

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.154:624.138.2

Р. В. РАЗДУЙ<sup>1\*</sup>, Ю. Л. ВИННИКОВ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Будівництва та цивільної інженерії», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Першотравневий пр., 24, Полтава, Україна, 36011, тел. +38 (095) 109 13 86, ел. пошта romanrazduy@gmail.com, ORCID 0000-0002-5819-6056

<sup>2</sup> Кафедра «Буріння та геології», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Першотравневий пр., 24, Полтава, Україна, 36011, тел. +38 (067) 256 42 86, ел. пошта vynnykov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2164-9936

### РЕЗУЛЬТАТИ КОМПЛЕКСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АРМОВАНИХ ГРУНТОЦЕМЕНТНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ОСНОВ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА БУРОЗМІШУВАЛЬНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

**Мета.** Шляхом експериментальних досліджень армованих за бурозмішувальною технологією основ стрічкових фундаментів у лотку та в польових умовах виявити закономірності їх напружено-деформованого стану (НДС), для достовірності отриманих результатів порівнюючи дані натурних досліджень і моделювання методом скінчених елементів (МСЕ). **Методика.** Лоткові випробування проведено в лотку металевим штампом. Випробувано неармовані глинисті основи й покращенні ґрунтоцементним армуванням при варіюванні значення коефіцієнта армування від 2,1 % до 7,1 % з глибиною армування 100 мм і діаметром 5 мм. Спостереження за осіданнями натурального об'єкту проводились методом геометричного нівелювання за деформаційними марками, влаштованими рівномірно за периметром будівлі. Ділянка, на якій було зведено десятиповерховий житловий будинок обрана через складні інженерно-геологічні умови. Проведено нульовий цикл спостережень, а також цикли після зведення кожного поверху будинку, прийняття його до експлуатації, заселення будинку та кожні наступні 2-3 роки. **Результати.** Несуча здатність основ зі зростанням відсотка армування ґрунту збільшується при заданих параметрах приблизно за лінійною залежністю. Наведені результати демонструють високу відповідність експериментальних та змодельованих залежностей осідань від тиску. У пластичній стадії роботи ґрунту використані моделі ізотропного ущільнення (HSM) більш адекватно описує поведінку ґрунту, в той час, як модель із критерієм міцності Мора-Кулона (МС) дещо завищує осідання. Розподіл осідань дослідного об'єкту по стрічковим фундаментам відповідає фактичному, що зафіксовано при тривалих геодезичних спостереженнях. Виміряні осідання основ секцій й отримані моделюванням мають задовільну збіжність. **Наукова новизна.** Перевірено відповідність лабораторних, натурних даних і результатів моделювання ґрунтоцементних основ стрічкових фундаментів. **Практична значимість.** Апробовано моделі поведінки ґрунту та методи задання ґрунтоцементних елементів (ГЦЕ) для моделювання МСЕ армованих основ стрічкових фундаментів.

*Ключові слова:* армування основи; бурозмішувальний метод; геодезичні спостереження; ґрунтоцементний елемент; моделювання; метод скінчених елементів; осідання; слабка основа; стрічкові фундаменти

#### Вступ

В умовах сьогодення через щільну міську забудову активно ведеться будівництво на слабких ґрунтах. Нестача вільного простору та складні інженерно-геологічні умови кожного разу ставлять оригінальні завдання перед проєктувальниками. Тому, ретельного розгляду набуває проблема проєктування та будівництва на слабких ґрунтах і шляхи їх вирішення.

Одним із них є армування основ – ефективний метод поліпшення їх механічних параметрів введенням у масив включень з вищими по-

рівняно з ґрунтом механічними характеристиками. Армуванням ґрунту можна узагальнено визначити як будь-яку техніку, яка використовується для механічного змішування ґрунту з добавками чи без них (ДБН В.2.1-10:2018, 2018; Петренко, В. Д., Крисан, В. І., Крисан, В. В., & Коновал, В. М., 2022).

Змішування ґрунту на місці використовується в геотехнічній галузі вже більше 50 років і є одним із найпоширеніших способів армування основ (Дубінчик, & Недужа, 2021). Вважається, що ця техніка вперше була введена в США у 1950-х роках і отримала подальший ро-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

звиток у Європі (особливо в Скандинавії та Нідерландах) і Японії з 1970-х років (Terashi, 1997; Kitazume, & Terashi, 2013; Sakr, El Sawwaf, & Rabah, 2021).

Змішування ґрунту для геотехнічного поліпшення основи, здебільшого, виконується на місці за допомогою шнеків або інших ріжучих інструментів. Найпоширенішим реагентом, який використовується в геотехнічному змішуванні ґрунту, є звичайний портландцемент. Так, за М. Топольницькі (Topolnicki, 2006) розвиток технологій та обладнання, що використовуються в змішуванні ґрунту важко простежити без певної загальної системи класифікації і пропонує класифікаційна система, котра ґрунтується на трьох основних робочих характеристиках:

- за різницею між мокрою та сухою технологіями в'язучого;
- за методом, який використовується для змішування в'язучого;
- за розташування інструменту.

У даній роботі, зокрема, розглядається армування основи з використанням бурозмішувальної технології. Головними перевагами такого методу є економічність виготовлення та доступність матеріалів, а недолік – складність прогнозування поведінки без контролю якості виготовлених ґрунтоцементних елементів (ГЦЕ). Загалом, змішування ґрунту можна виконати до коефіцієнта армування 100 %, тобто, до того моменту, коли переміщується весь ґрунт усередині конкретного блоку. Вибране співвідношення відображає механічні можливості та параметри застосованого методу. Залежно від мети робіт змішування, конкретних умов об'єкта, конструкції та вартості обробки використовуються різні схеми.

В Україні в останні роки також склалася тенденція щодо розвитку сфери закріплення основ ґрунтоцементом. Так школа геотехніки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» приймає активну участь у розробленні нових ефективних методів у геотехніці. Під керівництвом професора М. Л. Зоценка проводяться експериментально-теоретичні дослідження армування основ ГЦЕ, зокрема, виготовленими за бурозмішувальною технологією (Zotsenko, N, Vynnykov, Yu., & Zotsenko, V., 2015; Zotsenko, Vynnykov, Lartseva, Shokarev, & Krysan, 2011).

Одна із найбільш популярних методик випробування поведінки ґрунтів, покращених ґрунтоцементним армуванням в лабораторних умовах – це проведення дослідів у лотку. Наприклад, в Японії М. Тераші та Х. Танака (Terashi, & Tanaka, 1981) досліджували закономірності зміцнення ґрунту групою ГЦЕ на базі даних тестування лабораторної моделі та польових досліджень з коефіцієнтом армування у плані від 13 % до 32 %.

М. Буасіда, А. Порбах та ін. (Bouassida, & Porbaha, 2004; Bouassida, de Buhau, & Dormieux, 1995) проводили моделювання для визначення граничної несучої здатності зміцненого ґрунту при коефіцієнті армування основи 18,8 % із різною міцністю елементів.

І. Йін та З. Фанг (Yin, & Fang, 2010) провели моделювання плоскої деформації, щоб дослідити несучу здатність і типові схеми руйнування зміцненого ґрунту з коефіцієнтом армування 12,6 %.

А. Банадакі та ін. (Banadaki, Ahmad, & Ali, 2014) здійснили модельні випробування для визначення вертикальної несучої здатності торф'яного ґрунту, покращеного за допомогою ґрунтоцементу при коефіцієнті армування 13,1 %, 19,6 % та 26,2 %.

К. Яо та ін. (Yao, K., Yao, Z., Song, X., Zhang, X., Hu, J., & Pan, X., 2016) провели випробування моделі для дослідження осідання фундаменту на мулистій основі, зміцненій ГЦЕ. При цьому дослідними параметрами були глибина армування та коефіцієнт армування (2,3 %, 5,3 % і 9,3 %).

Однак, вищезгадані лоткові дослідження оцінювали загалом поведінку ґрунтоцементного покращення основ без урахування типу фундаменту.

### Мета

Тому за мету даної роботи прийнято – шляхом комплексних експериментальних досліджень армованих за бурозмішувальною технологією основ стрічкових фундаментів у лотку та в польових умовах виявити закономірності їх напружено-деформованого стану (НДС), для достовірності отриманих результатів порівнюючи дані натурних досліджень і моделювання методом скінчених елементів (МСЕ).

**Методика**

Лоткові випробування проведені в металевому лотку з прозорою передньою стінкою з оргскла металевим прямокутним штампом. Всього було виконано чотири серії лоткових експериментів.

В якості основи для всіх лоткових досліджень використано штучно вкладену глинисту пасту, назва якої відповідає суглинку важкому пилуватому, тугопластичному згідно класифікації ґрунтів. Для приготування пасти був використаний природній ґрунт, відібраний у м. Полтава з котловану на глибині 4 м від поверхні планування.

У першому випадку проведені випробування глинистих основ без армування ГЦЕ, інші випробування виконані при варіюванні значення коефіцієнта армування на трьох рівнях – 2,1 %; 4,4 % та 7,1 % з глибиною армування 100 мм.

Таблиця 1

**Характеристики глинистої пасти**

$\rho_{d*}$ г/см <sup>3</sup>	Фізичні характеристики							
	$\rho_s$ г/см <sup>3</sup>	W	W <sub>L</sub>	W <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>L</sub>	S <sub>r</sub>	e
1,45	1,85	0,27	0,37	0,22	0,15	0,32	0,85	0,85

Лоток для випробувань виготовлено зі сталевих листів товщиною 3 мм, передню стінку виготовлено з прозорого органічного скла товщиною 40 мм, а внутрішні розміри складають 580×530×560 мм.

Випробування проводилось прямокутним сталевим штампом розмірами 420×35 мм, навантаження на штамп передавалося через вантажну систему, яка складалася з швелеру та сталевих труби. Швелер встановлювався зверху на штамп, а до нього за допомогою двох тяжів підвішувалася труба у якості підвіски, до неї чіпляли траверсу, на яку клали таровані вантажі. Власна вага вантажної системи разом з прямокутним стрічковим штампом становила 282 Н.

Для створення армованої основи в основі прямокутного стрічкового штампа посередині лотка влаштовували ГЦЕ армування, виходячи з умови рівномірного розміщення елементів за площею основи штампа (рис. 1).

При відсотку армування 2,1 % було влаштовано 16 елементів діаметром 5 мм. При цьому крок елементів армування становив: 55 мм вздовж довгої сторони штампа та 20 мм вздовж короткого боку. При відсотку армування 4,4 % – 33 елементи діаметром 5 мм із кроком відповідно 25 та 20 мм. При відсотку армування 4,4 % влаштовано 54 елементи діаметром 5 мм із кроком 15 мм та 20 мм відповідно.

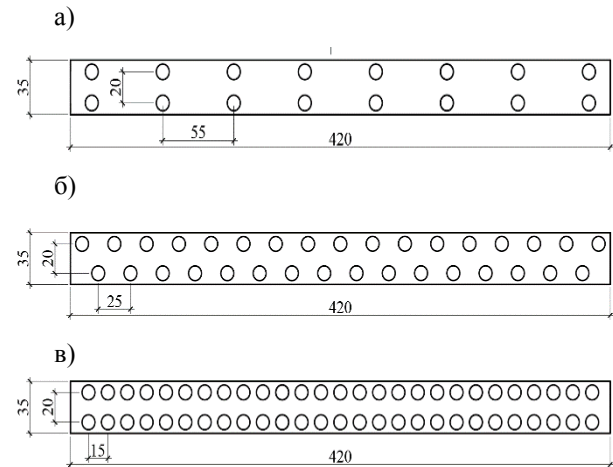


Рис. 1. Схема розміщення ГЦЕ армування в основі стрічкового штампу:  
 а) при відсотку армування  $i=2,1\%$ ;  
 б) при відсотку армування  $i=4,4\%$ ;  
 в) при відсотку армування  $i=7,1\%$

Тиск на основу прикладали ступенями: початковий ступінь дорівнював вазі системи навантаження; кожен наступний становив приблизно 0,2 кН, котрий витримували до умовної стабілізації осідань основи, за критерій якої приймали не перевищення осідання штампа 0,1 мм за останні 2 години спостережень. Фіксацію деформацій проводили через 1 хв., 5 хв., 15 хв., 30 хв., 60 хв. і далі через кожні 60 хв. після прикладення наступного ступеня тиску. Випробування припиняли після досягнення основою межі несучої здатності, що проявлялося в швидкому наростанні деформації без їх стабілізації.

Крім лоткового експерименту, проводилися довготривалі геодезичні спостереження за результатами осідання будівлі на основі, покращеній ГЦЕ. Ділянка, на якій було зведено десятиповерхового житлового будинку розташована по вул. Панянка, 65-б в м. Полтава. Будівля має складну форму у плані, складається із 5 секцій. I, II, IV та V секції дев'ятиповерхові, а центральна III секція має 10 поверхів (рис. 2).

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА



Рис. 2. Натурний об'єкт дослідження

Будівля безкаркасна, несучі повздовжні та поперечні цегляні стіни із цегли, перекриття із залізобетонних збірних круглопустотних плит, сходові марші та площадки збірні залізобетонні, фундаменти запроєктовані монолітні, стріч-

кові. Висота фундаментної стрічки 500 мм, а ширина варіюється у різних частинах будівлі від 1000 мм до 3600 мм. Позначка низу фундаменту на відмітці -3,050. Між підшвою стрічкових монолітних фундаментів та верхнім зрізом ґрунтоцементних армуючих елементів влаштована буферна щебенева подушка товщиною 300 мм з щебню фракції 20...40 мм, яка має ширину на 0,3 м більшу у кожен бік від бічних граней ГЦЕ.

Згідно до проектних даних основа армована ГЦЕ, виготовленими за бурозмішувальною технологією, діаметром 500 мм і довжиною 2000 мм при водоцементному відношенні 0,6...1,0 та відсотком цементу 20 % від ваги скелету природного ґрунту. Лабораторні дані щодо визначення фізико-механічних характеристик ґрунтоцементу в процесі контролю якості відсутні.

Інженерно-геологічні характеристики ділянки об'єкта подано у таблиці 2.

Таблиця 2

## Інженерно-геологічні характеристики дослідного майданчика

№	Найменування ґрунту	Товщина шару по свердловинам, м							Щільність ґрунту, $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	Щільність часток ґрунту, $\rho_s$ , т/м <sup>3</sup>	Природна вологість $W$	Вологісті		Питоме зчеплення, $c$ , кПа	Кут внутрішнього тертя, $\phi$ , град.	Модуль деформації $E$ , МПа	Вміст органічних речовин, $I_r$
		Св.1	Св.2	Св.3	Св.4	Св.5	Св.6	Св.7				$W_L$	$W_P$				
1	Насипний ґрунт	2,5	2,6	2,7	2,6	2,6	2,3	2,3	1,50	-	-	-	-	-	-	-	0,09
2	Глина з $I_r = 0.05$	-	-	-	1,0	1,1	0,7	0,7	1,81	2,68	0,30	0,46	0,24	35	13	1,5	0,05
3	Глина сильнозаторфована	-	-	-	0,5	0,4	-	-	1,31	2,68	1,55	0,96	0,34	5	4	0,5	0,43
4	Глина з $I_r = 0.07$	-	-	-	0,4	0,5	-	-	1,89	2,68	0,31	0,4	0,21	33	15	1,5	0,07
5	Пісок пилуватий	1,2	1,7	2,1	-	-	-	-	1,92	2,64	0,27	-	-	2	23	6,5	-
6	Пісок мілкий	6,6	6,1	5,7	5,7	5,7	6,4	6,5	1,97	2,64	0,26	-	-	3	26	10	-
7	Пісок мілкий	3,5	3,5	3,5	3,6	3,6	3,5	3,5	2,00	2,64	0,22	-	-	3	26	33	-
8	Суглинок	2,2	2,1	2,0	2,2	2,1	2,1	2,0	1,85	2,65	0,25	0,36	0,2	23	19	16,5	-

Дані щодо основи:

- товща насипних ґрунтів (ІГЕ-1) – 2,7 м;

- істотна неоднорідність ґрунтового масиву як за площею, так і глибиною (шари ІГЕ-2, ІГЕ-3, ІГЕ-4 зустрінуті не усіма свердловинами), а в

межах ІГЕ-5 – численні лінзи та прошарки піску пилуватого та супіску пластичного; – глинисті ґрунти ІГЕ-2, ІГЕ-3 та ІГЕ-4 належать до слабких (їх модулі деформації  $E < 5$  МПа);

– вміст органічних речовин у шарі ІГЕ-3 (глина важка, текуча) складає 43 %, тому вона належить до сильнозаторфованої;

– піски мілкі та пилуваті (ІГЕ-5) належать до несправжніх пливунів.

Спостереження за осіданнями будівлі проводили методом геометричного нівелювання III класу точності за деформаційними марками й опірними сполучними точками. Марки влаштовували приблизно на одному рівні, достатньо рівномірно за периметром будівлі (зокрема, на її кутах, у місцях примикання поперечних і поздовжніх несучих стін, по обидва боки від деформаційних швів тощо).

Безпосередньо зі зведенням цоколя будівлі влаштовували стінові марки, прокладали нівелірний хід і виконували нульовий цикл спостережень. Наступні цикли спостережень проводили після зведення кожного поверху будинку, прийняття його до експлуатації, заселення будинку та кожні наступні 2-3 роки.

### Результати

В процесі проведення серії штампових випробувань основи штампу в лабораторному лотку було отримано залежності середніх осідань основи штампа від ступенево-зростаючого тиску. При фіксації деформацій у часі побудовано графіки розвитку осідань основи жорсткого стрічкового штампа на кожному ступені тиску при основі із варіативними параметрами армування (рис. 3).

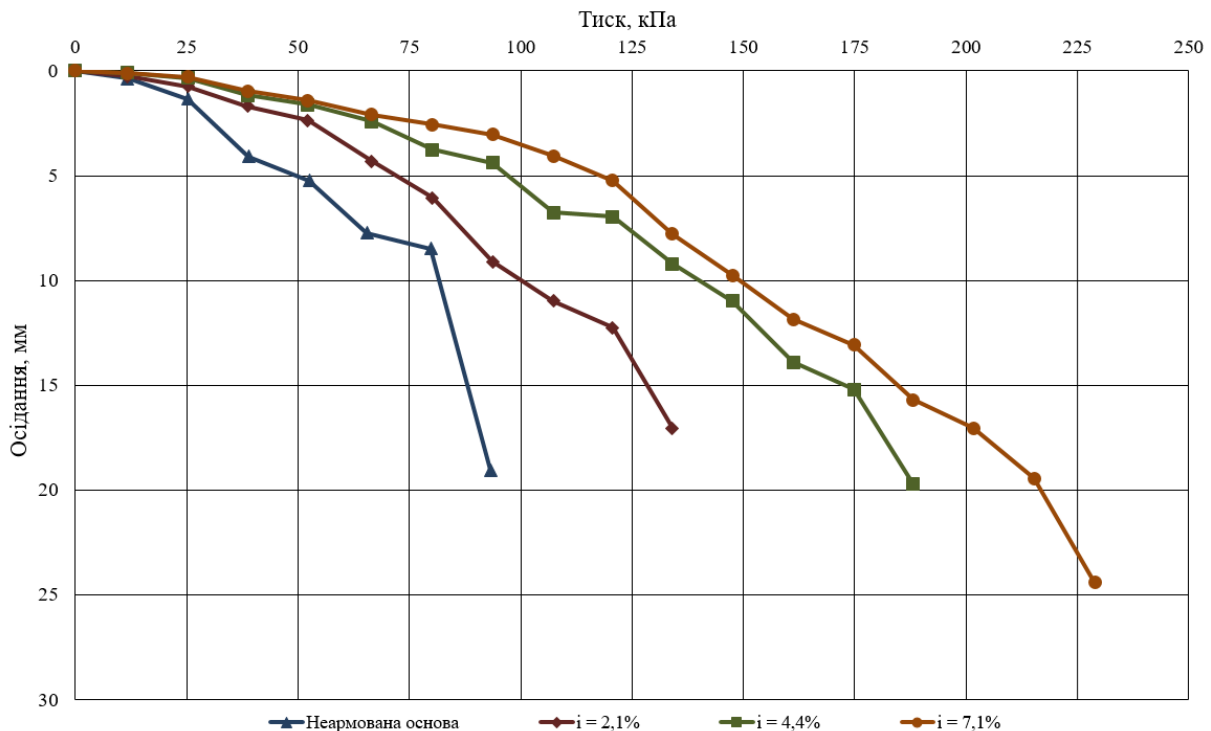


Рис. 3. Графік залежності осідань основи стрічкового штампа від тиску:

1 – неармована основа; 2 – коефіцієнт армування 2,1 %; 3 – коефіцієнт армування 4,4 %; 4 – коефіцієнт армування 7,1 %

Отже, з графіків залежності осідань основи штампа від тиску на ґрунтову основу можемо виявити деякі закономірності щодо її покращення ґрунтоцементними елементами:

1. Несуча здатність (міцність) основ зі зростанням відсотка армування ґрунту збільшується при заданих у лотковому дослідженні параметрах ґрунтової основи і висоті армування.

2. Величини першого та другого критичних тисків системи «армована основа – стрічковий фундамент» зростають приблизно за лінійною залежністю.

3. Зі збільшенням відсотку армування основи величина осідання, при якій визначалися перший та другий критичні тиски на основу збільшувалася.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Відповідно до мети для аналізу осідань армованих грунтоцементними елементами основ стрічкових фундаментів виконано моделювання методом скінчених елементів (МСЕ) за різними моделями розрахунку. Достовірність обраних моделей оцінювалася порівнянням змодельованих графіків осідання від навантаження з даними лоткового експерименту.

Для виконання тестової задачі було обрано дві моделі, доволі популярні та прості у використанні (Plaxis 3D, 2016; Chau, K., 2013; Faizi, K., A Rashid, A. S., Jahed Armaghani, D., Nazir, R., 2015): ідеальна пружно-пластична модель ґрунту із критерієм міцності Мора-Кулона (Mohr-Coulomb) та модель ізотропного ущільнення (зміцнення) (Hardening Soil).

Створено сітку скінчених елементів із рівнем щільності very fine, згущення автоматично виконувалося у паль та основи штампу, додаткового згущення не задавалося. Ітераційна процедура передбачала: відносна похибка дорівнює 0,05; максимальна кількість ітерацій кожного кроку не перевищує 60; максимальна кількість кроків у кожній фазі – по 250.

Для чисельного моделювання штампових досліджень у лотку були обрані ті самі характеристики лотку, ґрунтової основи, грунтоцементу та відсотків армування, що у лотковому дослідженні. Виконано два варіанти розрахунку, базуючись на методі задання грунтоцементних елементів.

У першому варіанті ГЦЕ моделювався як об'ємне ґрунтове тіло із відповідними характеристиками із моделлю поведінки.

При другому варіанті розрахунку виконувалося спрощення – ГЦЕ було змодельовано пальовими елементами. Для кожного випадку тиск на ґрунт прикладався відповідний до отриманого у лотковому експерименті.

У таблицях 3 та 4 подано характеристики, задані при моделюванні системи «ґрунтоцементна основа – жорсткий стрічковий штамп» по обом моделям поведінки ґрунту, відповідно.

На рис. 4 наведено графіки осідань за розрахунковими моделями МС та HSM (за обома варіантами задання ГЦЕ) для неармованої та армованої основи штампу.

Графік демонструє високу відповідність експериментальних і теоретично змодельованих залежностей осідань від тиску. Для неармованої основи у пластичній стадії роботи ґрунту

використання моделі HSM більш адекватно описує поведінку ґрунту, в той час, як модель МС дещо завищує осідання. Після досягненням основою першого критичного тиску обидві моделі поведінки ґрунту завищують несучу здатність основи у межах 5...30 %.

Таблиця 3

**Характеристики, задані для моделі ґрунту Mohr-Coulomb (MC)**

Елемент	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$E'$ , МПа	$\phi$ , °	$c$ , кПа	$\nu$
Ґрунтова паста	1,85	0,7	0	15,8	0,35
Щебінь	2,00	40	40	1,0	0,25
Ґрунтоцемент	2,00	300	–	–	–
Ґрунтоцементні пальові елементи	2,00	300	–	–	0,25

Таблиця 4

**Характеристики, задані для моделі ґрунту Hardening soil model (HSM)**

Елемент	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$E_{50}$ , МПа	$E_{oed}$ , МПа	$E_{ur}$ , МПа	$\phi$ , °	$c$ , кПа	$\nu$
Ґрунтова паста	1,85	0,7	0,7	3,5	0	15,8	0,35
Щебінь	2,00	40	40	–	0	1,0	0,25
Ґрунтоцемент	2,00	300	300	–	–	–	–
Ґрунтоцементні пальові елементи	2,00	300	300	–	–	–	0,25

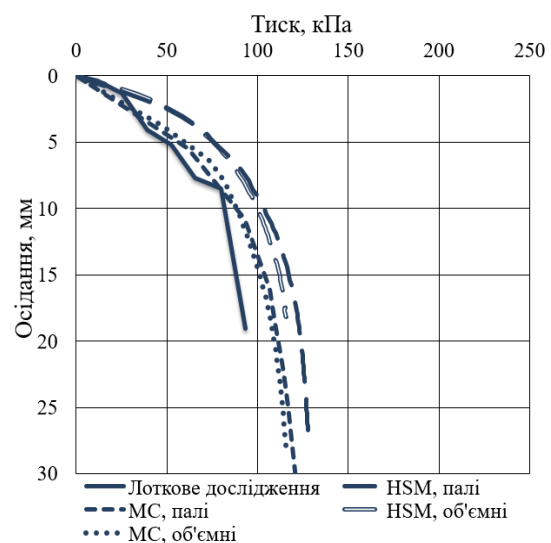


Рис. 4. Результати лоткових досліджень і чисельного моделювання неармованої основи

Для неармованої основи стрічкового штампу перший критичний тиск склав – 25 кПа (лоткові дослідження); 61 кПа (МС, палі); 73 кПа (МС, об'ємні елементи); 37 кПа (HSM, палі); 44 кПа (HSM, об'ємні елементи). Найближче наближення – на 76 % більше від експерименту модель HSM із пальовими елементами.

На рис. 5-7 подано графіки, отримані за результатами моделювання випробувань армованих основ штампу. Загалом обриси графіків осідання стрічкового штампу від навантаження у експериментальній частині та згідно моделювання МСЕ подібні.

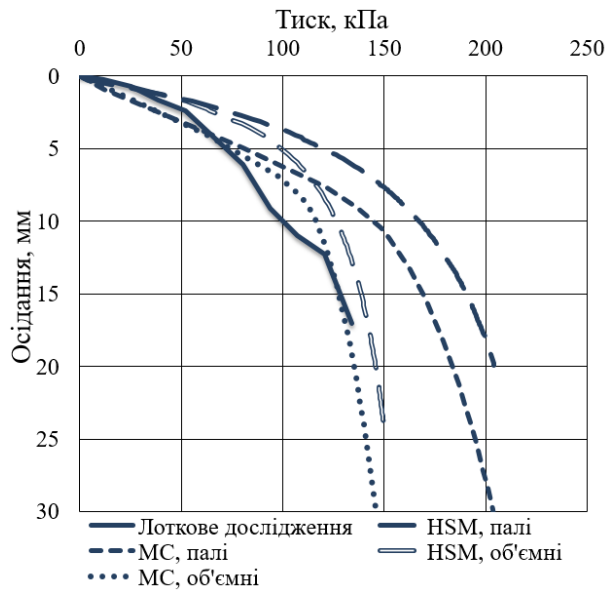


Рис. 5. Результати лоткових досліджень і чисельного моделювання при відсотку армування 2,1 %

На рис. 5 наведено графіки для відсотку армування  $i=2,1$  %. Для нього моделі HSM, як задання ГЦЕ об'ємними елементами, так і пальовими показує добре співпадіння графіків до досягнення першого критичного тиску, як для моделювання об'ємними елементами, так і для пальових елементів майже ідеальне. За моделлю МС в цій же стадії роботи ґрунту моделювання МСЕ завищує осідання. Лінійна залежність при цій моделі ґрунту, як і має бути теоретично, довша.

Такі самі висновки можна зробити після аналізу графічних залежностей для армованих основ при  $i=4,4$  % та  $i=7,1$  %. (рис. 6 і 7 відповідно). При усіх варіантах моделі МС завищують осідання основи, особливо в стадії пружних деформацій. Якщо порівнювати результати осідань після першого критичного тиску і пере-

ходу із пружної до пластичної поведінки ґрунту, то моделювання пальовими елементами завищує несучу здатність основи.

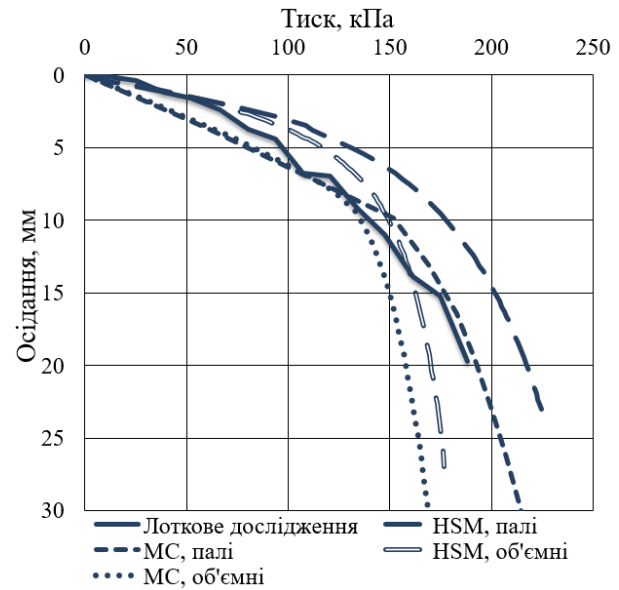


Рис. 6. Результати лоткових досліджень і чисельного моделювання при відсотку армування 4,4 %

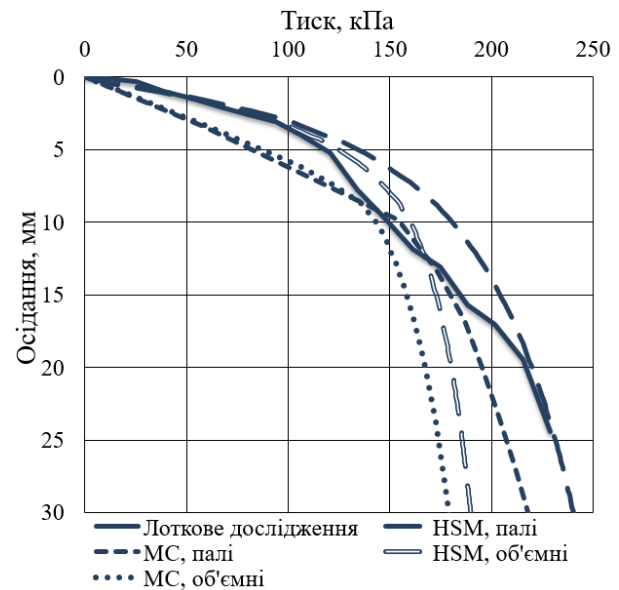


Рис. 7. Результати лоткових досліджень і чисельного моделювання при відсотку армування 7,1 %

Для армованої основи жорсткого стрічкового штампу при відсотку армування 2,1 % перший критичний тиск склав – 52 кПа (лоткові дослідження); 121 кПа (МС, палі); 108 кПа (МС, об'ємні елементи); 69 кПа (HSM, палі); 63 кПа (HSM, об'ємні елементи). Найближче наближення – на 21 % більше від експерименту модель HSM з об'ємними елементами.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Для армованої основи жорсткого стрічкового штапу при відсотку армування 4,4 % перший критичний тиск склав – 64 кПа (лоткові дослідження); 152 кПа (МС, палі); 132 кПа (МС, об'ємні елементи); 109 кПа (HSM, палі); 70 кПа (HSM, об'ємні елементи). Найближче наближення – на 9 % більше від експерименту модель HSM з об'ємними елементами.

Для армованої основи жорсткого стрічкового штапу при відсотку армування 7,1 % перший критичний тиск склав – 121 кПа (лоткові дослідження); 154 кПа (МС, палі); 135 кПа (МС, об'ємні елементи); 104 кПа (HSM, палі); 73 кПа (HSM, об'ємні елементи). Найближче наближення – на 12 % більше від експерименту модель МС із об'ємними елементами.

Можливі причини похибок – у неточностях визначення параметрів міцності, котрі наділі

задавалися для моделювання, адже складно в лабораторних умовах отримати однорідну ґрунтову основу. Доцільно відзначити різний характер зон пластичної роботи ґрунту на графіках: у моделі HSM плавніший графік, що більш корелює з експериментальним, а за ідеально пружно-пластичної роботи ґрунту фактично точки першого й другого критичного тиску співпадають, тобто, одразу відбувається швидкий приріст осідань.

За результатами геодезичних спостережень, виконаних згідно норм (ДСТУ Б В.2.1-30:2014, 2015), за осіданнями дев'яти-десяти поверхового житлового будинку в процесі його зведення та експлуатації побудовано епюри осідань марок на об'єкті досліджень на січень 2022 р. (рис. 8).

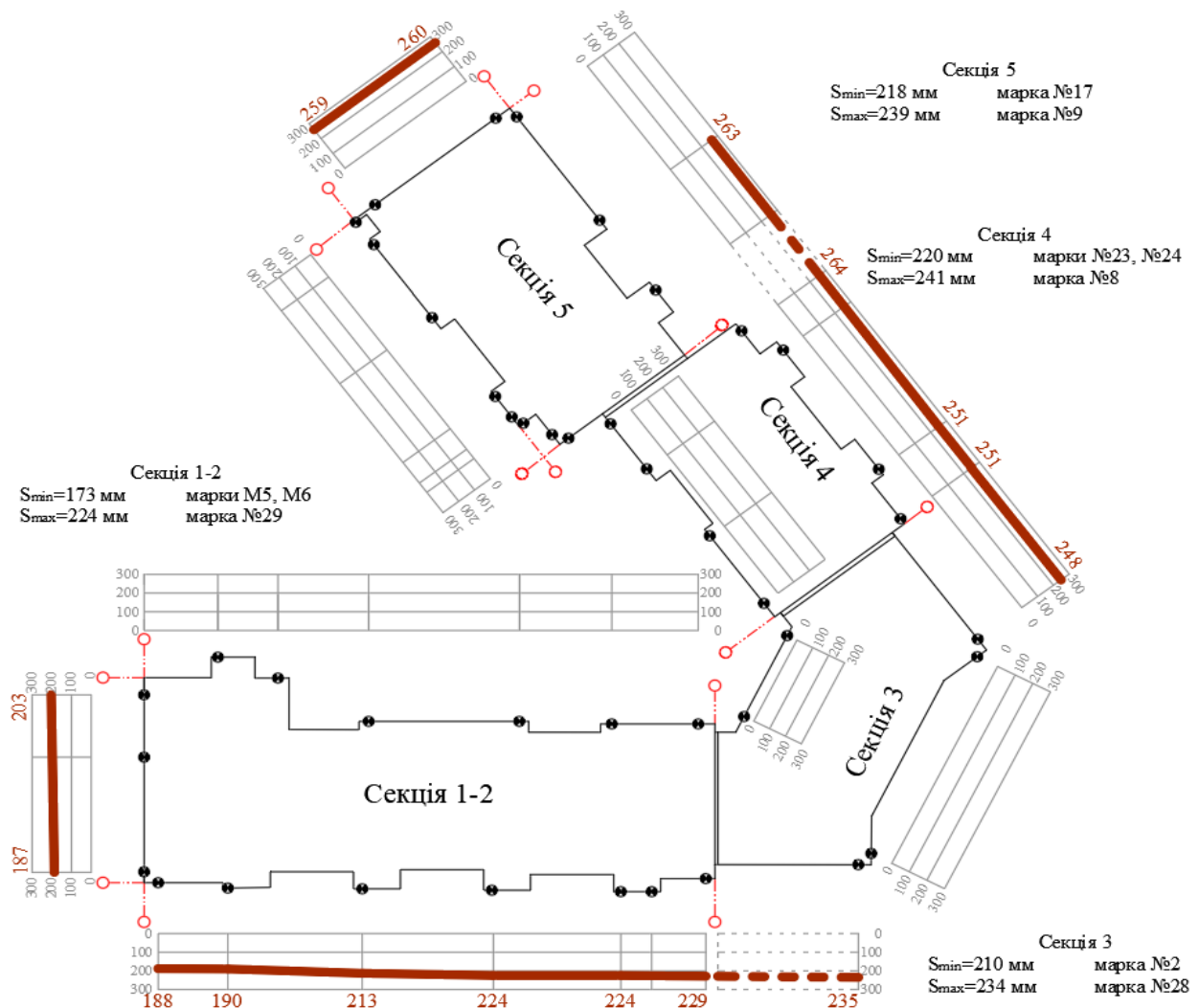


Рис. 8. Епюри осідань дослідного об'єкту



На кінець 2012 р. було здано в експлуатацію перші дві секції, в першому півріччі 2013 р. – три інші. Отже, будівля експлуатується 10 років. Крім нульового виконано ще чотирнадцять циклів нівелювання. Графіки розвитку осідань у часі стінових марок подано на рис. 9-12.

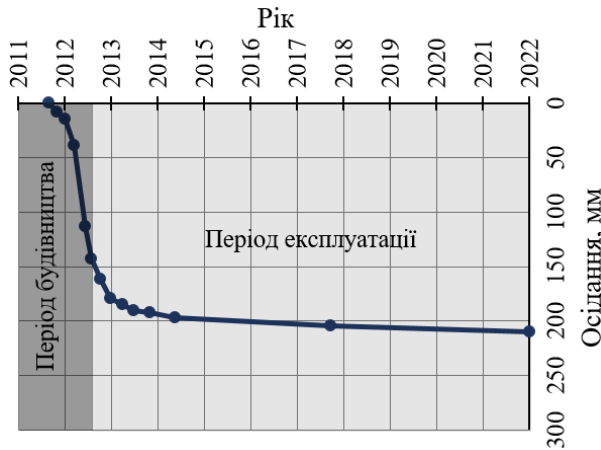


Рис. 9. Графік осідань секції I-II

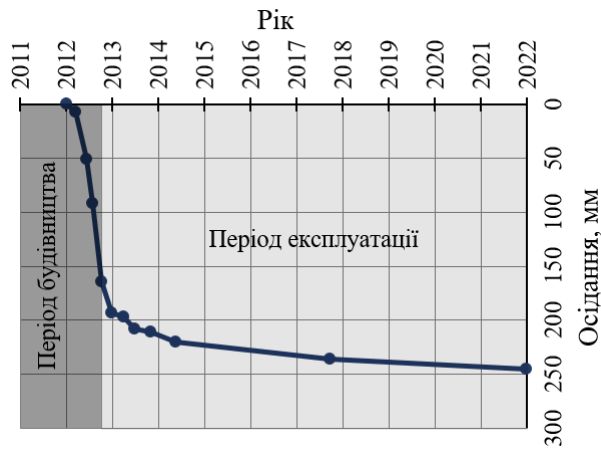


Рис. 10. Графік осідань секції III

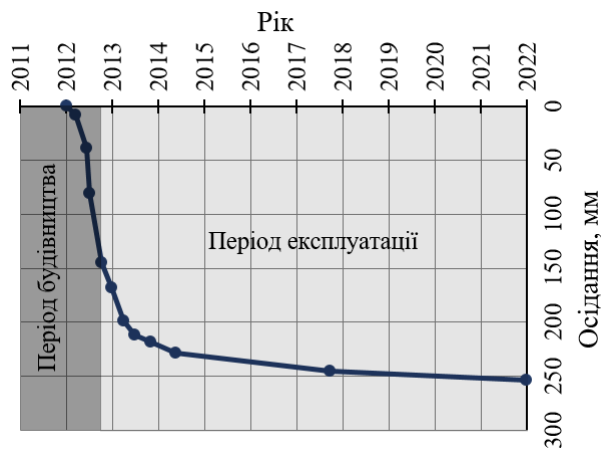


Рис. 11. Графік осідань секції IV



Рис. 12. Графік осідань секції V

У цілому, розвиток осідань основи фундаментів на даний момент продовжується, хоча є менш інтенсивною ніж у процесі будівництва, з тенденцією до стабілізації деформацій. При візуальному обстеженні стін будівлі тріщин у несучих стінах будинку виявлено не було.

Треба відмітити, що осідання секції I-II менше, а умовна стабілізація деформацій у цій секції простежується чіткіше, ніж в інших трьох. Це можна пов'язати із наступними факторами:

- ґрунтові умови під секцією I-II значно кращі при тому, що конструктивні вирішення фундаментів однакові.

- будівництво секції I-II розпочалося та закінчилося раніше за інших, тобто, відрізок часу від прикладання останнього суттєвого навантаження на будівлю менше.

За результатами геодезичних спостережень встановлені певні особливості розвитку осідань досліджуваного об'єкта, а саме:

- середні величини осідань  $S$  перевищили гранично допустимі нормами ДБН В.2.1-10:2018 (2018) величини для усіх секцій будівлі;

- відносні різниці осідань  $\Delta S/L$  не перевищили гранично допустимі нормами величини;

- швидкість розвитку осідань будівлі фактично прямо пропорційно залежить від швидкості завантаження під час монтажу та має лінійну залежність у період експлуатації з певними тенденціями до стабілізації;

- час стабілізації осідань ще не визначено, оскільки стабілізація ще не наступила (умова стабілізації – 1 мм/рік), передбачається, що найшвидше це відбудеться у секції I-II;

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

– тріщин та інших видимих дефектів чи деформацій у будівлі не виявлено, тому її технічний стан визначено нормальний.

Моделювання МСЕ системи «природний масив – ґрунтоцементна основа – стрічковий фундамент – цегляна будівля» призначено для порівняння результатів спостережень і чисельного розрахунку та підтвердження чи спростування коректності прийнятих методик прогнозування осідань будівель. Для 3D моделювання МСЕ з використанням пружно-пластичної моделі ґрунту НДС системи «природний масив – ґрунтоцементна основа – стрічковий фундамент – цегляна будівля» в інженерно-геологічних умовах майданчику об'єкту будівництва застосовано апробований комплекс Plaxis 3D Foundation. Модель поведінки ґрунту – пружно-пластична МС.

Геометрична модель являє собою композицію бурових свердловин, які створені відповідно до інженерно-геологічних розрізів. Розміри розрахункової області в плані складають 100x100 м. Глибина цієї області прийнята з певним запасом – 40 м. Ґрунтові нашарування задано за даними розвідувальних свердловин відповідно до даних табл. 2.

Створено сітку скінчених елементів, для якої прийнято рівень щільності coarse, розрахункова схема подана на рис. 13. Сітка об'ємних скінчених елементів у вигляді трикутних призм генерувалась програмою автоматично, згущення виконувалося у ГЦЕ та біля підшови фундаменту, додатково згущення не задавалось.

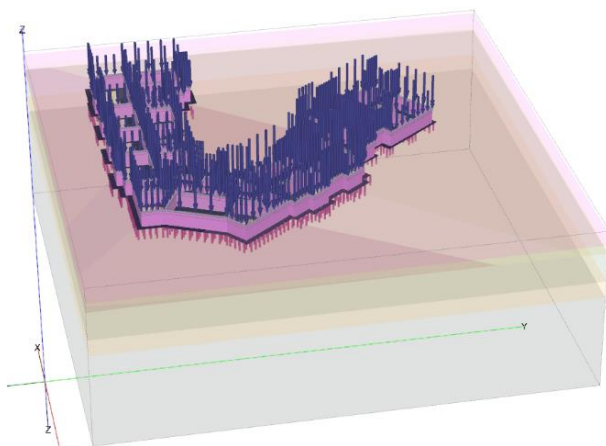


Рис. 13. Система «цокольний поверх – стрічковий фундамент – слабка основа, підсилена ГЦЕ»

ГЦЕ змодельовано пальовими елементами, так званими embedded beam. Тип поведінки – паля, з'єднання з фундаментом – вільне, поведінка матеріалу – linear elastic. Обрані тип елемента та поведінка матеріалу зумовлено тим, що для задач такого об'єму використання об'ємних елементів у такій кількості призводить до значного збільшення часу обрахунку, зростання кількості нев'язок та, виходячи з переліченого вище, «колапсу розрахунку».

Ітераційна процедура передбачала: відносна похибка дорівнює 0,1; максимальна кількість ітерацій не перевищує 60; максимальна кількість кроків у кожній фазі – по 100. Процес зведення об'єкту змодельовано за 4 фази:

- початкова, на якій масив отримав певні деформації під власною вагою відповідно до наслідків виїмання ґрунту;
- стадія виїмки ґрунту;
- влаштування стрічки фундаменту і стін підвалу нижче відмітки першого поверху;
- прикладення навантажень від надземної частини будівлі.

Величину модуля деформації ґрунтоцементу прийнято рівною 80 МПа, виходячи із значень нормативних документів, оскільки відсутня інформація щодо відбору зразків з ГЦЕ для визначення механічних характеристик ґрунтоцементу. Також змодельовано стрічкові фундаменти та стіни підвалу з фундаментних блоків. Надземна частина будівлі враховувалась як навантаження на рівні верху стін підвалу.

В результаті моделювання НДС системи «будівля – стрічковий фундамент – слабка основа, підсилена ґрунтоцементними елементами армування» вдалося отримати НДС системи. Розподіл осідань по стрічковим фундаментам відповідає фактичному, що зафіксовано при тривалих геодезичних спостереженнях (фактичному розташуванню стінових марок).

На рис. 14 наведено результати моделювання осідань штучної (армованої вертикальними ГЦЕ) основи стрічкових фундаментів будівлі. Зокрема, зафіксовано, що максимальне осідання будівлі при моделюванні склало 377 мм.

У табл. 5 порівнюються величини осідань основ секцій згідно даних моделювання та тривалих геодезичних спостережень. Виміряні осідання основ секцій й отримані моделюванням МСЕ у ПК Plaxis 3D мають задовільну збіжність.

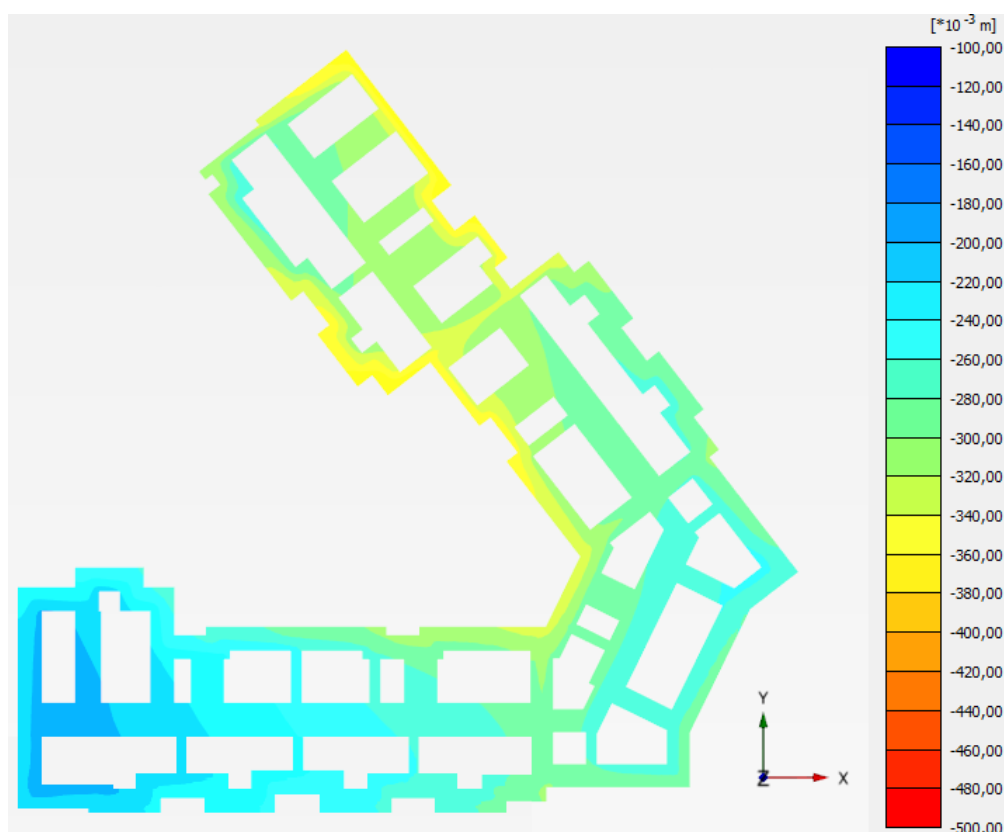


Рис. 14. Результати моделювання армованої основи фундаментної стрічки. Осідання, мм

Таблиця 5

**Порівняння результатів моделювання МСЕ і натурних спостережень за осіданнями основ об'єкту**

Секція	Моделювання МСЕ, мм	Тривалі натурні спостереження, мм
I	185...286	187...215
II	236...324	215...256
III	255...327	235...251
IV	272...358	248...264
V	268...377	249...260

**Наукова новизна та практична значимість**

Перевірено відповідність лабораторних, натурних даних та результатів моделювання досліджень ґрунтоцементних основ стрічкових фундаментів. Апробовано моделі поведінки ґрунту і методи задання ГЦЕ для моделювання МСЕ армованих основ стрічкових фундаментів.

**Висновки**

Метод армування основ фундаментів будівель і споруд ґрунтоцементними елементами, що виготовляють за бурозмішувальною технологією, у цілому підтвердив свою ефективність. Втім, зміцнення основи лише в межах шару слабких ґрунтів (коли їх потужність менша, ніж ширина фундаментів) для стрічкових фундаментів виявилось не достатньою.

Модель поведінки ґрунту HSM (модель ізотропного ущільнення) показує доволі точне співпадіння графіків, як для моделювання об'ємними елементами, так і для пальовими елементами, тоді як модель Мора-Кулона завищує осідання, особливо в стадії пружних деформацій.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

Banadaki, A., Ahmad, K., & Ali, N. (2014). Experimental investigations on ultimate bearing capacity of peat stabilized by a group of soil-cement column: a comparative study. *Acta Geotechnica*, 11, 295-307.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Bouassida, M., de Buhan, P., & Dormieux, L. (1995). Bearing capacity of a foundation resting on a soil reinforced by a group of columns. *Geotechnique*, 45, 25-34.
- Bouassida, M., & Porbaha, A. (2004). Bearing capacity of foundations resting on soft ground improved by soil cement columns. *Intern. Conf. on Geotechnical Engineering*, 173-180.
- Chau, K. (2013). Numerical Methods. *Proc. of the 18<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 647-654.
- Faizi, K., A Rashid, A. S., Jahed Armaghani, D., & Nazir, R. (2015). Deformation model of deep soil mixing using finite element method. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)*, 74, 179-184.
- Kitazume, M., & Terashi, M. (2013). *The deep mixing method*. CRC Press. Balkema, Leiden.
- Plaxis 3D (2016). *Reference Manual*.
- Sakr, M. A., El Sawwaf, M. A., & Rabah, A. K. (2021). Performance of improved ground by deep mixing technique: state of the art review. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*, 7, 3883-3892.
- Terashi, M. (1997). Theme lecture: Deep mixing method – Brief state of the art. *Proc. of 14<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Hamburg, Germany, 4, 2475-2478.
- Terashi, M., & Tanaka, H. (1981). Ground improved by deep mixing method. *Proc. of the 10<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3, 777-780.
- Topolnicki, M. (2006). Soil mixing – challenges of applications ranging from ground improvement to structural elements. *Proc. of the XIII Danube-European Conf. on Geotechnical Engineering*. Ljubljana, 2, 177-182.
- Yao, K., Yao, Z., Song, X., Zhang, X., Hu, J., & Pan, X. (2016). Settlement evaluation of soft ground reinforced by deep mixed columns. *Intern. Journal of Pavement Research and Technology*, 9, 460-465.
- Yin, J. H., & Fang, Z. (2010). Physical modelling of a footing on soft soil ground with deep cement mixed soil columns under vertical loading. *Marine Georesources and Geotechnology*, 28, 173-188.
- Zotsenko, N., Vynnykov, Yu., & Zotsenko, V. (2015). Soil-cement piles by boring-mixing technology. *Energy, energy saving and rational nature use*. Oradea University Press, 192-253.
- Zotsenko, M., Vynnykov, Yu., L'Areva, I., Shokarev, V., & Krysan, V. (2011). Characteristics of manmade stiff grounds improved by drill-mixing method. *Proc. of the 15<sup>th</sup> European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Athens, 1097-1102.
- ДБН В.2.1-10:2018 (2018). *Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення*. Київ: Мінрегіон України.
- ДСТУ Б В.2.1-30:2014 (2015). *Ґрунти. Методи вимірювання деформацій основ будинків і споруд*. Київ: Мінрегіон України.
- Дубінчик, О. І., & Недужа, Л. О. (2021). Науково-технічне обґрунтування підсилення ґрунтових основ армованими ґрунтоцементними палями. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 20, 13-18.
- Петренко, В. Д., Крисан, В. І., Крисан, В. В., & Коновал, В. М. (2022). Науково-технічне обґрунтування підсилення ґрунтових основ армованими ґрунтоцементними палями. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 21, 70-79.

R. V. RAZDUI<sup>1\*</sup>, YU. L. VYNNYKOV<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Department «Architecture and Urban Construction», National university «Yuri Kondratyuk Poltava polytechnic», Pervomaysky av., 24, Poltava, Ukraine, 36011, tel. +38 (095) 109 13 86, e-mail romanrazduy@gmail.com, ORCID 0000-0002-5271-6639

<sup>2</sup> Department «Drilling and Geology», National university «Yuri Kondratyuk Poltava polytechnic», Pervomaysky av., 24, Poltava, Ukraine, 36011, tel. +38 (067) 256 42 86, e-mail vynnykov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2164-9936

## RESULTS OF COMPLEX RESEARCH OF SOIL BASES REINFORCED BY SOIL-CEMENT ELEMENTS MANUFACTURED USING DRILLING MIXING METHOD

**Object.** To find out the nature of stress-strain state of strip foundations reinforced by drilling mixing technology by means of experimental studies in a tray and in field conditions, for the reliability of the obtained results, comparing field studies with finite element method (FEM) modeling. **Method.** Tray tests were carried out in a metal tray with a steel stamp. Unreinforced clay soil bases and bases reinforced by soil-cement were tested with varying values of the reinforcement coefficient from 2,1 % to 7,1 % with a reinforcement depth of 100 mm and a diameter of 5 mm. Observations of settlements of the natural object were carried out by the method of geometric leveling using deformation marks arranged evenly around the perimeter of the building. The site on which a ten-story residential building was built was chosen due to difficult engineering and geological conditions. The zero cycle of observations

was carried out, cycles after the construction of each floor of the building, its acceptance for operation, occupancy of the building and every subsequent 2-3 years. **Results.** The load-bearing capacity of the foundations with the increase in the percentage of soil reinforcement increases with the given parameters in an approximately linear dependence. The given results demonstrate a high correspondence between the experimental and simulated dependences of settlements on pressure. In the stage of plastic deformation, the use of the Hardening Soil model (HSM) more adequately describes the behavior of the soil, while the Mohr-Coulomb model (MCM) slightly overestimates the settlement. The distribution of settlements of the investigated object on strip foundations corresponds to the actual one recorded during long-term geodetic observations. The measured settlement of the foundations of the sections and those obtained by modeling have a satisfactory convergence. **Scientific novelty.** The correspondence of laboratory and field data and the results of modeling of soil-cement bases of strip foundations was checked. **The practical significance.** The models of soil behavior and the methods of specifying of soil-cement elements (SCE) for FEM modeling of reinforced soil bases of strip foundations have been tested.

**Keywords:** soil base reinforcement; drilling mixing method; geodetic observations; soil-cement element; modeling; finite element method; settlement; weak base; soft ground; strip foundations

## REFERENCES

- Banadaki, A., Ahmad, K., & Ali, N. (2014). Experimental investigations on ultimate bearing capacity of peat stabilized by a group of soil-cement column: a comparative study. *Acta Geotechnica*, 11, 295-307. (in English)
- Bouassida, M., de Buhan, P., & Dormieux, L. (1995). Bearing capacity of a foundation resting on a soil reinforced by a group of columns. *Geotechnique*, 45, 25-34. (in English)
- Bouassida, M., & Porbaha, A. (2004). Bearing capacity of foundations resting on soft ground improved by soil cement columns. *Intern. Conf. on Geotechnical Engineering*, 173-180. (in English)
- Chau, K. (2013). Numerical Methods. *Proc. of the 18<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 647-654. (in English)
- Faizi, K., A Rashid, A. S., Jahed Armaghani, D., & Nazir, R. (2015). Deformation model of deep soil mixing using finite element method. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)*, 74, 179-184. (in English)
- Kitazume, M., & Terashi, M. (2013). *The deep mixing method*. CRC Press. Balkema, Leiden. (in English)
- Plaxis 3D (2016). *Reference Manual*. (in English)
- Sakr, M. A., Elsawwaf, M. A., & Rabah, A. K. (2021). Performance of improved ground by deep mixing technique: state of the art review. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*, 7, 3883-3892. (in English)
- Terashi, M. (1997). Theme lecture: Deep mixing method – Brief state of the art. *Proc. of 14<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Hamburg, Germany, 4, 2475-2478. (in English)
- Terashi, M., & Tanaka, H. (1981). Ground improved by deep mixing method. *Proc. of the 10<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3, 777-780. (in English)
- Topolnicki, M. (2006). Soil mixing – challenges of applications ranging from ground improvement to structural elements. *Proc. of the XIII Danube-European Conf. on Geotechnical Engineering*. Ljubljana, 2, 177-182. (in English)
- Yao, K., Yao, Z., Song, X., Zhang, X., Hu, J., & Pan, X. (2016). Settlement evaluation of soft ground reinforced by deep mixed columns. *Intern. Journal of Pavement Research and Technology*, 9, 460-465. (in English)
- Yin, J. H., & Fang, Z. (2010). Physical modelling of a footing on soft soil ground with deep cement mixed soil columns under vertical loading. *Marine Georesources and Geotechnology*, 28, 173-188. (in English)
- Zotsenko, N., Vynnykov, Yu., & Zotsenko, V. (2015). Soil-cement piles by boring-mixing technology. *Energy, energy saving and rational nature use*. Oradea University Press, 192-253. (in English)
- Zotsenko, M., Vynnykov, Yu., L'Areva, I., Shokarev, V., & Krysan, V. (2011). Characteristics of manmade stiff grounds improved by drill-mixing method. *Proc. of the 15<sup>th</sup> European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Athens, 1097-1102. (in English)
- DBN V.2.1-10:2018 (2018). *Osnovy i fundamenty budivel ta sporud. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Minrehion Ukrainy. (in Ukrainian)
- DSTU B V.2.1-30:2014 (2015). *Grunty. Metody vymiriuvannia deformatsii osnov budynkiv i sporud*. Kyiv: Minrehion Ukrainy. (in Ukrainian)
- Dubinchyk, O. I., & Neduzha, L. O. (2021). Naukovo-tehnicne obgruntuvannia pidsylennia gruntovykh osnov armovanymy gruntotsementnymy paliamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 20, 13-18. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. D., Krysan, V. I., Krysan, V. V., & Konoval, V. M. (2022). Naukovo-tehnicne obgruntuvannia pidsylennia gruntovykh osnov armovanymy gruntotsementnymy paliamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 21, 70-79. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 01.05.2023.

Прийнята до друку 02.06.2023.