

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.13:624.154-048.32

В. В. ХАРЧЕНКО¹, В. С. АНДРЕЄВ^{2*}

¹Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, +38 (056) 373 15 53, ел. пошта harchenko-76@ukr.net, ORCID 0000-0002-7653-3001

^{2*}Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 480 11 33, ел. пошта v.s.andriev@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-0862-2790

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЛОТКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ҐРУНТОВОЇ ОСНОВИ ПРИ ЇЇ ПІДСИЛЕННІ МІКРОПАЛЕЮ

Мета. Отримання зміни деформованого стану моделей непідсиленої та підсиленої мікропалею ґрунтової основи для визначення впливу елемента підсилення. **Методика.** Використано метод досліджень в плоскому лотку, який дає змогу розв'язувати певне коло завдань, що пов'язані із взаємодією фундаментів з ґрунтовою основою. Наведено умови проведення експериментальних досліджень та особливості створення моделей непідсиленої та підсиленої мікропалею ґрунтової основи. Детально надано умови створення глинистої пасту, її укладання в плоскому лотку, підготовки моделі до навантаження, умови зняття відліків. Для оцінки адекватності експериментальних лоткових досліджень розраховано умови моделювання, виходячи із параметрів реальної цивільної споруди, її фундаменту та ґрунтової основи. **Результати.** Під час експериментальних досліджень ґрунтової основи та її взаємодії з фундаментом в плоскому лотку було проведено дві серії дослідів, в кожній з серій було проведено три досліді. В серіях №№ 1-3 досліджувалася непідсилена основа, в серіях №№ 4-6 – основа, що підсилена поодинокую мікропалею. Було проведено осереднення вертикальних переміщень, які були виміряні трьома індикаторами часового типу, встановленими посередині і по обох боках штампу, що моделював фундамент. На основі отриманих під час експериментальних досліджень результатів були побудовані діаграми в координатах $\sigma - s$ (напруження – осідання). **Наукова новизна.** Наукову новизну роботи складає отримання зміни деформованого стану моделей непідсиленої та підсиленої мікропалею ґрунтової основи і визначення впливу елемента підсилення (максимальне вертикальне переміщення 14,7 мм у підсиленій мікропалею моделі на відміну від 17,5 мм у непідсиленій, тобто визначено зменшення цієї компоненти деформованого стану в 1,19 рази). **Практична значимість.** Практична значимість проведеного дослідження полягає в доказі позитивного впливу мікропалі на основі результатів експериментальних лоткових досліджень. Базуючись на отриманих результатах, можна обґрунтовано застосовувати мікропалі, що створені за допомогою бурозмішувальної технології, для успішного зниження вертикальних переміщень фундаментів цивільних будівель на слабких ґрунтових основах.

Ключові слова: мікропалея; ґрунтова основа; підсилення; бурозмішувальна технологія; експериментальне випробування; лоткове дослідження

Вступ

Серед десятків методів підсилення ґрунтової основи в останній час в Україні та країнах Європейського Союзу найбільш широко застосовуваним є метод створення вертикальних елементів (паль або мікропаль) на основі струминного нагнітання (*jet-grouting*) або бурозмішувальної технології (*drilling-mixing technology*) (Zotsenko, N., Vynnykov, Yu., & Zotsenko, V., 2015; Зоценко, М. Л., Винников, Ю. Л., & Зоценко, В. М., 2016; Петренко, Харченко, Терещук, & Петров, 2020; Shin, & Lee, 2023; Stone Jr., Farhangi, Fatahi, & Karakouzian, 2023). Слід під-

креслити, що при всій технологічній пропрацьованості обох технологій до сих пір не існує теоретичного узагальнення їхнього впливу на ґрунтову основу.

Ця проблема обтяжується тим, що на практиці з'ясовано, що палі діаметром 0,5...1,2 м та довжиною 6,0...12,0 м, створені на основі *jet-grouting* або *drilling-mixing technology*, можуть бути вкорочені і перетворені на мікропалі (довжина $\geq 6,0$ м). Цей практичний крок, що дозволяє успішно виконати задачу підсилення ґрунтової основи цивільної будівлі з елементами підсилення довжиною до 6 метрів (в середньому 3,0...6,0 м), тобто мікропалеями, ускладнює

розуміння ситуації, що аналізується. Це відбувається тому, що зовнішня подібність таких мікропаль із забивними або буронабивними палями ніяким чином не пояснює їхню роботу із оточуючим ґрунтом.

Слід оговорити, що розглядається бурозмішувальна технологія створення мікропаль тому, що вона відрізняється технологічною простотою та, на відміну від *jet-grouting*, потребують менших витрат матеріалів (цемент, пісок, стиснуте повітря тощо). В якості експериментальних досліджень міцності та стійкості ґрунтових основ під час їхньої взаємодії з фундаментом широко застосовують метод моделювання (Wang, Han, & Jang, 2019; Vynnykov, & Razdui, 2021; Петренко, Андрєєв, & Харченко, 2021). Моделі системи «фундамент – основа» створюють зі штучних матеріалів, еквівалентних за своїми деформаційними властивостями і властивостями міцності до натурних, враховуючи прийнятий масштаб моделювання. Сьогодні цей метод широко використовують під назвою методу еквівалентних матеріалів. Його використання показало, що він дає змогу розв'язувати певне коло завдань, що пов'язані із взаємодією фундаментів з ґрунтовою основою (Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, Tiutkin, & Andreev, 2019; Петренко, Тют'кін, Крисан, В. І., & Крисан, В. В., 2019; Petrenko, Bannikov, Kharchenko, & Tkach, 2022).

Сутність методу еквівалентних матеріалів полягає в тому, що на фізичних моделях в плоскому або просторовому лотках з відомими допущеннями та при дотриманні певних умов досліджуються фізичні процеси і результати цих досліджень переносяться на натуру або порівнюються з результатами натурних чи аналітичних досліджень. В основі методу лежить теорія механічної подібності Ньютона, яка передбачає геометричну, кінематичну та динамічну подібність, тобто загальна механічна подібність визначається завданням перехідних множників від моделі до натурі (масштабів моделювання) для розмірів, часу і маси.

Одним із найпоширеніших методів моделювання об'єктів, що взаємодіють з ґрунтовою основою, є проведення випробувань в плоскому або просторовому лотках. Користуючись цим методом можна вносити суттєві доповнення до розрахунків, а у багатьох випадках отримувати точніші результати, іноді цей метод дає змогу

розв'язувати складні задачі взаємодії фундаментів з ґрунтовою основою. Під час моделювання за допомогою лотків зазвичай використовують матеріал натурі або підготовлений натурний ґрунт.

Мета

Метою наукового дослідження, результати якого наводяться в науковій статті, є отримання зміни деформованого стану моделей невідсиленої та посиленої мікропалею ґрунтової основи для визначення впливу елемента підсилення.

Методика

Під час проведення експериментальних досліджень було прийнято такі положення моделювання. По-перше, було визначено масштаб моделювання n з урахуванням геометричної подібності для фундаменту та ґрунтової основи. Він дорівнює $n=10$, тобто розміри фундаменту було зменшено у 10 разів. Для експериментальних досліджень міцності та стійкості основи в плоскому лотку прийнято фундамент на 1 пог. м. та шириною 1,6 м (Dubinchyk, Bannikov, Kildieiev, & Kharchenko, 2020). Відповідно, замість нього застосовувався металевий жорсткий штамп шириною 0,16 м і довжиною 0,1 м.

По-друге, кінематична подібність у розрахунок не бралася, оскільки модель навантажувалася статичним навантаженням протягом короткого (до 10 хвилин) періоду часу. Такий час випробування, що потребував активного зняття відліків індикаторів часового типу, заплановано таким коротким ще й з умови того, щоб виключити з випробування ефекти, пов'язані з в'язким компонентом деформування. Відповідно, будь-який вплив повзучості або вторинної консолідації, які виникають під час тривалих досліджень, повністю виключено.

По-третє, під час проведення експериментів не було необхідності дотримання умов динамічної подібності через відсутність зміни навантаження за періодичним законом або у вигляді імпульсу або удару.

Водночас було прийнято положення про те, що силова подібність під час навантаження моделі статичним навантаженням була дотримана до реальної ситуації цивільної будівлі, оскільки навантаження на штамп, що моделював фундамент, складало 3,17 кН/м. Тобто, до навантаження також додано масштаб моделювання

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$n=100$, і воно зменшене в 100 разів. Таким чином, максимальна величина напружень під штампом складала 0,198 (0,2) МПа.

Для повного опису поведінки фундаменту цивільної будівлі під час впливу на нього навантаження необхідно враховувати численні параметри: конструкцію фундаменту, можливість підсилення ґрунтової основи мікропалиями, деформаційні властивості матеріалів, характеристики ґрунтової основи тощо. Відповідно, що критеріїв подібності, які можуть бути складені з цих параметрів, досить багато. Тому, як правило, під час переходу до моделей не представляється можливим зберегти числові значення всіх критеріїв подібності, однак, правильне уявлення про роботу фундаменту і ґрунтової основи можна отримати, також і в тих випадках, коли задовольняється тільки частина критеріїв подібності.

Модель ґрунтової основи виготовляли з однорідного ґрунту (зволожений суглинок) шляхом його пошарового ущільнення. Висота ґрунтової моделі в масштабі 1:10 становила 200 мм. Експериментальні дослідження проводилися в плоскому лотку конструкції Галузевої науково-дослідної лабораторії механіки ґрунтів Українського державного університету науки і технологій. Висота лотка становить 220 мм, розміри в плані – 680×120 мм. Передня стінка лотка представляє собою прозоре органічне скло для спостережень за розвитком деформацій та можливістю їхньої фотографічної фіксації. В процесі завантаження моделей контролювався рівень абсолютних переміщень за допомогою індикаторів часового типу виробництва Німеччини.

Для забезпечення чітко вертикальної передачі навантаження в центрі моделі встановлено металеву кульку діаметром 8 мм. Вертикальне навантаження на штамп створювалося за допомогою лабораторних мас (4 кг), при цьому навантаження передавалося за допомогою важільної системи з плечем 1:10 через жорсткий металевий штамп площею 0,016 м² (160,0 см²). Приріст вертикального навантаження на штамп становив від 40 до 80 Н (з урахуванням плеча відповідно від 400 до 800 Н), при цьому величина напружень під штампом змінювалася від 0,025 МПа до 0,05 МПа.

Осідання штампа вимірювали трьома індикаторами годинникового типу з ціною поділки

0,01 мм. Індикатори на штампі встановлювали симетрично щодо центру його вертикальної поздовжньої площини. Вертикальні переміщення штампа, який моделював фундамент, фіксували після додавання кожного ступеня навантаження фотографуванням деформованої моделі і зняттям за індикаторами відліків, після чого знаходили осереднене значення (рис. 1).



Рис. 1. Підготовка експерименту в плоскому лотку

Переміщення ґрунтової основи фіксували за лінійками міліметрового паперу, наклеєними на бічних гранях плоского лотка, а також за деформаціями моделі із сіткою, нанесеною на її лицьовій стороні. Для спостереження за розвитком деформацій з боку прозорої стінки було нанесено сітку 2,0×2,0 см, накреслену на передній стороні моделі гострим олівцем по вирівняній поверхні. Деформації шарів ґрунту, віддалених від поверхні, фіксувалися за допомогою смужок пофарбованого ґрунту. Для стабілізації структури моделі ґрунтової основи до експериментів її витримували протягом 1 доби.

Для виготовлення глинистої пасти, застосовуваної для лоткових експериментів, використовували повітряно-сухий ґрунт (суглинок) (ДСТУ Б В.2.1-2-96, 1997), який перед випробуваннями перебував у приміщенні протягом одного року. Застосування повітряно-сухого ґрунту як основи пояснюється тим, що під час його замочування водою глиниста паста, яку отримують, являє собою більш однорідну масу.

Суглинок розтирався до однорідного утворення на металевому листі за допомогою трамбування масою 15 кг.

Ґрунт замочували водою і пропускали через набір сит із діаметром залишків від 1,0 мм до 0,3 мм. Ґрунт укладався в лоток шарами товщиною близько 3,0 см і ущільнювався трамбуванням. Коли товщина загального шару в лотку досягала 20 см, вирівнювали верхню грань моделі. Фізико-механічні характеристики ґрунту основи наступні: суглинок із показником текучості $I_L=0,05$; числом пластичності $I_P=0,135$; щільністю ґрунту під час виготовлення моделі $\rho_{сп}=1,88\dots 1,91$ г/см³; щільністю сухого ґрунту $\rho_d=1,269\dots 1,287$ г/см³; вологістю $W=0,15\dots 0,19$; коефіцієнтом пористості $e=0,642\dots 0,909$; ступенем вологості $S_r=0,65$; модулем деформації $E=20,1$ МПа.

Для перевірки точності визначення значень стисливості ґрунту використовувалися два однакових компресійних прилади, до яких прикладалися однакові навантаження. Робоче кільце одного з приладів було повністю заповнене ґрунтом, а інше – наполовину. Для переходу від значень модуля деформації, отриманих у лабораторних умовах, до розрахункових значень модуля деформації використовували рекомендації ДСТУ Б В.2.1-2-96 (1997).

Мікропалю було створено із того ж самого ґрунту, однак під час замішування разом із водою застосовувався клей ПВА, що пояснюється наступною об'єктивною обставиною. Серцевиною модельної мікропалі було застосовано сталевий дріт діаметром 2 мм і довжиною 6 см, що відповідає реальній довжині палі 6 м. Після декількох невдалих спроб застосувати лише ґрунт, цемент та воду для створення оболонки навколо дроту, було визначено, що зчеплення сталі та модельного ґрунтоцементу недостатньо. Це характеризувалося тим, що після витримання модельної мікропалі протягом 7 діб в деяких місцях суміш ґрунтової пасти та цементу відшаровувалася, а деякі модельні мікропалі руйнувалися прямо в руках, не дозволяючи постановку в тіло моделі. Тому було вирішено замішувати ґрунтову пасту разом з цементом, водою та додатковим в'язучим. Такий прийом дозволив створити 14 модельних мікропалей діаметром 5 мм, які мали достатню міцність та не руйнувалися. З цієї кількості було відібрано 9 модельних мікропалей, які на основі візуального контролю мали найбільш презентабельний вигляд, що характеризувався повною відсутністю поверхневих пошкоджень.

Для встановлення модельної мікропалі в загальну модель в плоскому лотку було застосовано електричну дріль, за допомогою якої було створено вертикальну лідерну свердловину діаметром 0,5 см, в яку було розміщено готову модельну мікропалу. Під час її розміщення контролювалася швидкість для того, щоб руйнування модельної мікропалі не відбулося.

Після створення з урахуванням масштабу потрібної моделі ґрунтової основи із підсилення мікропалею на заданій у вихідних даних відстанях встановлювали штамп, який навантажували для вивчення під час моделювання деформованого стану. Для виключення впливу стінок лотка на характер деформування ґрунтової основи, підсиленої мікропалею, (зменшення тертя ґрунту об лоток) його стінки змащувалися технічним мастилом.

Результати

Під час експериментальних досліджень ґрунтової основи та взаємодії з фундаментом в плоскому лотку було проведено дві серії дослідів, в кожній з серій було проведено три дослідів. В серіях №№ 1-3 досліджувалася непідсилена основа, в серіях №№ 4-6 – основа, що підсилена поодиноким мікропалею. Задачею серій №№ 1-3 було отримання ряду даних про загальне деформування моделі ґрунтової основи, які в подальшому слугували як такі, з якими порівнювалися результати серій №№ 4-6. Порівняння між результатами серій повинно довести ефективність застосування підсилення ґрунтової основи мікропаллями.

Після проведення двох серій випробувань моделей в плоскому лотку був проведений кількісний аналіз зміни деформованого стану. Для цього аналізу було проведено осереднення вертикальних переміщень, які були виміряні трьома індикаторами часового типу, встановленими посередині і по обох боках штамп, що моделював фундамент. Осереднене вертикальне переміщення штамп s знаходилося із застосуванням простої формули: $s=(s_1+s_2+s_3)/3$, де s_1 , s_2 , s_3 – відповідно показники індикаторів №№ 1-3. Це проводилося для того, щоб максимально згладити вплив незначних кренів, які все ж таки відмічалися. На основі отриманих під час експериментальних досліджень результатів були побудовані діаграми в координатах $\sigma - s$ (рис. 2).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

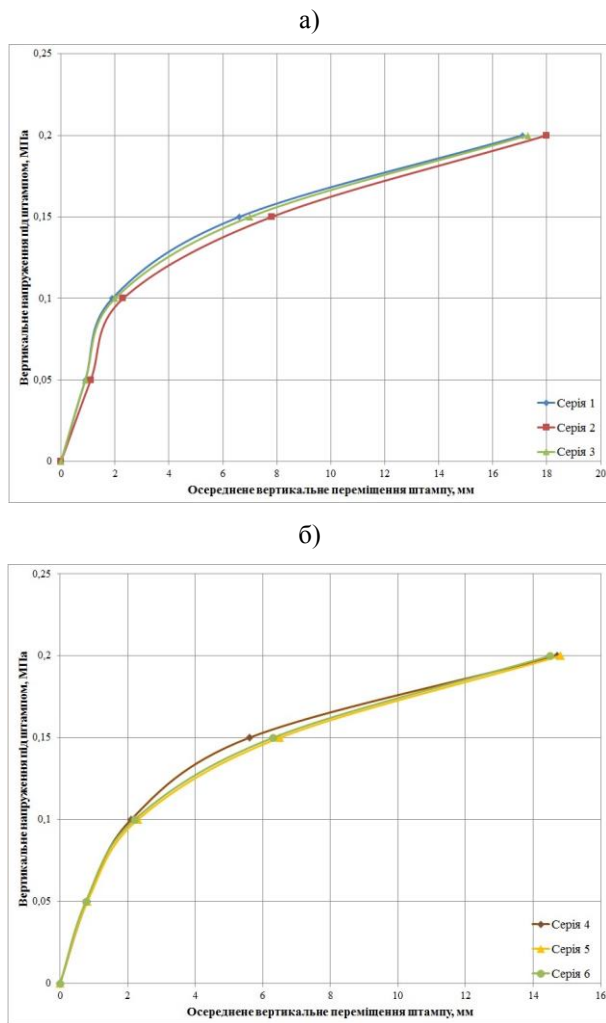


Рис. 2. Діаграми вертикальних переміщень моделей:
а) непідсиленої ґрунтової основи;
б) підсиленої мікропалею

Отримані діаграми характеризують деформований стан непідсиленої та підсиленої мікропалею моделі ґрунтової основи, а також визначають позитивний вплив підсилення (14,7 мм у підсиленій мікропалею моделі на відміну від 17,5 мм у непідсиленій, тобто в 1,19 рази). Візуальний аналіз діаграм вертикальних переміщень моделей (рис. 2) свідчить про те, що всі проведені серії характеризуються відсутністю аномальних значень або значних розходжень між отриманими результатами.

Наукова новизна і практична значимість

Наукову новизну роботи складає отримання зміни деформованого стану моделей непідсиленої та підсиленої мікропалею ґрунтової основи і визначення впливу елемента підсилення.

Практична значимість проведеного дослідження полягає в доказі позитивного впливу мікропалі на основі результатів експериментальних лоткових досліджень. Базуючись на отриманих результатах, можна обґрунтовано застосовувати мікропалі, що створені за допомогою бурозмішувальної технології, для успішного зниження вертикальних переміщень фундаментів цивільних будівель на слабких ґрунтових основах.

Висновки

Після проведення експериментальних лоткових досліджень ґрунтової основи при її підсиленні мікропалею та аналізу отриманих результатів можна зробити висновок про чіткий позитивний вплив запропонованого способу підсилення. Зменшення вертикальних осідань модельного фундаменту, що взаємодіє із слабкою ґрунтовою основою, сягає 20 %. Це характеризує застосування мікропалей, що мають менші геометричні розміри та менш матеріаломістку технологію спорудження, як ефективний робочий спосіб впливу на слабку ґрунтову основу, маючи на меті її підсилення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Dubinychuk, O., Bannikov, D., Kildieiev, V., & Kharchenko, V. (2020). Geotechnical analysis of optimal parameters for foundations interacting with loess area. *E3S Web of Conferences*, 168, 00024. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800024>
- Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, V., Tiutkin, O., & Andreev, V. (2019). Improving the safety of soil foundations when they are restored using soil-cement elements. *MATEC Web of Conferences*, 294, 03006. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929403006>
- Petrenko, V., Bannikov, D., Kharchenko, V., & Tkach, T. (2022). Regularities of the deformed state of the geotechnical system "soil base – micropile". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970, 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012028>
- Shin, J., & Lee, K. (2023). Investigation of Load-Bearing Capacity for Reinforced Concrete Foundation Retrofitted Using Steel Strut-Tie Retrofit System. *Sustainability*, 15, 10372.
- Stone Jr., R.C., Farhangi, V., Fatahi, B., & Karakouzian, M. (2023). A novel short pile foundation system bonded to highly cemented layers for settlement control. *Canadian Geotechnical Journal*, 60(9), 1332-1351.

- Vynnykov, Y., & Razdui, R. (2021). The results of modeling the strain state of soil base reinforced by soil-cement elements under strip foundations of the building. *Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(57), 74-81.
- Wang, C., Han, J.-T., & Jang, Y.-E. (2019). Experimental Investigation of Micropile Stiffness Affecting the Underpinning of an Existing Foundation. *Applied Sciences*, 9, 2495.
- Zotsenko, N., Vynnykov, Y., & Zotsenko, V. (2015). Soil-cement piles by boring-mixing technology. *Energy, energy saving and rational nature use. – Oradea University Press*, 192-253.
- ДСТУ Б В.2.1-2-96 (1997). *Ґрунти. Класифікація*. Київ: Держбуд України.
- Зоценко, М. Л., Винников, Ю. Л., & Зоценко, В. М. (2016). *Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом*. Харків: Друкарня Мадрид.
- Петренко, В. Д., Андреев, В. С., & Харченко, В. В. (2021). Порівняльний аналіз технологій влаштування мікропалів під час підсилення слабких ґрунтових основ. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 19, 69-77.
- Петренко, В. Д., Харченко, В. В., Терещук, Р. М., & Петров, О. М. (2020). Залежності напружено-деформованого стану фундаментів та основ при їх відновленні на основі буроін'єкційних свердловин. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 18, 96-105.
- Петренко, В. Д., Тютюкін, О. Л., Крисан, В. І., & Крисан, В. В. (2019). Відновлення міцносних та деформативних характеристик земляного полотна та його основи армуванням ґрунтоцементними елементами. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 16, 65-74.

V. V. KHARCHENKO¹, V. S. ANDRIEIEV^{2*}

¹*Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +38 (056) 373 15 53, e-mail harchenko-76@ukr.net, ORCID 0000-0002-7653-3001

²*Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 480 11 33, e-mail v.s.andrieiev@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-0862-2790

RESULTS OF EXPERIMENTAL TRAY STUDIES OF THE SOIL FOUNDATION BASE REINFORCED WITH MICROPILES

Purpose. Obtaining a change in the deformed state of models of unreinforced and reinforced micropile soil base to determine the influence of the reinforcement element. **Methodology.** The method of research in a flat tray was used, which makes it possible to solve a certain range of tasks related to the interaction of foundations with the soil base. The conditions for conducting experimental research and the features of creating models of unreinforced and micropile reinforced soil bases are given. The conditions for creating clay paste, laying it in a flat tray, preparing the model for loading, and taking measurements are given in detail. To assess the adequacy of experimental tray studies, modeling conditions were calculated based on the parameters of a real civil structure, its foundation and soil base. **Findings.** During the experimental studies of the soil foundation and its interaction with the base in a flat tray, two series of experiments were conducted, three experiments in each series. In series Nos. 1-3, an unreinforced base was studied, in series Nos. 4-6, a base reinforced with a single micropile. Vertical displacements were averaged, which were measured by three dial indicators installed in the middle and on both sides of the die that modeled the foundation. On the basis of the results obtained during the experimental studies, diagrams were plotted in $\sigma - s$ coordinates (stress – settlement). **Originality.** The originality of the work consists of obtaining a change in the deformed state of the models of unreinforced and micropile reinforced soil base and determining the influence of the reinforcement element (the maximum vertical displacement of 14.7 mm in the model reinforced with micropile in contrast to 17.5 mm in the unreinforced one, i.e., the reduction of this component of the deformed state by 1.19 times). **Practical value.** The practical value of the conducted research lies in the proof of the positive impact of micropiles based on the results of experimental tray studies. Based on the obtained results, it is reasonable to apply micropiles created with the help of drilling-mixing technology to successfully reduce the vertical displacements of the foundations of civil structures on weak soil bases.

Keywords: micropile; ground base; strengthening; drilling-mixing technology; experimental test; tray study

REFERENCES

- Dubinchyk, O., Bannikov, D., Kildieiev, V., & Kharchenko, V. (2020). Geotechnical analysis of optimal parameters for foundations interacting with loess area. *E3S Web of Conferences*, 168, 00024. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800024> (in English)
- Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, V., Tiutkin, O., & Andreev, V. (2019). Improving the safety of soil foundations when they are restored using soil-cement elements. *MATEC Web of Conferences*, 294, 03006. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929403006> (in English)
- Petrenko, V., Bannikov, D., Kharchenko, V., & Tkach, T. (2022). Regularities of the deformed state of the geotechnical system “soil base – micropile”. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970, 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012028> (in English)
- Shin, J., & Lee, K. (2023). Investigation of Load-Bearing Capacity for Reinforced Concrete Foundation Retrofitted Using Steel Strut-Tie Retrofit System. *Sustainability*, 15, 10372. (in English)
- Stone Jr., R.C., Farhangi, V., Fatahi, B., & Karakouzian, M. (2023). A novel short pile foundation system bonded to highly cemented layers for settlement control. *Canadian Geotechnical Journal*, 60(9), 1332-1351. (in English)
- Vynnykov, Y., & Razdui, R. (2021). The results of modeling the strain state of soil base reinforced by soil-cement elements under strip foundations of the building. *Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(57), 74-81. (in English)
- Wang, C., Han, J.-T., & Jang, Y.-E. (2019). Experimental Investigation of Micropile Stiffness Affecting the Underpinning of an Existing Foundation. *Applied Sciences*, 9, 2495. (in English)
- Zotsenko, N., Vynnykov, Y., & Zotsenko, V. (2015). Soil-cement piles by boring-mixing technology. *Energy, energy saving and rational nature use. – Oradea University Press*, 192-253. (in English)
- DSTU B V.2.1-2-96 (1997). *Grunty. Klasyfikatsiia*. Kyiv: Derzhbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- Zotsenko, M. L., Vynnykov, Yu. L., & Zotsenko, V. M. (2016). *Burovi gruntotsementni pali, yaki vyhotovliaiutsia za burozmishuvalnym metodom*. Kharkiv: Drukarnia Madryd. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. D., Andrieiev, V. S., & Kharchenko, V. V. (2021). Porivnialnyi analiz tekhnolohii vlashtuvannia mikropal pid chas pidsyleniia slabkykh gruntovykh osnov. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 19, 69-77. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. D., Kharchenko, V. V., Tereshchuk, R. M., & Petrov, O. M. (2020). Zalezhnosti napruzhenodeformovanoho stanu fundamentiv ta osnov pry yikh vidnovlenni na osnovi buroiniektiinykh sverdlovyn. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 18, 96-105. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Krysan, V. I., & Krysan, V. V. (2019). Vidnovlennia mitsnosnykh ta deformatyvnykh kharakterystyk zemlianooho polotna ta yoho osnovy armuvanniam gruntotsementnyimi elementamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 16, 65-74. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 05.03.2024.

Прийнята до друку 04.04.2024.