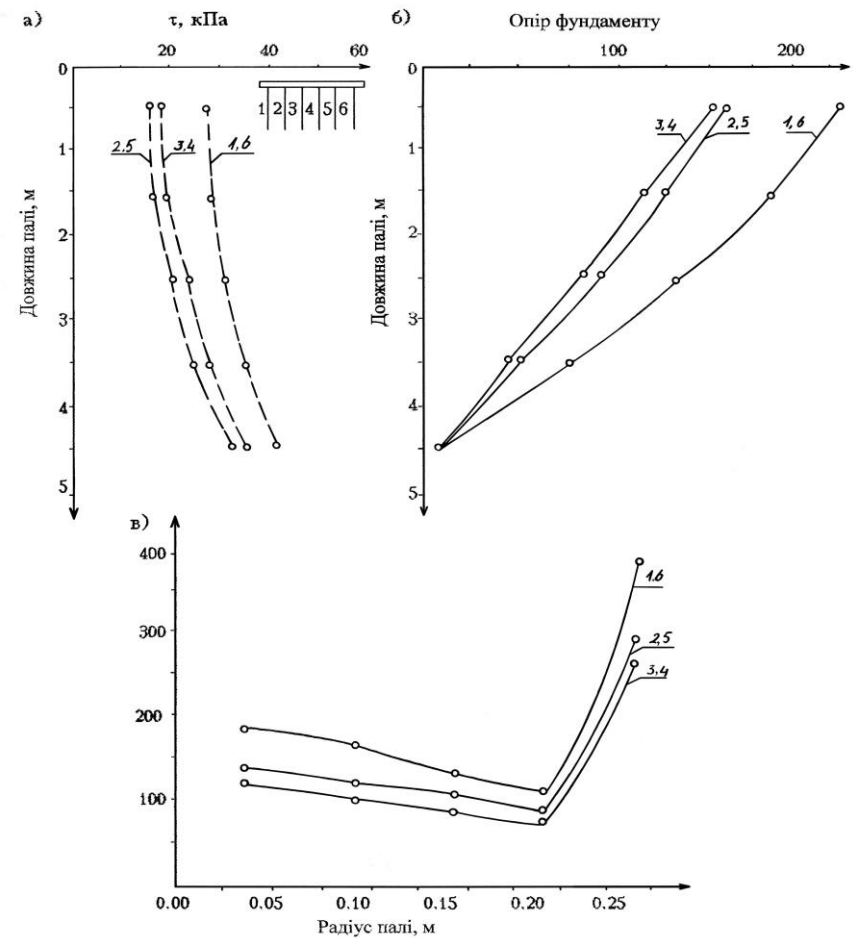


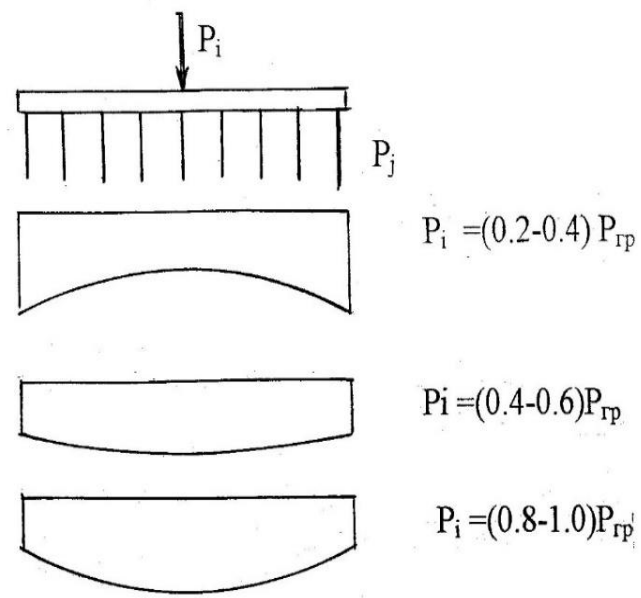
Рис.2.16– Розподіл зусиль між елементами групи палей (NS=6)

а) сили тертя по бокові поверхні;

б) поздовжні сили;

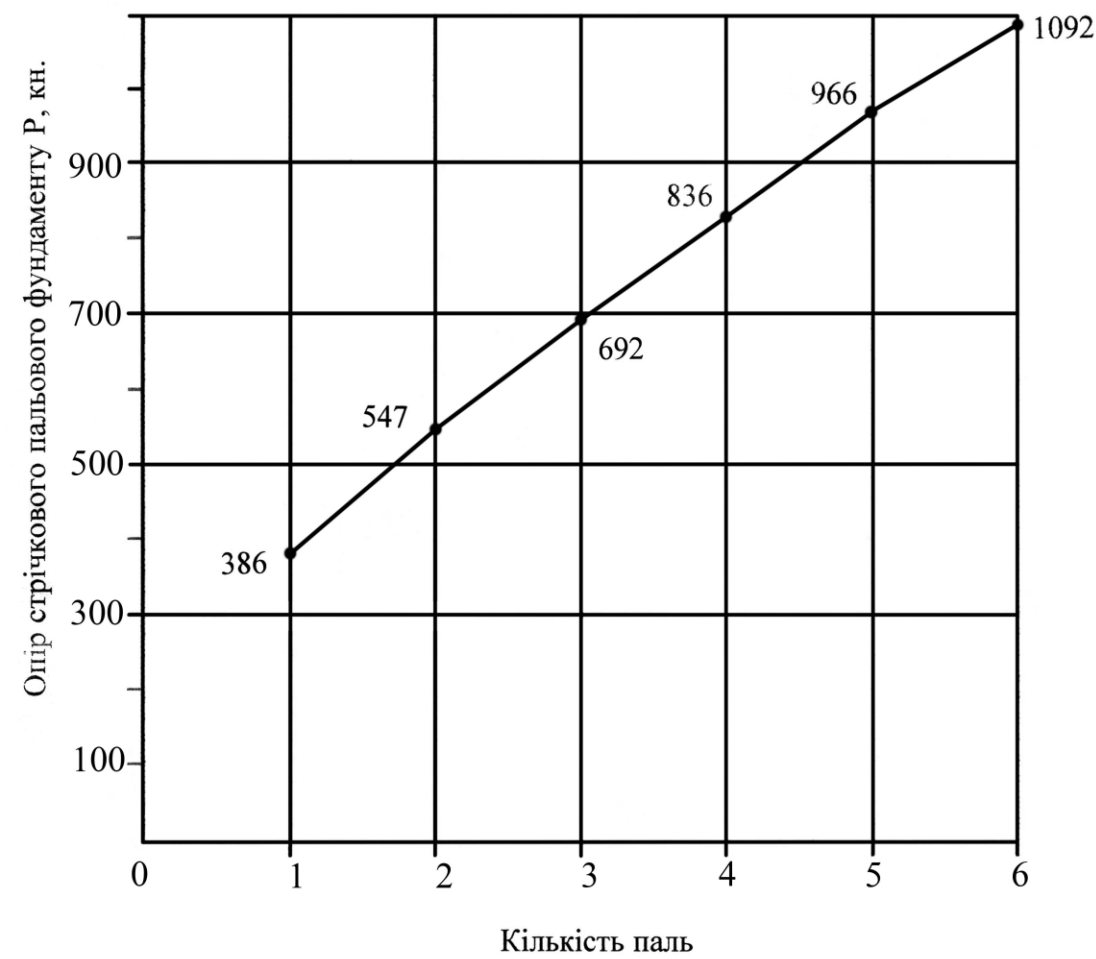
в) нормальні напруження під нижнім кінцем

Рис. 3.1 – Розподіл зусиль між палями в стрічковому пальовому фундаменті



- Навантаження і розподіл зусиль між палями стрічкового фундаменту схожі;
- При 7–10 палях $P_{ср}$ стає майже сталою, фундамент переходить у плоско-деформований стан.
- Поздовжні зусилля в палі зменшуються з глибиною через тертя по боках, при цьому крайні палі несуть більші зусилля, ніж центральні.

Рис. 3.2 – Залежність опору СПФ при збільшенні кількості палей

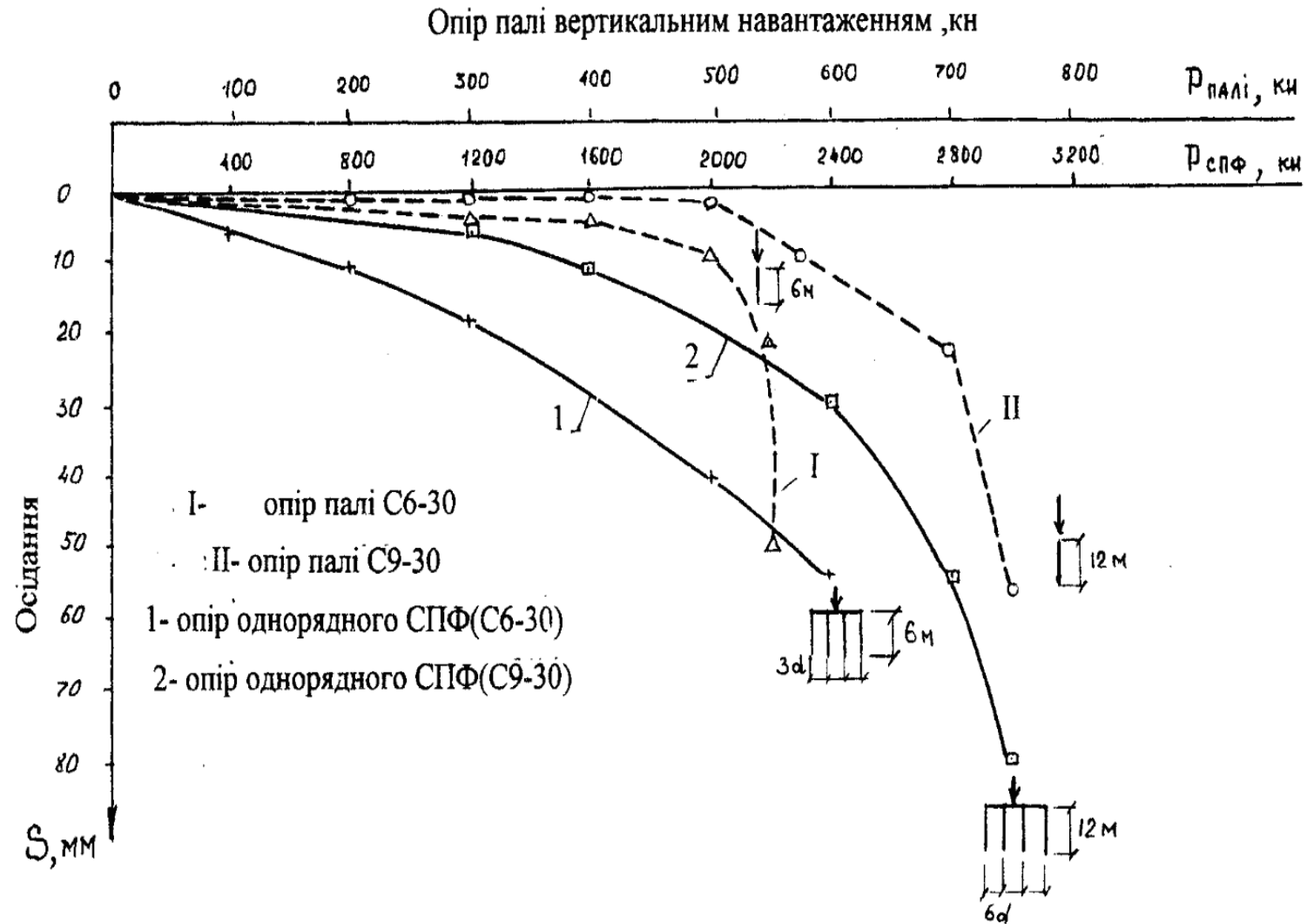


Таблиця 3.1 Дані про опір СПФ вертикальним навантаженням

Кількість паль в фундаменті	Загальний опір фундаменту, кН при $S=0.01$ м	Приріст опору ΔP_i , кН		Середнє значення опору палі $P_{i,c}$, кН	Приріст ΔP_i , кН	
		абсолютне ΔP_i	відносне $\Delta P_i / P_1$		відносний $P_{i,c} / P_1$	абсолютний $\Delta P_{i,c}$
1	386	-	1	386	1	-
2	547	161	0.417	273.5	0.708	112.5
3	692	145	0.376	230	0.596	43.5
4	836	144	0.373	209	0.541	21
5	966	130	0.337	193	0.5	16
6	1092	126	0.326	181.9	0.471	11

Дані таблиці підтверджують експериментальне зниження опору паль у стрічковому фундаменті через взаємодію напружених зон сусідніх паль.

Рис. 3.3 – Опір палі і стрічкових пальових фундаментів (досліди Бартоломія, 1982 р.)



Висновки

1. В роботі змодельовано механізм трансформації зовнішнього навантаження на призматичну палю, а від неї на підвалину за допомогою МГЕ з використанням фундаментального розв'язку Р. Міндліна для пружної півплощини.
2. Загальний опір стрічкових пальових фундаментів вертикальним навантаженням зростає із збільшенням кількості паль по довжині стрічки, та приріст загального опору стрічкового фундаменту із збільшенням кількості паль прямує до деякої постійної величини.
3. Середнє значення опору в складі СПФ менше опору одиночної палі, що обумовлено взаємовпливом напружених зон основи сусідніх паль.
4. Приріст середнього опору однієї палі стрічкового однорядного фундаменту зменшується при збільшенні кількості паль, і при числі паль $n \geq 6$ стає практично рівним нулю, тобто, при такій кількості паль фундамент стає “стрічковим”.
5. Розподіл загального навантаження фундаменту на окремі палі нерівномірне: крайні палі сприймають більші, а центральні – менші зусилля в порівнянні із середнім значенням опору палі в складі фундаменту.
6. Використання в прогнозних розрахунках нових дилатансійних пружнопластичних моделей дає можливість ще на стадії проектування прогнозувати НДС основ, варіювати вхідними параметрами для отримання найбільш економічного рішення, та отримання картини роботи фундаменту та ґрунтової основи під тисками сучасних висотних будівель.
7. Отримані за МГЕ прогнозні графіки «навантаження – осідання» поведінки СПФ під навантаженням аж до його «зриву» дає можливість визначити несучу здатність СПФ згідно критерія $S \leq S_u$ та при нагоді більш повно (економічніше) використовувати резерви несучої здатності при конкретних граничних умовах.

Рецензія

офіційного опонента к. т. н., доц. Слободян Наталії Михайлівни на

бакалаврську кваліфікаційну роботу

студента Кротова Олега Олександровича

на тему: «Вплив взаємодії паль стрічкового пальового фундаменту на його опір за методом граничних елементів»
яку представлено на здобуття кваліфікації бакалавра з будівництва за спеціальністю 8.092101- Промислове та цивільне будівництво.

Представлена на рецензію бакалаврська кваліфікаційна робота складається із чотирьох розділів, містить таблиці, графіки, рисунки, загальні висновки, бібліографію та додатки. Робота складається з 56 сторінок і містить 21 рисунок, 7 таблиць, список використаних джерел з 20 найменувань.

Оформлення дисертації виконане відповідно до вимог чинного Положення про порядок підготовки бакалаврів у ВНТУ.

Актуальність роботи визначається гострою соціальною необхідністю в об'єктах соціально-побутового призначення, яка потребує збільшення об'ємів цивільного та промислового будівництва. Ріст об'ємів будівництва можливий при раціональному використанні нових видів фундаментів і сучасних технологій їх розрахунку та влаштування. Пальові фундаменти – найпоширеніші типи фундаментів – відзначаються надійністю при зведенні промислових та цивільних будівель. Проблема оцінки несучої спроможності фундаментної конструкції є визначальною в практичному проектуванні.

Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні математичної моделі прогнозування НДС стрічкових пальових фундаментів (СПФ) для задач пружного півпростору за числовим методом граничних елементів.

Практична цінність полягає в створенні алгоритму та нової технології прогнозування НДС та несучої спроможності стрічкових пальових фундаментів за сучасним МГЕ.

Представлена БКР заслуговує на оцінку «відмінно», а її автор заслуговує на присвоєння кваліфікації бакалавра з будівництва за спеціальністю 8.092101 – "Промислове та цивільне будівництво".

Рецензент

Доцент, к.т.н.

Н.М. Слободян

(посада, науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ініціали, прізвище)



Відгук
керівника бакалаврської кваліфікаційної роботи
студента Кротова Олега Олександровича
на тему «Вплив взаємодії паль стрічкового пальового фундаменту на його опір за методом граничних елементів»

БКР – науково-дослідницького напрямку, присвячена актуальній темі вдосконалення розрахунку взаємодії паль стрічкового пальового фундаменту, розвитку їх математичного моделювання.

Тема виконана в рамках науково-дослідної роботи кафедри БМГА, відповідає виданому завданню.

Студент ознайомився із найбільш важливими і значущими питаннями розрахунку фундаментних конструкцій за сучасним числовим методом граничних елементів, виявивши самостійність та наполегливість.

В наявності достатній рівень теоретичної та практичної підготовки, знання фахової літератури; підготовленість до прийняття сучасних рішень, уміння аналізувати літературні джерела, приймати правильні рішення.

В БКР застосовано сучасні інформаційні технології для проведення математичного моделювання поведінки під навантаженням СПФ, проаналізовано результати експерименту.

Числові результати досліджень з використанням МГЕ апробовано в публікації в науковому журналі ФБЦЕІ “Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві”, №2, 2024.

Календарний план виконувався своєчасно. Виконана БКР заслуговує оцінку “А”.

Якість підготовки студента відповідає вимогам освітньо-професійної програми “Промислове та цивільне будівництво” і можливості присвоєння йому ступеня бакалавра з будівництва.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

Професор, д.т.н.  А.С. Моргун

(посади, науковий ступінь, вчене звання)

(ініціали)

(підписи, прізвище)