

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.138:624.154

В. Д. ПЕТРЕНКО^{1*}, В. С. АНДРЕЄВ², В. В. ХАРЧЕНКО³

^{1*} Кафедра «Транспортна інфраструктура», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, ел. пошта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

² Кафедра «Транспортна інфраструктура», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 480 11 33, ел. пошта avs_diit@ukr.net, ORCID 0000-0002-0862-2790

³ Кафедра «Транспортна інфраструктура», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта harchenko-76@ukr.net, ORCID 0000-0002-7653-3001

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВЛАШТУВАННЯ МІКРОПАЛЬ ПІД ЧАС ПІДСИЛЕННЯ СЛАБКИХ ГРУНТОВИХ ОСНОВ

Мета. Виконати порівняльний аналіз буроін'єкційної та бурозмішувальної технологій влаштування мікропаль під час підсилення слабких ґрунтових основ із визначенням технологічних особливостей, які суттєво впливають на проектування та розрахунок підсилення слабких ґрунтових основ. **Методика.** Для вирішення поставленої задачі проведено детальний аналіз найбільш ефективних методик влаштування мікропаль під час підсилення слабких ґрунтових основ (фізичне занурення, буронабивна, буроін'єкційна, бурозмішувальна та застосування особливих впливів). Детально розглянуті особливості технологічних параметрів буроін'єкційної та бурозмішувальної технологій. Виявлено переваги та недоліки кожної з технологій. Доведено, що бурозмішувальна технологія має більшу ступінь прогнозованості зміни напружено-деформованого стану неоднорідної основи. Для визначення впливу деформаційних характеристик створена просторова скінченно-елементна модель на основі плоского прототипу, що побудований за допомогою автоматичної триангуляції професійного розрахункового комплексу SCAD. **Результати.** Отримано значне зменшення деформованого стану при практично постійному напруженому стані. При збільшенні деформаційної характеристики в 3 рази (відношення модулів пружності ґрунтоцементу палі та ґрунту слабкої основи) вертикальні переміщення фундаменту зменшуються в 1,23 рази. **Наукова новизна.** Вона полягає в отриманні залежності зміни вертикальних переміщень та напружень від модулів пружності ґрунтоцементу мікропалі, створеної на основі бурозмішувальної технології. **Практична значимість.** Полягає в отриманих результатах порівняльного аналізу обґрунтування бурозмішувальної технологій влаштування мікропаль під час підсилення слабких ґрунтових основ із визначенням технологічних особливостей та вибором бурозмішувальної як найбільш ефективного варіанту з позиції реалізації технології.

Ключові слова: фундамент; основа; мікропалі; буроін'єкційна технологія; бурозмішувальна технологія

Вступ

Влаштування мікропаль під час підсилення слабких ґрунтових основ в останній час стало альтернативною методикою зменшення деформацій в процесі експлуатації промислових та цивільних будівель. Такий спосіб підсилення, за умови усестороннього наукового обґрунтування, демонструє високий рівень ефективності зниження осідань будівель та споруд і має достатню прогнозованість результату підсилення ще на стадії проектування та розрахунку.

Важливим чинником застосування мікропаль під час підсилення підфундаментної осно-

ви є те, що, на відміну від апробованого та ефективного методу поверхневого механічного ущільнення (Dubinchuk, Bannikov, Kildieiev, Kharchenko, 2020), використання елементів підсилення довжиною 2...12 м та діаметром, як правило, 300...600 мм (до 1000...1200 мм за потреби) можливе не тільки під час спорудження фундаменту, а й в процесі його експлуатації, тобто при виконанні процесів реконструкції або додаткового підсилення при надбудові.

Однак важливою перевагою методу поверхневого механічного ущільнення, на відміну від будь-яких методів, що застосовують занурення

елементів підсилення, є достатня однорідність системи «фундамент – основа». Це пояснюється тим, що в процесі ущільнення зміна структури слабого ґрунту суттєво змінюється, але кардинальної неоднорідності за рахунок різних деформативних характеристик слабого і ущільненого шарів не відбувається. Система «фундамент – елемент підсилення – основа» є значно неоднорідною, оскільки додаткова зміна деформативних характеристик у випадку палі або мікропалі значно змінює її напружено-деформований стан (НДС). Саме тому випадок застосування елементів підсилення потребує більш складних аналітичних побудов або застосування чисельного аналізу із використанням більш точних скінченно-елементних моделей.

Додаткова складність застосування мікропаль під час підсилення слабких ґрунтових основ пов'язана із технологічними особливостями методів їх влаштування. Найбільш застосованими методиками є фізичне занурення, буронабивна, буроін'єкційна, бурозмішувальна та застосування особливих впливів. Кожна з цих методик має декілька різновидів, що виділилися в окремі технології.

Технологія фізичного занурення, наприклад, забивання мікропаль не отримала широкого застосування, хоча її перевагою є індустріальне виготовлення елементів підсилення із контролем якості бетону та металеві оболонки. Підвищені динамічні ударні взаємодії, що виникають при роботі дизель-молоту, виключають застосування цієї технології в умовах вже існуючої забудови та під час реконструкції будівель та споруд.

Так, окрім забивання або укручування мікропаль, тобто фізичного занурення елементів підсилення, базуючись на досвіді реконструкції історичних будівель, достатньо широке розповсюдження отримала технологія пневмо- або віброштампування (трамбування) (Алексеев, & Мирошніченко, 2007; 2009). В ході влаштування мікропаль на її основі пневмопробійником створюють свердловину, заповнюють її сумішшю щебеню та цементу в пропорції 4:1 та повторюють операцію 5...10 разів, після чого середину заповнюють бетоном. При явних перевагах (довжина мікропалі знаходиться в межах 1,5...2,0 м, а діаметр – 135...200 мм; існує можливість влаштування палей під кутом 20...45° до вертикалі; достатньо розвинута теорія розрахунку вертикальних та похилих еле-

ментів підсилення), суттєвим недоліком є достатня складність технологічного процесу та неоднозначність роботи багатошарової мікропалі, що викликає значну неоднорідність НДС в процесі навантаження.

Буронабивна технологія створення мікропалі отримала достатній розвиток, особливо для випадку елементів підсилення із розширеною п'ятою (порожнина камуфлету, виконана розширювачем при шнековому бурінні). Значні переваги технології (мобільне устаткування для проведення робіт з підсилення; можливість армування мікропалі; відсутність потреби в обсадних трубах), її основним недоліком для створення мікропаль є потреба в застосуванні обсадної труби та неможливість якісного бетонування при недостатньому контролі ущільнення бетону в нижній частині мікропалі.

Технології, що базуються на застосуванні особливих впливів, застосовують електричний струм (електророзрядна) (Рытов, 2004), магнітне поле (Власов, Тимченко, & Рябичев, 2005) або ударну хвилю вибуху (ущільнення ґрунтових масивів структурно-нестійких ґрунтів за допомогою малощільних вибухових речовин на основі аміачної селітри, розчину поверхнево-активної речовини і алюмінієвої пудри) (Бойко, Ган, А. Л., & Ган, О. В., 2018). Вказані технології є перспективними, але на даний час не мають фундаментальної наукової бази, а впливи, які застосовуються в них, як ті, що впливають на ґрунтову основу, мають дуже конкретну область застосування і не можуть бути запропоновані для широкого використання.

Враховуючи вищевикладене, на даний час в Україні найбільшого розповсюдження отримали буроін'єкційна та бурозмішувальна технології, які, засновуючись на єдиному принципі підсилення, мають значні відмінності.

Мета

Мета роботи полягає в порівняльному аналізі буроін'єкційної (струменевої) та бурозмішувальної технологій влаштування мікропаль під час підсилення слабких ґрунтових основ із визначенням технологічних особливостей, які суттєво впливають на проектування та розрахунок підсилення слабких ґрунтових основ.

Методика

Обидві технології влаштування мікропаль під час підсилення слабких ґрунтових основ,

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

тобто буроін'єкційна (інші назви: високонапірна цементация, струменева геотехнологія, *jet-grouting*) та бурозмішувальна мають спільну сутність. Вона полягає в тому, що за допомогою вказаних технологій в ґрунтовому масиві та підфундаментній основі утворюються елементи підсилення із особливого матеріалу – ґрунтоцементу.

Хоча буроін'єкційна технологія, яка є різновидом цементации, відноситься до групи методів хімічного закріплення ґрунтів, але, на відміну від силікатизації, глинізації, смолізації та бітумізації, застосовується частіше, що пояснюється її мінімальним негативним впливом на навколишнє середовище (за умови застосування лише цементу без додатків для суміші). Ґрунтоцемент, що утворюється під час змішування робочого цементного розчину із ґрунтом, мінімально впливає на хімічний баланс ґрунтового масиву, майже його не порушуючи.

Якщо вплив на екологічний стан при проведенні підсилення слабкої ґрунтової основи є незначним, то зміна НДС при зануренні елементів, що мають суттєво вищі, ніж у ґрунту, міцнісні та деформаційні характеристики є значною. Проведені експерименти в натурі та за допомогою математичного моделювання доводять, що неоднорідність вказаних характеристик в системі «фундамент – елемент підсилення – основа» призводить до позитивного ефекту зменшення деформацій при незначному підвищенні напружень. Однак, саме результати цих досліджень ставлять нову задачу визначення впливу технологічних факторів на НДС цієї системи.

Не викладаючи детально основ буроін'єкційної та бурозмішувальної технологій, що широко висвітлені в фундаментальних роботах зарубіжних та вітчизняних авторів, слід детально розглянути деякі технологічні особливості. Це дозволить обрати із двох технологій ту, що на даний час розвитку їх основ, є найбільш науково обґрунтованою і може бути рекомендована як основна для влаштування мікропаль під час підсилення слабких ґрунтових основ.

Слід ще раз підкреслити, що обидві технології базуються на одночасному руйнуванні і перемішуванні ґрунту із створенням ґрунтоцементу (*mix-in-place*) (Nikbakhtan, & Osanloo, 2009), однак, із-за особливостей технологій отримані елементи підсилення працюють в ре-

жимах, що обґрунтовуються саме технологічними параметрами.

Так, відомо, що буроін'єкційна технологія базується на руйнуванні ґрунту високонапірним струменем, поділяючись на одно-, дво- та трьохкомпонентний різновиди (Modoni, Croce, & Mongiovi, 2008; Flora, Modoni, Lirer, & Croce, 2013). Кожен з них, застосовуючи руйнуючий струмінь під тиском в десятки чи навіть сотні атмосфер, прямо залежить від наступних технологічних параметрів: тиску цементного струменя, витрати розчину, швидкості підйому інструменту та руйнівної енергії струменя. Вказана енергія є інтегральним параметром, оскільки вона пов'язана із трьома іншими, а найбільш впливовими є тиск цементного струменя та швидкість підйому інструменту (Бройд, 2004; Головка, 2010; Малинин, 2009).

Саме ці технологічні параметри є сутнісними, оскільки діаметр елементу підсилення, створеного на основі буроін'єкційної технології, тісно пов'язаний із процесом подачі тиску в ґрунтовий масив (чим менше тиск, тим менше руйнівна енергія і менше діаметр мікропалі (Croce, Flora, & Modoni, 2014)) та підйомом ін'єкційної штанги (чим швидший підйом, тим менше часу на руйнування ґрунту і, відповідно, менше діаметр мікропалі (Зуєвська, Шайдецька, & Губашова, 2019)).

Таким чином, задача змінення НДС при зануренні елементів підсилення (мікропаль) під час підсилення слабких ґрунтових основ ускладнюється тим, що знаходження напружень і деформацій стає пов'язаним не лише із міцнісними та деформаційними характеристиками неоднорідної системи «фундамент – елемент підсилення – основа», а й з факторами, що є сутнісними для буроін'єкційної технології.

Під час застосування бурозмішувальної технології тиск руйнуючого струменя не досягає навіть десяти атмосфер, а процес одночасного руйнування і перемішування ґрунту реалізується за допомогою спеціальних механічних приладів – бурозмішувачів в вигляді лопатей, шнека, гвинта або крильчатки (Зоценко, М. Л., Винников, & Зоценко, В. М., 2016). Таким чином, вплив тиску і відповідно руйнівної енергії струменя для бурозмішувальної технології є несуттєвим. Витрати розчину також відіграють незначну роль, оскільки вміст цементу в ґрунтоцементі можна обмежити з самого початку в

залежності від властивостей, що потребуються (Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, Tiutkin, & Andreev, 2019), а вплив швидкості підйому інструменту відсутній зовсім, оскільки елемент підсилення (мікропала) формується більше механічним руйнуванням, чим струменевим.

Відповідно, бурозмішувальна технологія, на відміну від буроін'єкційної, при аналізі системи «фундамент – елемент підсилення – основа» не обтяжується додатковими характеристиками, що впливають на визначення НДС. Крім того, важливими факторами, що підкреслюють технологічну перевагу бурозмішувальної технології над буроін'єкційною є, по-перше, відсутність рідини, що подається із цементом і повітрям під високим тиском, та, по-друге, дуже низькі величини тиску в декілька атмосфер (0,2...0,3 МПа) при подаванні водоцементної суміші при бурозмішувальній технології. Це також включає застосування труб і шлангів високої міцності для подачі до монітора, в нижній частині якого знаходяться отвори суттєво більші за своїми розмірами в порівнянні із соплами в ін'єкційній штанзі (Малинин, 2009).

Застосування бурозмішувальної технології влаштування мікропаль під час підсилення слабких ґрунтових основ має більшу ступінь прогнозованості зміни НДС неоднорідної основи, причому вплив деформаційних характеристик слід оцінити за допомогою чисельного аналізу.

Результати

Першим кроком обґрунтування бурозмішувальної технології влаштування мікропаль під час підсилення слабких ґрунтових основ є отримання в ході чисельного аналізу закономірностей зміни НДС системи «фундамент – елемент підсилення – основа» від деформаційних властивостей ґрунтоцементу. Для цього створена просторова скінченно-елементна модель на основі плоского прототипу, що побудований за допомогою автоматичної триангуляції розрахункового комплексу SCAD (Петренко, Тют'кін, Кулаженко, Є. Ю., & Кулаженко, О. М., 2018; Петренко, Харченко, Терещук, & Петров, 2020).

Для чисельного аналізу та порівняння його результатів розглянуто чотири варіанти: фундамент на слабкій основі без підсилення (Варіант 0) та три варіанти його підсилення ґрунтоцементними палями довжиною 6 м діаметром

1,0 м, створеними на основі бурозмішувальної технології (рис. 1).

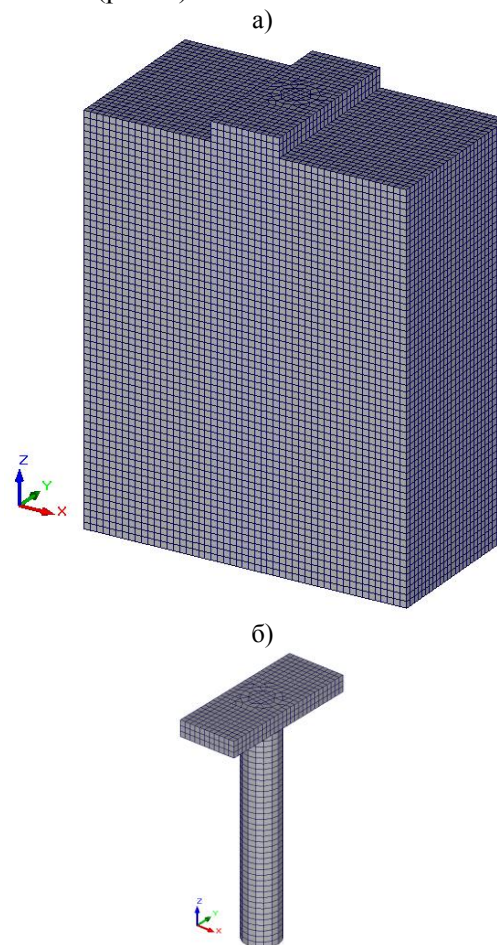


Рис. 1. Скінченно-елементна модель:
а) загальна; б) фрагмент – фундамент із мікропалем

У ролі навантаження моделі було прийнято значення 316,83 кН/м, розподілене по нижній частині стіни 380 мм для фундаменту шириною 1,6 м та товщиною 0,4 м. Моделі всіх чотирьох варіантів базуються на скінченних елементах типу призми або тетраедра із характерним розміром 0,15 м (заданий в ході автоматичної триангуляції в режимі з'єднання трикутних елементів плоского прототипу в чотирикутні) і налічують 91944 вузлів, 86265 скінченних елементів (близька 276000 ступенів волі), що характеризує задачу як великорозмірну.

Скінченно-елементним моделям надані наступні деформаційні характеристики: жорсткість 1 (слабка основа – суглинок, питома вага $\gamma=1,9 \text{ т/м}^3$, модуль пружності $E=10 \cdot 10^3 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассону $\nu=0,3$); жорсткість 2 (фундамент – залізобетон, питома вага $\gamma=2,45 \text{ т/м}^3$,

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

модуль пружності $E=3,25 \cdot 10^7$ кПа, коефіцієнт Пуассону $\nu=0,2$); жорсткість 3 (матеріал елемента підсилення – палі, що створена за допомогою бурозмішувальної технології) при однаковій питомій вазі $\gamma=2,1$ т/м³ та коефіцієнті Пуассону $\nu=0,3$ і має різні показники модуля пружності для кожного з трьох варіантів: $E=3 \cdot 10^3$ кПа (Варіант 1 – середнє значення для ґрунтоцементу із роботи Петренко, Тютюкін, Крисан, В. І., & Крисан, В. В.); $E=1 \cdot 10^4$ кПа (Варіант 2 – значення для ґрунтоцементу із роботи Зоценко, М. Л., Винников, & Зоценко, В. М., 2016); $E=3 \cdot 10^7$ кПа (Варіант 3 – значення для армованого ґрунтоцементу із роботи Швец, Феклін, & Гинзбург, 1985). Три варіанти підсилення, що розглядаються, є у визначеній мірі гіпотетичними, оскільки модуль пружності ґрунтоцементу, як відомо, змінюється із кількі-

стю цементу (Малинин, 2009; Петренко, Тютюкін, Крисан, В. І., & Крисан, В. В.), а також при армуванні, відповідно зростатиме і його питома вага. Однак для чіткого відокремлення впливу саме деформаційних характеристик (модулю пружності ґрунтоцементу) питома вага для трьох варіантів є константою для створення рівних умов чисельного аналізу.

На схему накладені граничні умови: понизу моделі – заборона переміщення по всім трьом осям X, Y та Z, по боках основи – заборона по осях X та Y, по поперечних сторонах моделі – заборона по осі Y (умова плоскої деформації). Верх фундаменту вільний від граничних умов. Отримані результати чисельного аналізу (рис. 2, 3) свідчать про значний вплив на НДС системи «фундамент – елемент підсилення – основа».

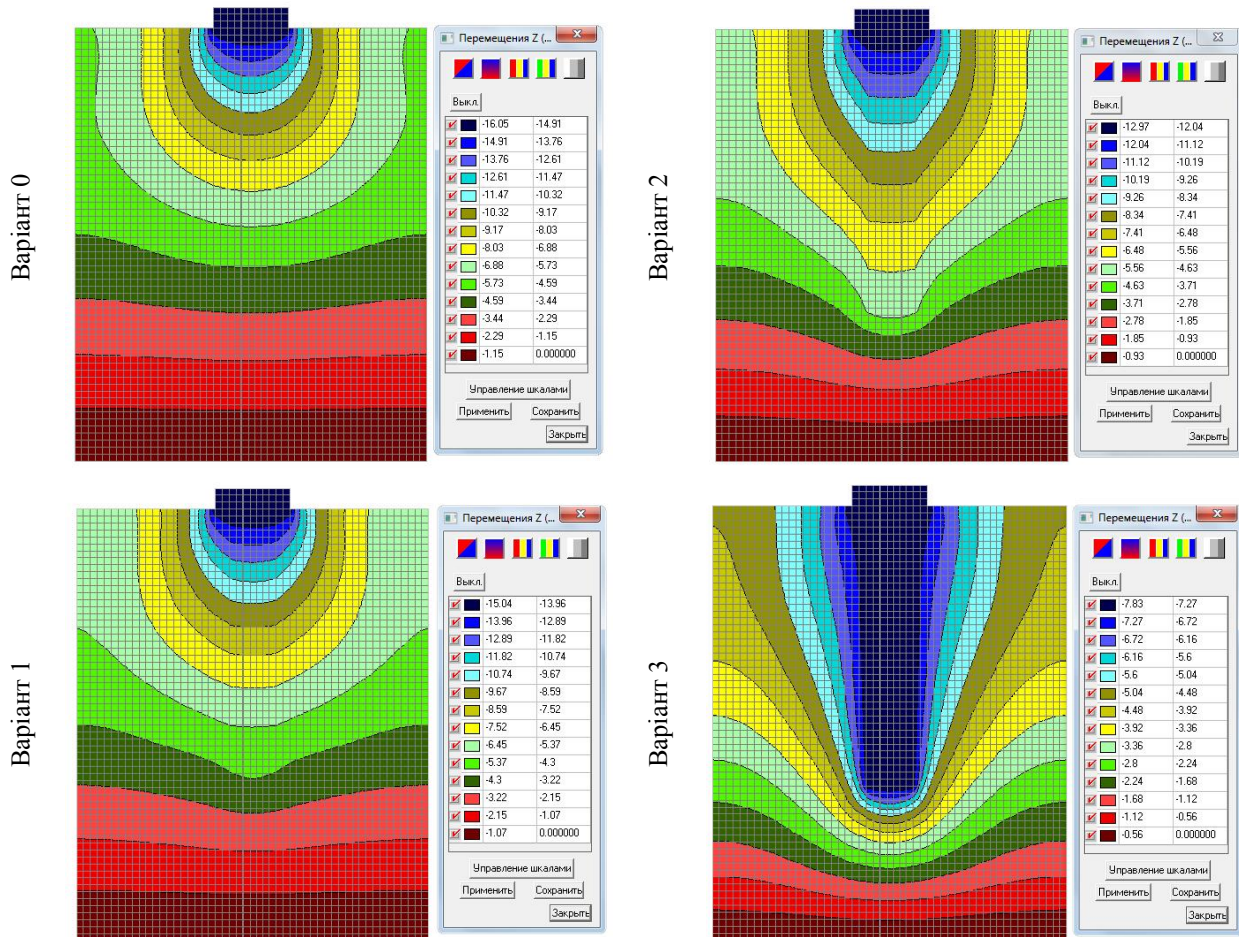


Рис. 2. Ізолінії та ізополя переміщень по осі Z (вертикальна) в фрагменті моделей

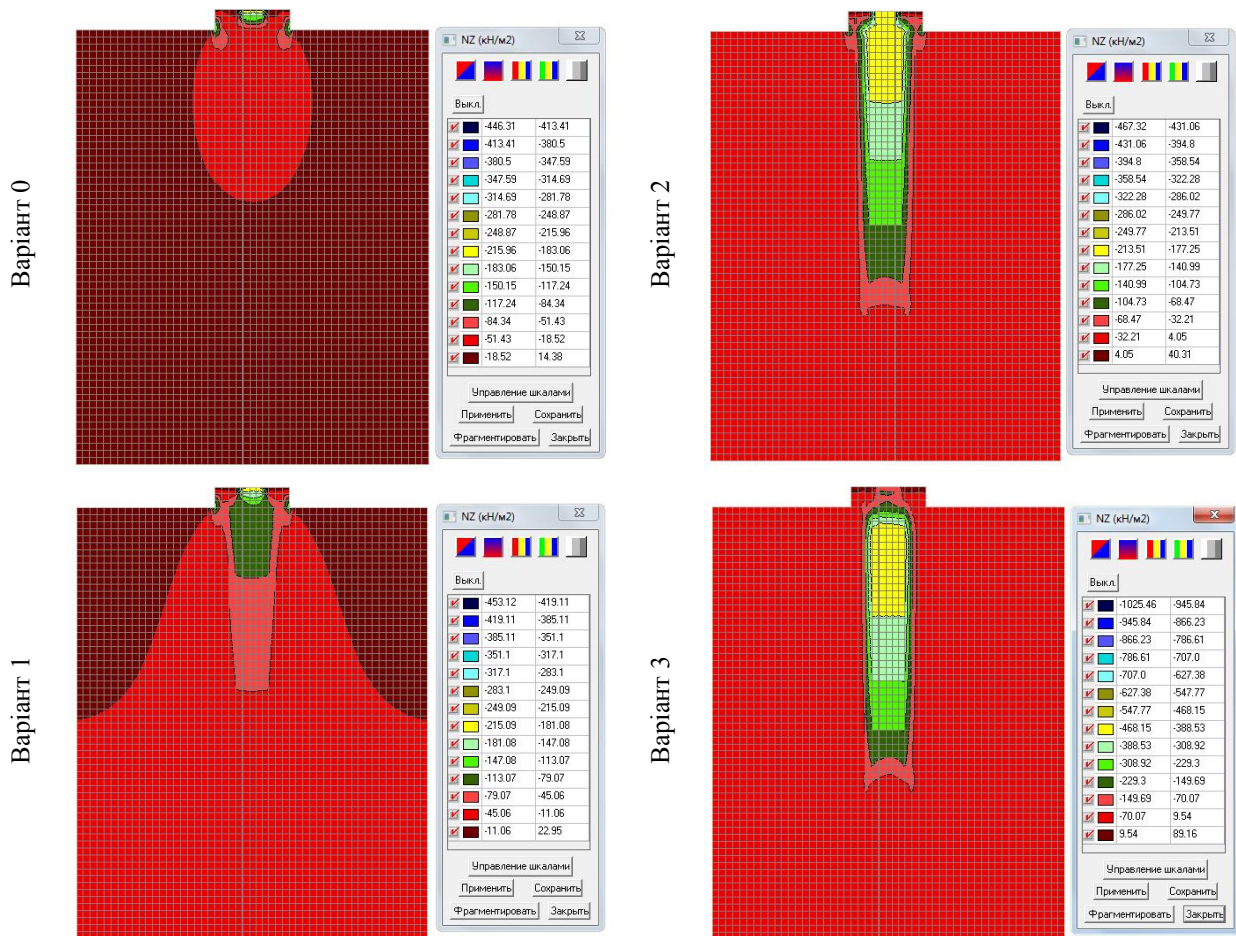


Рис. 3. Ізолінії та ізополя нормальних напружень по осі Z (вертикальна) в фрагменті моделей

Спостерігається значне зменшення переміщень по осі Z від модуля пружності ґрунтоцементу: -16,05 мм (Варіант 0), -15,04 мм (Варіант 1), -12,97 мм (Варіант 2) та -7,83 мм (Варіант 3), тобто відповідно в 1,06, 1,23 та 2,05 рази.

Значення нормальних напружень по осі Z під обрізом фундаменту в залежності від варіанту змінюється незначно: -0,16 МПа (Варіант 0), -0,14 МПа (Варіант 1), -0,15 МПа (Варіант 2) та -0,20 МПа (Варіант 3).

Таким чином, створення мікропалі на основі бурозмішувальної технології при збільшенні деформаційної характеристики в 3 рази (відношення модулів пружності ґрунтоцементу палі та ґрунту слабкої основи) зменшує вертикальні переміщення фундаменту в 1,23 рази, що є досить ефективним рішенням впливу на НДС системи «фундамент – елемент підсилення – основа».

Наукова новизна та практична значимість

В дослідженнях впливу на НДС системи «фундамент – елемент підсилення – основа» на основі чисельного аналізу отримано залежності зміни вертикальних переміщень та напружень від модуля пружності ґрунтоцементу мікропалі, створеної на основі бурозмішувальної технології. Такі наукові результати позначені новизною і свідчать про необхідність подальших досліджень впливу жорсткості мікропалі, що залежить від її геометричних параметрів.

Практичне значення мають результати порівняльного аналізу обґрунтування бурин'єкційної (струменевої) та бурозмішувальної технологій влаштування мікропалей під час підсилення слабких ґрунтових основ із визначенням технологічних особливостей та вибором бурозмішувальної як найбільш ефективного варіанту з позиції реалізації технології.

Висновки

Поступове збільшення обсягів будівництва промислових та цивільних будівель на слабких ґрунтах потребує наукового обґрунтування влаштування мікропаль. Вибір способу влаштування таких елементів армування потребує аналізу технологічних параметрів та впливу методу на напружено-деформований стан системи «фундамент – елемент підсилення – основа».

Найбільш застосовані буроін'єкційна та бурозмішувальна технології, при всьому об'ємі отриманої інформації про вплив сутнісних параметрів, потребують подальшого дослідження, що довело дослідження впливу деформаційних характеристик ґрунтоцементу на НДС системи «фундамент – елемент підсилення – основа».

Подальші дослідження будуть проведені для з'ясування закономірностей напружень та переміщень системи «фундамент – елемент підсилення – основа» при варіації геометричних та деформаційних параметрів системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. Taylor & Francis Group.
- Dubinchyk, O., Bannikov, D., Kildiev, V., & Kharchenko, V. (2020). Geotechnical analysis of optimal parameters for foundations interacting with loess area. *II International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 168, 00024.
- Flora, A., Modoni, G., Lirer, S., & Croce, P. (2013). The diameter of single-, double-, and triple-fluid jet grouting columns: Prediction method and field trial results. *Géotechnique*, 63(11), 934-945.
- 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. *2nd International Scientific and Practical Conference "Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport"*.
- Modoni, G., Croce, P., & Mongiovi, L. (2008). Theoretical modelling of jet grouting: Closure. *Géotechnique*, 58(6), 533-535.
- Nikbakhtan, B., & Osanloo, M. (2009). Effect of grout pressure and grout flow on soil physical and mechanical properties in jet grouting operations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 498-505.
- Алексеев, С. И., & Мирошниченко, Р. В. (2007). Оценка закрепления основания методом пневмотрамбования щебёночно-цементной смеси. *Известия Петербургского университета путей сообщения*, 4(13), 88-97.
- Алексеев, С. И., & Мирошниченко, Р. В. (2009). Влияние выштампованных микросвай на несущую способность фундаментов мелкого заложения. *Вестник ТГАСУ*, 3, 133-142.
- Бройд, И. И. (2004). *Струйная геотехнология*. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов.
- Бойко, В. В., Ган, А. Л., & Ган, О. В. (2018). Ущільнення просадних ґрунтів вдосконаленими зарядами малої щільності. *Збірник наукових праць НГУ*, 55, 152-162.
- Власов, С. Ф., Тимченко, С. Е., & Рябичев, В. Д. (2005). *Интенсификация процессов струйного закрепления пород при магнитной обработке цементных растворов*. Луганск: Янтарь.
- Головки, С. І. (2010). *Теорія та практика підсилення ґрунтових основ методом високонапірної цементації*. Дніпропетровськ: Пороги.
- Зоценко, М. Л., Винников, Ю. Л., & Зоценко, В. М. (2016). *Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом*. Харків: Друкарня Мадрид.
- Зуєвська, Н. В., Шайдецька, Л. В., & Губашова, В. С. (2019). Вплив виконання елементів струменевої цементації на фізико-механічні характеристики навколишнього ґрунтового масиву. *Енергетика: економія, технології, екологія*, 4, 27-34.
- Малинин, А. Г. (2009). *Струйная цементация грунтов*. Москва: Стройиздат.
- Петренко, В. Д., Тютюкін, О. Л., Кулаженко, Є. Ю., & Кулаженко, О. М. (2018). *Математичне моделювання земляного полотна залізниць на основі методу скінченних елементів*. Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна.
- 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.
- 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.
- Рытов, С. А. (2004). Электроразрядная технология для устройства свай и анкеров. *Реконструкция городов и геотехническое строительство*, 8, 172-175.
- Швец, В. Б., Феклин, В. И., & Гинзбург, Л. К. (1985). *Усиление и реконструкция фундаментов*. Москва: Стройиздат.

V. D. PETRENKO^{1*}, V. S. ANDRIEIEV², V. V. KHARCHENKO³

^{1*} Department «Transport infrastructure» of Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 50 69, e-mail petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

² Department «Transport infrastructure» of Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 480 11 33, e-mail avs_diit@ukr.net, ORCID 0000-0002-0862-2790

³ Department «Transport infrastructure» of Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail harchenko-76@ukr.net, ORCID 0000-0002-7653-3001

COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNOLOGIES OF MICROPILES ARRANGEMENT DURING STRENGTHENING OF WEAK SOIL BASES

Purpose. Perform a comparative analysis of drill and injection (jet-grouting) and drill and mixing technologies of micropiles arrangement of weak soil bases with the identification of technological features that significantly effect on the design and calculation of weak soil bases strengthening. **Methodology.** To solve this problem, was conducted of the detailed analysis of the most effective methods of micropiles arrangement during the strengthening of weak soil bases (physical immersion, bored and packing of concrete, drill and injection of ground, drill and mixing soils and application of special effects). Peculiarities of technological parameters of jet-grouting and drill and mixing technologies are considered in detail. The advantages and disadvantages of each of the technologies are revealed. It is proved that the drill and mixing technology has a greater degree of prediction of the stress-strain state change of the inhomogeneous base. To determine the influence of deformation characteristics, a spatial finite-element model based on a flat prototype was created, which was built using automatic triangulation of the professional calculation complex SCAD. **Findings.** A significant reduction of the deformed state at an almost constant stress state is obtained. When the deformation characteristic increases by 3 times (the ratio of the modulus of elasticity of the soil cement pile and the weak soil), the vertical displacements of the foundation decrease by 1.23 times. **Originality.** It consists in obtaining the dependence of the change of vertical displacements and stresses on the modulus of elasticity of the soil cement micropile, created on the basis of drill and mixing technology. **Practical value.** It consists in the obtained results of comparative analysis of substantiation of micropile installation drill and mixing technology during strengthening of weak soil bases with definition of technological features and choice of drill and mixing as the most effective variant from the point of view of technology realization.

Keywords: foundation; base; micropile; jet-grouting; drill and mixing technology

REFERENCES

- Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. Taylor & Francis Group. (in English)
- Dubinchyk, O., Bannikov, D., Kildieiev, V., & Kharchenko, V. (2020). Geotechnical analysis of optimal parameters for foundations interacting with loess area. *II International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 168, 00024. (in English)
- Flora, A., Modoni, G., Lirer, S., & Croce, P. (2013). The diameter of single-, double-, and triple-fluid jet grouting columns: Prediction method and field trial results. *Géotechnique*, 63(11), 934-945. (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. *2nd International Scientific and Practical Conference "Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport"*. (in English)
- Modoni, G., Croce, P., & Mongiovi, L. (2008). Theoretical modelling of jet grouting: Closure. *Géotechnique*, 58(6), 533-535. (in English)
- Nikbakhtan, B., & Osanloo, M. (2009). Effect of grout pressure and grout flow on soil physical and mechanical properties in jet grouting operations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 498-505. (in English)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Alekseev, S. I., & Miroschnichenko, R. V. (2007). Otsenka zakrepleniya osnovaniya metodom pnevmotrambovaniya shchebenochno-tsementnoy smesi. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*, 4(13), 88-97. (in Russian)
- Alekseev, S. I., & Miroschnichenko, R. V. (2009). Vliyaniye vyshtampovannykh mikrosvay na nesushchuyu sposobnost fundamentov melkogo zalozheniya. *Vestnik TGASU*, 3, 133-142. (in Russian)
- Broyd, I. I. (2004). *Struynaya geotekhnologiya*. Moskva: Izdatelstvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov. (in Russian)
- Boiko, V. V., Han, A. L., & Han, O. V. (2018). Ushchilnennia prosadnykh gruntiv vdoskonalenymy zariadamy maloi shchilnosti. *Zbirnyk naukovykh prats NHU*, 55, 152-162. (in Ukrainian)
- Vlasov, S. F., Tymchenko, S. E., & Riabychev, V. D. (2005). *Yntensyfykatsiya protsessov struinoho zakrepleniya porod pry mahnytnoi obrabotke tsementnykh rastvorov*. Luhansk: Yantar. (in Russian)
- Holovko, S. I. (2010). *Teoriia ta praktyka pidsyleniia gruntovykh osnov metodom vysokonapirnoi tsementatsii*. Dnipropetrovsk: Porohy. (in Ukrainian)
- Zotsenko, M. L., Vynnykov, Yu. L., & Zotsenko, V. M. (2016). *Burovi gruntotsementni pali, yaki vyhotovliautsia za burozmishuvalnym metodom*. Kharkiv: Drukarnia Madryd. (in Ukrainian)
- Zuievskaya, N. V., Shaidetska, L. V., & Hubashova, V. Ye. (2019). Vplyv vykonannya elementiv strumenevoi tsementatsii na fizyko-mekhanichni kharakterystyky navkolyshnoho gruntovoho masyvu. *Enerhetyka: ekonomii, tekhnologii, ekolohii*, 4, 27-34. (in Ukrainian)
- Malinin, A. G. (2009). *Struynaya tsementatsiya gruntov*. Moskva: Stroyizdat. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Kulazhenko, Ye. Yu., & Kulazhenko, O. M. (2018). *Matematychni modeliuvannia zemlianooho polotna zaliznyts na osnovi metodu skinchennykh elementiv*. Dnipro: Dnipropetr. nats. un-t zalizn. transp. im. akad. V. Lazariana. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Krysan, V. I., & Krysan, V. V. (2019). Vidnovlenniia mitsnosnykh ta deformatyvnykh kharakterystyk zemlianooho polotna ta yoho osnovy armuvanniam gruntotsementnymy elementamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 16, 65-74. (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 buroinieksiinykh sverdlovyh. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 18, 96-105. (in Ukrainian)
- Rytov, S. A. (2004). Elektrorazryadnaya tekhnologiya dlya ustroystva svay i ankerov. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitelstvo*, 8, 172-175. (in Russian)
- Shvets, V. B., Feklin, V. I., & Ginzburg, L. K. (1985). *Usilenie i rekonstruktsiya fundamentov*. Moskva: Stroyizdat. (in Russian)

Надійшла до редколегії 17.03.2021.

Прийнята до друку 30.03.2021.