

УДК 624.131.54:004.42

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗНИЖЕННЯ ЖОРСТКОСТІ ҐРУНТОВОЇ ОСНОВИ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СИСТЕМИ «ОСНОВА–СПОРУДА»

Г.А. Затилюк¹,

д-р філософії з прикладної механіки, доцент

Б.Я. Бартків¹,

аспірант

В.О. Недін¹,

канд. техн. наук, доцент

А.І. Лисовенко²,

інженер з експлуатації будівель та споруд

¹Київський національний університет будівництва і архітектури²ТОВ «Еталон ЛТД»

DOI: 10.32347/2410-2547.2026.116.299-317

У статті досліджено вплив реологічних властивостей ґрунтів (повзучості та консолідації) на розвиток осідань та перерозподіл зусиль у конструкціях будівлі з часом. Моделювання виконано у програмному комплексі «ЛІРА-САПР» з використанням об'ємних скінченних елементів. На основі теорії лінійної спадкової повзучості реалізовано методику поетапної зміни модуля деформації ґрунту за допомогою системи «Монтаж+». Проведено порівняльний аналіз трьох розрахункових схем: від спрощеного прикладання навантаження до врахування просторової жорсткості каркаса в простих та складних (із лінками) інженерно-геологічних умовах. Доведено, що реологічні процеси у неоднорідних ґрунтах викликають незначний перерозподіл внутрішніх зусиль у колонах каркаса, напружень в фундаментній плиті.

Ключові слова: реологія ґрунтів, консолідація, повзучість, система «основа-споруда», скінченно-елементне моделювання, ПК ЛІРА-САПР, перерозподіл зусиль.

Вступ. Надійна експлуатація сучасних будівель і споруд неможлива без точного прогнозування їхньої взаємодії з ґрунтовою основою. Традиційні підходи до проектування, які розглядають систему «основа-споруда» у статичному (миттєвому) стані, часто виявляються недостатніми. Реальна робота ґрунтових основ, особливо дисперсних багатокомпонентних середовищ, характеризується вираженими реологічними властивостями – процесами консолідації (віджимання порової води) та в'язкої повзучості мінерального скелета. Ігнорування фактора часу призводить до неточної оцінки довготривалих диференціальних (нерівномірних) осідань, що викликає значний перерозподіл внутрішніх зусиль у несучих конструкціях [14]. Значущість проблеми післябудівельних осідань (post-construction settlement) підтверджується і в новітніх світових дослідженнях [11, 12, 14].

Сучасні нормативні документи, зокрема ДБН В.2.1-10:2018 [3] та Eurocode 7 [9], наголошують на необхідності врахування фактора часу при оцінці деформацій. Як зазначають А.В. Перельмутер та В.І. Сливкер [6], розрахункова модель не повинна бути застиглою: вона має відображати життєвий цикл споруди як системи зі змінною розрахунковою схемою. На сьогодні просторове скінченно-елементне моделювання (СЕ) ефективно реалізується в ПК «ЛІРА-САПР» [6], проте питання коректного математичного обґрунтування імітації деградації жорсткості ґрунту через систему нелінійних історій (Монтаж+) потребує глибшого висвітлення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Фундаментальні основи врахування фактора часу в механіці ґрунтів закладені у класичних працях Н.А. Цитовича [8], М.Н. Маслова [4] та С.Р. Мещяна [5], які адаптували математичний апарат теорії спадкової повзучості до опису деформування глинистих та суглинистих масивів. Нормативні документи такі як українські ДБН В.2.1-10:2018 [3] та європейський стандарт Eurocode 7 [3], жорстко регламентують необхідність врахування реологічних властивостей при розрахунках осідань у часі. Питання

взаємодії системи «основа – фундамент – споруда» (Soil-Structure Interaction, SSI) з урахуванням фактора часу та складної геології детально досліджено в інноваційних проектах за участю П.І. Кривошеєва, І.П. Бойка, В.С. Шокарева та ін. [10]. Видатні фахівці в галузі будівельної механіки А.В. Перельмутер та В.І. Сливкер наголошують, що розрахункова модель не може бути застиглою: вона повинна відображати життєвий цикл споруди як системи зі змінною розрахунковою схемою та еволюцією характеристик матеріалів [6].

На сьогодні просторове скінченно-елементне моделювання (МСЕ) таких систем ефективно розв'язується інструментами ПК «ЛІРА-САПР» [1]. Роль чисельного моделювання для глибокого розуміння поведінки слабких ґрунтів під поетапним будівельним навантаженням підкреслюється у новітніх міжнародних дослідженнях 2024-25 року [11, 12, 14]. Водночас, практична реалізація імітації деградації жорсткості ґрунту в часі з використанням стандартних інструментів, таких як система «Монтаж+», потребує подальшого вивчення та математичного обґрунтування взаємодії з ущільненими основами [2].

Мета дослідження. Метою даного дослідження є чисельне моделювання реологічних процесів ґрунтового масиву на основі теорії спадкової повзучості за допомогою підсистеми «Монтаж+» у ПК «ЛІРА-САПР», а також кількісна оцінка впливу фактора часу та складної інженерно-геології на розвиток диференціальних осідань і перерозподіл зусиль у просторовому залізобетонному каркасі будівлі.

Виклад основного матеріалу та методів дослідження

1. Теоретичні основи реологічної моделі

Найбільш адекватною для інженерних розрахунків ґрунтів у фазі ущільнення визнана теорія лінійної спадкової повзучості Больцмана-Вольтерра [5, 8]. Згідно з цією теорією, повна відносна деформація ґрунту $\varepsilon(t)$ залежить від усієї історії навантаження і описується інтегральним рівнянням другого роду [8]:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_{\text{inst}}} \left[\sigma(t) + \int_0^t K(t-t_0) \sigma(t_0) dt_0 \right], \quad (1)$$

де $\sigma(t)$ – нормальне напруження; E_{inst} – миттєвий модуль деформації (пружності); $K(t-t_0)$ – ядро повзучості, що характеризує швидкість накопичення деформацій у часі [5, 13].

Фундаментальні дослідження Н.А. Цитовича [5] та С.Р. Мешяна [8] довели високу точність цього апарату для опису консолідації ґрунтів. Для математичного опису швидкості затухання деформацій у часі традиційно використовується експоненційна апроксимація (ядро повзучості Маслова-Арутюняна). Проте безпосереднє розв'язання інтегро-диференціальних рівнянь спадкової повзучості для просторових МСЕ-моделей з мільйонами ступенів вільності в умовах поетапного введення є надзвичайно ресурсомістким завданням. Тому для практичної реалізації в ПК «ЛІРА-САПР» (підсистема «МОНТАЖ+») застосовано загальноприйнятій у будівельній механіці метод ефективного модуля. Згідно з цим підходом, інтегральна дія повзучості замінюється квазіпружним розрахунком на дискретних етапах шляхом введення перехідного коефіцієнта редукції жорсткості K_t :

$$E_{\text{eq}}(t) = K_t \cdot E_0. \quad (2)$$

Фізичний зміст коефіцієнта K_t полягає у відображенні накопиченої міри повзучості ґрунту на певному етапі життєвого циклу споруди.

Таблиця 1

Етапи поетапного моделювання реологічних процесів

Стадія №	1	2	3	4	5	6	7
Коеф. K_t	1	0.95	0.88	0.8	0.73	0.67	0.65

Для аналізованих у роботі було прийнято, що у момент $t=0$ (початкове прикладення навантаження) коефіцієнт $K_t = 1.0$. У стані повної стабілізації ($t \rightarrow \infty$), коли процеси первинної консолідації та вторинної повзучості скелета завершуються, довготривала жорсткість падає до 65% від початкової, тобто $K_\infty = 0.65$. Закон нелінійного розподілу коефіцієнта K_t обчислено за експоненційним графіком затухання деформацій і розбито на 7 розрахункових стадій для моделювання у системі «МОНТАЖ+» (Таблиця 1). Враховуючи специфіку чисельного

(параметричного) експерименту та відсутність результатів багаторічних натурних або лабораторних випробувань на повзучість для конкретних зразків ґрунту, матриця перехідних коефіцієнтів K_t (Таблиця 1) була синтезована авторами аналітичним шляхом. Цей методологічний підхід є загальноприйнятим на етапі варіантного проектування.

2. Параметри розрахункових скінченно-елементних моделей

Як об'єкт дослідження розглянуто просторовий ґрунтовий масив розмірами в плані 61х61 м. Моделювання виконано з використанням ізопараметричних просторових об'ємних скінченних елементів (КЕ 31, 33) (рис. 1). З рекомендованими граничними умовами [7].

Висота ґрунтового масиву під час моделювання прийнята рівною 11 м. Дане значення обґрунтоване нормативною вимогою ДБН В.2.1-10:2018 [3] щодо визначення межі стисливої товщі H_c , де додаткові вертикальні напруження від споруди загасають до рівня, що не перевищує 20% від природних (побутових) напружень ґрунту: $\sigma_{zp} \leq 0.2\sigma_{zg}$.

Для всебічного аналізу виконано три серії чисельних експериментів.

Задача №1. Постадійне навантаження масиву без врахування власної жорсткості будівлі. Змодельовано ідеальну залізобетонну фундаментну плиту товщиною 600 мм, на яку прикладено еквівалентне навантаження від сумарної ваги будівлі $g = 9.23 \text{ т/м}^2$. Геологічний зріз прийнято горизонтально-шаруватим (однорідним у плані) (рис. 2). Фізико-механічні характеристики наведено у Таблиці 2.

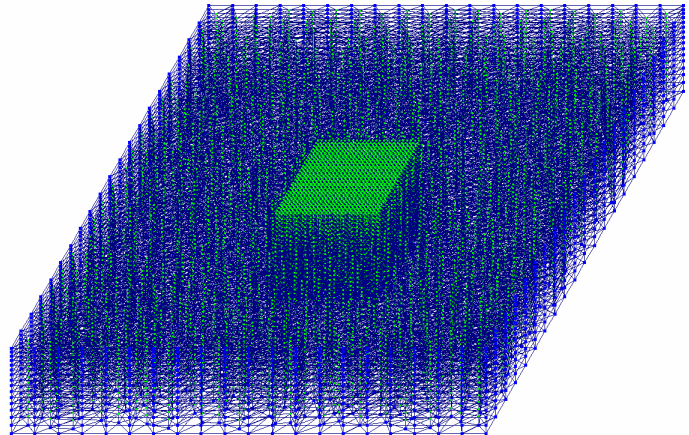


Рис. 1. Скінченно-елементна модель ґрунтового масиву

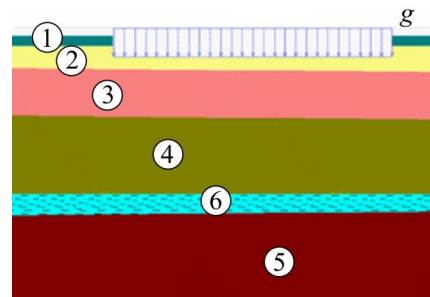


Рис. 2. Поперечний розріз ґрунтового масиву з підпрограми ГРУНТ в ПК «ЛІРА САПР»

Таблиця 2

Характеристика ґрунтів для задачі №1 та №2

№	Найменування ґрунту	Позначення ґрунтів кольором (Рис. 2)	Показник текучості	Коефіцієнт пористості	Модуль деформації (т/м ²)	Коефіцієнт Пуассона	Питома вага ґрунту (т/м ³)
1	Насипний		0.20	0.70	1000	0.3	1.8
2	Пісок пілуватий			0.54	1800	0.3	1.75
3	Супісок		1.10	0.72	2000	0.3	1.82
4	Суглинок тугопластичний		0.26	0.68	1800	0.35	1.87
5	Глина напівтверда		0.15	0.80	2200	0.42	1.92
6	Пісок пілуватий водонасичений			0.54	1800	0.3	1.75

Результати розрахунків для Задачі №1 зображено на рис. 3 (ізополя осідання ґрунтового масиву) та рис. 4, на якому продемонстровано графік поетапного осідання ґрунтового масиву.

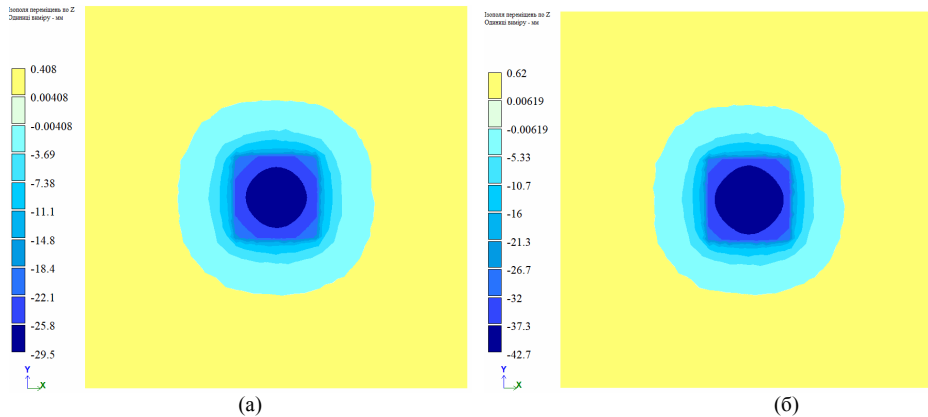


Рис. 3. Задача №1. Осідання ґрунтового масиву в стадії 1 (а) та стадії №7 (б), мм

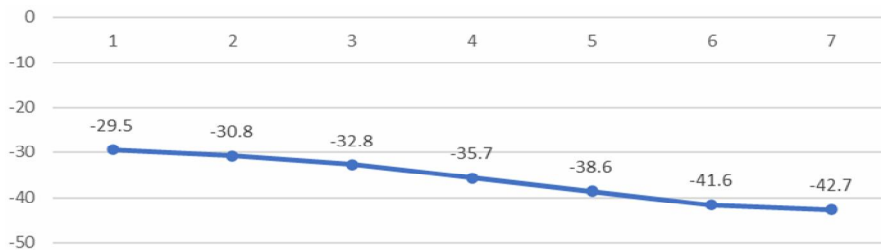


Рис. 4. Графік максимальних осідань від стадій задачі №1, мм

Задача №2. Розглядається сумісна робота (Soil-Structure Interaction) масиву (з аналогічними

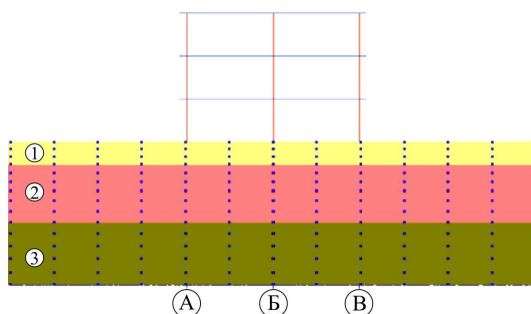


Рис. 5. Поперечний розріз скінченно-елементної моделі в ПК «ЛІРА САПР», задача №2

Таблиці 2 умовами) та просторового каркаса триповерхової будівлі розмірами 12x12 м у плані (рис. 5). Висота поверху 3 м. Конструктивні елементи: фундаментна плита ($h=600$ мм), плити перекриття $h=200$ мм), колони (переріз 400x400 мм). До перекриттів докладено експлуатаційне корисне навантаження 1.0 т/м^2 та власна вага конструкцій.

Вплив просторової жорсткості каркаса (аналіз Задачі 1 та Задачі 2)

У Задачі 1 (без каркаса) при миттєвому прикладанні навантаження максимальні осідання становили 29.5 мм (рис. 3). У процесі деградації жорсткості ґрунту осідання зросли до 42.7 мм (рис. 4). Деформована поверхня набула яскраво вираженої форми глибокої "чаші", оскільки гнучка фундаментна плита самостійно не здатна чинити опір вигину.

Введення просторового каркаса в Задачі 2 докорінно змінило механіку деформування. Система колон і плит перекриттів спрацювала як жорстка просторова ферма. Завдяки ефекту перерозподілу, максимальне осідання у стабілізованому стані (ст. 1) склало 33.3 мм (рис. 6) (проти 42.7 мм у Задачі 1). Динаміку нелінійного зростання осідань по стадіях для цієї задачі наведено на графіку (рис. 14). Таким чином, розрахунок без урахування сумісної роботи конструкцій (SSI) призводить до значного завищення розрахункових абсолютних осідань на 28–30%, що наочно демонструє порівняльний графік (рис. 15).

Вирівнювання осідань призводить до того, що центральні колони "зависають" на жорсткому каркасі, передаючи частину зусиль на периметральні елементи. Зусилля N розподіляються симетрично, але нерівномірно: від -59 т у кутових до -202 т у центральній колоні (рис. 9).

Водночас зміна кривизни осідань не суттєво впливає на напруження в конструкціях: у процесі релаксації основи відбувається незначний перерозподіл згинальних моментів M_x та M_y у фундаментній плиті (рис. 7, 8, 10), а також у дисках перекриттів (рис. 11, 12, 13), що рекомендується враховувати при конструюванні.

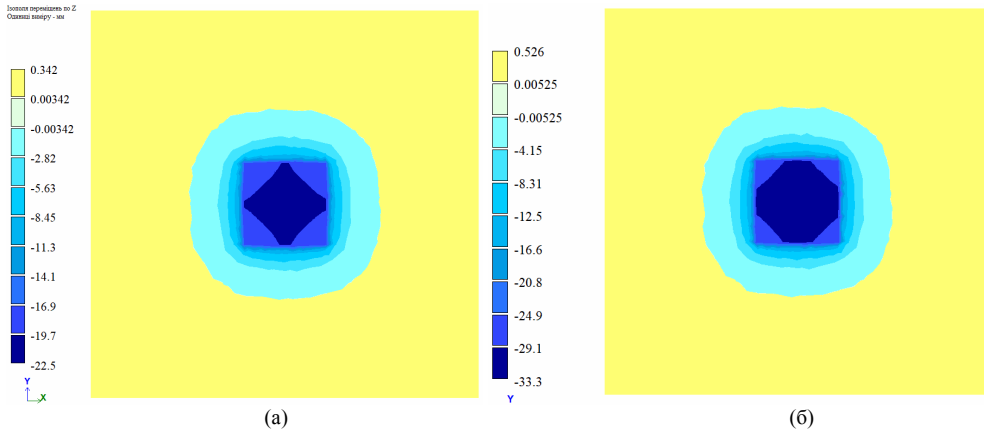


Рис. 6. Задача №2. Осідання ґрунтового масиву в стадії 1 (а) та стадії №7 (б), мм

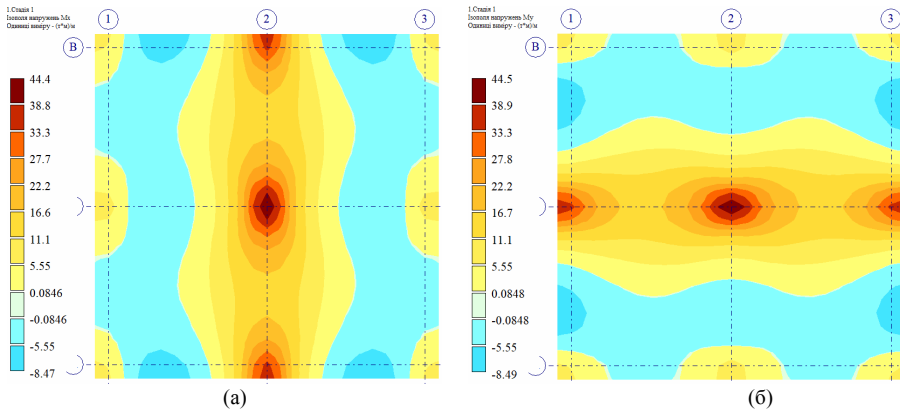


Рис. 7. Задача №2. Згинальні моменти фундаментної плити в стадії 1, (а) M_x , (б) M_y , кНм

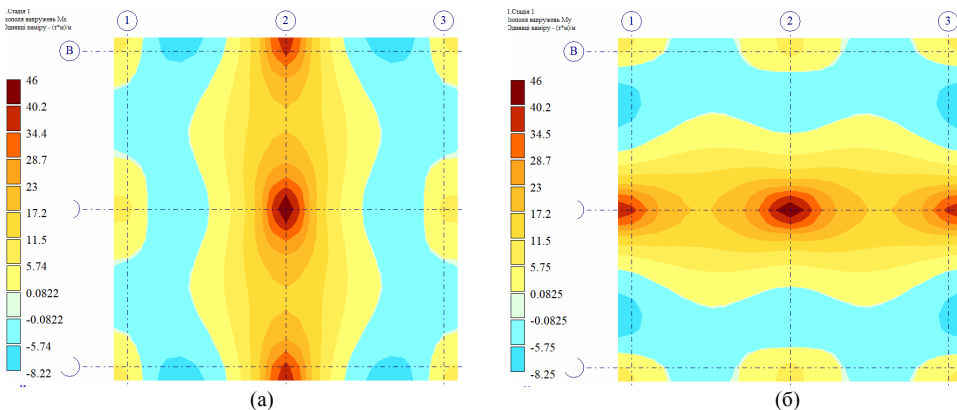


Рис. 8. Задача №2. Згинальні моменти фундаментної плити в стадії 7, (а) M_x , (б) M_y , т*м

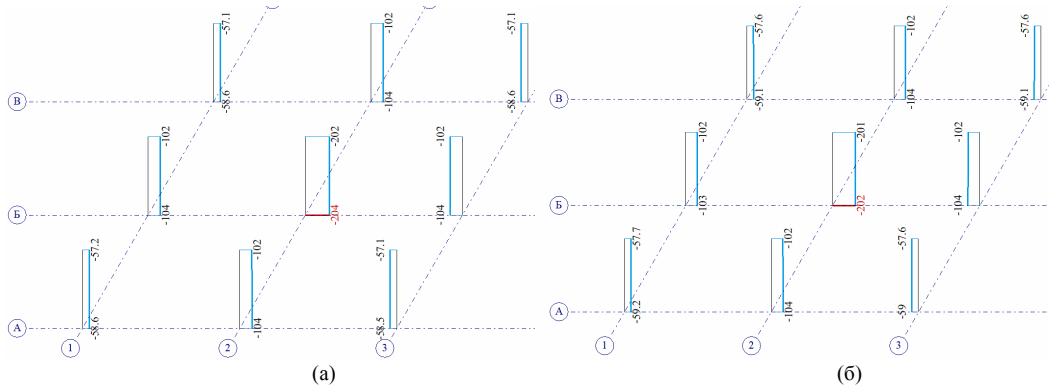


Рис. 9. Повздовжні зусилля N в колонах першого поверху будівлі на стадії 1 (а) та стадія №7 (б), задача №2, т

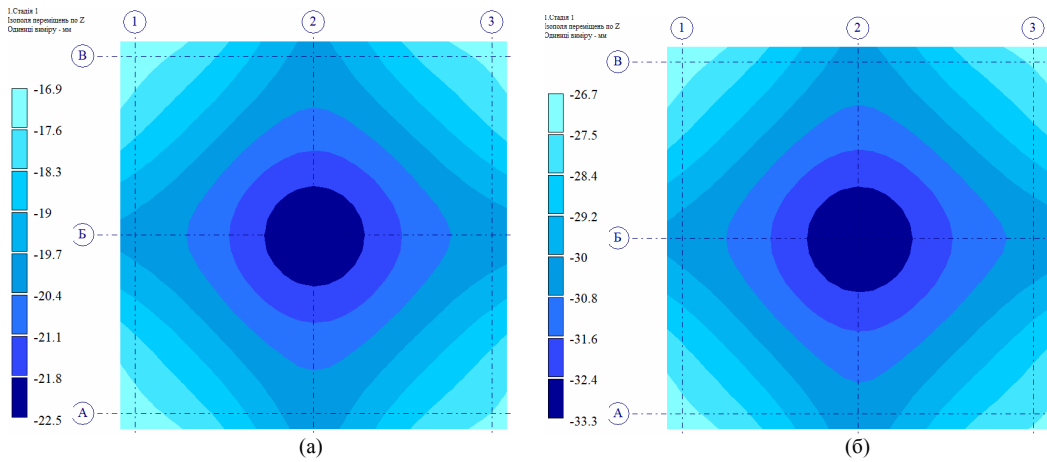


Рис. 10. Задача №2. Осідання фундаментної плити в стадії 1 (а) та стадія №7 (б), мм

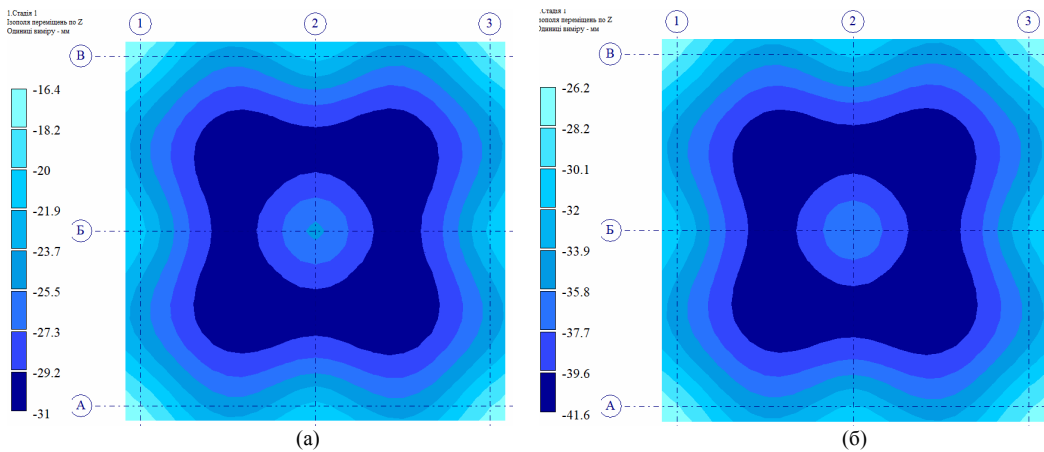


Рис. 11. Задача №2. Переміщення плити перекриття в стадії 1 (а) та стадія №7 (б), мм

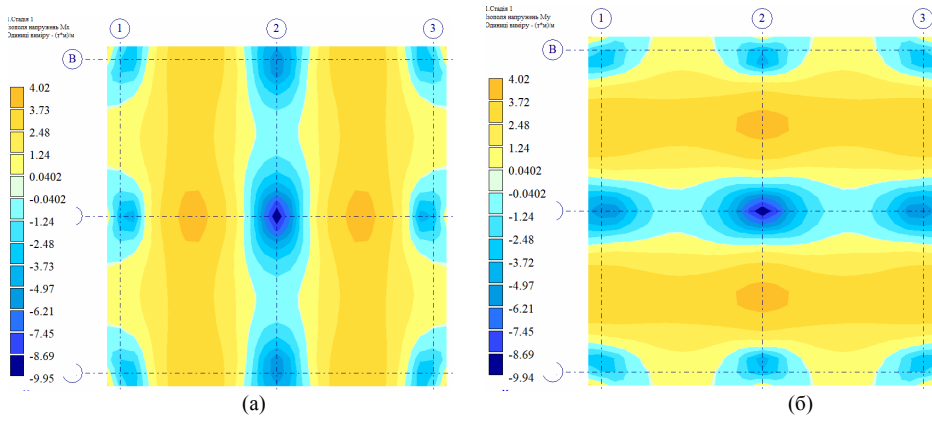


Рис. 12. Задача №2. Згинальні моменти плити перекриття в стадії 1, (а) M_x , (б) M_y , т*м

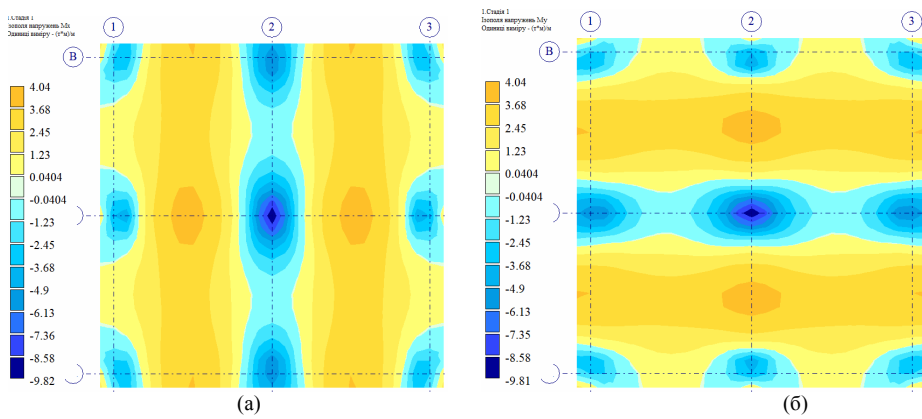


Рис. 13. Задача №2. Згинальні моменти плити перекриття в стадії 7, (а) M_x , (б) M_y , т*м

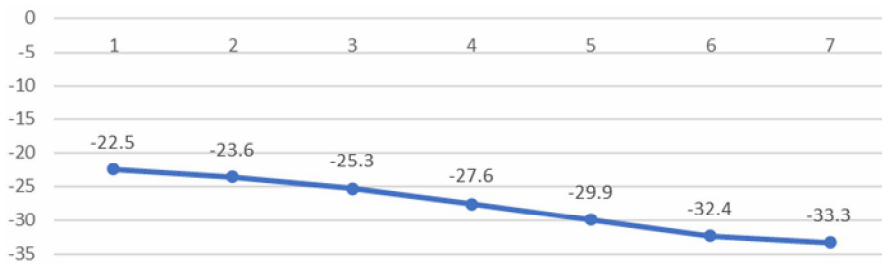


Рис. 14. Графік максимальних осідань від стадій задачі №2, мм

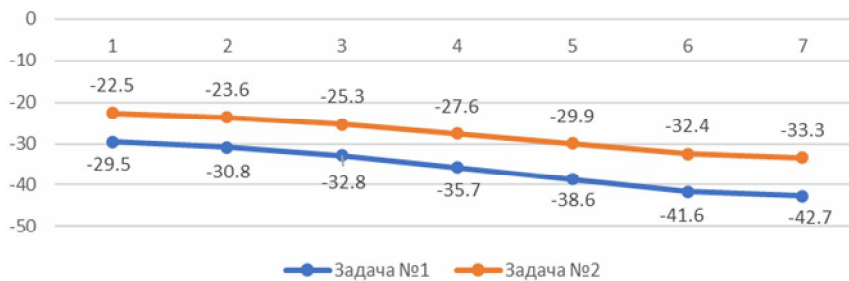


Рис. 15. Порівняльний графік максимальних осідань від стадій задачі №1 та №2, мм

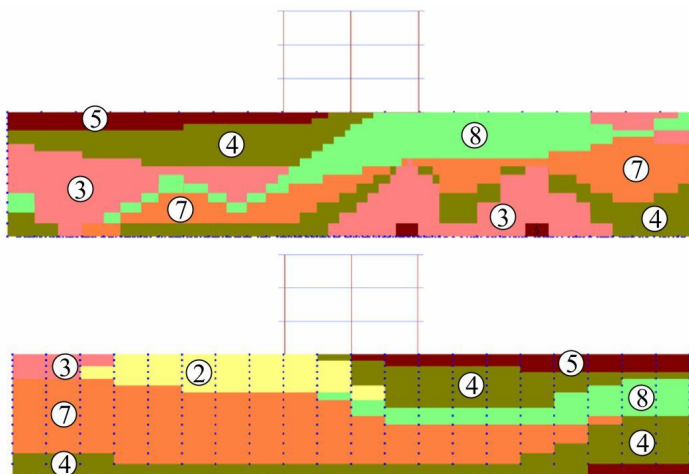


Рис. 16. Поперечний розріз скінченно-елементної моделі в ПК «ЛІРА САПР», задача №3

Задача №3. Просторова робота каркаса будівлі (аналогічно Задачі №2), але на складній ґрунтовій основі, ускладненій наявністю нерівномірних лінз та перепадів шарів (рис. 16). Особливу небезпеку становлять водонасичені піски та пилуваті ґрунти (Таблиця 3), які характеризуються низькими модулями деформації та тривалим періодом релаксації.

Таблиця 3

Характеристики ґрунтів для задачі №3

№	Найменування ґрунту	Позначення ґрунтів кольором (Рис. 16)	Показник текучості	Коефіцієнт пористості	Модуль деформації (т/м ²)	Коефіцієнт Пуассона	Питома вага ґрунту (т/м ³)
1	Насипний		0.20	0.70	1000	0.3	1.8
2	Пісок пилуватий			0.69	1500	0.3	1.71
3	Супісок		0.48	0.61	1000	0.3	1.85
4	Суглинок тугопластичний		0.27	0.68	2500	0.35	1.93
5	Глина напівтверда		0.06	0.82	2100	0.42	1.96
6	Пісок пилуватий водонасичений			0.69	1500	0.3	1.71
7	Супісок пилуватий		0.48	0.79	900	0.3	1.75
8	Пісок дрібний			0.63	3000	0.3	1.72

Вплив складної геології та диференційованої реології ґрунтів (Аналіз Задачі 3, Задачі 3.1 та Задачі 3.2).

Наявність у ґрунтовому масиві лінз та виклинцювань слабких ґрунтів створює передумови для розвитку диференціальних (нерівномірних) осідань у часі. Для глибокого аналізу впливу реології різних типів ґрунтів на напружено-деформований стан (НДС) просторового каркаса було розроблено три послідовні моделі зі складними геологічними умовами: Задачі 3, 3.1 та 3.2.

У Задачі 3 застосовано традиційний, проте дещо консервативний підхід: коефіцієнт редукції жорсткості K прийнято однаковим для всіх інженерно-геологічних елементів (деградація від 1.0 на миттєвій стадії 1 до 0.65 на стабілізованій стадії 7). За таких умов максимальне осідання зросло з 24.2 мм (миттєве) до 35.8 мм (стабілізоване), що показано на ізопоях (рис. 17) та графіку осідань (рис. 19). Еволюцію згинальних моментів та деформацій плит для цього сценарію відображено на рис. 20–24. З точки зору механіки взаємодії «основа-споруда», утворення глибокої "чаші" осідань під центром будівлі призводить до ефекту «зависання» жорсткого каркаса. Це чітко простежується на порівняльній діаграмі зусиль (рис. 39): у процесі

релаксації ґрунту центральна колона розвантажується з -201 т до -199 т, передаючи це навантаження на більш жорсткі периметральні зони (зусилля в кутовій колоні вузла 7 зростає з -59.3 т до -60.2 т), що видно з епюр поздовжніх зусиль (рис. 18). Однак такий підхід не враховує того факту, що фізична природа консолідації та повзучості піщаних і глинистих ґрунтів принципово відрізняється.

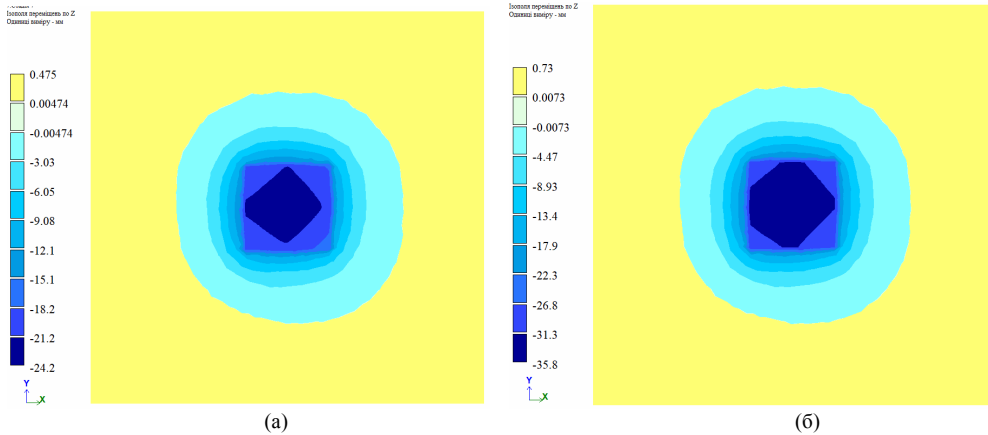


Рис. 17. Задача №3. Осідання ґрунтового масиву в стадії I (а) та стадія №7 (б), мм

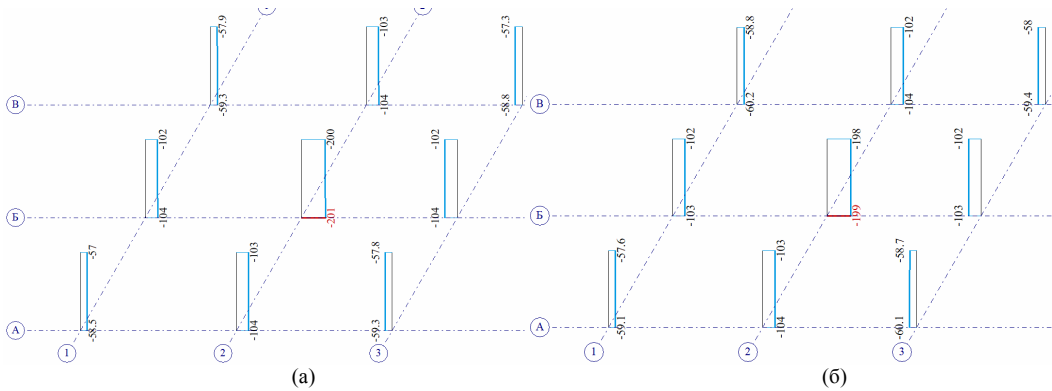


Рис. 18. Повздовжні зусилля N в колонах першого поверху будівлі, в стадії I (а) та стадія №7 (б), задача №3, т

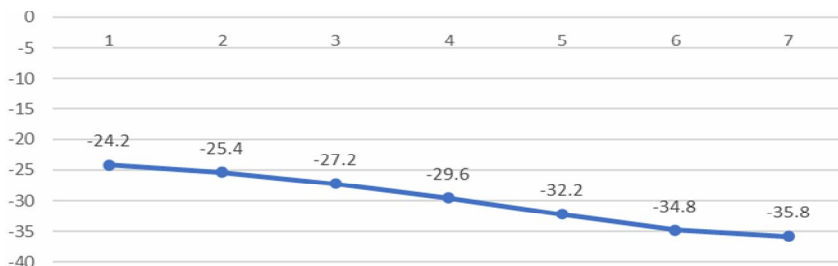


Рис. 19. Графік максимальних осідань від стадій задачі №3, мм

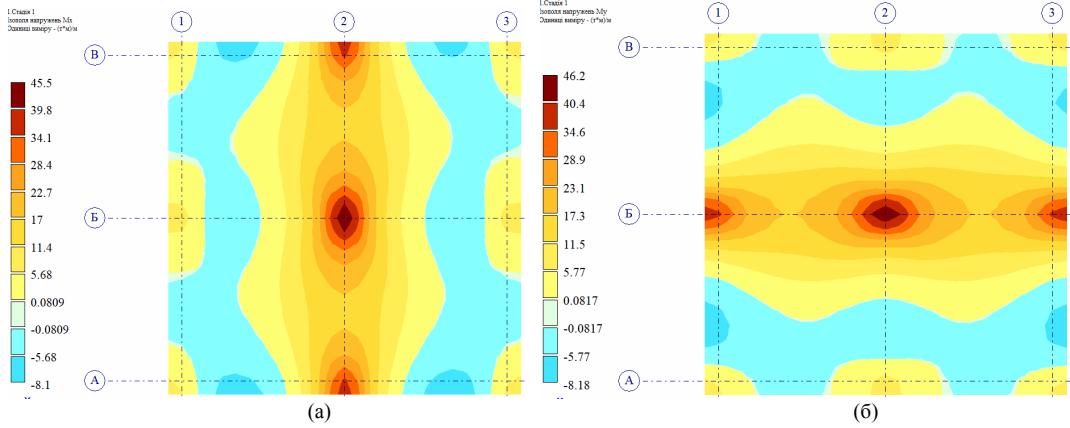


Рис. 20. Задача №3. Згинальні моменти фундаментної плити в стадії 1, а) M_x , б) M_y , $\text{кН}\cdot\text{м}$

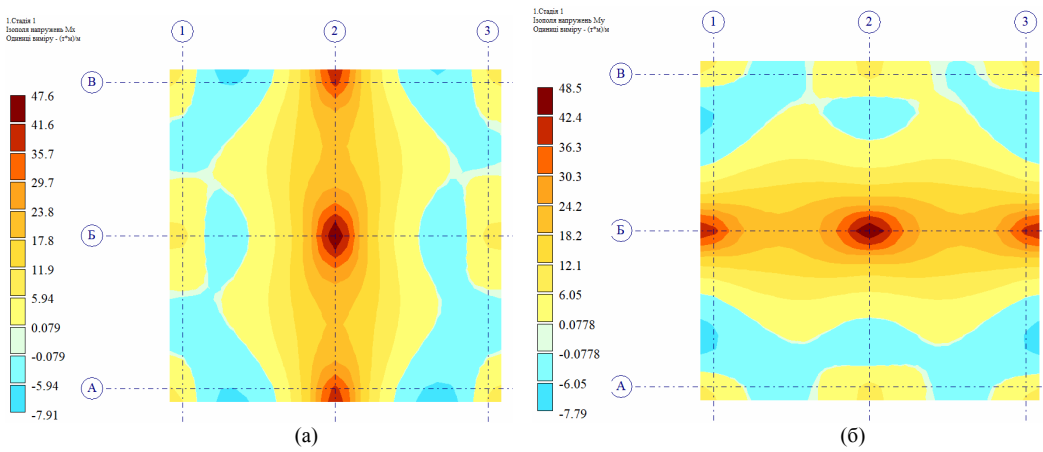


Рис. 21. Задача №3. Згинальні моменти фундаментної плити в стадії 7, (а) M_x , (б) M_y , $\text{т}\cdot\text{м}$

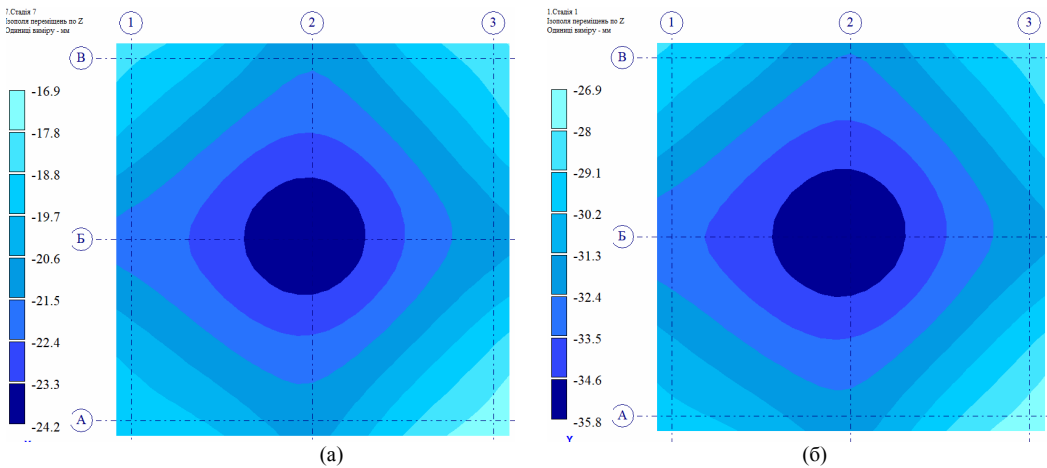


Рис. 22. Задача №3. Осідання фундаментної плити в стадії 1 (а) та стадії №7 (б), мм

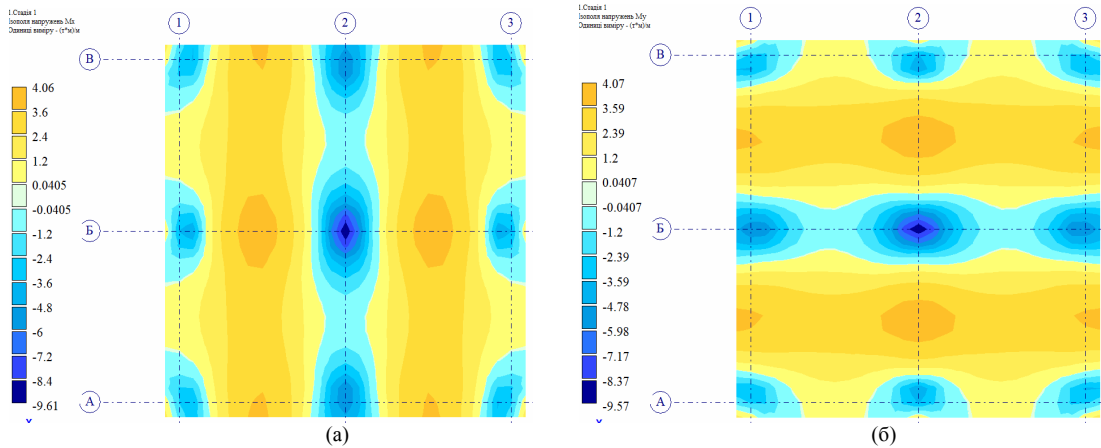


Рис. 23. Задача №3. Згинальні моменти плити перекриття в стадії 7, (а) M_x , (б) M_y , т*м

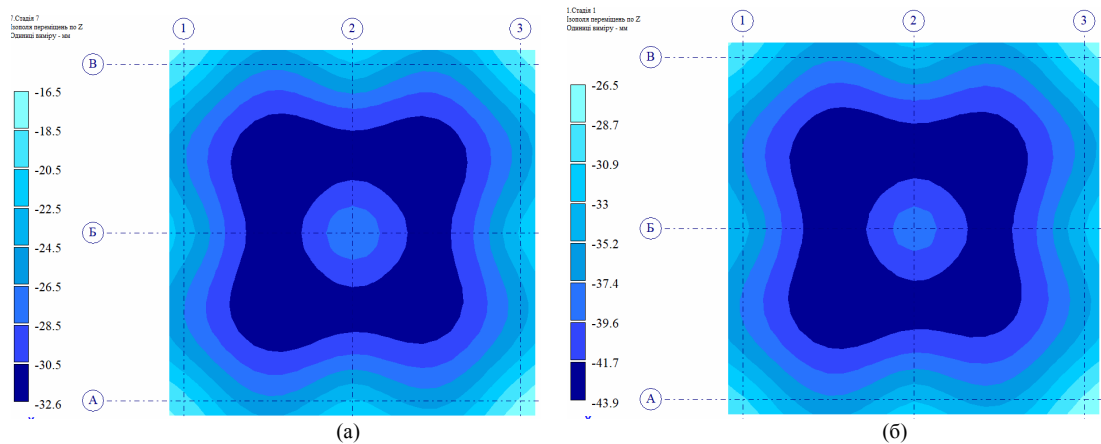


Рис. 24. Задача №3. Переміщення плити перекриття в стадії 1 (а) та стадії №7 (б), мм

Задача №3.1

У Задачі 3.1 було введено бінарну диференціацію реологічних властивостей: для пісків та насипних ґрунтів, що відображено в таблиці №4, які стабілізуються швидко і не мають значної в'язкої течії мінерального скелета, задано кінцевий коефіцієнт $K = 0.80 - 0.88$. Для слабких глинистих ґрунтів залишено глибоку деградацію до $K = 0.65$. Завдяки тому, що піщані шари зберегли вищу довготривалу жорсткість і створили надійнішу відсіч, максимальні стабілізовані осідання (ст. 7) зменшилися до 33.9 мм (рис. 25, 27, 29). Згинальні моменти для цієї задачі представлено на рис. 26, 28. Відповідно, пом'якшився і перерозподіл зусиль (рис. 30): центральна колона взяла на себе -200 т, а навантаження на кутові колони дещо знизилосся (до -60.0 т).

Таблиця 4

Стадія №	1	2	3	4	5	6	7
Глинисті ґрунти, коеф. K_f	1	0.95	0.88	0.8	0.73	0.67	0.65
Піски, коеф. K_f	1	0.95	0.88	0.8	0.8	0.8	0.8

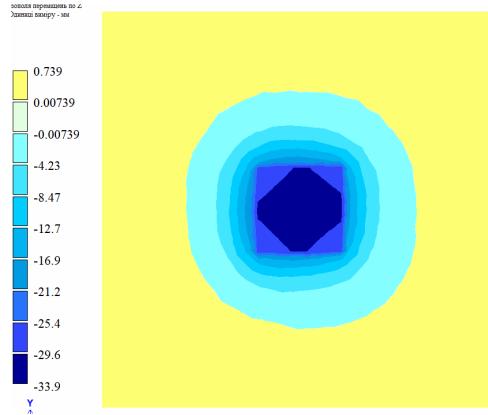


Рис. 25. Задача №3.1. Осідання ґрунтового масиву в стадії №7, мм

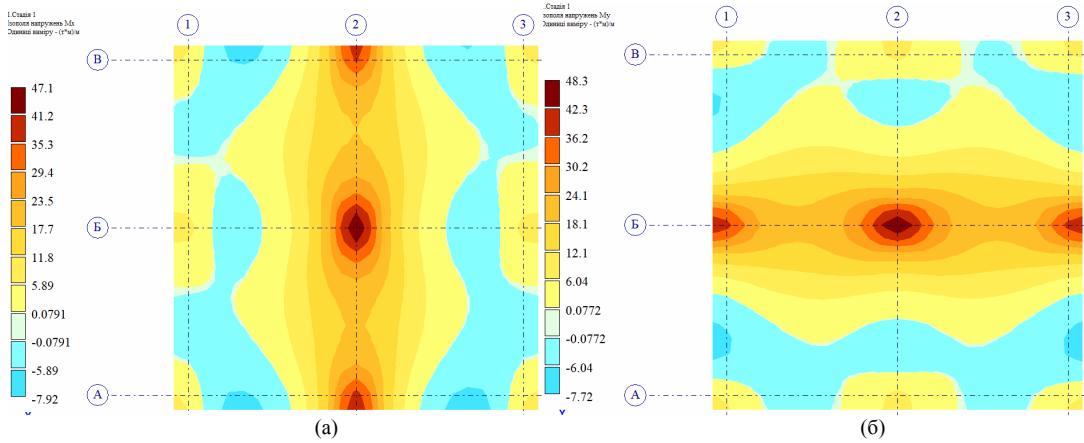


Рис. 26. Задача №3.1. Згинальні моменти фундаментної плити в стадії 7, (а) M_x , (б) M_y , т*м

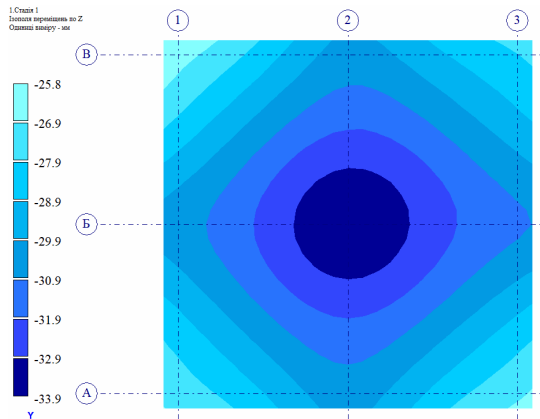


Рис. 27. Задача №3.1. Осідання фундаментної плити в стадії №7, мм

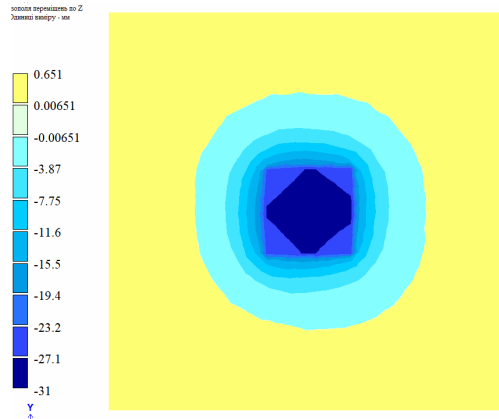


Рис. 31. Задача №3.2. Осідання ґрунтового масиву в стадії №7, мм

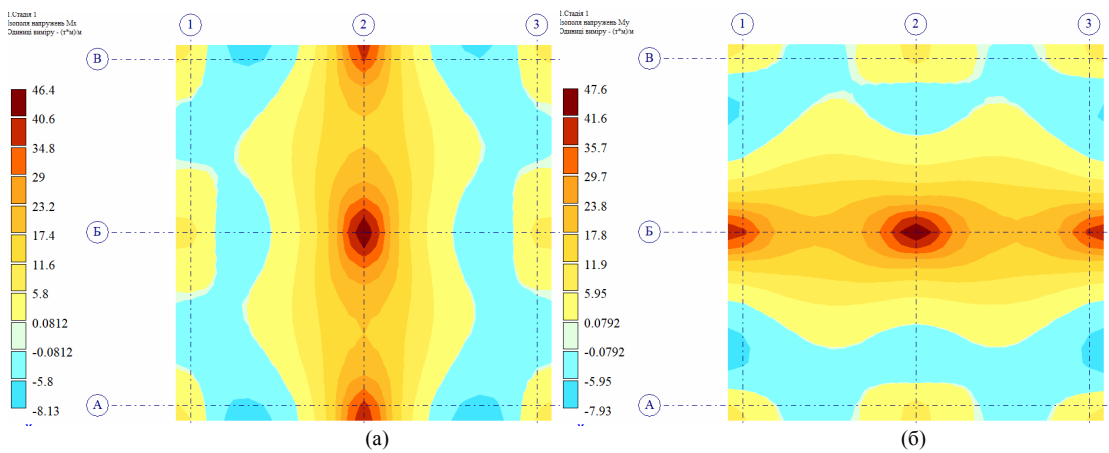


Рис. 32. Задача №3.2. Згинальні моменти фундаментної плити в стадії 7, (а) M_x , (б) M_y , т*м

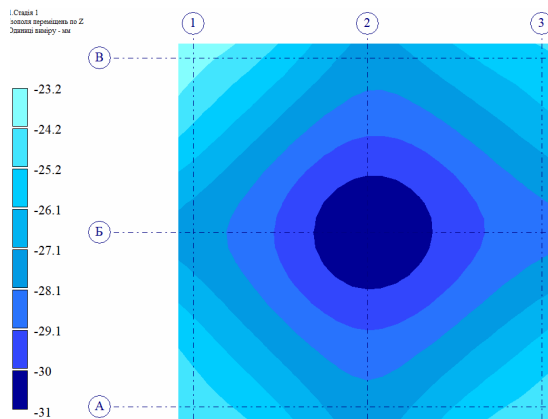


Рис. 33. Задача №3.2. Осідання фундаментної плити в стадії №7, мм

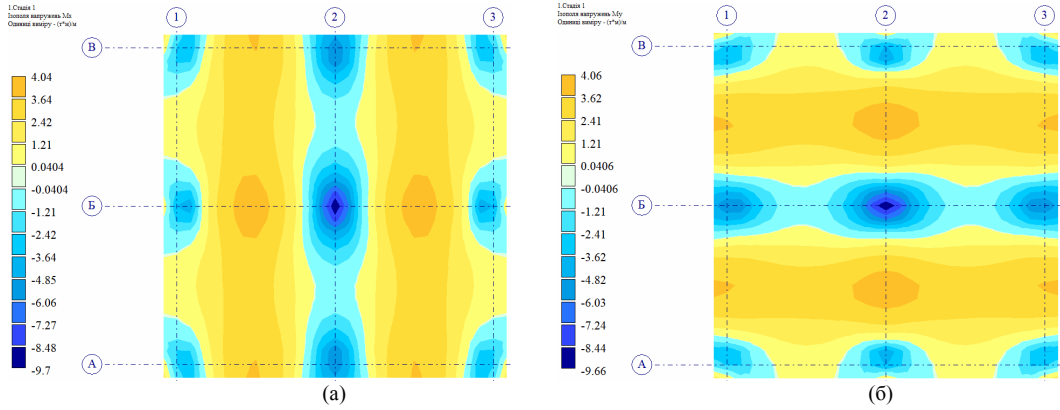


Рис. 34. Задача №3.2. Згинальні моменти плити перекриття в стадії 7, (а) M_x , (б) M_y , т*м

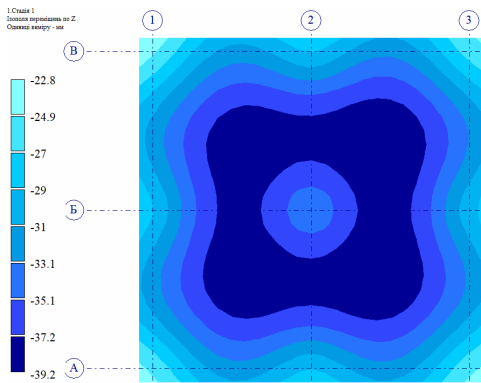


Рис. 35. Задача №3.2. Переміщення плити перекриття в стадії 1 (а) та стадії №7 (б), мм

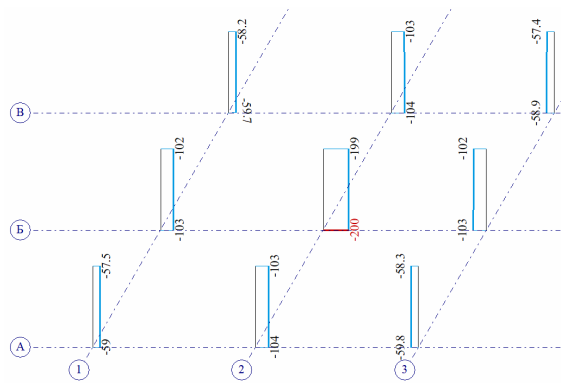


Рис. 36. Повздовжні зусилля N в колонах першого поверху будівлі задачі №3.2, стадія №7, т

В усіх сценаріях Задачі №3, попри значні диференціальні осідання, зумовлені лінзами слабких ґрунтів, перерозподіл поздовжніх зусиль N у колонах, на згинальні моменти (напруження) в фундаментній плиті та плитах перекриття виявилися вкрай незначними (різниця між значеннями складає до 4%). Порівняльний аналіз для трьох підзадач зведено на підсумкових графіках осідань (рис. 37) та діаграмах зусиль (рис. 38, 39).

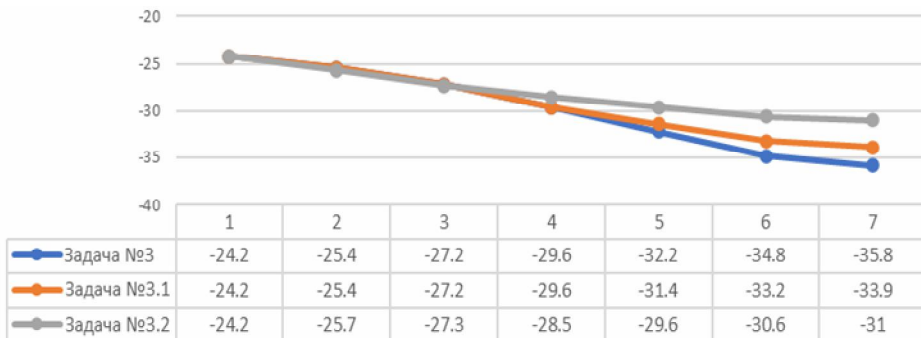


Рис. 37. Порівняльний графік максимальних осідань від стадій задач №3; 3.1; 3.2, мм

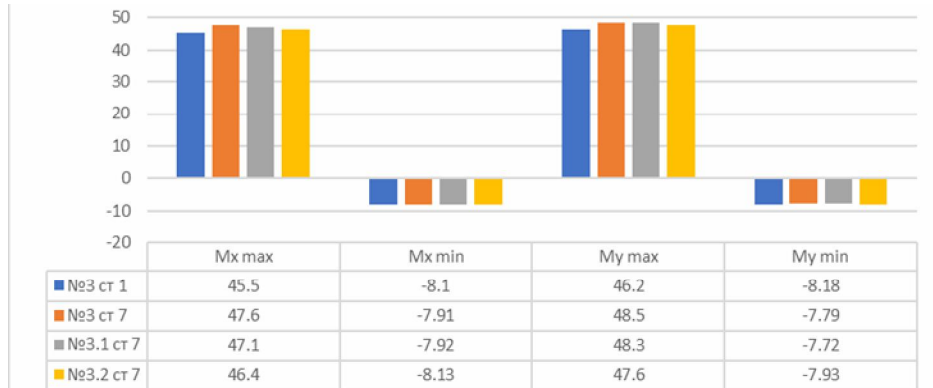


Рис. 38. Порівняльна діаграма максимальних та мінімальних зусиль M_x та M_y фундаментної плити від стадій задач №3; 3.1; 3.2, т*м

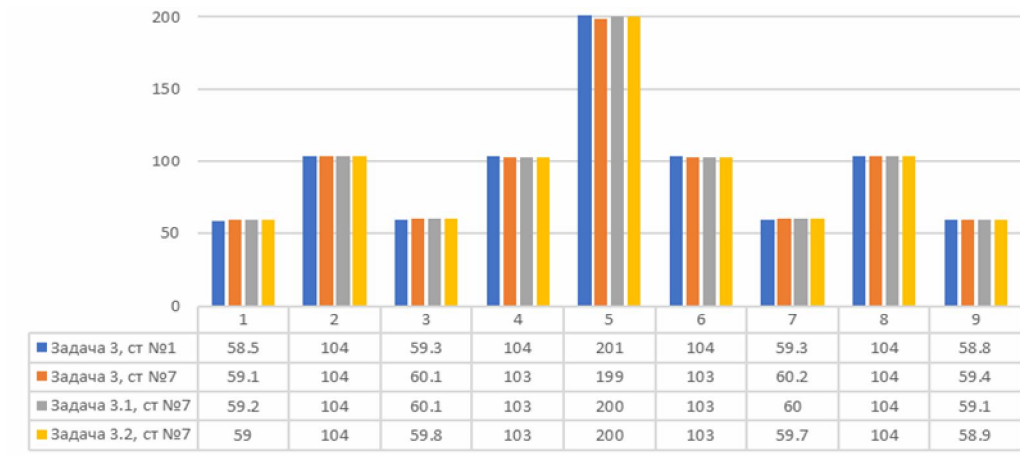


Рис. 39. Порівняльна діаграма зусиль в колонах від стадій задач №3; 3.1; 3.2, т

Висновки. Проведений теоретичний та чисельний аналіз проблеми впливу реологічних процесів на деформування системи «основа – фундамент – споруда» дозволяє сформулювати наступні обґрунтовані висновки:

Застосування теорії лінійної спадкової повзучості через введення перехідного коефіцієнта жорсткості ґрунту K (від 1.0 до 0.65) у підсистемі «МОНТАЖ+» (ЛІРА-САПР) є ефективним інструментом для прогнозування довготривалих осідань. Дослідження підтверджують, що стабілізовані деформації внаслідок в'язкої течії скелета та первинної консолідації можуть перевищувати початкові пружні осідання на 75–80%.

Просторовий залізобетонний каркас будівлі чинить активний супротив нерівномірному деформуванню основи. Заміна реального каркаса на еквівалентне зовнішнє навантаження, прикладене до плитного фундаменту, є математично некоректним прийомом, який штучно завищує максимальні абсолютні осідання на 15-20% і спотворює форму мульди осідання.

Процес релаксації напружень у ґрунтовій основі ініціює явище перерозподілу зусиль у часі. Через інтенсивніше осідання центральної зони фундаменту спостерігається ефект «зависання» каркаса: центральні колони розвантажуються, ретранслюючи додаткові напруження на периметральні та кутові несучі елементи.

Встановлено необхідність диференційованого підходу до призначення реологічних параметрів різних типів ґрунтів. Використання традиційного усередненого коефіцієнта повзучості (деградація всіх ґрунтів до $K=0.65$, Задача 3) призводить до штучного завищення стабілізованих осідань до 35.8 мм. Водночас, коректне застосування диференційованих коефіцієнтів (Задача 3.2), що враховує здатність малостисливих пісків зберігати довготривалу

жорсткість ($K=0.85$), демонструє реальне осідання на рівні 31.0 мм та значно м'якший перерозподіл зусиль (збереження -200 т на центральній колоні).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Барабаш М. С., Костира Н. О., Томашевський А. В. Визначення напружено-деформованого стану та міцності пошкоджених несучих конструкцій інструментами ПК «ЛІРА-САІР». Український журнал будівництва та архітектури. 2022. № 1(007). С. 24–33.
2. Винников Ю. Л. Математичне моделювання взаємодії фундаментів з ущільненими основами під час їх зведення та подальшої роботи : монографія. Полтава : ПолтНТУ, 2016. 296 с.
3. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. 36 с.
4. Маслов М. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. Москва : Высшая школа, 1968. 629 с.
5. Мешчан С. Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. Москва : Недра, 1985. 342 с.
6. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев : Сталь, 2002. 597 с.
7. Солoday I. I., Петренко Е. Ю., Затилук Г. А. Особливості створення розрахункових моделей при дослідженні напружено-деформованого стану підземних споруд // Опір матеріалів і теорія споруд. 2019. Вип. 102. С. 139–149.
8. Цытович Н. А. Механика грунтов. 4-е изд. Москва : Высшая школа, 1983. 288 с.
9. Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules (EN 1997-1:2004). Brussels : CEN, 2004. 171 p.
10. Innovative projects in difficult soil conditions using artificial foundation and base, arranged without soil excavation / P. Kryvosheiev, G. Farenjuk, V. Tytarenko, I. Boyko, M. Kornienko, M. Zotsenko, Yu. Vynnykov, V. Siedin, V. Shokarev, V. Krysan // Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Seoul, 2017. P. 3007–3010
11. Liu B., Xue J., Lehane B. M., Yin Z.-Y. Time-dependent soil–structure interaction analysis using a macro-element foundation model. Engineering Structures. 2024. Vol. 312. 118046.
12. Wong Y. F., et al. Role of Numerical Modelling in Understanding Soft Soil Behaviour Under Construction Load. Construction. 2025. Vol. 5, Iss. 2. P. 204.
13. Wood, D. M. Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics. Cambridge : Cambridge University Press, 1990. 462 p.
14. Xie J.-B., et al. Influencing Factors and Control Measures for Post-Construction Settlement of High-Fill Red Clay Embankment. Eng. 2025. Vol. 6, No. 12. P. 363.

REFERENCES

1. Barabash M. S., Kostyra N. O., Tomashevskiy A. V. Vyznachennia napruzhenno-deformovanoho stanu ta mitsnosti poskodzhennykh nesuchykh konstrukttsii instrumentamy PK «LIRA-SAPR» (Determination of the stress-strain state and strength of damaged load-bearing structures using LIRA-SAPR software tools). Ukrainnyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury. 2022. No. 1(007). S. 24–33.
2. Vynnykov Yu. L. Matematychnе modelivannia vzaemodii fundamentiv z ushlynenymy osnovamy pid chas yikh zvedennia ta podalshoi roboty : monohrafiia (Mathematical modeling of the interaction of foundations with compacted bases during their construction and subsequent operation : monograph). Poltava : PoltNTU, 2016. 296 p.
3. DBN V.2.1-10:2018. Osnovy i fundamenti budivel ta sporud. Osnovni polozhennia (Bases and foundations of buildings and structures. General principles). Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2018. 36 p.
4. Maslov M. N. Osnovy mekhaniki gruntov i inzhenernoy geologii (Fundamentals of soil mechanics and engineering geology). Moskva : Vysshaya shkola, 1968. 629 p.
5. Meshchian S. R. Eksperimentalnaya reologiya glinistykh gruntov (Experimental rheology of clay soils). Moskva : Nedra, 1985. 342 p.
6. Perelmuter A. V., Slivker V. I. Raschetnye modeli sooruzhenii i vozmozhnost ikh analiza (Computational models of structures and the possibility of their analysis). Kyiv : Stal, 2002. 597 p.
7. Solodei I. I., Petrenko E. Yu., Zatyliuk H. A. Osoblyvosti stvorennia rozrakhunkovykh modelei pry doslidzhenni napruzhenno-deformovanoho stanu pidzemnykh sporud (Features of creating computational models in the study of the stress-strain state of underground structures). Opir materialiv i teoriia sporud. 2019. Vyp. 102. S. 139–149.
8. Tsytovich N. A. Mekhanika gruntov (Soil mechanics). 4-e izd. Moskva : Vysshaya shkola, 1983. 288 p.
9. Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules (EN 1997-1:2004). Brussels : CEN, 2004. 171 p.
10. Innovative projects in difficult soil conditions using artificial foundation and base, arranged without soil excavation / P. Kryvosheiev, G. Farenjuk, V. Tytarenko, I. Boyko, M. Kornienko, M. Zotsenko, Yu. Vynnykov, V. Siedin, V. Shokarev, V. Krysan // Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Seoul, 2017. P. 3007–3010
11. Liu B., Xue J., Lehane B. M., Yin Z.-Y. Time-dependent soil–structure interaction analysis using a macro-element foundation model. Engineering Structures. 2024. Vol. 312. 118046.
12. Wong Y. F., et al. Role of Numerical Modelling in Understanding Soft Soil Behaviour Under Construction Load. Construction. 2025. Vol. 5, Iss. 2. P. 204.
13. Wood D. M. Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics. Cambridge : Cambridge University Press, 1990. 462 p.
14. Xie J.-B., et al. Influencing Factors and Control Measures for Post-Construction Settlement of High-Fill Red Clay Embankment. Eng. 2025. Vol. 6, No. 12. P. 363.

Затилюк Г.А., Бартків Б.Я., Недін В.О., Лисовенко А.І.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗНИЖЕННЯ ЖОРСТКОСТІ ҐРУНТОВОЇ ОСНОВИ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СИСТЕМИ «ОСНОВА-СПОРУДА»

У статті досліджено комплексний вплив реологічних процесів (консолідації та в'язкої повзучості ґрунтового скелета) на еволюцію напружено-деформованого стану просторової системи «основа – фундамент – споруда» у часі. Актуальність роботи зумовлена необхідністю точного прогнозування післябудівельних осідань для забезпечення експлуатаційної надійності будівель в ускладнених інженерно-геологічних умовах. За допомогою програмного комплексу «ЛІРА-САПР» (підсистема «МОНТАЖ+») реалізовано методику поетапного моделювання зміни еквівалентної жорсткості ґрунтового масиву. Теоретичним підґрунтям моделі виступає теорія лінійної спадкової повзучості Больцмана-Вольтерра з використанням експоненційного ядра релаксації Маслова-Арутюняна. Це дозволило обґрунтувати застосування перехідного коефіцієнта жорсткості K , що нелінійно деградує від 1.0 (миттєвий пружний стан) до диференційованих значень K_{∞} (від 0.85 для пісків до 0.65 для слабких глин) після завершення консолідації. Дослідження охопило репрезентативні розрахункові сценарії: навантаження на плитний фундамент без урахування жорсткості надземної будови; сумісна робота залізобетонного каркаса з однорідною основою; сумісна робота будівлі з неоднорідною геологічною структурою, ускладненою лінзами слабого ґрунту. Результати доводять, що ігнорування просторової жорсткості каркаса призводить до переоцінки абсолютних осідань на понад 28%. Включення каркаса у спільну роботу з деградуючою в часі основою генерує ефект розвантаження центральної зони плити (ефект «зависання») з перерозподілом контактної тиску на периферію. Встановлено, що використання традиційного усередненого коефіцієнта повзучості штучно завищує стабілізовані осідання. Коректне застосування диференційованих коефіцієнтів демонструє значно м'якший перерозподіл зусиль у несучих елементах. Отримані закономірності доводять необхідність врахування фактора часу на етапі проектування для запобігання прогресуючому руйнуванню.

Ключові слова: механіка ґрунтів, реологія, повзучість ґрунту, консолідація, ЛІРА-САПР, взаємодія «основа-споруда», метод скінченних елементів, диференціальні осідання, перерозподіл зусиль.

Zatyliuk Gh.A., Bartkiv B.Y., Nedin V.O., Lysovenko A.I.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF SOIL BASE STIFFNESS REDUCTION ON THE STRESS-STRAIN STATE OF THE "BASE-STRUCTURE" SYSTEM

This article investigates the complex influence of rheological processes, specifically consolidation and viscous creep of the soil skeleton, on the evolution of the stress-strain state of the spatial "soil base - foundation - structure" system over time. The relevance of the work is driven by the need for accurate forecasting of post-construction settlements to ensure the operational reliability of buildings, especially under complicated geological conditions. Using the "LIRA-SAPR" software package and the "MONTAZH+" subsystem, a methodology for the staged modeling of changing equivalent soil stiffness was implemented. The theoretical foundation of the numerical model is the classical linear hereditary creep theory of Boltzmann-Volterra, utilizing the exponential relaxation kernel of Maslov-Arutyunyan. This justified the application of a transitional stiffness coefficient K , which non-linearly degrades from 1.0 (instantaneous elastic state at the moment of external load application) to differentiated values of K_{∞} (ranging from 0.85 for sands to 0.65 for weak clays depending on their physical nature) after the completion of hydrodynamic consolidation processes. The research encompassed several representative computational scenarios: 1) load on a foundation slab without accounting for superstructure spatial stiffness; 2) joint operation of a three-story reinforced concrete frame with a homogeneous soil base; 3) joint spatial operation of the building with heterogeneous geology, complicated by the presence of lenses of weak soil (using various schemes for differentiating rheological properties). The modeling results conclusively prove that ignoring the spatial stiffness of the load-bearing frame leads to an overestimation of maximum absolute settlements by more than 28%. At the same time, incorporating the frame into joint operation with a time-degrading base generates a load-relieving effect in the central zone of the slab (the "hanging" effect), with a subsequent redistribution of contact pressure to the periphery. It was established that using a traditional averaged creep coefficient for all layers artificially overestimates stabilized settlements. The correct application of differentiated coefficients, which takes into account the ability of low-compressibility sands to maintain long-term stiffness, demonstrates a significantly softer redistribution of forces in load-bearing elements. The obtained regularities expand the understanding of the mechanics of interaction between structures and visco-elastic bases and prove the absolute necessity of considering the time factor during the design stage to prevent progressive collapse.

Keywords: soil mechanics, rheology, soil creep, consolidation, LIRA-SAPR, soil-structure interaction, finite element method, differential settlement, stress redistribution.

УДК 624.131.54:004.42

Затилюк Г.А., Бартків Б.Я., Недін В.О., Лисовенко А.І. Дослідження впливу зниження жорсткості ґрунтової основи на напружено-деформований стан системи «основа-споруда» // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2026. – Вип. 116. – С. 299-317.

У статті досліджено вплив реологічних властивостей ґрунтів (повзучості та консолідації) на розвиток осідань та перерозподіл зусиль у конструкціях будівлі з часом. Моделювання виконано у програмному комплексі «ЛІРА-САПР» з використанням об'ємних скінченних елементів. На основі теорії лінійної спадкової повзучості реалізовано методику поетапної зміни модуля деформації ґрунту за допомогою системи «Монтаж+». Проведено порівняльний аналіз трьох розрахункових схем: від спрощеного прикладання навантаження до врахування просторової жорсткості каркаса в простих та складних (із лінзами) інженерно-геологічних умовах. Доведено, що реологічні процеси у неоднорідних ґрунтах викликають незначний перерозподіл внутрішніх зусиль у колонах каркаса, напружень в фундаментній плиті.

Табл. 5. Іл. 38. Бібліогр. 14 назв.

UDC 624.131.54:004.42

Zatyliuk Gh.A., Bartkiv B.Y., Nedin V.O., Lysovenko A.I. **Research on the influence of soil base stiffness reduction on the stress-strain state of the “base-structure” system.** Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUCA, 2026. – Issue 116. – P. 299-317.

The article investigates the influence of soil rheological properties (creep and consolidation) on the development of settlements and the redistribution of forces in building structures over time. Modeling was performed in the LIRA-SAPR software package using solid finite elements. Based on the theory of linear hereditary creep, a methodology for the staged change of the soil deformation modulus was implemented using the MONTAZ+ system. A comparative analysis of three computational models was conducted: from a simplified load application to taking into account the spatial stiffness of the frame under simple and complex (with lenses) geotechnical conditions. It is proven that rheological processes in heterogeneous soils cause an insignificant redistribution of internal forces in the frame columns and stresses in the foundation slab.

Tabl. 5. Fig. 39. Ref. 14.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор філософії в прикладній механіці, доцент, доцент кафедри будівельної механіки ЗАТИЛЮК Герман Анатолійович

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, КНУБА, кафедра будівельної механіки

E-mail: zatyliuk.ha@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0392-2214>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): аспірант кафедри будівельної механіки БАРТКІВ Богдан Ярославович

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, КНУБА, кафедра будівельної механіки

E-mail: bartkiv.by@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-0174-5889>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельної механіки КНУБА, НЕДІН Валентин Олегович

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, КНУБА, кафедра будівельної механіки

Тел.: +38(044) 241-54-62

E-mail: nedin.vo@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3138-2892>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): інженер з експлуатації будівель та споруд ТОВ «Еталон ЛТД» ЛИСОВЕНКО Андрій Ігорович

Адреса робоча: 08130 Україна, Київська область, село Петропавлівська Борщагівка, вулиця Велика Кільцева, 4

E-mail: lysovenko_ai@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-1819-0740>