

Апробація удосконаленої моделі ґрунтової основи для моделювання багатосекційних будівель на пальових фундаментах

Сергій ТАБАЧНИКОВ¹

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова
17, вул. Черноглазівська, Харків, Україна, 61002
¹s.v.tabachnikov@ukr.net, orcid.org/0000-0002-2619-8612

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.269-285

Анотація. На сьогоднішній день у будівельній галузі при будівництві багатоповерхових будівель і споруд із значними навантаженнями на основу у вигляді нескількох ґрунтів використовуються великорозмірні плитні та пальово-плитні фундаменти. Однією з основних тенденцій при зведенні житлових комплексів є секційність багатоповерхових будівель. Метою цієї статті є апробація удосконаленої моделі ґрунтової основи у вигляді суцільного «ступінчастого» шару скінченної розподільчої здатності та її параметрів на підставі порівняння результатів чисельних розрахунків і спостережень за осіданнями трисекційної багатоповерхової будівлі на пальово-плитних фундаментах в процесі будівництва.

На підготовчому етапі досліджень для верифікації поведінки взаємодії одиночної палі з ґрунтовою основою було створено відповідну скінченно елементну модель системи «ґрунтова основа – одиночна паля». Отримані максимальні значення осідання модельних паль за результатами чисельних розрахунків було порівняно із результатами натурних випробувань ґрунтів палями, що підтвердило відповідність отриманих розрахункових значень.

Виконано моделювання та розрахунок поряд розташованих пальово-плитних фундаментів трисекційної багатоповерхової будівлі з урахуванням різної поверховості секцій в процесі будівництва у системі «основа – фундаменти – споруди», що взаємодіє із удосконаленою моделлю ґрунтової основи у вигляді суцільного «ступінчастого» шару скінченної розподільчої здатності. Отримані розрахункові значення порівняно із результатами багаторічних натурних спостережень за осіданнями кожної секції будівлі в процесі будівництва. З метою виявлення



Сергій ТАБАЧНИКОВ

доцент кафедри
геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва
к.т.н., доц.

фактору впливу послідовності зведення будівлі із урахуванням секційності, було проаналізовано розподілення розрахункових реакцій у головах паль однієї з секцій. Результати досліджень підтвердили можливість застосування удосконаленої моделі ґрунтової основи для прогнозування деформацій різноповерхових секційних будівель на великорозмірних пальово-плитних фундаментах, в основі яких залягають структурно стійкі дисперсні ґрунти. Результати чисельних досліджень показують, що врахування у моделі основи різних величин стисливих товщ під різно навантаженими фундаментами в поєднанні з підвищеним модулем деформації, запропонованим професором Самородовим О.В., дозволяє найбільш точно моделювати осідання кожної із секцій трисекційної будівлі.

Ключові слова. Різноповерхова будівля, пальово-плитні фундаменти, ґрунтова основа, стислива товща, модуль деформації, модель, удосконалення, натурні спостереження, осідання

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У сучасному будівництві багатоповерхових будівель та споруд, зокрема при значних навантаженнях на ґрунтову основу, що складається з нескільких ґрунтів, широко використовуються великорозмірні плитні та пальово-плитні фундаменти. Однією з характерних рис сучасних житлових комплексів є секційність будівель. При проектуванні таких секційних багатоповерхових споруд основною умовою є дотримання нормативів щодо гранично допустимих деформацій основи (ДБН В.2.1–10:2018, 2018).

Згідно з чинними нормативними документами, результатами розрахунків є теоретичні значення середнього осідання та крену будівлі. Однак у практиці проектування великорозмірних плитних та пальово-плитних фундаментів ці розрахункові значення часто значно перевищують фактичні, що підтверджується даними моніторингу осідань багатоповерхівок, наведеними в роботах (Кушнер, 2008; Самородов, 2017; Katzenbach, 2015).

Коли розраховані осідання фундаменту на природній основі перевищують гранично допустимі значення, проектувальники змушені вживати додаткових заходів для зниження деформацій, найчастіше шляхом переходу до пальово-плитної конструкції фундаменту. Такий підхід істотно підвищує вартість будівництва. Тому виникає необхідність у вдосконаленні та оптимізації проектних рішень на основі реальної поведінки об'єктів.

Сучасні наукові досягнення в галузі геотехніки, результати інструментального моніторингу та використання потужних програмних комплексів відкривають можливість для більш точного моделювання взаємодії системи «основа – фундаменти – споруди» («ОФС»). Це дозволяє враховувати різні моделі поведінки ґрунтів, послідовність будівництва та взаємовплив секцій споруди при їх зведенні.

МЕТА РОБОТИ

Метою дослідження є перевірка ефективності удосконаленої моделі ґрунтової основи, яка представлена у вигляді суцільного «ступінчастого» шару зі скінченною розподільною здатністю (Самородов та Табачников, 2023, 2024), а також визначення її параметрів для прогнозування фактичних осідань п'ятисекційної багатоповерхової будівлі. Обґрунтування вибору саме цієї моделі базується на зіставленні результатів чисельного моделювання з фактичними даними спостережень за осіданням двадцяти одноповерхового житлового будинку на пальово-плитних фундаментах у процесі будівництва.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сьогодні при інженерних розрахунках основ та фундаментів широко застосовується модель ґрунтової основи у вигляді суцільного лінійно-деформованого шару, так як вона пропонується державними будівельними нормами (ДБН В.2.1–10:2018, 2018) та вимагає завдання лише товщини шару H (стисливої товщі) та деформаційних характеристик ґрунту (модуля загальної деформації E та коефіцієнта Пуассона ν) та не має обмежень у плані. При моделюванні та чисельних розрахунках системи «основа – фундаменти – споруди» у сучасних розрахункових комплексах SOFiSTiK, ABAQUS, Plaxis, SCAD, Ліра тощо, які є повсякденним інструментом інженерів-геотехніків, у просторовій постановці задачі найчастіше застосовується модель ґрунтової основи у вигляді суцільного шару скінченної розподільчої здатності приведено на Рис. 1 (Винников, 2005; Numerik in der Geotechnik, 2014; Бойко, 2012; Носенко, 2012; Скочко, 2020; Mirlatifi, 2022), яка, крім обмеження вертикальних деформацій на деякій глибині H , також має обмеження горизонтальних деформацій на відстані від навантаження у плані ($B \times L$).

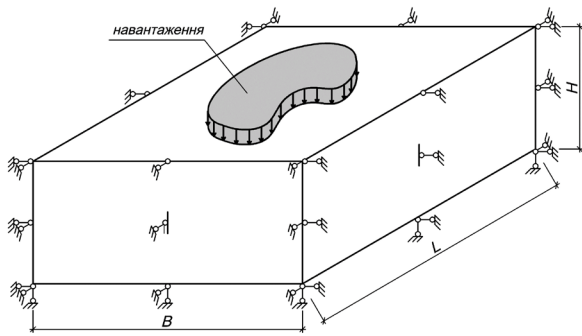


Рис.1. Модель ґрунтової основи у вигляді суцільного шару скінченної розподільчої здатності (для просторових задач)
 Fig.1. Soil base model in the form of a continuous layer of finite distribution capability (for three-dimensional solutions)

Такі граничні умови моделі ґрунтуються на тому, що при дії зовнішніх навантажень на ґрунтову основу утворюється просторова область деформування, за межами якої деформаціями ґрунту можна знехтувати, так як додаткове навантаження на межах ґрунтового масиву не перевищує структурної міцності ґрунту (Лучковський, 2000; Тер-Мартirosyan, 2009). При цьому для самої моделі можуть задаватися будь-які закономірності деформування ґрунтів під навантаженнями, в тому числі й у часі. До найбільш розповсюдженою та обґрунтованою моделі поведінки ґрунтів основи можна віднести лінійно-деформовану модель, яка, наприклад

в Plaxis, має назву лінійно-пружна модель Linear Elastic (LE) (Plaxis, 2020), яка заснована на законі Гука для ізотропної пружності. У цій моделі містяться всього два основних параметри: модуль Юнга (модуль пружності) E , kH/m^2 та коефіцієнт Пуассона ν , од.

У попередніх наших публікаціях (Самородов та Табачников, 2023, 2024, 2025) запропоновано та обґрунтовано удосконалену модель ґрунтової основи у вигляді суцільного «ступінчастого» шару скінченної розподільчої здатності (ССШСРЗ), де нижня границя моделі має ступінчастий геометричний профіль через різні величини стислих товщ під кожним фундаментом, що дає змогу адекватно враховувати взаємодію великорозмірних фундаментів поряд розташованих різноповерхових споруд, в тому числі на пальових фундаментах.

На Рис. 2 показано приклад побудови ступінчастої границі нижнього шару удосконаленої моделі ґрунтової основи l , яка має параметри фізико-механічних характеристик ґрунтів основи і розподільчу здатність, що враховується кутом α (Samorodov & Tabachnikov, 2024), та різні величини стислих товщ (активних зон деформування) $H_{p,i}$ під кожним фундаментом споруд шириною b_i , які передають навантаження на основу p_i .

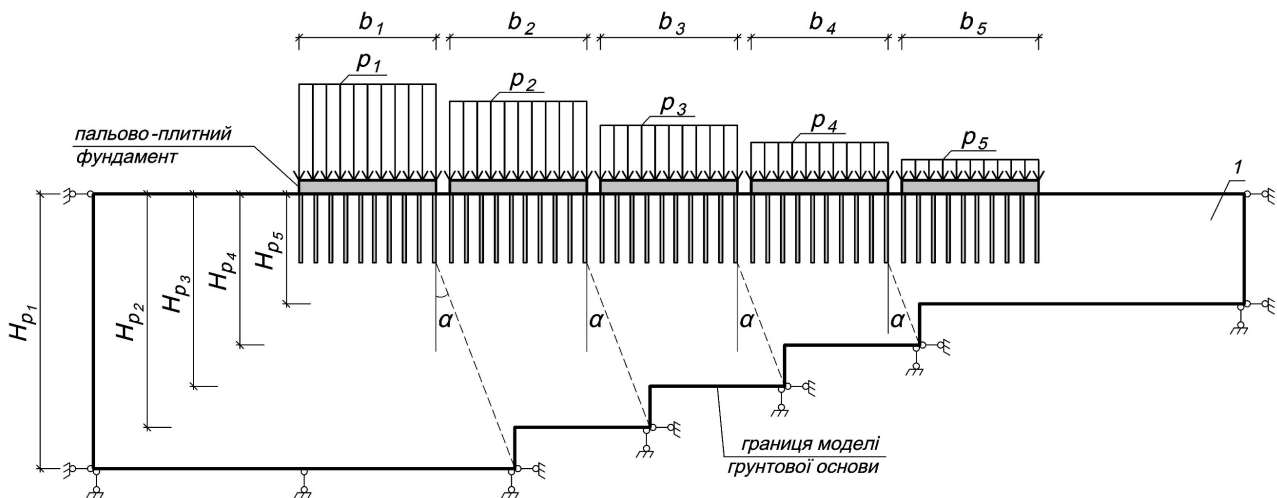


Рис.2. Приклад побудови нижньої границі удосконаленої моделі ґрунтової основи у вигляді ССШСРЗ
 Fig.2. An example of building the lower boundary of the improved soil base model

Об'єктом дослідження є деформації ґрунтової основи пальново-плитних фундаментів поряд розташованих житлових двадцятиодноповерхових будівель з підземним поверхом. Район будівництва – Україна, м. Харків, Шевченківський район, вул. Клочківська, 117. Враховуючи дотримання послідовності зведення будівлі та зведення перших

трьох секцій у першу чергу, в даній роботі проаналізовано взаємодію фундаментних конструкцій з ґрунтовою основою саме цих секцій. Загальний вигляд розташування будівлі в процесі будівництва представлений на рис. 3 (дослідна будівля 1, секції 1, 2, 3).

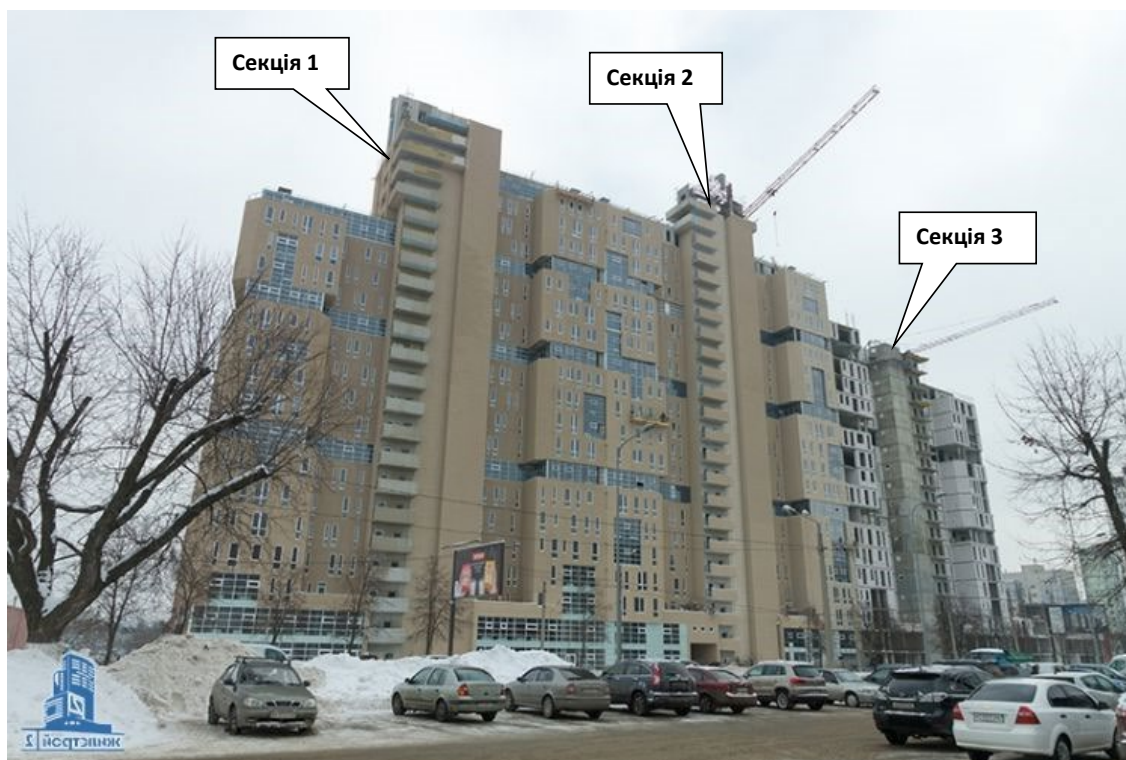


Рис.3. Загальний вигляд дослідною будівлі в процесі будівництва
Fig.3. General view of the experimental building under construction.

Секції будівлі є подібними, а в плані кожна секція є дзеркальним відображенням поряд розташованої. В межах 17-го поверху секції 1 та секції 3 виконано зменшення площі поверху, що можна побачити на фото.

Конструктивна схема будівлі — зв'язева. Будівля має монолітний залізобетонний повний каркас, що складається з безбалкових перекриттів, колон, ядер і діафрагм жорсткості. Просторова стійкість будівлі забезпечується діафрагмами та ядрами жорсткості, з'єднаними жорсткими дисками перекриттів. Діафрагми жорсткості прийняті перерізом 400, 300 та 250 мм. Стіни ядер жорсткості – перерізом 250 та 200 мм. Стіни

цокольного поверху – товщиною 250 мм. Колони – монолітні залізобетонні перерізом 600×600 мм, 600×700 мм, а також круглим діаметром 500 мм. Перекриття – монолітні залізобетонні безбалкові, товщиною 200 мм. Фундаменти – пальново-плитні. Палі бурін'єкційні діаметром 630 мм та довжиною 11 м об'єднані монолітним залізобетонним плитним ростверком товщиною 900 мм. Низ ростверку прийнято на абсолютній відмітці 104,50 м. Абсолютна відмітка закладання нижніх кінців паль – 93,50м.

В геологічній будові досліджуваної території до глибини 25,0 м (зверху вниз) беруть участь неоген-четвертинні відкладення, які

представлено алювіально-делювіальними суглинками та пісками, які перекрито незначним шаром насипних ґрунтів та ґрунтами з домішками рослинних залишків. Нижче залягають блакитно-сірі глини верхнього палеогену. Гідрогеологічні умови території вишукувань характеризуються наявністю

алювіального та бучакського водоносних горизонтів. На момент вишукувань 2014 року сталий рівень ґрунтових вод зафіксовано в межах абс. відм. 103,30-104,30 м.

Інженерно-геологічний розріз з умовним розташуванням пальово-плитних фундаментів наведено нижче на Рис. 4.

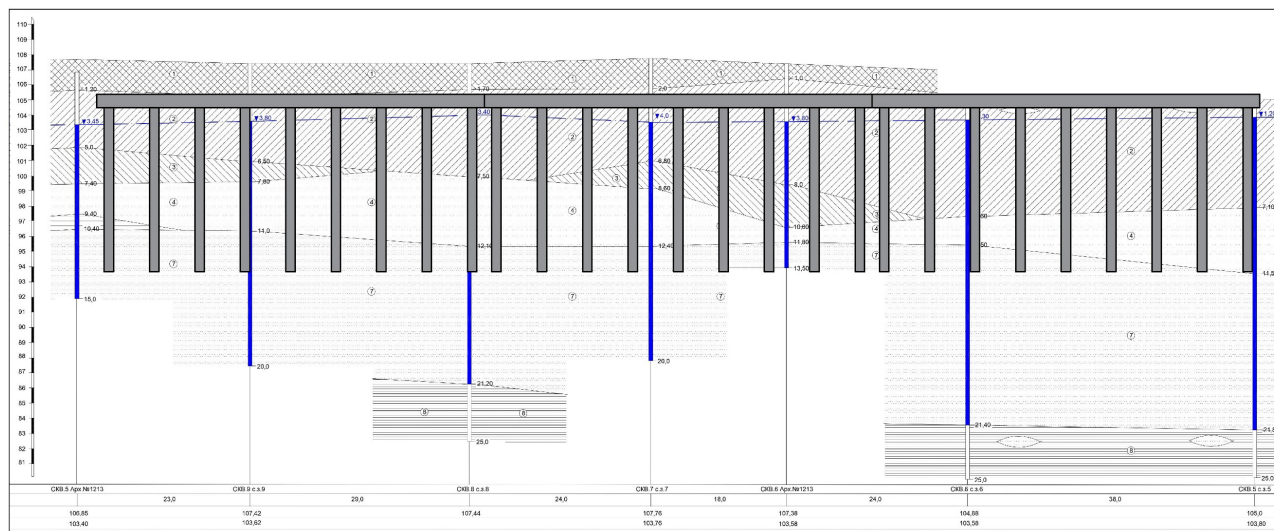


Рис.4. Умовне розташування пальово-плитних фундаментів Секцій 1, 2, 3 на інженерно-геологічному розрізі

Fig.4. Conventional layout of the pile-raft foundations of Sections 1, 2, and 3 on the engineering-geological cross-section

Опис ґрунтів представлено в Табл. 1. Основні фізико-механічні властивості ґрунтів, де дослідні характеристики представлені як розрахункові при довірчій ймовірності 0,85,

приведені до відповідності показано на Рис. 5 до інженерно-геологічних умов ділянки в межах дослідного будинку приведено в Табл.2.

Табл. 1. Найменування та опис ґрунтів
Table 1. Soils description

Номер ІГЕ	Найменування та опис ґрунтів
ІГЕ-1	Насипні ґрунти – суглинки темно-сірі, коричнево-бурі, піски жовті з домішками цегляної крихти та будівельного сміття до 25%, злежані.
ІГЕ-2	Суглинок м'якопластичної консистенції, у водонасиченому стані – текучопластичної консистенції.
ІГЕ-3	Глини темно-сірі, з домішками рослинних решток, тугопластичної консистенції, у водонасиченому стані – тугопластичної консистенції.
ІГЕ-4	Піски сірі, зеленувато-сірі з жовтуватим відтінком, дрібні, однорідні, від середньої щільності до щільних, насичені водою.
ІГЕ-5	Піски сірі, середньої крупності, однорідні, щільні, насичені водою.
ІГЕ-6	Глини блакитно-сірі, тугопластичної консистенції, у водонасиченому стані тугопластичної консистенції.
ІГЕ-7	Піски темно-сірі, сірі, пилюваті, однорідні, щільні, насичені водою

Табл. 2. Фізико-механічні властивості ґрунтів
Table 2. Physical and mechanical properties of soils

Характеристика ґрунту	Умовні позначення	Одиниці вимірювання	Шар				
			ПЕ-1	ПЕ-2	ПЕ-3	ПЕ-4	ПЕ-5
Пит. вага ґрунту	γ	кН/м ³	16,3	18,67	18,85	19,70	18,34
Пит. вага водонас. ґрунту	γ_{sat}	кН/м ³	-	19,05	19,23	19,61	18,35
Пит. вага частин ґрунту	γ_s	кН/м ³	-	26,59	26,09	26,0	25,87
Пит. вага зваж. в воді ґрунту	γ_{sb}	кН/м ³	-	9,37	9,61	10,12	8,90
Природна вологість	W	д.од.	-	0,24	0,23	0,21	0,28
Показник текучості	I_L	д.од.	-	0,9	-	-	0,09
Число пластичності	I_p	д.од.	-	0,1	-	-	0,11
Кут внутр. тертя	ϕ	град.	-	16	30	33	28
Пит. зчеплення ґрунту	c	кПа	-	17	2	4	22
Коеф. пористості	e	д.од.	-	0,74	0,70	0,58	0,78
Модуль деформації в водонасиченому стані	E_{sat}	МПа	-	10	24	25	17

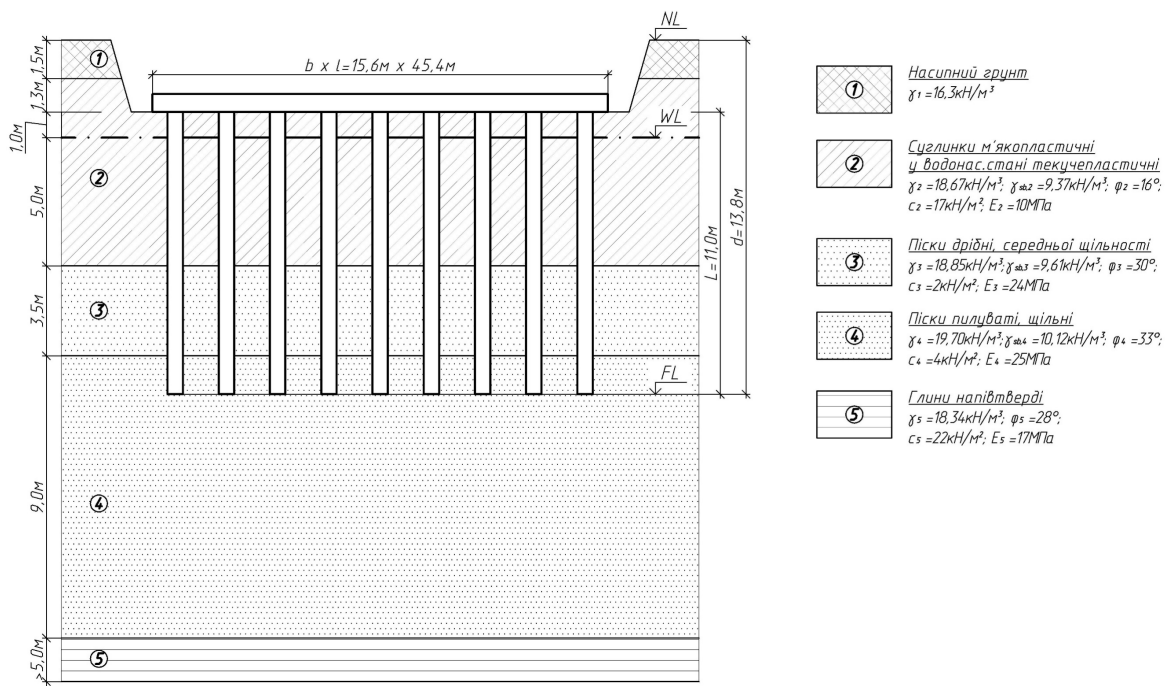


Рис.5. Принципова схема розташування пальово-плитних фундаментів Секцій 1, 2, 3 на інженерно-геологічному розрізі

Fig.5. Principal layout of the pile-raft foundations of Sections 1, 2, and 3 on the engineering-geological cross-section

Попередні розрахунки показали, що максимальний середній тиск під умовним фундаментом тільки від власної ваги зведених конструкцій без введення підвищувальних коефіцієнтів не перевищує розрахункового

опору ґрунту основи: $p = 215,0 \text{ кПа} < R = 1850,0 \text{ кПа}$, що дає змогу виконувати розрахунок фундаментів за деформаціями основи на основі лінійно-деформованої моделі поведінки ґрунту під

навантаженням.

Моделювання системи «основа – фундаменти – споруди» та результати розрахунків.

На ділянці будівництва в межах секції 1 та 2 було виконано натурні випробування ґрунтів палями. Установкою для випробувань слугувала конструкція анкерного стенда СА-600 показано на Рис. 6, що складається з металевих балок і анкерується в ґрунт за допомогою металевих гвинтових палей. Для контрольних випробувань в якості анкерних палей використовувались вже існуючі підряд розташовані палі. До голови палі кріпився хомут з арматурними стержнями для вимірювання вертикальних переміщень палі. Прилади для вимірювання переміщень розташовувалися на реперній системі симетрично осі випробуваної палі. Для передачі вертикального статичного навантаження на палю використовувалися два гідродомкрати вантажопідйомністю по 2000 кН кожен. Тиск у домкратах створювався насосною станцією та контролювався манометром. За допомогою спеціальних приладів визначалися переміщення голови палі на кожному ступені навантаження.



Рис.6. Випробувальний стенд
Fig.6. Test stand

На підготовчому етапі досліджень для верифікації поведінки взаємодії одиночної палі з ґрунтовою основою було створено відповідну скінченно елементну модель системи «ґрунтова основа – одиночна паля». Ґрунтова основа змодельована відповідно до схеми приведеної на Рис. 5. Для

моделювання одиночної палі було обрано два підходи: перший – об'ємними елементами (Volume Pile) показано на Рис. 7, другий – використання елемента інтегрована балка (Embedded Beam Row) показано на Рис. 8. Як у першому, так і в другому варіанті всі геометричні та фізико-механічні параметри відповідали реальній палі.

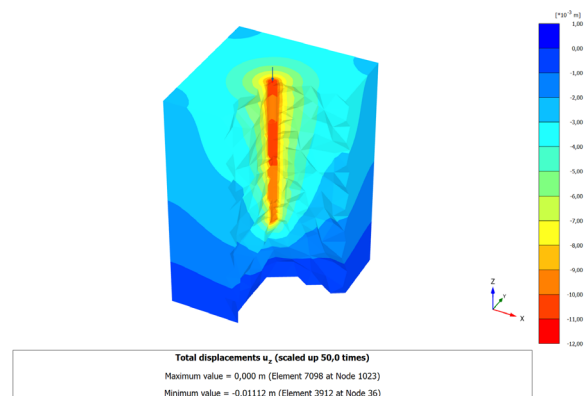


Рис.7. Осідання одиночної палі Volume Pile
Fig.7. Volume Pile displacement

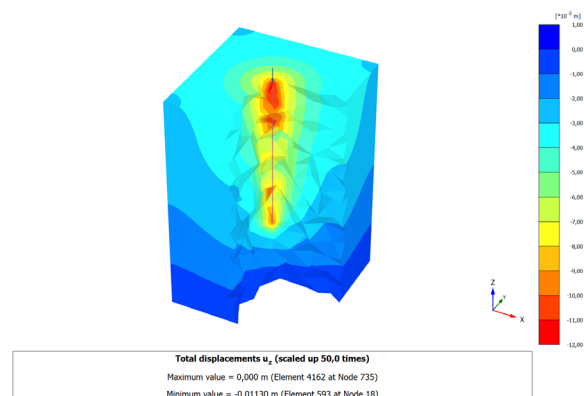


Рис.8. Осідання одиночної палі Embedded Beam
Fig.8. Embedded Beam Pile displacement

Кожен із підходів має свої переваги та обмеження, що визначають доцільність їх застосування залежно від задачі моделювання. Об'ємна палі моделюється у вигляді твердої тривимірної геометрії, яка взаємодіє з ґрунтовим середовищем через явні контактні поверхні. Цей підхід забезпечує високу точність, дає можливість враховувати реальну геометрію палі, детальну взаємодію з ґрунтом. Проте, враховуючи велику кількість палей у досліджуваному палевому полі, такий підхід буде достатньо ресурсоємним. Альтернативою є інтегровані балки -

одновимірні лінійні елементи, які не мають геометричної оболонки, але взаємодіють із ґрунтом через пружні з'єднання, що моделюють опір по бічній поверхні палі та під нижнім кінцем. Цей підхід є значно менш ресурсоємним, дозволяє швидко створити модель та отримати результати в межах прийнятної точності для більшості інженерних задач.

Отримані максимальні значення осідання модельних паль за результатами чисельних розрахунків було порівняно із результатами натурних випробувань ґрунтів палями показано на Рис. 9.

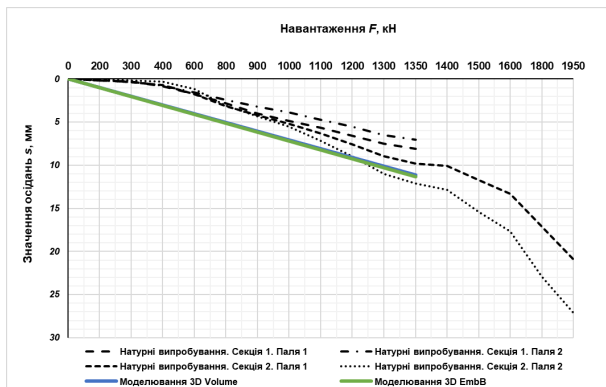


Рис.9. Порівняння осідань модельних одиночних паль з результатами натурних випробувань

Fig.9. Comparison of displacements of model single piles with the results of full-scale tests

За результатами порівняння можна зробити висновок про достатню відповідність взаємодії модельних паль з ґрунтовою основою до результатів натурних випробувань ґрунтів палями, тому у подальших дослідженнях палі змодельовано із використанням інструменту Embedded Beam.

Також слід зазначити що, під час випробування окремої палі оцінюються локальні деформації та стійкість ґрунтової основи, тоді як при взаємодії пальово-плитного фундаменту із ґрунтовою основою при регулярному кроці паль відбуваються спільні

деформації системи (Самородов, 2017). Така система має несучу здатність, що суттєво перевищує сумарний граничний опір окремих паль у складі такого фундаменту.

Для апробації удосконаленої моделі ґрунтової основи за допомогою розрахункового комплексу PLAXIS 3D створено скінченно-елементну модель системи «основа – фундамент – споруди», яка складається з ґрунтової основи та трьохсекційної 21-поверхової споруди на пальово-плитних фундаментах з підземним поверхом.

Елементи конструкції будівлі, а саме ростверк, стіни, перекриття та покриття, пластинчатими скінченними елементами із використанням пружної моделі матеріалу з параметрами, наведеними у Табл. 3. Колони змодельовано сріжневими елементами.

Табл. 3. Параметри конструкцій споруд
Table 3. Structural parameters of structures

Параметр	Модель матеріалу	Структурний параметр матеріалу	Товщина	Питома вага	Модуль пружності	Коефіцієнт Пуассону
Познач.	Model	Type	d	γ	E	ν
Од. вимір.	-	-	м	кН/м ³	кН/м ²	од.
Ростверк	Elastic	Непор.	0,9	25,0	30,0·10 ⁶	0,2
Монолітні залізобетонні стіни	Elastic	Непор.	0,2 / 0,25 / 0,3 / 0,4	25,0	30,0·10 ⁶	0,25
Плита перекриття	Elastic	Непор.	0,2	25,0	30,0·10 ⁶	0,2
Колони	Elastic	Непор.	0,6×0,6 / 0,6×0,6 / Ø0,5	25,0	30,0·10 ⁶	0,2

Нижче, на Рис.10 наведено план пальового поля. Загальна кількість паль під кожен секцію становить 222 штуки.

В якості навантажень враховано тільки власну вагу елементів конструкції будівель.

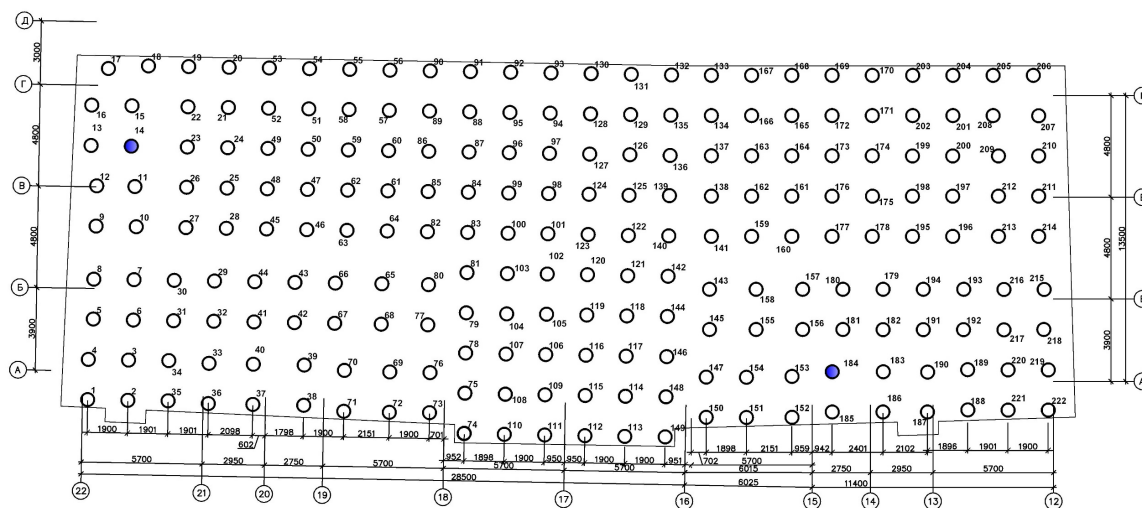


Рис.10. План розташування паль
Fig.10. Layout of piles

При моделюванні ґрунтової основи застосовано пружноідеалопластичну Модель Мора-Кулона (Mohr-Coulomb (MC)), яка відрізняється від лінійно-пружної моделі Linear Elastic (LE) тим, що містить п'ять вхідних параметрів: E , кН/м^2 і ν , од. – деформаційні параметри ґрунту, φ , $^\circ$ і c , кН/м^2 – міцнісні параметри ґрунту, та ψ , $^\circ$ - кут дилатації.

Чисельні розрахунки напружено-деформованого стану системи «основа – фундаменти – споруди» виконано із застосуванням удосконаленої модель ґрунтової основи у вигляді суцільного «ступінчастого» шару скінченої розподільчої здатності (ССШСРЗ) зі ступінчастою стисливою товщею моделі ґрунтової основи, яка враховує кут α та різні величини стисливих товщ під кожним фундаментом споруд в залежності від навантаження, як показано на Рис. 2.

Вертикальні (по глибині) границі було обмежено на глибині, яка дорівнювала величині стисливої товщі H_i для кожного окремого фундаменту, враховуючи різні величини навантажень відповідно до Табл. 4.

Для формування активної зони – стисливої товщі під кожною секцією будівлі при різних навантаженнях розподіл стискаючих напружень по глибині прийнято під кутом $\alpha \approx 25^\circ$ до вертикалі від внутрішнього краю більш навантаженого фундаменту (Samorodov & Tabachnikov, 2024). Горизонтальні (у плані) границі було обмежено на відстані від плями будівлі, яка дорівнювала максимальній величині стисливої товщі

$H=11,8$ м при максимальному навантаженні (Numerik in der Geotechnik, 2014).

Табл. 4. Розрахункові значення відповідно до ДБН

Table 4. Design values according to DBN (Ukrainian Building Code)

Поверховість n, поверхів	Середн. тиск під підшовною ум. фунда. $p_{сер.}$, кН/м^2	Стислива товща ос- нови H_c , м	Зна- чення осідань будівлі s , мм
4	39,2	-	-
5	49,0	-	-
7	68,6	-	-
8	78,4	-	-
10	98,0	3	9,8
11	107,8	4,2	15,1
12	117,6	5,4	21,2
13	127,4	6,4	27,2
15	147,0	8,0	39,2
16	156,8	8,8	46,0
18	176,4	10,0	58,8
18/19	183,3	10,4	63,5
18/21	197,0	11,2	73,5
18/22	203,8	11,4	77,5
22	215,6	11,8	84,8

Для врахування зміни потужності активної зони (стисливої товщі) під фундаментами в процесі збільшення навантаження на ґрунтову основу застосовано простий підхід з моделювання, де прийнято практично недеформований жорсткий матеріал із значним модулем пружності $E=100,0 \cdot 10^9$ кН/м^2 (на рисунку зафарбовано суцільним чорним кольором) нижче за максимальну розрахункову границю відповідно до найбільш навантаженої секції при відповідній кількості збудованих поверхів показано на Рис. 11.

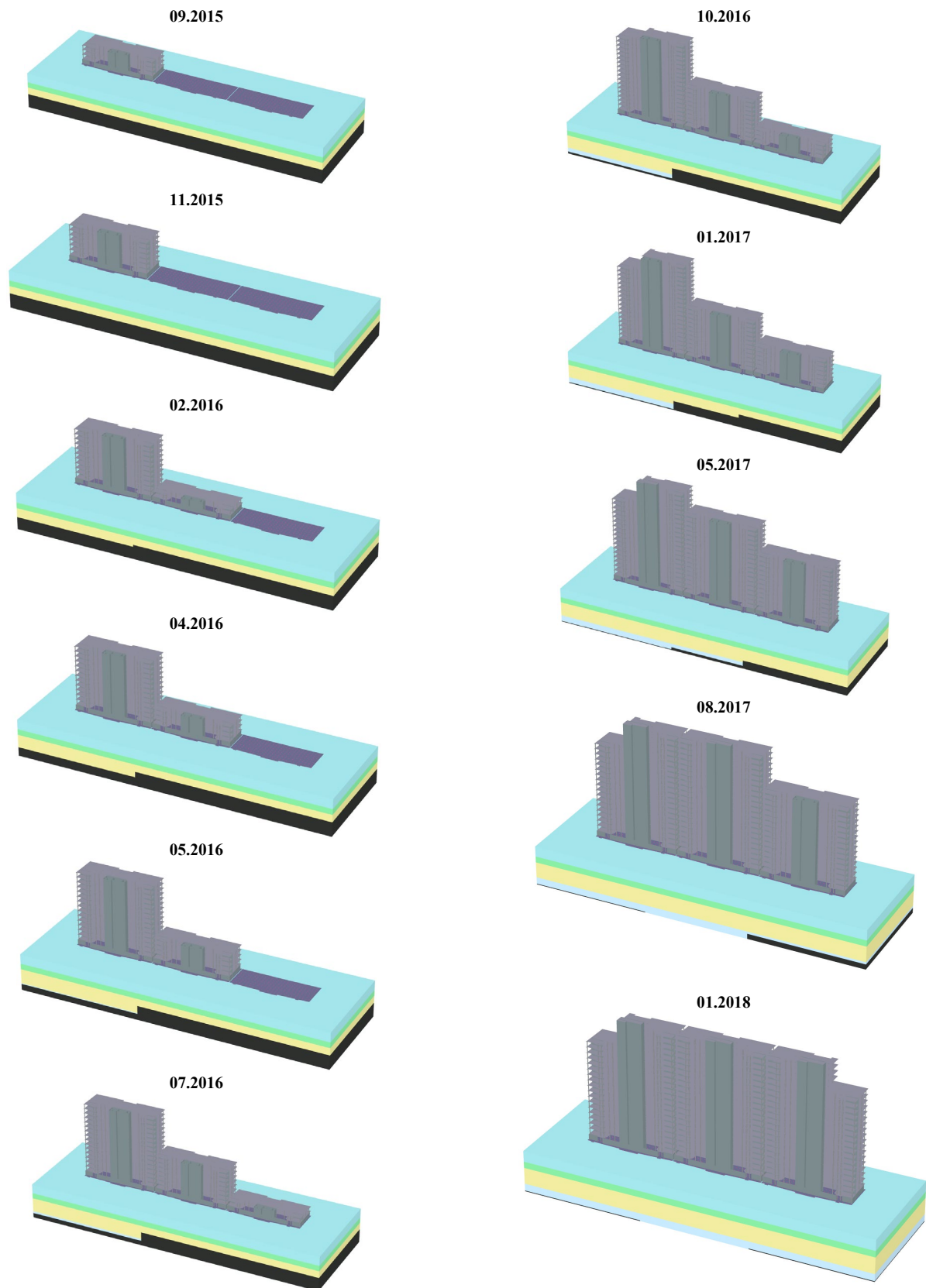


Рис.11. Розрахункові схеми моделі зі ступінчатою стисливою товщею відповідно до дати спостереження та кількості зведених поверхів

Fig.11. Calculation schemes incorporating a stepped compressible layer, adjusted in accordance with the observation timeline and the progressive construction of floors

Попередні розрахунки показали, що теоретичні середні значення осідань кожної із досліджуваних секцій будівлі завищені до 5,6 разів у порівнянні із фактичними виміряними під час спостережень значеннями. До того ж отримані розрахункові значення методом скінченних елементів у Plaxis близькі до теоретичних значень отриманих при розрахунках за ДБН методом пошарового підсумування Табл. 4.

Нижче на рисунку 12 наведено ізополі розрахункових значень осідань для моделі ґрунтової основи у вигляді СШСРЗ зі ступінчастою стисливою товщею під фундаментами секцій на завершальному етапі будівництва, при нормативному модулі деформації ґрунту відповідно до Табл. 2.

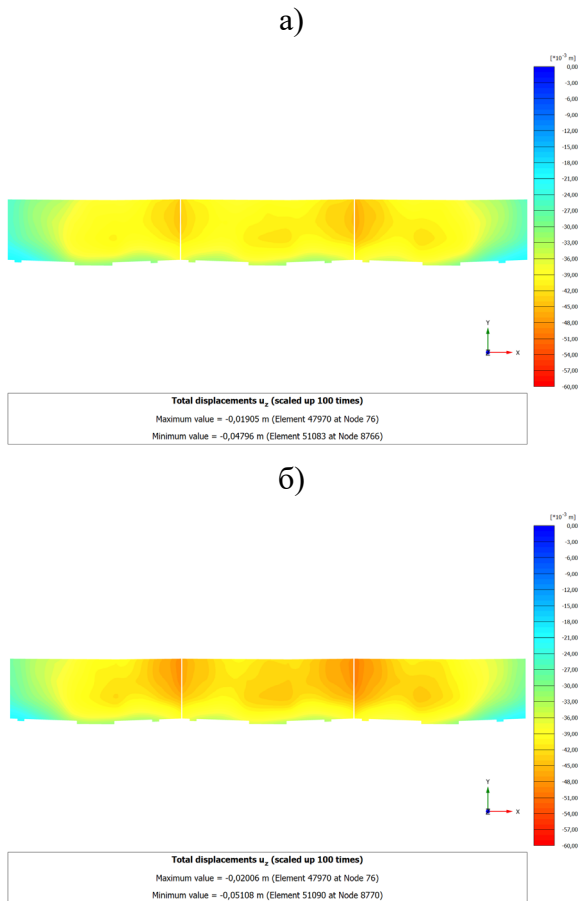


Рис.12. Ізополі вертикальних переміщень фундаментів на 01.2018 – завершальний етап будівництва: а) Linear Elastic (LE) Model; б) Mohr-Coulomb (MC) Model

Fig.12. Isolines of vertical displacements of foundations as of January 2018 – final stage of construction: a) Linear Elastic (LE) Model; б) Mohr-Coulomb (MC) Model

У роботі професора Самородова О.В. також відмічено неузгодженість між теоретичними та фактичними осіданнями будівель з великорозмірними фундаментами, де виявлено, що різниця між фактичними та теоретичними осіданнями для фундаментів площею $A \geq 1000 \text{ м}^2$ сягає 10 і більше разів. За результатами досліджень Самородова О.В. запропоновано для призначення модуля деформації ґрунту E_A основи великорозмірного фундаменту площею A при співвідношенні його сторін $l/b \leq 3$ використовувати спрощену емпіричну залежність

$$E_A \cong E \sqrt[3]{A/1}, \quad (1)$$

де $E(E_{um})$ – нормативний (довідковий) або такий, що визначається за допомогою випробувань круглими чи прямокутними штампами площею $0,5 \text{ м}^2 \leq A_{um} \leq 1,0 \text{ м}^2$, модуль деформації ґрунту (ДСТУ Б В.2.1-7-2000. 2001), кПа.

Враховуючи що площа фундаментної плити кожної із секцій із урахуванням архітектурних особливостей становить приблизно $810,0 \text{ м}^2$ та використовуючи формулу 1 було призначено модуль деформації ґрунту E_A основи великорозмірного фундаменту для кожного із шарів ґрунту у межах визначеної стисливої товщі:

- для ІГЕ-4 $E_A^4 \cong E \sqrt[3]{A} = 25000 \sqrt[3]{810} = 25000 \cdot 9,3 = 232500 \text{ кН/м}^2$;

- для ІГЕ-5 $E_A^5 \cong E \sqrt[3]{A} = 17000 \sqrt[3]{810} = 17000 \cdot 9,3 = 158100 \text{ кН/м}^2$.

На підставі обраних параметрів моделі та вихідної інформації виконано моделювання взаємодії будівель з вказаною моделлю основи. Чисельний розрахунок виконано методом скінченних елементів та отримано абсолютні значення величин напружено-деформованого стану системи.

За результатами моделювання визначено особливості деформування кожної секції будівлі в залежності від співвідношення навантажень. Отримані розрахункові значення осідань використано у подальшому співставленні з результатами натурних

спостережень за осіданнями дослідної будівлі під час будівництва.

На Рис. 13 наведено ізополі розрахункових значень осідань для моделі ґрунтової основи у вигляді СШСРЗ зі ступінчастою стисливою товщею під фундаментами секцій на завершальному етапі будівництва із врахуванням модуля деформації ґрунту E_A основи великорозмірного фундаменту.

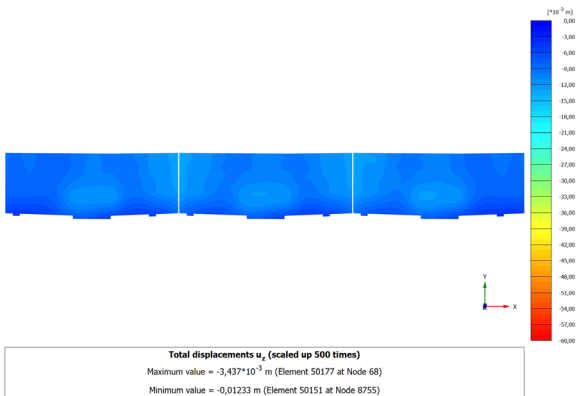


Рис.13. Ізополі вертикальних переміщень фундаментних плит на 01.2018 – завершальний етап будівництва при $E_A=9,3E$

Fig.13. Isolines of vertical displacements of foundations as of January 2018 – final stage of construction where $E_A=9,3E$

Результати моніторингу осідань дослідної будівлі. Спостереження за осіданнями будівлі проводилися в процесі будівництва методом високоточного нівелювання II класу. Були визначені позначки осадових марок М.1, М.2, М.3, М.4 – для секції 1 та М.21, М.22, М.23, М.24 – для секції 2, що були закладені в рівні цокольного поверху будівлі в межах кутів кожної секції. Для секції 3 фіксувалась загальна фактична кількість зведених поверхів без спостереженнями за осіданнями.

В процесі будівництва виділено 12 етапів спостережень, які наведено у табличній формі Табл.5.

Табл. 5. Етапи спостережень
Table 5. Observation stages

Поверховість n, поверхів			
Дата заміру	Секція 1	Секція 2	Секція 3
09.2015	4		
11.2015	7		
02.2016	11		

04.2016	13	4	
05.2016	15	5	
07.2016	16	8	
10.2016	18/19	10	4
01.2017	18/21	12	7
05.2017	18/22	18	13
08.2017	18/22	22	16
11.2017	18/22	22	18
01.2018	18/22	22	22/18

Для нівелювання було використано нівелір Н-05 й інварну нівелірну рейку

РН-05. Нівелювання виконано в прямому і зворотному напрямках шляхом суміщення. На кожній станції за спостереженнями основних і додаткових шкал обчислені перевищення a_3, a_n та їх різниця $h=a_3-a_n$, яка не перевищувала 0,7 мм. Для прямого і зворотного ходів по кожній секції (між суміжними реперами в ході) обчислені суми перевищень прямого $[h]_n$ і зворотного $[h]_3$ ходів. Розбіжності fx не перевищували $\pm 2,1$ мм (L - довжина ходу в км) при кількості станцій менше 15. Для точності підрахунків використана програма Microsoft Excel, а зрівнювання результатів проводилось в програмі ARMGEO. Геодезичні роботи та розрахунки виконані к.т.н., доц. Наливайком Т.А.

На Рис. 14 наведено графіки фактичних осідань двох секцій будівлі від контрольованих реальних навантажень у процесі будівництва.

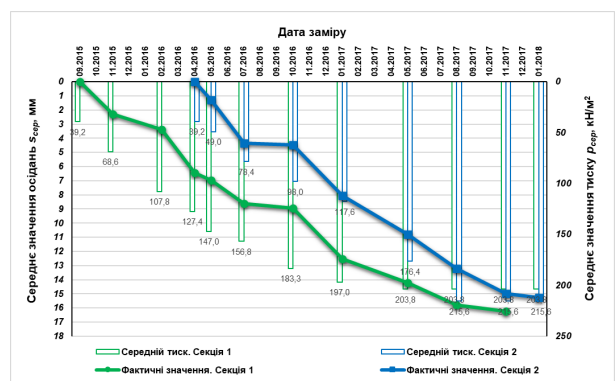


Рис.14. Середні фактичні осідання секції 1, 2 від середнього тиску під подошвою умовного фундаменту

Fig.14. Measured average settlements of Sections 1 and 2 in relation to the average pressure under the base of the equivalent foundation

На Рис. 15 та 16 наведено порівняння

фактичних осідань із розрахунковими значеннями при E та E_A із урахуванням початкових осідань перших 4-х поверхів, які прийнято за нульові значення, враховуючи розрахунок за нормативним методом пошарового підсумовування осідань ґрунтів основи.

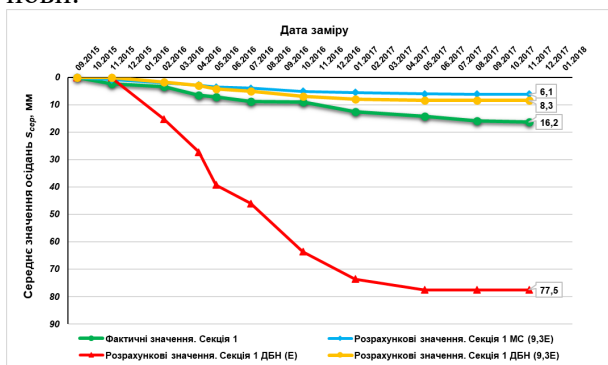


Рис.15. Середні осідання Секції 1 у порівнянні із розрахунковими значеннями
 Fig.15. Average settlements of Section 1 compared with calculated values

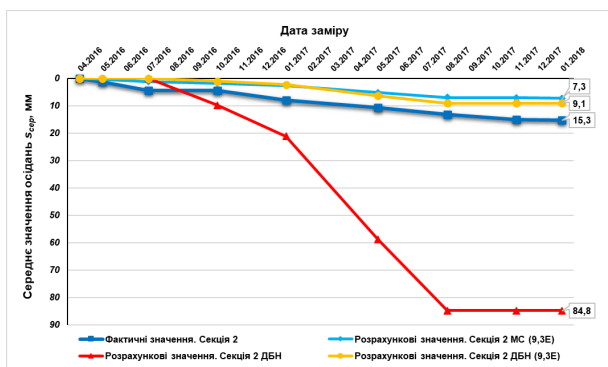


Рис.16. Середні осідання Секції 2 у порівнянні із розрахунковими значеннями
 Fig.16. Average settlements of Section 2 compared with calculated values

Як видно з графіків на Рис. 15 та 16, найбільш близькі розрахункові значення осідань у порівнянні із фактичними, вимірними при натурних спостереженнях для кожної секції будівлі, отримано при використанні підвищеного модуля деформації E_A , на відміну від значень при використанні нормативного (штампового) модуля деформації, який наводиться у звіті з інженерно-геологічних вишукувань. Теоретичні розрахунки за нормативним методом пошарового підсумовування осідань ґрунтів основи також дозволяє прогнозувати

адекватні осідання будівлі в процесі будівництва та експлуатації, враховуючи різницю навантажень по кожній із секцій.

З метою виявлення фактору впливу послідовності зведення будівлі із урахуванням секційності, було проаналізовано розподілення розрахункових реакцій у головах паль першої секції. Для наочності обрано середній ряд паль між осями Б-В показано на Рис. 10. Нумерацію паль було приведено з 1 (паля 9) по 24 (паля 214) зліва направо приведено на Рис. 17.

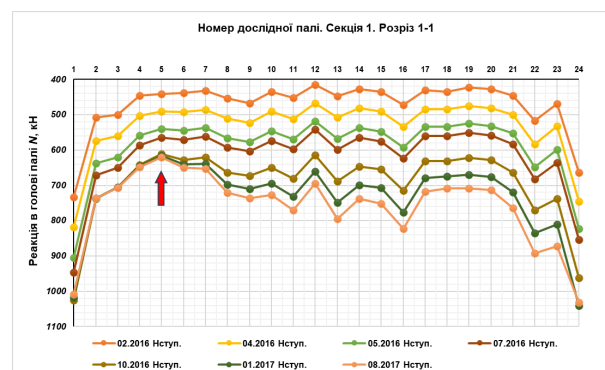


Рис.17. Реакція в голові палі
 Fig.17. Reaction force in the pile head

Як видно з графіків на Рис. 17 наростання реакцій у палях відбувається майже лінійно в залежності від збільшення навантаження по мірі зведення секції до моменту коли секція 1 починає сприймати вплив від зведення секції 2 (відмічена червоною стрілкою). Наочно цей ефект можна показати оцінивши різницю реакцій крайніх паль (паля 1- паля 24) в залежності від співвідношення середнього тиску $p_{секція2}/p_{секція1}$ показано на Рис. 18.

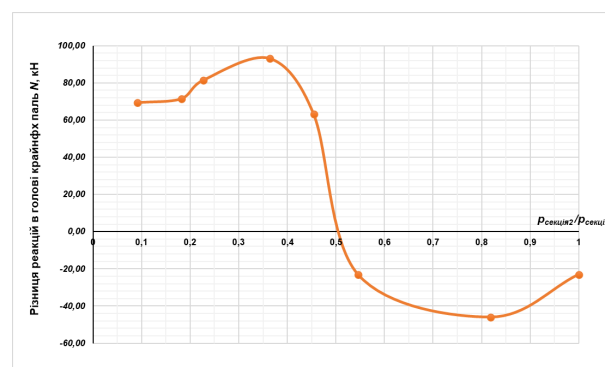


Рис.18. Вплив послідовності зведення секцій
 Fig.18. Impact of the construction sequence of sections

Таким чином, можна констатувати той факт що при співвідношенні навантажень другої секції до першої менше 0,5, або 50%, що відповідає даті спостереження на 10.2016, перша секція практично не сприймає вплив від зведення другої секції. Після досягнення другою секцією 50% навантаження першої секції відбувається послідовний перерозподіл зусиль в елементах фундаментних конструкцій та каркасу будівлі, що треба враховувати при проектуванні. Слід зазначити що цей ефект також відстежується на графіку осідань показано на Рис. 14 та співпадає з результатами наших попередніх досліджень.

На Рис. 18 наведено загальний вигляд зведеної будівлі на завершальному етапі будівництва.



Рис.19. Загальний вигляд будівлі на завершальному етапі будівництва

Fig.19. General view of the building at the final stage of construction

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Виконано моделювання та проведено аналіз напружено-деформованого стану системи «основа – фундаменти – споруди» у програмному комплексі Plaxis. На основі проведених спостережень за деформаціями трьохсекційної багатоповерхової будівлі на великорозмірних пальово-плитних фундаментах обґрунтовано застосування удосконаленої моделі ґрунтової основи для розрахунку поряд розташованих різноповерхових будівель із застосуванням підвищеного модуля деформації E_A основи великорозмірних фундаментів.

Аналіз результатів досліджень дозволяє зробити наступні висновки та рекомендації:

1. Підтверджується можливість застосування моделі ґрунтової основи у вигляді суцільного шару скінченної розподільчої здатності із різними стисливими товщами та підвищеними модулями деформації ґрунтів основи для прогнозування коректних деформацій секційних будівель на великорозмірних пальово-плитних фундаментах, в основі яких залягають структурно стійкі ґрунти. Застосування «ступінчатої» моделі дозволяє найбільш точно спрогнозувати характер деформування кожної із секцій досліджуваної трьохсекційної будівлі.

2. Підтверджено можливість застосування запропонованого проф. Самородовим О.В. модуля деформації ґрунту E_A основи для великорозмірних фундаментів для багатосекційних споруд на пальово-плитних фундаментах при умові дотримання послідовного зведення кожної секції із різницею навантажень не менше 50%, що, зазвичай, забезпечується під час будівництва таких будівель.

3. Додатково підтверджено, що застосування нормативного методу пошарового підсумовування осідань ґрунтів основи багатосекційних великорозмірних пальово-плитних фундаментів з підвищеними модулями деформації ґрунтів у межах стислової товщі моделі лінійно-деформованого середовища, із урахуванням різних потужностей стисливих товщ в залежності від навантаження, дозволяє прогнозувати коректні осідання будівлі в процесі будівництва та експлуатації.

4. Підтверджено важливість стадійного моделювання багатосекційних будівель та споруд на пальово-плитних фундаментах, що дозволяє проєктувальникам якісно оцінювати перерозподіл зусиль як у фундаментних конструкціях так і в елементах каркасу будівлі при зміні навантажень кожної секції в процесі будівництва.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лучковский, И.Я. (2000). *Взаимодействие конструкций с основанием*. Харьков: ХДАГХ (Библиотека журнала ITE), Том 3.
2. Винников, Ю.Л. (2005). *Моделирование процессов усадки грунта при несимметричному напружено-деформованому стані основ* (Дис. ... докт. техн. наук). КНУБА. Київ.
3. Кушнер, С.Г. (2008). *Расчет деформаций оснований зданий и сооружений*. Запорожье.
4. Основи та фундаменти споруд. Основні положення: ДБНВ.2.1–10:2018. (2018) [Чинний від 2019.01.01]. К.: Мінрегіон України.
5. Самородов, О.В., & Табачников, С.В. (2023). Заявка на патент на винахід № а202301804, Україна МПК E02D 27/12. *Спосіб моделювання ґрунтової основи поряд розташованих фундаментів*. Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова. Заявл. 25.04.2023.
6. Empfehlungen des Arbeitskreises "Numerik in der Geotechnik" – EANG. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Ed.). (2014). 196 с.
7. Бойко, І.П., & Носенко, В.С. (2012). Вплив послідовності зведення суміжних секцій висотного будинку на перерозподіл зусиль у пальових фундаментах. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво*, 4(1), 54–60.
8. Носенко, В.С. (2012). *Напружено-деформований стан пальово-плитних фундаментів секційних висотних будинків*: (Дис. ... канд. техн. наук). КНУБА. Київ.
9. Сковчок, Л.О., & Шабалтун, А.М. (2020). Вплив послідовності зведення будинків на формування напружено-деформованого стану системи «основа-фундамент-надземні конструкції». *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*, 41, 32–44.
10. Ter-Martirosyan, Z. G., & Ter-Martirosyan, A. Z. (2009). Soil beds of high-rise buildings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 46(5), 165–179.
11. Самородов, А.В. (2017). *Проектирование эффективных комбинированных свайных и плитных фундаментов многоэтажных зданий: Монография*. Харьков: Типография Мадрид.
12. PLAXIS CONNECT Edition V20. *Material Models Manual* (2020).
13. Samorodov, O., & Tabachnikov, S. (2024). A soil base model of adjacent various story structures. *У Proceedings of 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization: 18–21 June 2024, Barcelona, Spain* (ред. М. Arroyo & А. Gens), *Volume Field monitoring in geomechanics* (1144–1150). Scipedia. <https://doi.org/10.23967/isc.2024.025>
14. Mirlatifi, S., Azari, B., Buys, H., Parsa-Pajouh, A., & Cullen, I. (2022). Basement diaphragm walls and foundations of Sydney's tallest building, Crown Sydney Hotel Resort – challenges and solutions. In *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (Rahman & Jakska, Eds.), Sydney, Australia, 4145–4149. ISBN 978-0-9946261-4-1.
15. Katzenbach, R., & Leppla, S. (2015). Realistic modelling of soil-structure interaction for high-rise buildings. *Procedia Engineering*, 117, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.137>
16. ДСТУ Б В.2.1-7-2000 (ГОСТ 20276-99). (2001). *Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи польового визначення характеристик міцності і деформованості*. [Чинний від 01.01.2001]. К.: Мінрегіонбуд України.
17. Aleksandrovych, V., Samorodov, O., Tabachnikov, S., & Havryliuk, O. (2024). Investigation of the influence of boundary conditions on the deformability of a model of soil base of limited width in the form of a linearly deformable elastic half-plane. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1376, 1-11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012017>.
18. Samorodov, O., Tabachnikov, S., Goodary, R., et al. (2025). Validation of an enhanced soil base model for analyzing adjacent buildings with varying loads. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43, 127. <https://doi.org/10.1007/s10706-025-03089-z>.

REFERENCES

1. Luchkovskiy, I.Ya. (2000). *Vzaimodiyetie konstruktssii s osnovaniem* [Interaction of structures with the foundation]. Kharkiv: KhDAGKh. Vol.3. (in Russian).
2. Vynnykov, Y.L. (2005). *Modeliuvannia protsesiv uschylennia hruntu pry visesymetrychnomu napruzhenno-deformovanomu stani osnov* [Modeling of soil compaction processes

- under axisymmetric stress–strain state of foundations] (Diss. ... dokt. tekhn. Nauk). KNUCA. Kyiv (in Ukrainian).
3. Kushner, S.H. (2008). *Raschetnye deformatsii osnovanii zdaniy i sooruzheniy* [Calculation of deformations of foundations of buildings and structures]. Zaporizhzhia. (in Russian).
 4. *Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennia: DBNV.2.1–10:2018*. (2018) – [Chynnyi vid 2019.01.01]. – K.: Minrehion Ukrainy, 36 (in Ukrainian).
 5. Samorodov, O.V., & Tabachnikov, S.V. (2023). Zaiava na patent na vynakhid No. a202301804, Ukraina MPK E02D 27/12. *Sposib modeliuвання gruntovoi osnovy poriad rozmauovanykh fundamentiv* [Method for modeling the soil base of closely spaced foundations]. Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov. Filed 25.04.2023. (in Ukrainian).
 6. Empfehlungen des Arbeitskreises "Numerik in der Geotechnik" – EANG. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Ed.). (2014). *Empfehlungen des Arbeitskreises "Numerik in der Geotechnik" – EANG*. 196 pp. (in German).
 7. Boiko, I.P., & Nosenko, V.S. (2012). Vplyv poslidovnosti zvedennia sumizhnykh sektsii vysotnoho budynku na pererozpodil zusyill u palovykh fundamentakh [Influence of the construction sequence of adjacent sections of a high-rise building on the redistribution of forces in pile foundations]. *Zbirnyk naukovykh prats Poltavskogo natsionalnoho tekhnichnoho universytetu im. Yu. Kondratiuka. Ser.: Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, 4(1), 54–60. (in Ukrainian).
 8. Nosenko, V.S. (2012). *Napruzheno-deformovanyi stan palovo-plytnykh fundamentiv sektsiinykh vysotnykh budynkiv* [Stress–strain state of pile–raft foundations of sectional high-rise buildings] (Dyss. ... kand. tekhn. Nauk). KNUBA. Kyiv. (in Ukrainian).
 9. Skochko, L.O., & Shabaltun, A.M. (2020). Vplyv poslidovnosti zvedennia budynkiv na formuvannia napruzhenodeformovanoho stanu systemy "osnova-fundament-nadzemni konstruktsii" [Influence of construction sequence of buildings on the formation of the stress–strain state of the “base–foundation–superstructure” system]. *Osnovy i fundamenti: Mizhv idomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, 41, 32–44. (in Ukrainian).
 10. Ter-Martirosyan, Z. G., & Ter-Martirosyan, A. Z. (2009). Soil beds of high-rise buildings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 46(5), 165–179.
 11. Samorodov, A.V. (2017). *Proektirovanie effektivnykh kombinirovannykh svaivnykh i plitnykh fundamentov mnogoetazhnykh zdaniy: Monografiya* [Design of effective combined pile and raft foundations for high-rise buildings: Monograph]. Kharkiv: Tipografiya Madrid. (in Russian).
 12. *PLAXIS CONNECT Edition V20. Material Models Manual* (2020).
 13. Samorodov, O., & Tabachnikov, S. (2024). A soil base model of adjacent various story structures. *У Proceedings of 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization: 18–21 June 2024, Barcelona, Spain* (ред. М. Arroyo & А. Gens), *Volume Field monitoring in geomechanics* (с. 1144–1150). Scipedia. <https://doi.org/10.23967/isc.2024.025>
 14. Mirlatifi, S., Azari, B., Buys, H., Parsa-Pajouh, A., & Cullen, I. (2022). Basement diaphragm walls and foundations of Sydney’s tallest building, Crown Sydney Hotel Resort – challenges and solutions. In *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (Rahman & Jaksá, Eds.), Sydney, Australia, pp. 4145–4149. ISBN 978-0-9946261-4-1.
 15. Katzenbach, R., & Leppla, S. (2015). Realistic modelling of soil-structure interaction for high-rise buildings. *Procedia Engineering*, 117, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.137>
 16. DSTU B V.2.1-7-2000 (GOST 20276-99). (2001). *Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Hrunty. Metody pol'ovoho vyznachennia kharakterystyk mitsnosti i deformovanosti*. [Chynnyi vid 01.01.2001]. K.: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian).
 17. Aleksandrovykh, V., Samorodov, O., Tabachnikov, S., & Havryliuk, O. (2024). Investigation of the influence of boundary conditions on the deformability of a model of soil base of limited width in the form of a linearly deformable elastic half-plane. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1376, 1-11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012017>.
 18. Samorodov, O., Tabachnikov, S., Goodary, R., et al. (2025). Validation of an enhanced soil base model for analyzing adjacent buildings with varying loads. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43, 127. <https://doi.org/10.1007/s10706-025-03089-z>.

Validation of the Improved Soil Base Model for the Simulation of Multi-Section Buildings on Pile Foundations

Sergii TABACHNIKOV

Summary. In the construction industry, large-scale slab and pile-raft foundations are used for the construction of multi-storey buildings and structures with significant loads on a non-rocky soil foundation. One of the main trends in the construction of residential complexes is the sectional nature of multi-storey buildings. The purpose of this article is to test an advanced soil foundation model in the form of a continuous "stepped" layer with finite load distribution capacity and its parameters based on the comparison of numerical calculation results and observations of settlements in a three-section multi-storey building on pile-raft foundations during construction.

In the preparatory stage of the research, a corresponding finite element model of the "soil foundation – single pile" system was created to verify the interaction behavior of a single pile with the soil foundation. The maximum settlement values of the model piles obtained from numerical calculations were compared with the results of field tests of piles, confirming the consistency of the calculated values.

Modeling and calculation of pile-raft foundations of the three-section multi-storey building, with consideration for the different number of floors in the sections during construction in the "foundation – foundations – structures" system interacting with the improved soil foundation model in the form of a continuous "stepped" layer with finite load distribution capacity, were carried out. The calculated values were compared with the results of long-term field observations of settlements in each building section during construction. To identify the impact of the sequence of building construction with respect to sectional division, the distribution of calculation reactions at the pile heads of one section was analyzed. The results of the study confirmed the applicability of the improved soil foundation model for predicting deformations in multi-storey sectional buildings on large-scale pile-raft foundations with structurally stable dispersed soils beneath them. The results of numerical studies show that considering different compressible layers in the foundation model under various loadings, combined with an increased deformation

modulus proposed by Professor O.V. Samorodov, allows for the most accurate modeling of settlement in each section of the three-section building.

Keywords. Multi-storey building, pile-raft foundations, soil foundation, compressible layer, deformation modulus, model, improvement, field observations, sett