

Оцінка впливу змінної жорсткості основи та стадійності зведення на напружено–деформований стан фундаментної плити

Людмила БОНДАРЕВА¹, Василь БЕГАН², Тетяна ДИПТАН³

^{1,2}Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037,

¹bondareva.lo@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7392-814X>

²began.vasya@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-0357-5762>

³dyptan.tv@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2852-014X>

Анотація. У сучасній практиці проектування фундаментних плит багатоповерхових будівель розрахунок взаємодії системи «основа–фундамент–будівля» найчастіше виконується із використанням спрощених моделей ґрунтової основи, у яких коефіцієнти постелі приймаються постійними по всій площі фундаменту та незмінними на всіх етапах навантаження. Такий підхід значно спрощує процес розрахунку, однак не повною мірою відображає реальну роботу ґрунтового масиву, жорсткість якого змінюється залежно від рівня навантаження, напружено-деформованого стану та етапності зведення споруди.

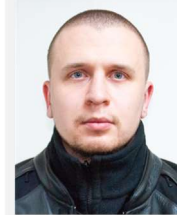
У даній роботі досліджено вплив урахування стадійності зведення будівлі та змінної жорсткості ґрунтової основи на напружено-деформований стан фундаментної плити багатоповерхової каркасно-монолітної будівлі. Для дослідження розглянуто різні варіанти розрахункових моделей ґрунтової основи, які відрізняються підходом до визначення коефіцієнтів постелі та урахуванням поетапного формування конструктивної системи будівлі в процесі монтажу.

Числове моделювання виконано методом скінченних елементів у програмному комплексі «LIRA-FEM» із використанням систем «Монтаж» та «Ґрунт». У процесі моделювання враховано поетапне введення конструктивних елементів у роботу, поступове прикладання навантажень, накопичення деформацій на попередніх стадіях будівництва та зміну жорсткісних характеристик ґрунтової основи залежно від поточного рівня навантаження.

Проведено порівняння результатів



Людмила БОНДАРЕВА
доцент кафедри
геотехніки
к.т.н., доц.



Василь БЕГАН
аспірант кафедри
геотехніки



Тетяна ДИПТАН
ст. викладач кафедри
геотехніки

розрахунку за величинами осідань фундаментної плити,

внутрішніх зусиль та необхідної площі робочого армування. Отримані результати показали, що врахування етапності зведення будівлі та змінної жорсткості основи суттєво впливає на напружено-деформований стан фундаментної конструкції, характер розподілу внутрішніх зусиль і необхідну кількість армування.

Встановлено, що використання більш детальної розрахункової моделі системи «основа–фундамент–будівля» дозволяє уточнити результати розрахунку фундаментної плити та підвищити достовірність оцінки її

роботи в реальних умовах експлуатації. Отримані результати підтверджують доцільність урахування етапності зведення та змінної жорсткості ґрунтової основи при проектуванні фундаментних конструкцій з метою зниження матеріаломісткості та забезпечення необхідної надійності й експлуатаційної придатності будівель.

Ключові слова. LIRA-FEM, числове моделювання, змінні коефіцієнти постелі.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У сучасній практиці проектування фундаментних плит розрахунок взаємодії будівлі з ґрунтовою основою найчастіше виконується із застосуванням моделі пружної основи типу «Вінклера-Фуса». У межах цього підходу ґрунт розглядається як система незалежних пружних елементів, а його жорсткість характеризується коефіцієнтом постелі, який пов'язує контактний тиск із осіданням фундаменту.

У більшості інженерних розрахунків коефіцієнт постелі приймається постійним для всієї фундаментної плити та для всіх етапів навантаження. Такий підхід значно спрощує розрахунок, однак не повністю відображає реальну роботу системи «основа-фундамент-будівля». Відомо, що жорсткість ґрунтової основи залежить від напружено-деформованого стану масиву ґрунту, рівня прикладеного навантаження та ступеня ущільнення ґрунту під фундаментом. У процесі зведення будівлі навантаження на основу зростає поступово, що призводить до зміни деформаційних характеристик ґрунту та, відповідно, значення коефіцієнта постелі.

Додатковим фактором, який впливає на результати розрахунку фундаментних конструкцій, є стадійність зведення будівлі. У реальних умовах навантаження передається на фундамент поступово в процесі будівництва, що змінює напружено-деформований стан як конструкції фундаменту, так і ґрунтової основи. Проте у багатьох розрахункових моделях цей ефект не враховується, і всі навантаження прикладаються до конструкції одночасно.

Зазначені спрощення можуть призводити

до відмінностей між розрахунковими результатами та фактичною роботою системи «основа-фундамент-будівля». Зокрема, використання постійного коефіцієнта постелі може впливати на визначення осідань фундаменту, розподіл контактних реакцій та величину внутрішніх зусиль у фундаментній плиті, що безпосередньо впливає на підбір армування.

У зв'язку з цим виникає необхідність дослідження впливу різних підходів до моделювання ґрунтової основи, зокрема врахування стадійності зведення будівлі та зміни коефіцієнта постелі залежно від рівня навантаження, на результати розрахунку фундаментних плит. Проведення такого аналізу дозволяє оцінити точність традиційних розрахункових схем та визначити можливості їх удосконалення для більш реалістичного відображення роботи системи «основа-фундамент-будівля».

МЕТА РОБОТИ

Метою даного дослідження є проведення комплексного аналізу роботи фундаментних конструкцій із урахуванням їх взаємодії з ґрунтовою основою та оцінка впливу конструктивних параметрів фундаментів на напружено-деформований стан системи «основа-фундамент-споруда». Особливу увагу приділено дослідженню величини та характеру осідань фундаментів, розподілу напружень у фундаментних плитах, а також визначенню раціональної кількості армування залежно від прийнятих конструктивних рішень.

У межах дослідження передбачається виконати порівняльний аналіз різних варіантів фундаментних конструкцій із використанням чисельного моделювання для визначення основних параметрів їх роботи під дією експлуатаційних навантажень. Отримані результати дозволять оцінити вплив геометричних характеристик фундаментів, жорсткості конструкції та властивостей ґрунтової основи на величину осідань, концентрацію напружень у плиті та характер розподілу внутрішніх зусиль.

На основі проведених розрахунків планується визначити можливості оптимізації конструктивних параметрів фундаментних плит з метою зменшення матеріаломісткості конструкції, зокрема шляхом раціонального підбору армування. Очікується, що результати дослідження дозволять обґрунтувати доцільність застосування більш ефективних конструктивних рішень фундаментів, що забезпечують зниження витрат матеріалів та підвищення економічної ефективності проектування без зниження надійності та експлуатаційної придатності будівельних конструкцій.

ВИХІДНІ ДАНІ

Для дослідження напружено-деформованого стану фундаментної конструкції було розглянуто об'єкт —

багатоповерхову будівлю каркасно-монолітної конструктивної системи з фундаментною плитою.

Будівля має прямокутну форму в плані з габаритними розмірами 45×19 м. Несуча система споруди виконана у вигляді просторового залізобетонного каркаса, що складається з монолітних колон, монолітних ядер жорсткості та міжповерхових перекриттів.

Фундамент будівлі запроєктовано у вигляді **монолітної залізобетонної фундаментної плити товщиною 800 мм**, яка працює як суцільна плоска конструкція та забезпечує передачу навантажень від будівлі на ґрунтову основу.

В якості основи прийнято супісок твердий та суглинок м'якопластичний. По всій площі фундаментної плити влаштовано щелеву підготовку товщиною 200 мм.

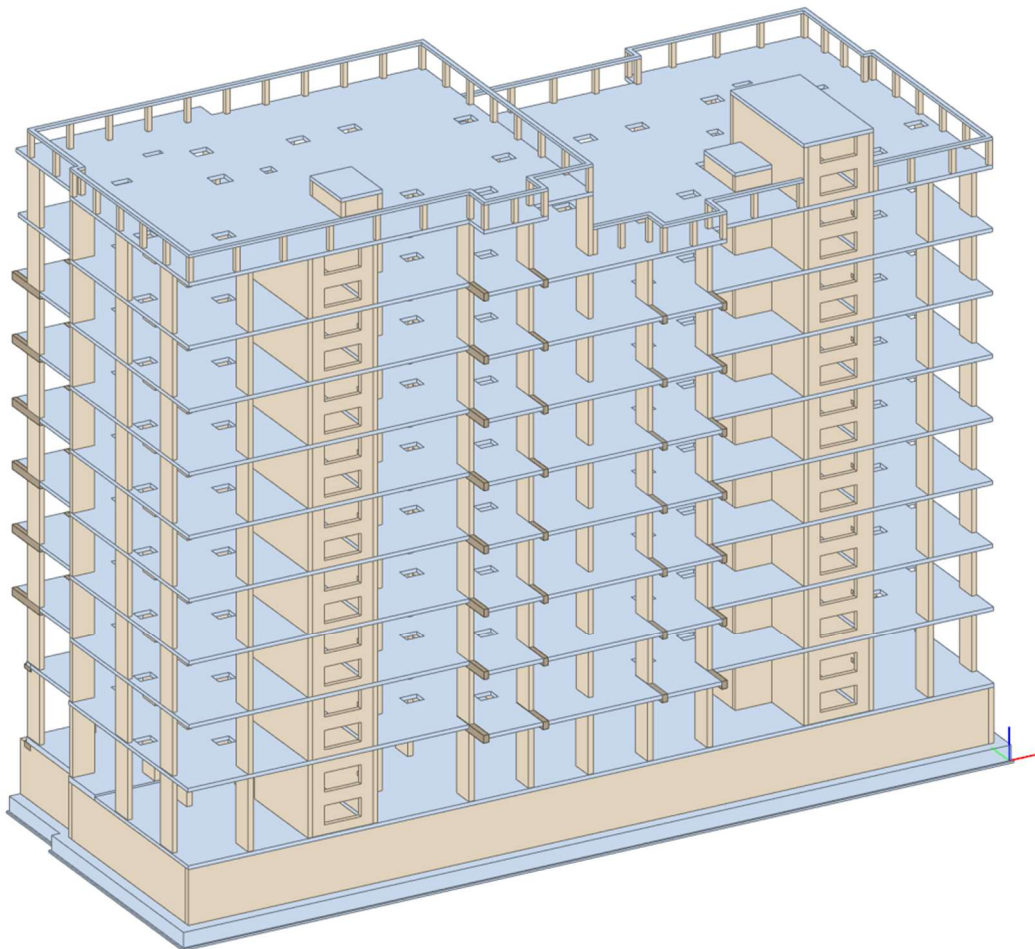


Рис.1. Схема поетапного формування розрахункової моделі будівлі

Fig.1. Scheme of the staged formation of the structural analysis model of the building

реальної роботи системи «основа – фундамент – будівля» у даному дослідженні було виконано числове моделювання з урахуванням етапності зведення споруди.

Моделювання виконано у програмному комплексі «LIRA-FEM» із використанням системи «Монтаж», яка дозволяє враховувати:

- поетапного введення елементів у роботу;
- поступове прикладання навантажень;
- зміну жорсткісної схеми конструкції;
- накопичення деформацій на попередніх етапах.

У межах дослідження було розглянуто дві розрахункові схеми.

Перша схема передбачає розрахунок конструкції з урахуванням етапності зведення будівлі із застосуванням системи «Монтаж». У цьому випадку процес формування конструктивної системи будівлі було змодельовано у вигляді **11 послідовних етапів**. На кожному етапі в роботу вводилися конструктивні елементи відповідного поверху, зокрема колони, стіни ригелі, плити перекриття. Одночасно з

активацією елементів враховувалася дія їхньої власної ваги, яка передавалася на конструкції нижніх поверхів та фундаментну плиту. Схема зведення розрахункової моделі будівлі на кожному етапі наведена на рис. 4.

Такий підхід дозволяє відтворити реальний процес нарощування поверховості будівлі та поступове зростання навантаження на фундаментну систему.

Друга схема розрахунку передбачає використання аналогічної розрахункової моделі будівлі, проте **без урахування етапності зведення**. У цьому випадку всі конструктивні елементи будівлі вводяться в роботу одночасно, а навантаження прикладаються до повністю сформованої конструктивної системи.

Порівняння результатів розрахунку для зазначених схем дозволяє оцінити вплив урахування етапності зведення будівлі на напружено-деформованого стану фундаментної плити, розподіл реакцій ґрунтової основи та величину осідань фундаменту

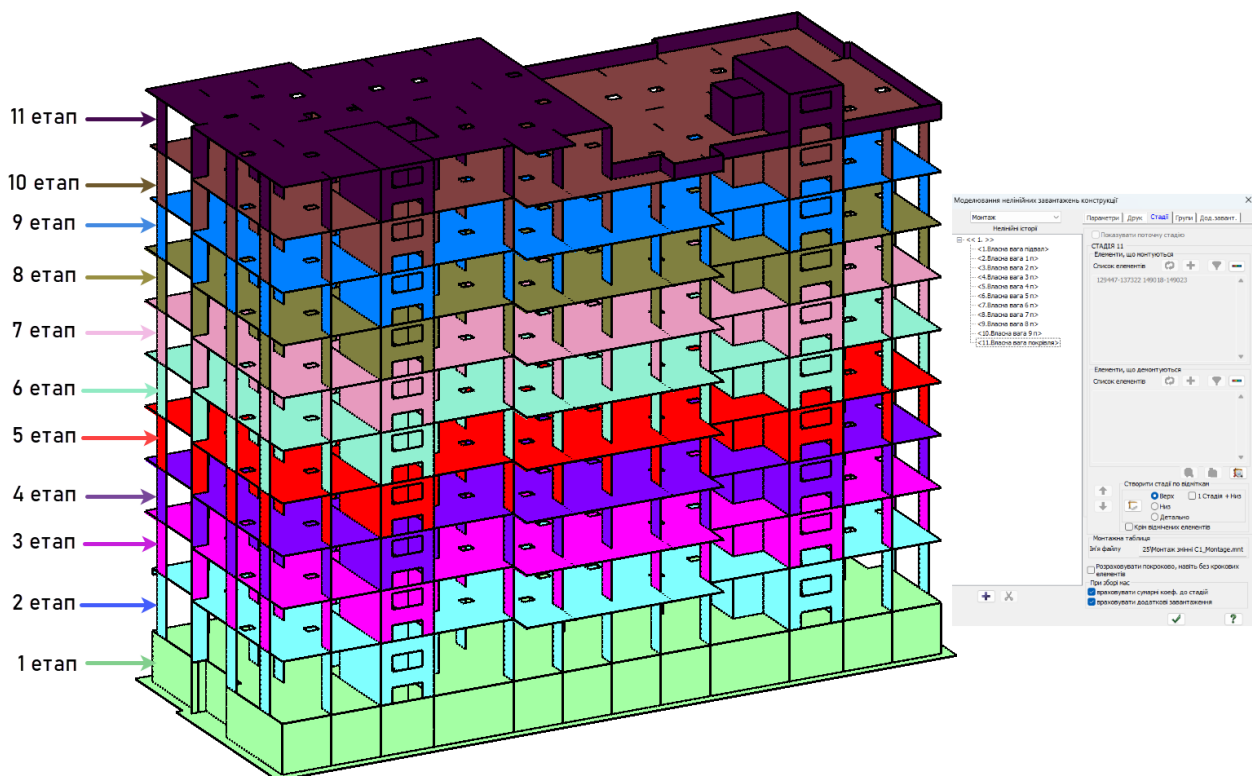


Рис.4. Схема поетапного формування розрахункової моделі будівлі

Fig.4. Scheme of the staged formation of the structural analysis model of the building

РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ОСНОВИ

Розрахунок осідань фундаментної плити будівлі виконано з використанням розрахункової схеми у вигляді лінійно-деформованого півпростору. Для визначення деформацій ґрунтової основи застосовано метод пошарового підсумовування, який дозволяє враховувати зміну напружено-деформованого стану в межах стиснутої товщі ґрунтового масиву.

Розрахункова модель основи представлена системою взаємно впливаючих розрахункових ділянок. Спільна робота просторової системи «основа – фундамент – споруда» моделювалася методом змінних коефіцієнтів жорсткості ітераційним способом із використанням системи «Ґрунт» програмного комплексу LIRA-

$$S = 0,8 \cdot W = 0,8 \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zy,i})h_i}{E_i} + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zy,i} \cdot h_i}{E_{e,i}} \right), \quad (2)$$

Де: E_i – модуль деформації i -го шару ґрунту по гілці первинного завантаження; $E_{e,i}$ – модуль деформації i -го шару ґрунту по гілці вторинного завантаження; $\sigma_{zp,i}$ – напруження в i -тому шарі ґрунту від зовнішнього навантаження; $\sigma_{zy,i}$ – напруження в i -тому шарі ґрунту від власної ваги.

Коефіцієнт пружності основи визначається за формулою:

$$C_1 = \frac{q}{S}, \quad (3)$$

$$q = \frac{P}{\eta \cdot b^2}, \quad (4)$$

Де: b – розмір меншої сторони фундаменту; η – відношення сторін фундаменту; S – осідання основи.

З метою оцінки впливу зміни жорсткісних характеристик ґрунтової основи залежно від рівня навантаження у

FEM.

У розрахунковій моделі взаємодія фундаментної плити з ґрунтовою основою враховувалася за допомогою коефіцієнтів жорсткості основи у вертикальному напрямку, які задавалися по плоских скінчених елементах, розміщених у площині ХОУ та моделюючих підшову фундаменту.

Межу стиснутої товщі визначено за формулою:

$$\sigma_{zp} = \lambda \cdot \sigma_{zg}, \quad (1)$$

Де: σ_{zp} – додаткове вертикальне напруження; σ_{zg} – вертикальне напруження від власної ваги ґрунту; λ – коефіцієнт глибини стиснутої товщі.

Осідання основи визначається за методом пошарового підсумування за наступною формулою:

дослідженні було розглянуто **два варіанти розрахункової моделі основи**.

У першому варіанті розрахунку коефіцієнти постелі визначалися **окремо для кожного етапу монтажу будівлі**. На кожній стадії зведення споруди виконувалося уточнення напруженого стану основи, після чого на основі отриманих контактних напружень та розрахункових осідань визначалися нові значення коефіцієнтів жорсткості ґрунтової основи.

Таким чином, для кожного етапу зведення будівлі формувалися власні значення коефіцієнтів постелі, що відповідали поточному рівню навантаження на фундамент. Такий підхід дозволяє врахувати зміну деформаційних характеристик ґрунтової основи в процесі поступового зростання навантаження та більш реалістично відтворити роботу системи «основа – фундамент – споруда».

Реалізація цього підходу виконувалася за допомогою механізму підзадач у системі «Ґрунт» програмного комплексу LIRA-FEM, де для кожного монтажного етапу

формувався окрема підзадача з відповідними значеннями коефіцієнтів жорсткості основи.

У другому варіанті розрахунку коефіцієнти постелі приймалися **постійними по всій площі підшви фундаменту**. Значення коефіцієнтів жорсткості визначалися один раз за максимальним розрахунковим сполученням навантажень та надалі використовувалися незмінними для всієї розрахункової моделі.

Такий підхід відповідає традиційній практиці розрахунку фундаментних плит, у якій жорсткість ґрунтової основи приймається сталою та не залежить від рівня навантаження або етапності зведення

будівлі.

Порівняння результатів розрахунку для зазначених варіантів дозволяє оцінити вплив врахування зміни жорсткості ґрунтової основи в процесі зведення будівлі на величину осідань фундаменту, розподіл контактних реакцій та напружено-деформований стан фундаментної плити.

Ізополя розподілу коефіцієнтів постелі C_1 , визначених за першим варіантом для останнього (11-го) етапу зведення каркасу наведено на рис. 5, а ізополя розподілу коефіцієнтів постелі C_1 , визначених за другим варіантом, наведено на рис. 6.

Ізополя C_1z
Одиниці виміру - kN/m^3

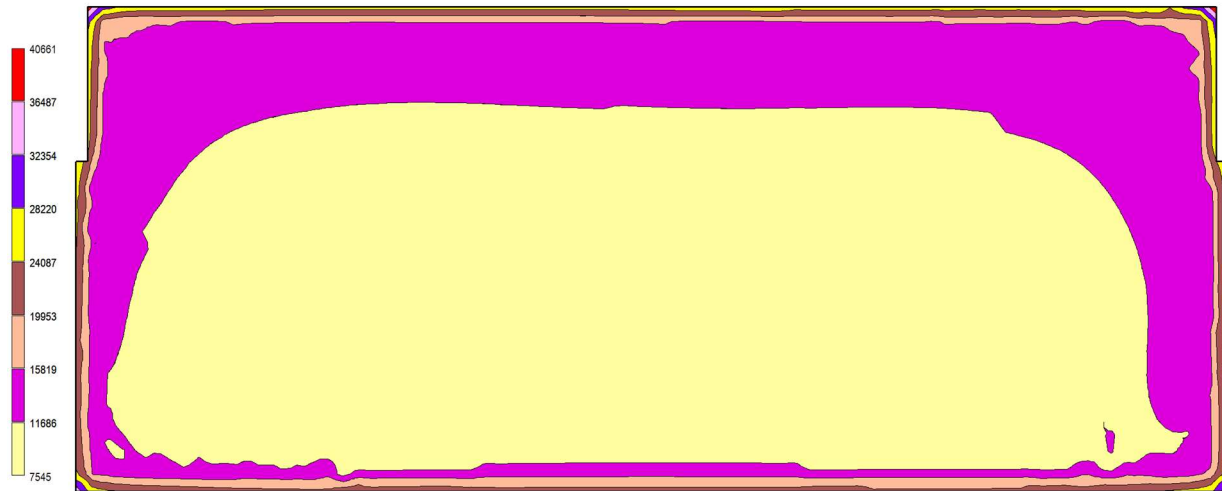


Рис.5. Ізополя розподілу коефіцієнтів постелі C_1 для першого варіанту розрахунку (11-й), kN/m^3
Fig.5. Distribution contours of the subgrade reaction coefficient C_1 for the 1st analysis case (11), kN/m^3

Ізополя C_1z
Одиниці виміру - kN/m^3

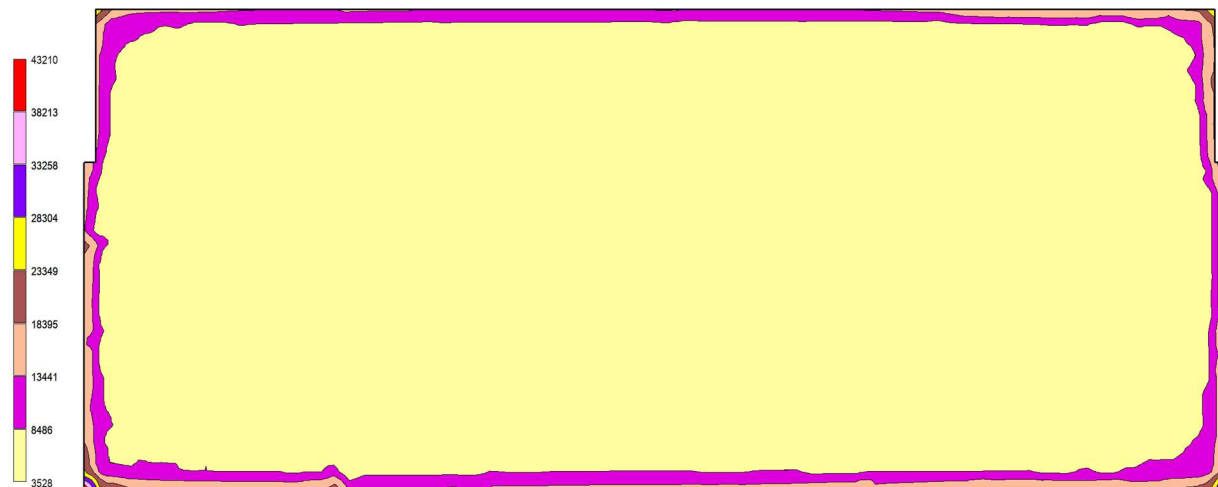


Рис.6. Ізополя розподілу коефіцієнтів постелі C_1 для другого варіанту розрахунку, kN/m^3
Fig.6. Distribution contours of the subgrade reaction coefficient C_1 for the 2nd analysis case, kN/m^3

Для оцінки впливу прийнятої розрахункової моделі ґрунтової основи на напружено-деформований стан фундаментної плити було виконано порівняння внутрішніх зусиль у плиті для двох варіантів розрахунку.

Аналіз проводився за максимальними значеннями згинальних моментів у напрямку осі X (M_x), які визначають напружений стан конструкції та безпосередньо впливають на необхідну кількість армування.

Результати розрахунку показали, що характер розподілу згинальних моментів у фундаментній плиті для обох варіантів є

подібним, що зумовлено однаковою геометрією будівлі та схемою передачі навантажень від колон каркаса. Максимальні значення моментів формуються у зонах найбільшої концентрації вертикальних навантажень.

Водночас отримані числові значення згинальних моментів мають певні відмінності. Для першого варіанту розрахунку максимальний згинальний момент M_x становить **622 кН·м/м**, тоді як для другого варіанту цей показник досягає **684 кН·м/м**.

Ізополя напружень M_x
Одиниці виміру - (кН*м)/м

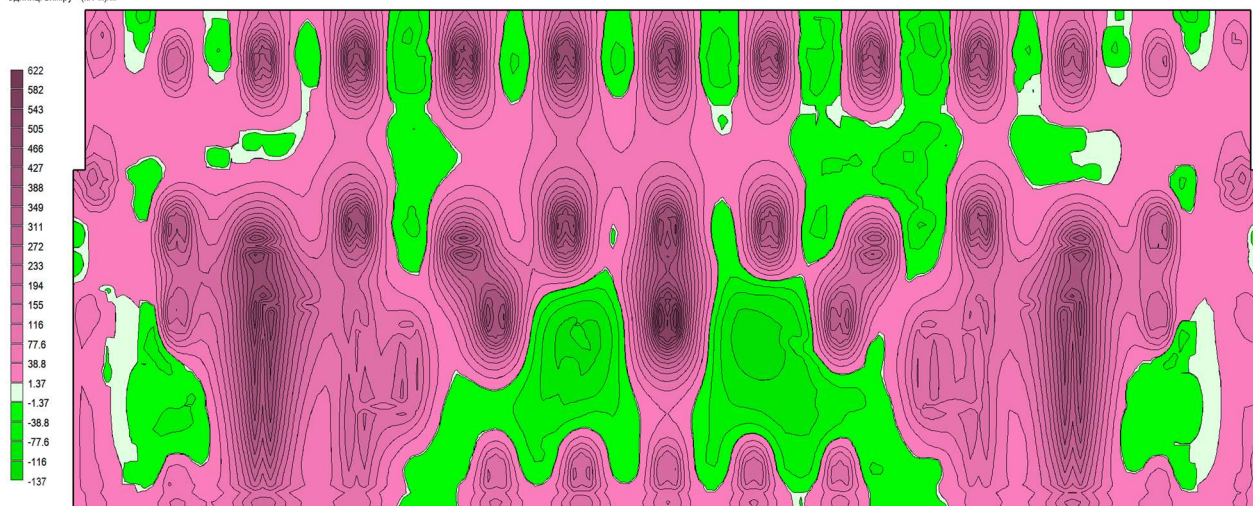


Рис.9. Ізополя максимальних напружень по M_x для першого варіанту розрахунку, (кН*м)/м

Fig.9. Contour plot of maximum stresses by M_x for the first calculation variant, (кН*м)/м

Ізополя напружень M_x
Одиниці виміру - (кН*м)/м

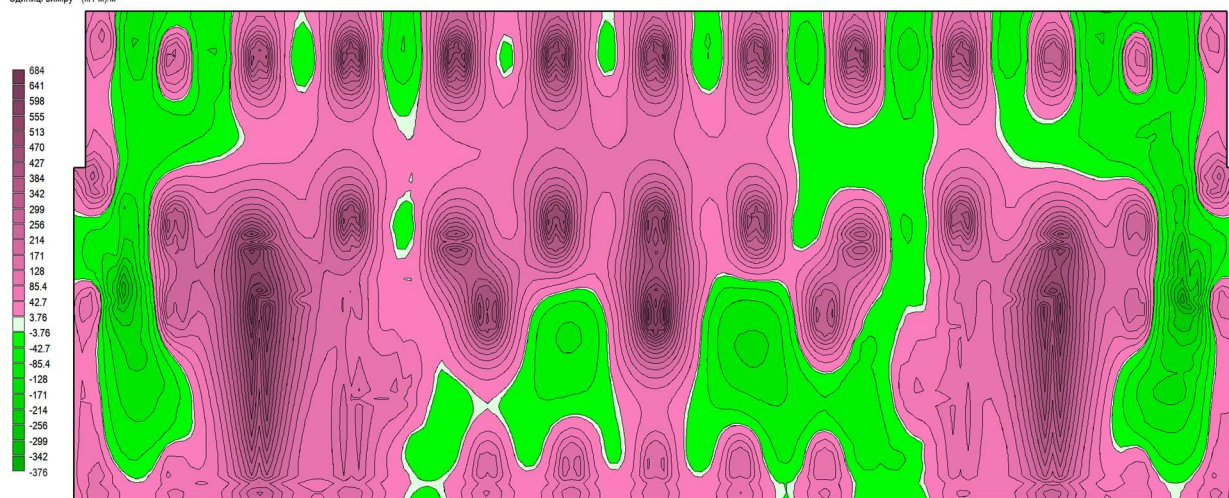


Рис.10. Ізополя максимальних напружень по M_x для другого варіанту розрахунку, (кН*м)/м

Fig.10. Contour plot of maximum stresses by M_x for the second calculation variant, (кН*м)/м

Також було виконано аналіз згинальних моментів у фундаментній плиті у напрямку осі Y (M_y), які також визначають напружений стан конструкції та впливають на необхідну кількість армування.

Порівняння результатів показало, що загальний характер розподілу моментів M_y для обох розрахункових схем залишається подібним. Найбільші значення моментів формуються у зонах розташування несучих колон, де спостерігається найбільша концентрація вертикальних навантажень, що передаються від надземної частини

будівлі на фундаментну плиту.

Разом з тим числові значення згинальних моментів відрізняються залежно від прийнятої моделі ґрунтової основи. Для розрахункової схеми, у якій враховувалася етапність зведення будівлі та змінні коефіцієнти постелі, максимальний згинальний момент M_y становить **759 кН·м/м**. У варіанті розрахунку із постійними коефіцієнтами постелі максимальне значення моменту досягає **844 кН·м/м**.

Ізополя напружень M_y
Одиниці виміру - (кН*м)/м

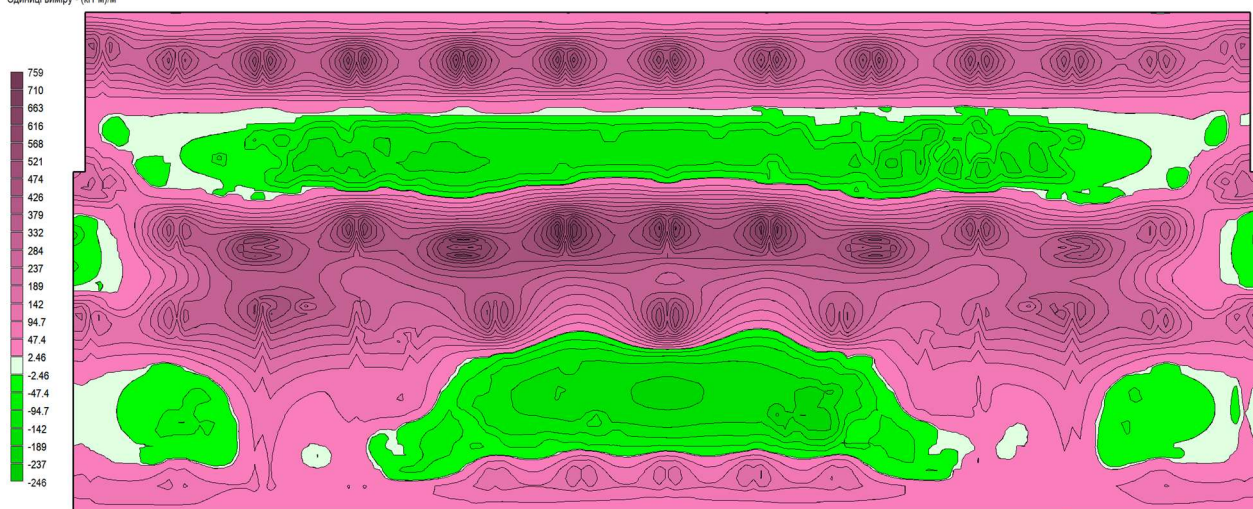


Рис. 11. Ізополя максимальних напружень по M_y для першого варіанту розрахунку, (кН*м)/м
Fig. 11. Contour plot of maximum stresses by M_y for the first calculation variant, (кН*м)/м

Ізополя напружень M_y
Одиниці виміру - (кН*м)/м

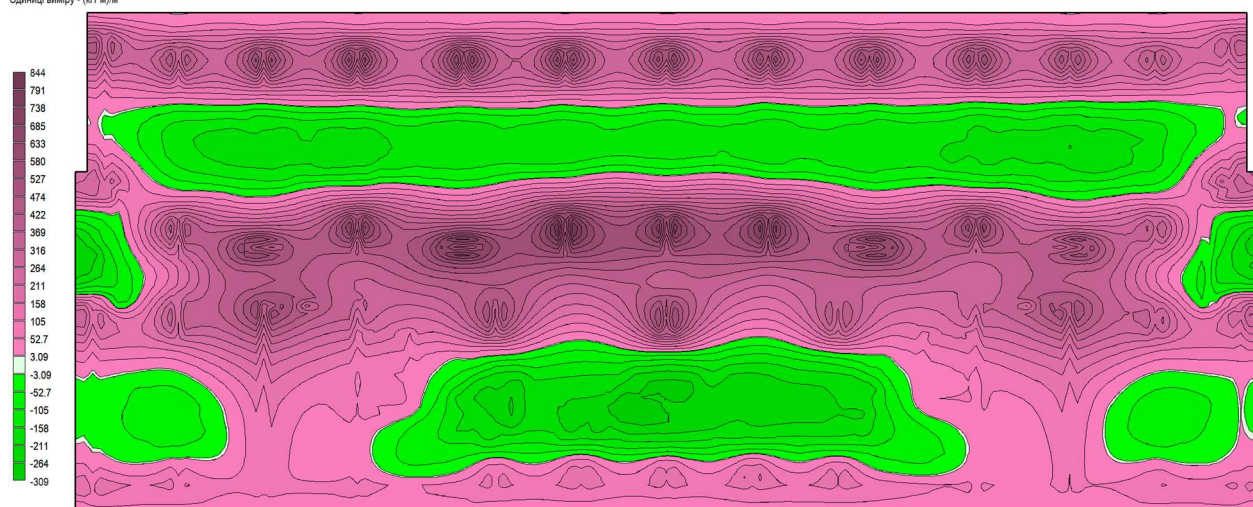


Рис. 12. Ізополя максимальних напружень по M_y для другого варіанту розрахунку, (кН*м)/м
Fig. 12. Contour plot of maximum stresses by M_y for the second calculation variant, (кН*м)/м

На основі отриманих значень внутрішніх зусиль у фундаментній плиті було виконано підбір необхідної площі робочої арматури. Порівняння результатів для двох розрахункових варіантів показує, що характер розподілу зон армування в обох випадках є подібним, що зумовлено однаковою геометрією конструкції та схемою передачі навантажень від колон каркасу.

Разом з тим значення необхідної площі армування відрізняються. У варіанті розрахунку, де враховано етапність зведення будівлі та зміну коефіцієнтів постелі, отримані менші значення необхідної площі арматури. У варіанті

розрахунку без урахування етапності зведення будівлі спостерігається збільшення зон із підвищеною потребою в армуванні.

Таким чином, врахування етапності зведення будівлі та змінної жорсткості ґрунтової основи призводить до зменшення розрахункових внутрішніх зусиль у фундаментній плиті та, відповідно, до зменшення необхідної площі робочої арматури.

Ізополя необхідної площі нижнього армування фундаментної плити для розглянутих варіантів розрахунку наведено на рис. 13–16.

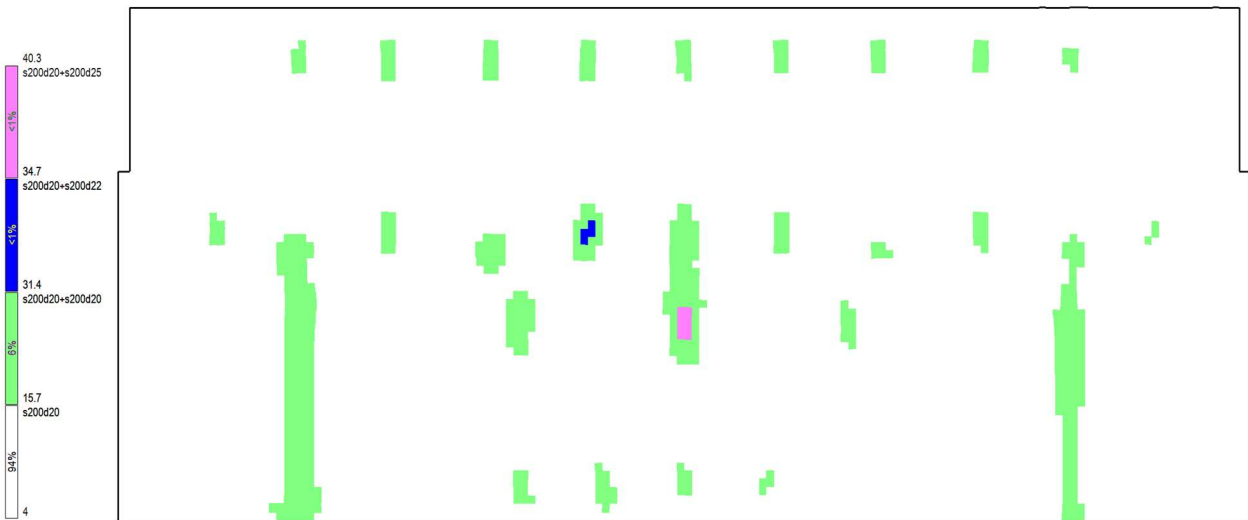


Рис. 13. Розрахункові зони армування нижньої зони вздовж осі «X» для першого варіанту розрахунку
 Fig. 13. Required bottom reinforcement zones in the «X» direction for the first analysis case

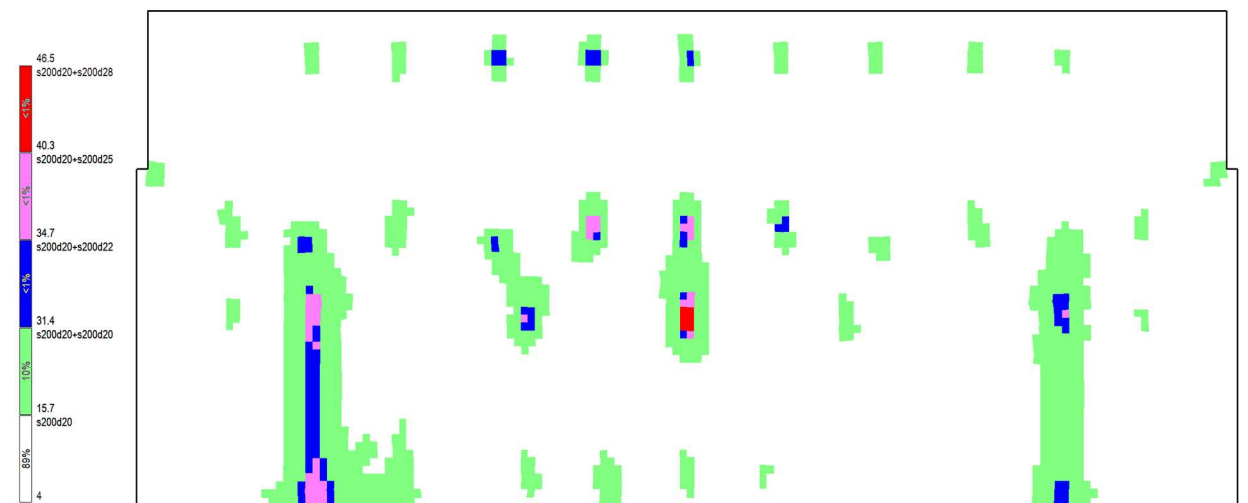


Рис. 14. Розрахункові зони армування нижньої зони вздовж осі «X» для другого варіанту розрахунку
 Fig. 14. Required bottom reinforcement zones in the «X» direction for the second analysis case

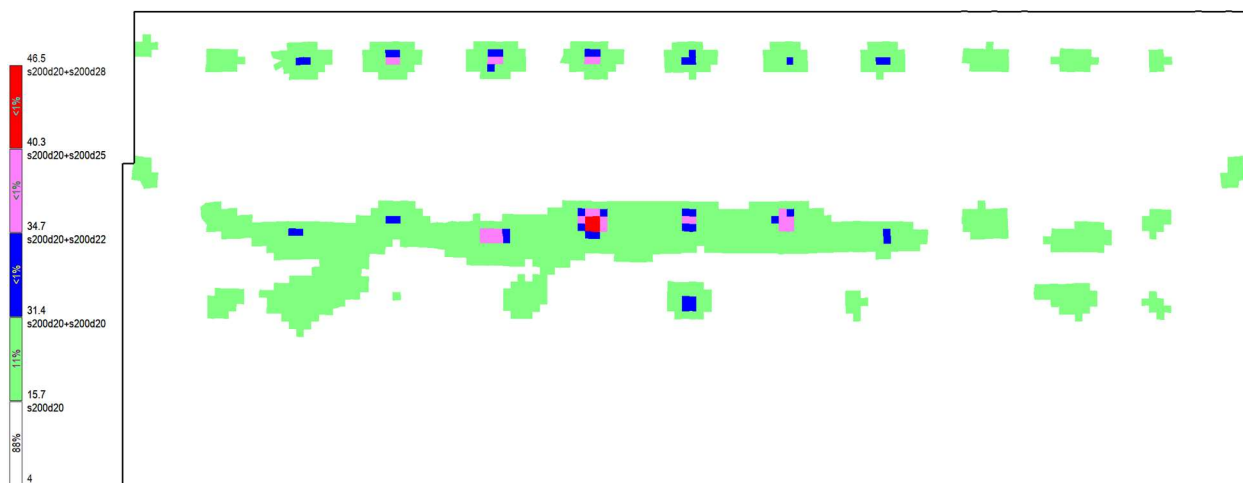


Рис.15.Розрахункові зони армування нижньої зони вздовж осі «Y» для першого варіанту розрахунку
Fig.15. Required bottom reinforcement zones in the «Y» direction for the first analysis case

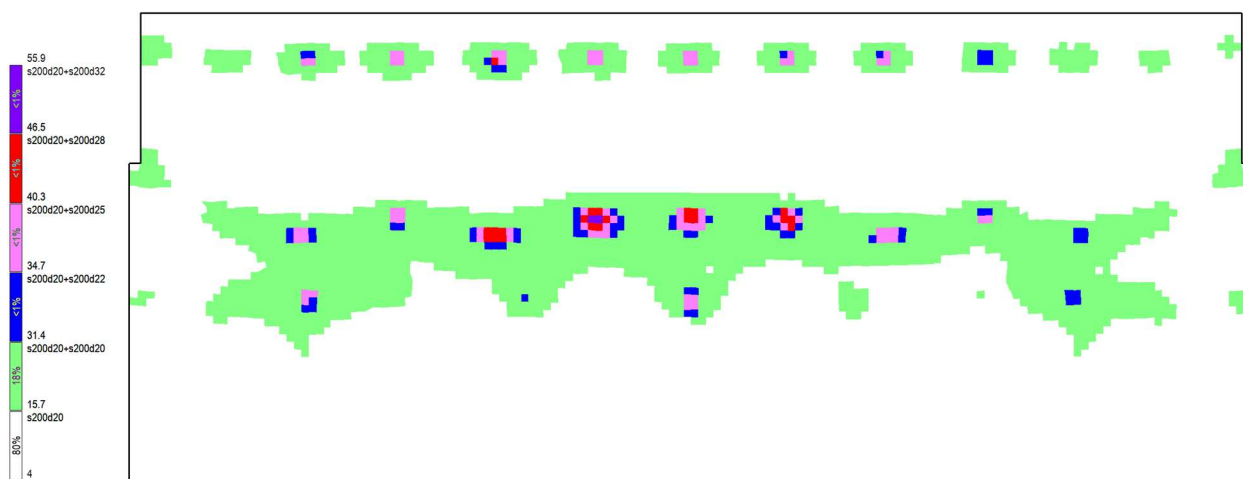


Рис.16.Розрахункові зони армування нижньої зони вздовж осі «Y» для другого варіанту розрахунку
Fig.16. Required bottom reinforcement zones in the «Y» direction for the second analysis case

Табл. 1: Прийнята за розрахунками вага армування зон фундаментної плити
Table 1. Calculated reinforcement weight adopted for the foundation slab zones

Найменування	1-й варіант (монтаж)	2-й варіант	Різниця, кг	Різниця, %
Нижня вздовж осі «X»	13753	15183	1430	9,42
Нижня вздовж осі «Y»	15134	17053	1919	11,25
Верхня вздовж осі «X»	5361	6308	947	15,01
Верхня вздовж осі «Y»	5948	6195	247	3,99
Сумарно	40196	44739	4543	10,15

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У результаті проведеного дослідження встановлено, що врахування етапності зведення будівлі та змінної жорсткості ґрунтової основи суттєво впливає на напружено-деформований стан системи

«основа–фундамент–будівля».

Виконані числові розрахунки показали, що застосування моделі зі змінними коефіцієнтами постелі, які уточнюються на кожному етапі монтажу будівлі, дозволяє більш реалістично відобразити роботу ґрунтової основи в процесі поступового

© Л. Бондарева, В. Беган, Т. Диптан

Опубліковано Київським Національним університетом будівництва і архітектури

зростання навантажень. У порівнянні з традиційною схемою із постійними коефіцієнтами постелі отримано **менші значення** осідань фундаментної плити та внутрішніх зусиль у конструкції.

Встановлено, що максимальне осідання фундаментної плити для розрахункової схеми з урахуванням етапності зведення та змінних коефіцієнтів постелі становить **28,3 мм**, тоді як для моделі з постійними коефіцієнтами постелі — **44,5 мм**. Таким чином, різниця між результатами розрахунку є суттєвою та підтверджує вплив прийнятої моделі основи на результати оцінки деформацій фундаменту.

Аналіз внутрішніх зусиль показав, що врахування змінної жорсткості основи та стадійності зведення призводить до зменшення максимальних згинальних моментів у фундаментній плиті. Максимальний момент по M_x **зменшився** з **684 кН·м/м** до **622 кН·м/м**, а максимальний момент M_y — з **844 кН·м/м** до **759 кН·м/м**.

На основі отриманих результатів армування фундаментної плити встановлено, що використання уточненої розрахункової моделі (з врахуванням монтажу та змінних коефіцієнтів постелі) дозволяє зменшити необхідну кількість робочої арматури. Загальна економія армування для фундаментної плити склала близько **10,15%** (приблизно **168000 грн**) у порівнянні з традиційною моделлю розрахунку із постійними коефіцієнтами постелі.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування числового моделювання з урахуванням етапності зведення та змінних коефіцієнтів жорсткості основи при проєктуванні фундаментних плит багатоповерхових будівель. Такий підхід дозволяє підвищити достовірність оцінки напружено-деформованого стану конструкцій, оптимізувати витрати матеріалів та забезпечити необхідний рівень надійності й експлуатаційної придатності будівлі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Міністерство розвитку громад та територій України. (2018). Основи та фундаменти споруд. Основні положення проєктування (ДБН В.2.1-10:2018). Мінрегіон України.
2. Бойко, І. П., Жук, В. В., Корнієнко, М. В., & Сахаров, О. С. (2004). Напружено-деформований стан пальового фундаменту висотної каркасної будівлі з урахуванням спільної роботи з ґрунтовим масивом. Будівельні конструкції, 61(1), 19–22.
3. Підлуцький, В. Л. (2022). Дослідження впливу складного навантаження на фундаменти неглибокого закладання та формування реактивної епюри в ґрунтовій основі. Основи та фундаменти, 45, 55–67. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.45.2022.55-67>
4. Максименко, В. П., & Войтенко, П. В. (2011). Дослідження напружено-деформованого стану фундаментної плити на основі тривимірної моделі. Сучасне промислове та цивільне будівництво, 7(4), 193–203.
5. Барабаш, М. С., Кір'язев, П. М., Лапенко, О. І., & Ромашкіна, М. А. (2019). Основи комп'ютерного моделювання (2-ге вид.). Національний авіаційний університет.
6. Носенко, В., & Кашоїда, О. (2020). Вплив моделі ґрунтової основи та паль на напружено-деформований стан фундаменту і несучих конструкцій висотного будинку. In Conference Proceedings of International Scientific-Practical Conference of Young Scientists "BUILD-MASTER-CLASS-2020" (pp. 130–131). Kyiv National University of Construction and Architecture.

REFERENCES

1. Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. (2018). Osnovy ta fundamenty sporud. Osnovni polozhennia proiektuvannia (DBN V.2.1-10:2018) [Bases and foundations of structures. Basic design provisions (DBN V.2.1-10:2018)]. Minrehion Ukrainy.
2. Boiko, I. P., Zhuk, V. V., Korniienko, M. V., & Sakharov, O. S. (2004). Napruzhenodeformovanyi stan palovoho fundamentu vysotnoi karkasnoi budivli z urakhuvanniam spilnoi roboty z gruntovym masyvom [Stress-strain state of a pile foundation of a high-rise frame building considering interaction with the

- soil mass]. *Budivelni Konstruktsii* [Building Structures], 61(1), 19–22.
3. Pidlutskyi, V. L. (2022). Doslidzhennia vplyvu skladnoho navantazhennia na fundamentei nehlybokoho zakladannia ta formuvannia reaktyvnoi epiury v gruntovii osnovi [Investigation of the influence of complex loading on shallow foundations and formation of the reactive pressure diagram in the soil base]. *Osnovy ta Fundamenti* [Bases and Foundations], 45, 55–67. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.45.2022.55-67>
 4. Maksymenko, V. P., & Voitenko, P. V. (2011). Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu fundamentnoi plyty na osnovi tryvymirnoi modeli [Investigation of the stress-strain state of a foundation slab based on a three-dimensional model]. *Suchasne Promyslove ta Tsyvilne Budivnytstvo* [Modern Industrial and Civil Construction], 7(4), 193–203.
 5. Barabash, M. S., Kiriaziev, P. M., Lapenko, O. I., & Romashkina, M. A. (2019). *Osnovy kompiuternoho modeliuвання* [Fundamentals of computer modeling] (2nd ed.). National Aviation University.
 6. Nosenko, V., & Kashoida, O. (2020). Vplyv modeli gruntovoi osnovy ta pal na napruzhenno-deformovanyi stan fundamentu i nesuchykh konstruktsii vysotnoho budynku [Influence of the soil foundation and pile model on the stress-strain state of the foundation and load-bearing structures of a high-rise building]. In *Conference Proceedings of the International Scientific-Practical Conference of Young Scientists "BUILD-MASTER-CLASS-2020"* (pp. 130–131). Kyiv National University of Construction and Architecture.

Assessment of the Influence of Variable Soil Stiffness and Staged Construction on the Stress–Strain State of a Foundation Slab

*Liudmyla BONDAREVA,
Vasyl BEHAN
Tetiana DYPTAN*

Abstract. In modern practice of designing foundation slabs for multi-storey buildings, the analysis of the interaction within the “soil–foundation–structure” system is most commonly performed using simplified soil models in which the subgrade reaction coefficients are assumed to be constant over the entire foundation area and unchanged throughout all loading stages. Such an approach significantly

© Л. Бондарева, В. Беган, Т. Диптан

simplifies the calculation process; however, it does not fully reflect the actual behaviour of the soil mass, whose stiffness changes depending on the loading level, stress-strain state, and construction sequence of the structure.

This study investigates the influence of considering the staged construction process and variable stiffness of the soil base on the stress-strain state of a foundation slab of a multi-storey reinforced concrete frame building. Different variants of soil foundation models were analysed, differing in the approach to determining subgrade reaction coefficients and in the consideration of the staged formation of the structural system during construction.

Numerical modelling was performed using the finite element method in the “LIRA-FEM” software package with the application of the “Montage” and “Soil” systems. The modelling process considered the staged activation of structural elements, gradual application of loads, accumulation of deformations at previous construction stages, and variation of the soil stiffness characteristics depending on the current loading level.

A comparative analysis of the calculation results was carried out in terms of foundation slab settlements, internal forces, and required reinforcement areas. The obtained results showed that consideration of the construction sequence and variable soil stiffness significantly affects the stress-strain state of the foundation structure, the distribution pattern of internal forces, and the required amount of reinforcement.

It was established that the use of a more detailed calculation model of the “soil–foundation–structure” system makes it possible to refine the analysis results of the foundation slab and improve the reliability of evaluating its behaviour under real operating conditions. The obtained results confirm the feasibility of considering staged construction and variable soil stiffness in the design of foundation structures in order to optimize structural solutions, reduce material consumption, and ensure the required reliability and serviceability of buildings.

Key words. LIRA-FEM, numerical modelling, variable subgrade reaction coefficients.

Стаття надійшла до видання:
13.05.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування:
21.05.2026.

Стаття опублікована:
30.05.2026