

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.13:624.154.54

В. В. ХАРЧЕНКО¹, В. Д. ПЕТРЕНКО^{2*}

¹ Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +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) 708 50 69, ел. пошта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МОДЕЛІ ОСНОВИ ТА ФУНДАМЕНТУ БУДІВЛІ ПІД ЧАС ЇЇ ПІДСИЛЕННЯ МІКРОПАЛЯМИ

Мета. На основі аналізу існуючого досвіду провести обґрунтування вибору моделі основи та фундаменту будівлі під час його підсилення мікропаллями. Такий методологічний крок дозволить прийняти до подальших досліджень модель основи, яка більш повно відповідає взаємодії мікропаль, фундаменту визначеної жорсткості та варіації їхніх параметрів. **Методика.** Фундаменти, в тому числі ті, що підсилюються мікропаллями, проектується таким чином, щоб навантаження на основу не перевищувало певної межі, яка дозволяє проводити розрахунки за деформаціями у фазі ущільнення. Для вирішення поставленої задачі проведено аналіз методу загальних пружних деформацій основи, розроблений з використанням гіпотези пружного півпростору. Залучення пружного півпростору до теоретичних побудов має основою чіткі та відпрацьовані рішення теорії пружності і, ширше, механіки суцільного середовища. Також розглянутий метод, заснований на обмеженні зони основи, що деформується (гіпотеза шару кінцевої товщини). Узагальнені випадки застосування цих гіпотез для проектування та розрахунку фундаментів з врахуванням їх взаємодії з основою. **Результати.** Визначено, що більш плідною гіпотезою як для фундаментів взагалі, так і для випадку їх підсилення мікропаллями, є гіпотеза пружного шару. На її основі обґрунтовано, що скінченно-елементні моделі фундаменту з мікропаллями та ґрунтовою основою повинні мати визначені межі, що, в першу чергу, дозволяють вільне деформування системи «фундамент – основа», а, в другу чергу, мати розміри, що можуть бути піддані розрахунку на ПЕОМ. **Наукова новизна.** Вона полягає в обґрунтуванні моделі основи, що базується на гіпотезі шару кінцевої товщини як найбільш відповідної для чисельних експериментів за допомогою методу скінченних елементів. **Практична значимість.** Полягає в отриманні обґрунтованої товщини кінцевого шару, що дорівнює 5...6 значень довжини мікропалі. Саме ця товщина, на основі якою обираються розміри скінченно-елементної моделі, дозволяє вільне формування напружено-деформованого стану моделі і не має протиріччя з вже існуючими вимогами до визначення цього параметру.

Ключові слова: основа; фундамент; мікропалля; модель основи; взаємодія фундаменту та основи

Вступ

Відомо, що фундаменти пальової конструкції під час їх проектування та розрахунку державними нормами рекомендується розглядати як умовно суцільні (ДБН В.2.1-10-2009, 2010; ДБН В.2.1-10:2018, 2018). Однак, застосування мікропаль, наприклад, створених на основі бурозмішувальної або буроін'єкційної технологій (Zotsenko, N., Vynnykov, Yu., & Zotsenko, V., 2015; Зоценко, М. Л., Винников, Ю. Л., & Зоценко, В. М., 2016; Петренко, Харченко, Терещук, & Петров, 2020), потребують обґрунтування цієї тези.

В загальному випадку, під час застосування аналітичних або чисельних методів розрахунку

фундаментів, підсиленних мікропаллями, слід визначитися з моделлю основи, з якою вони контактують (Винников, 2004; Зоценко, М. Л., Винников, Ю. Л., & Зоценко, В. М., 2016).

Таке визначення потрібне для того, щоб врахувати дію мікропалі на загальний напружено-деформований стан, оскільки вибір моделі (пружний півпростір, шар кінцевої товщини, різні основи типу вінклерівської або пастернаковської тощо) суттєво впливає на розрахункову область та спосіб визначення напружень та переміщень.

На даний час для розрахунку основ по деформаціям широко використовується модель Н. М. Герсеванова, який запропонував для визначення напружено-деформованого стану ви-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

користувати співвідношення лінійної теорії пружності, а при ущільненні ґрунту виділяти три фази (Зоценко, Коваленко, Хілобок, & Яковлев, 2004):

- фазу ущільнення та місцевих руйнувань;
- фазу інтенсивних зрушень та ущільнення з сторони від зон пластичної деформації;
- фазу загального зсуву із виникненням випиранням ґрунту.

Фундаменти, в тому числі ті, що підсилюються мікропаллями, проєктуються таким чином, щоб навантаження на основу не перевищувало певної межі, яка дозволяє проводити розрахунки за деформаціями у фазі ущільнення. Таким чином, при заміні модуля пружності на модуль загальної деформації, що враховує пружні і пластичні (залишкові) деформації, вдається забезпечити несучу здатність фундаменту з урахуванням властивостей ґрунту, а також виконувати розрахунки в більшому діапазоні тисків.

На ранньому етапі використання моделі Н. М. Герсеванова для вирішення практичних завдань виникли такі проблеми, що полягають у врахуванні:

- конструктивних та технологічних особливостей фундаментів будівель і споруд, що розраховуються;
- жорстких характеристик фундаментів;
- малого терміну випробувань та швидкого навантаження ґрунтових зразків порівняно з терміном експлуатації споруд та часом застосування до основи навантаження.

Слід зазначити, що це вище перелічене певною мірою враховано і усунуто під час створення нормативних документів. Над цим працювали кілька поколінь дослідників, деякі з них відмовилися від моделі Н. М. Герсеванова на користь іншої, що більш повно враховує ті чи інші особливості деформування ґрунтових основ.

Ґрунти, з яких складається основа, як правило, мають природне походження зі складною історією утворення. Отже, фізико-механічні властивості різних видів ґрунтів можуть відрізнятися. При описі поведінки ґрунтів під навантаженням використовуються моделі дискретного та суцільного середовища. Для останнього найбільш відпрацьованою є теорія фільтраційної консолідації в рамках лінійної пружної консолідуючого середовища, яка була сформульо-

вана і вирішена для компресійного завдання К. Терцаги. Як рівняння стану середовища було прийнято закон Гука. Оскільки завдання вирішувалося при постійному навантаженні, проблему вдалося звести до отримання значень порового тиску з подальшим визначенням напружень в ґрунтовому скелеті і його переміщень (Зоценко, Коваленко, Хілобок, & Яковлев, 2004; Швеєц, Шаповал, Петренко, & al., 2008).

Отримані К. Терцаги рішення при тих чи інших припущеннях використовуються в інженерній практиці і зараз. Однак прийняті ним співвідношення не дозволяють врахувати ряд особливостей ущільнення реальних ґрунтових основ (загасання епюри вертикальних напружень по глибині та просторовий характер роботи ґрунтових основ фундаментів). У зв'язку з цим з'явилася низка інженерних методів, суть яких полягає у пошуку компромісу між фактичним напружено-деформованим станом ґрунту та отриманими в рамках компресійного завдання рішеннями.

Найбільш досконалими даними серед методів є запропонований Н. А. Цитовичем метод еквівалентного шару, суть якого зводиться до побудови рішення ґрунту, що знаходиться в умовах компресійного стиснення під впливом розподіленого визначеним чином по глибині об'ємного навантаження. При цьому закон зміни об'ємного навантаження відповідає епюрі розподілу вертикальної нормальної напруження, розрахованого для випадку просторового завдання. Необхідно відзначити, що такий підхід, однак, не дозволяє повністю відобразити фактичний характер ущільнення ґрунтових основ, що знаходяться під впливом місцевого навантаження (дія мікропалі), оскільки при компресії немає можливості відтоку порової рідини в горизонтальному напрямку.

Мета

На основі аналізу існуючого досвіду провести обґрунтування вибору моделі основи та фундаменту будівлі під час його підсилення мікропаллями. Такий методологічний крок дозволить прийняти до подальших наукових досліджень модель ґрунтової основи, яка більш повно відповідає взаємодії мікропаль, фундаменту визначеної жорсткості та варіації їхніх параметрів.

Методика

Найбільшого поширення на практиці розрахунку конструкцій на пружній основі, зокрема фундаментів, отримав метод Б. Н. Жемочкіна. Пружна основа Б. М. Жемочкін представляє системою вертикальних зв'язків (стрижнів), розташованих по лінії контакту основи та фундаменту, що зумовлює спільність деформацій системи у цій зоні. Жорсткість зв'язків характеризує умова спільної роботи пружної основи та фундаменту і в загальному випадку може бути змінною в плані (Швец, Шаповал, Петренко, & al., 2008).

Використовуючи змішаний метод будівельної механіки, Б. М. Жемочкін формує вихідну систему розрахункових рівнянь щодо невідомих зусиль у цих абсолютно жорстких зв'язках, додаючи рівняння рівноваги статичі. Точність розрахунків визначається кількістю зв'язків. Метод загальних пружних деформацій основи, розроблений з використанням **гіпотези пружного півпростору** (рис. 1), перебільшує розподільну роль ґрунту.

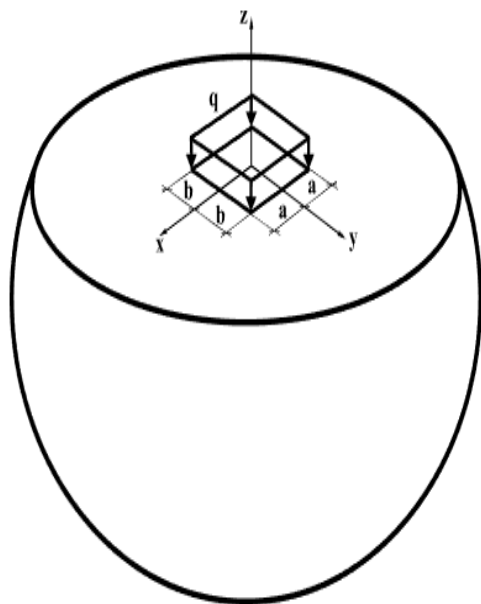


Рис. 1. Модель, що базується на гіпотезі пружного півпростору

Метод Б. Н. Жемочкіна базується на робочій гіпотезі, оскільки залучення пружного півпростору до теоретичних побудов має основою чіткі та відпрацьовані рішення теорії пружності і, ширше, механіки суцільного середовища. Проте для чисельного підходу застосування цього

методу має деякі недоліки, наприклад, потребу в створенні скінченно-елементних моделей із завищеними розмірами розрахункової області.

Перебільшення розподільної ролі ґрунту в методі Б. Н. Жемочкіна призвело до розробки методів визначення деформацій ґрунтів, що наділяють основу проміжною розподільчою здатністю між гіпотезою Вінклера та гіпотезою пружного півпростору. Недоліки, властиві гіпотезі Вінклера, значною мірою усуваються з використанням методу змінного коефіцієнта жорсткості С. Н. Клепікова. Цей метод, зберігаючи в загальному вигляді вінклерівську основу для залежності між навантаженням і осадкою, проте дозволяє наділити стисливу основу реальними властивостями, характерними як для пружної, так і нелінійно-деформованої основи при поетапному її завантаженні.

Під час застосування методу Б. Н. Жемочкіна, для розрахунку конструкцій на ґрунтовій основі за пружністю досліджувалася А. П. Синициним. М. І. Горбунов-Посадов вважає, що рішення А. П. Синицина правильніше використовувати для визначення деформацій контактної сфери, що прилягає до фундаменту.

Більш плідною гіпотезою як для фундаментів взагалі, так і для випадку їх підсилення мікропаллями, є **гіпотеза шару кінцевої товщини**. Вона більш адекватна для чисельного підходу, оскільки скінченно-елементні моделі фундаменту з мікропаллями та ґрунтовою основою повинні мати визначені межі, що, в першу чергу, дозволяють вільне деформування системи «фундамент – основа», а, в другу чергу, мати розміри, що можуть бути піддані розрахунку на ПЕОМ. Таким чином, визначення товщини шару є важливим кроком для створення моделі (Russo, 2016; Петренко, Харченко, Терещук, & Петров, 2020).

Норми проектування основ фундаментів містять умовний прийом, запропонований Д. Є. Польшиним і заснований на обмеженні зони основи, що деформується, по заданому співвідношенню вертикальних осевих нормальних напружень від зовнішнього навантаження і вертикальних напружень від власної ваги ґрунту (Швец, Шаповал, Петренко, & al., 2008).

Недолік експериментальних даних по товщині деформованої зони, особливо в натурних умовах, пов'язаний з відсутністю способів визначення вихідного природного напруженого

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

стану від дії власної ваги та порушення цілісності масиву при впровадженні вимірювальних приладів. Тому в технічній літературі містяться пропозиції низки дослідників щодо визначення товщини деформованої зони.

Так, Н. А. Цитович рекомендує для глинистих ґрунтів визначати потужність товщі, що деформується, виходячи з умови, що на її межі напруження дорівнюють структурній міцності ґрунту. За відсутності даних структурної міцності глибину стисливої зони, Н. А. Цитович рекомендує приймати подвоєну товщину еквівалентного шару.

Відповідно до рекомендації Б. І. Далматова, основа приймається такою, що не стискається на глибині, що дорівнює подвоєній потужності еквівалентного шару і визначеній методом спроб для схеми стисливого шару кінцевої товщини.

За даними К. Є. Єгорова, 70 % загальної осадки основи відбувається за рахунок стиснення верхнього шару, що дорівнює 0,25 від характерного розміру фундаменту.

М. І. Горбунов-Посадов рекомендував для більш розмірних фундаментних плит, що зводяться на сильно стислій основі, приймати товщину зони, що деформується, в межах 10...15 м.

За даними спостережень Б. І. Далматова, за пошаровими деформаціями основ, складених сильно стисливими ґрунтами, виміряна товщина більш ніж в 2 рази перевищувала ширину фундаменту.

Таким чином, кожен з авторів пропонує конкретне рішення для вказаних випадків, не наводячи узагальнених рішень. Відповідно, прийнявши гіпотезу пружного шару, слід розробити авторські положення для подальшого створення скінченно-елементних моделей.

Результати

Узагальнюючи результати експериментальних спостережень низки дослідників (М. І. Горбунов-Посадов, Т. А. Маліков, К. Є. Єгоров) за розвитком пошарових деформацій на основі великорозмірних фундаментів (ширини $b > 10$ м), слід зазначити, що розміри деформованої зони залежать, в основному, від ґрунтових умов. Зазначене вище узгоджується з висновками, згідно з якими глибина товщі, що деформується, в основі будівель та споруд ко-

ливається від 0,5 до 0,75 ширини підшови фундаменту (Швец, Шаповал, Петренко, & al., 2008).

Для умов близького залягання ґрунту, що не стискається, К. Є. Єгоровим було запропоновано метод розрахунку осадки для пружного шару кінцевої товщини (рис. 2).

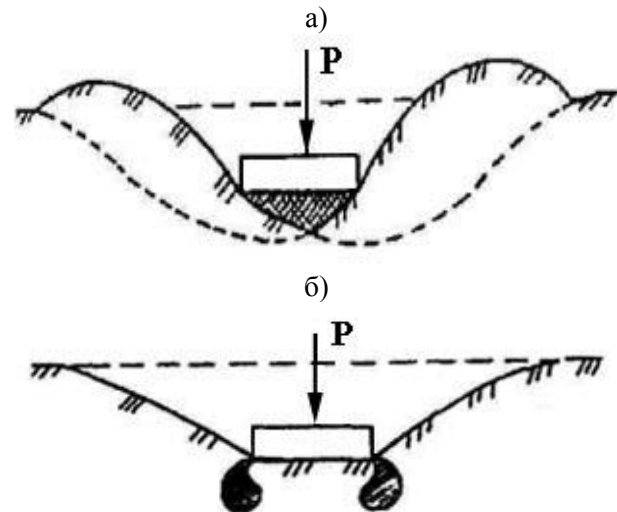


Рис. 2. Схема шару кінцевої товщини:

- а) основа працює в умовах граничної рівноваги;
б) пружного шару, працюючого в умовах змішаної задачі теорії пружності та теорії пластичності

Цей метод застосовується поряд з розрахунком осадки за методом пружного півпростору (рис. 3).

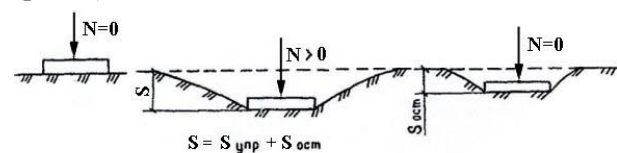


Рис. 3. Схема розрахункової моделі пружного лінійно-деформованого півпростору

Умовність способу К. Є. Єгорова полягає у встановленні вихідного значення товщини зони, що деформується. Тим не менш, ця розрахункова схема застосовується як для випадку залягання ґрунту практично недеформованою основою ($E > 100$ МПа), так і у разі основи, завантаженої по великій площі ($b > 10$ м, $E > 10$ МПа).

В роботах В. Б. Швеца дослідження зі штампами площею 0,5...1,0 м² проведені на глинистих, піщаних та великомоноблочних основах з вимірюванням пошарових деформацій у центральній частині круглих жорстких штам-

пів. показано, що в глинистих основах отримані наступні результати:

1) осадки штампів більш ніж на 90 % викликаються стисненням шару ґрунту товщиною $1,5b$ у центрі та $1,25b$ поблизу його краю. При цьому частка деформацій верхнього шару ґрунту завтовшки $0,5b$ у загальному осаді штампу становить понад 70 % для центральної його частини та 85 % для крайової;

2) товщина деформованої зони в часі (2,5 місяця) зберігає практично постійне значення, а деяке збільшення осадки, що спостерігається, відбувається за рахунок деформацій у верхніх шарах на глибині $1,0b$;

3) у великоуламкових (з глинистим заповнювачем) і піщаних ґрунтах глибина зони, що деформується, не перевищувала $1,2$ і $1,5b$, при цьому 90 % деформацій протікає у верхньому шарі товщиною b .

Відзначено також, що глибина зони, що деформується, приймається пропорційно збільшенню тиску і виміряна товща в $1,5\dots 2$ рази менше, ніж обчислена за нормами лінійно-деформованого півпростору.

Дослідженнями пошарових деформацій, проведеними П. А. Коноваловим на основі штампів і дослідних фундаментів, встановлено, що виміряна зона, що деформується, в $1,5\dots 2$ рази менша, ніж обчислена за нормативними джерелами. Фактична глибина зони, що деформується, у тому числі під фундаментами існуючих будівель, становить 50...60 % розрахункових значень.

Встановлено, що виміряна глибина товщі, що деформується, зменшується з підвищенням модуля деформації, тоді як її розрахункове значення не залежить від величини модуля деформації. Тому, чим вище його значення, тим більше є розбіжність між фактичними і розрахунковими значеннями глибини товщі, що деформується, а зі збільшенням розмірів підшви фундаментів зростає зона деформацій основи.

Вимірювання пошарових деформацій у піщаній основі під жорстким круглим штампом показали, що 70 % деформацій відбувалося у шарі товщиною $1,5d$, а 80 % – у шарі, товщина якого дорівнює $2,0d$ (d – малий діаметр штамп). Зазначені досліди проводились у ґрунтовому лотку зі штампом малого діаметра ($d=28$ см, $F=615$ см²).

Спосіб визначення товщі, що деформується,

по суті, базується на використанні за пропозицією К. Терцаги, результатів компресійних випробувань зразків непорушеного ґрунту, відібраних з різної глибини під подошвою фундаменту.

Для умов чисельного моделювання товщина шару кінцевої товщині i , відповідно, висота скінченно-елементної моделі приймалася для мікропалі довжиною 1 м рівною 7 м, тобто під вістрям палі залишалася основа висотою 6 м ($E=30$ МПа) (рис. 4) (Dubinchyk, Bannikov, Kildieiev, & Kharchenko, 2020).

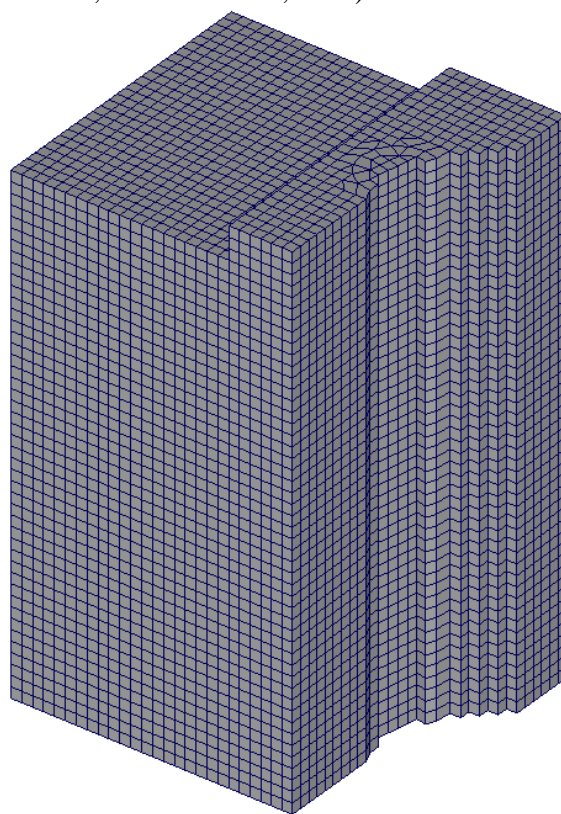


Рис. 4. Скінченно-елементна модель стрічкового фундаменту, підсиленого мікропалею

Аналізуючи значення напружень та переміщень розглянутої моделі, слід відмітити, що навіть висоти у 5 м під вістрям палі було б достатньо для вільного розповсюдження вказаних факторів. Про це свідчать ізолінії та ізополя, які не мають переламів та інших геометричних викривлень, які свідчать про «затиснення» сформованого напружено-деформованого стану. Тобто можна стверджувати, що таких значень висоти скінченно-елементної моделі по відношенню до мікропалі достатньо для проведення коректного чисельного експерименту.

Наукова новизна та практична значимість

Згідно з результатами аналізу вже проведених досліджень обґрунтовано модель основи, що базується на гіпотезі шару кінцевої товщини. Саме ця гіпотеза, яка була отримана при теоретичному підході, є найбільш відповідною для чисельних експериментів за допомогою методу скінченних елементів.

Практична значимість полягає в отриманні обґрунтованої товщини кінцевого шару, що дорівнює 5...6 значень довжини мікропалі. Саме ця товщина, на основі якою обираються розміри скінченно-елементної моделі, дозволяє вільне формування напружено-деформованого стану моделі і не має протиріччя з вже існуючими вимогами до визначення цього параметру.

Висновки

Геотехніка, механіка ґрунтів та основи проектування фундаментів будь-якої конструкції на основах різних властивостей напрацювали великий масив наукових даних та узагальнили їх в низці гіпотез, розглянутих в статті. Проте, поява нових конструктивних рішень, наприклад, мікропалі для фундаментів під час їх підсилення, потребує якщо не виникнення нових гіпотез, але коригування вже апробованих.

В роботі проведено обґрунтування вибору моделі основи та фундаменту будівлі під час її підсилення мікропалами та обрано гіпотезу шару кінцевої товщини. Практично, при проведенні чисельного аналізу отримано, що товщина цього шару повинна складати 5...6 значень довжини мікропалі для адекватної відповідності реальним умовам взаємодії в системі «фундамент – основа» математичного моделювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 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.
- Russo, G. (2016). A method to compute the non-linear behaviour of piles under horizontal loading. *Soils and Foundations*, 56(1), 33-43.
- Zotsenko, N., Vynnykov, Yu., & Zotsenko, V. (2015). Soil-cement piles by boring-mixing technology. *Energy, energy saving and rational nature use*, 192-253.
- Винников, Ю. Л. (2004). *Математичне моделювання взаємодії фундаментів з ущільненими основами при їх зведенні та наступній роботі*. Полтава: ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка.
- ДБН В.2.1-10:2018 (2018). *Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення*. Київ: Мінрегіонбуд.
- ДБН В.2.1-10-2009 (2010). *Зміна № 2. Фундаменти заглиблені і глибокого закладання. Основні положення*. Київ: Мінрегіонбуд.
- Зоценко, М. Л., Винников, Ю. Л., & Зоценко, В. М. (2016). *Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом*. Харків: Друкарня Мадрид.
- Зоценко, М. Л., Коваленко, В. І., Хілобок, В. Г., & Яковлев, А. В. (2004). *Інженерна геологія: Механіка ґрунтів, основи та фундаменти*. Київ: Вища школа.
- 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.
- Швец, В. Б., Шаповал, В. Г., Петренко, В. Д., & al. (2008). *Фундаменты промышленных, гражданских и транспортных сооружений на слоистых грунтовых основаниях*. Днепропетровск: Нова ідеологія.

V. V. KHARCHENKO¹, V. D. PETRENKO^{2*}

¹ Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +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 Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 50 69, e-mail petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF THE MODEL OF THE BUILDING'S BASE AND FOUNDATION DURING ITS REINFORCEMENT WITH MICROPILES

Purpose. Based on the analysis of the existing experience, to justify the choice of the model of the base and foundation of the building during its reinforcement with micropiles. Such a methodological step will make it possible to adopt a base model, which more fully corresponds to the interaction of micropiles, the foundation of a certain stiffness and the variation of their parameters for further research. **Methodology.** Foundations, including those reinforced with micropiles, are designed in such a way that the load on the foundation does not exceed a certain limit, which allows calculations for deformations in the compaction phase. To solve the problem, the analysis of the method of general elastic deformations of the base, developed using the hypothesis of an elastic half-space, was carried out. The inclusion of an elastic half-space in theoretical constructs is based on clear and well-established solutions of the theory of elasticity and, more broadly, the mechanics of a solid medium. Also, the considered method is based on limiting the zone of the deformable base (hypothesis of a layer of finite thickness). The cases of application of these hypotheses for the design and calculation of foundations, taking into account their interaction with the foundation were generalized. **Findings.** It was determined that the elastic layer hypothesis is a more fruitful hypothesis both for foundations in general and for the case of their reinforcement with micropiles. On its basis, it is justified that the finite-element models of the foundation with micropiles and the soil base should have defined limits, which, first of all, allow free deformation of the «foundation – base» system, and, secondly, have dimensions that can be subjected to calculation on a personal computer. **Originality.** It consists in substantiating the foundation model based on the hypothesis of a layer of finite thickness as the most suitable for numerical experiments using the finite element method. **Practical value.** It consists in obtaining a justified thickness of the final layer, which is equal to 5 ... 6 values of the length of the micropile. It is this thickness, on the basis of which the dimensions of the finite-element model are chosen, that allows the free formation of the stress-strain state of the model and does not contradict the existing requirements for determining this parameter.

Keywords: base; foundation; micropile; base model; interaction of base and foundation

REFERENCES

- 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)
- Russo, G. (2016). A method to compute the non-linear behaviour of piles under horizontal loading. *Soils and Foundations*, 56(1), 33-43. (in English)
- Zotsenko, N., Vynnykov, Yu., & Zotsenko, V. (2015). Soil-cement piles by boring-mixing technology. *Energy, energy saving and rational nature use*, 192-253. (in English)
- Vynnykov, Yu. L. (2004). *Matematychni modeliuvannia vzaiemodii fundamentiv z ushchilnenymy osnovamy pry yikh zvedenni ta nastupnii roboti*. Poltava: PoltNTU im. Yurii Kondratiuka. (in Ukrainian)
- DBN V.2.1-10:2018 (2018). *Osnovy i fundamenty budivel ta sporud. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Minrehionbud. (in Ukrainian)
- DBN V.2.1-10-2009 (2010). *Zmina № 2. Fundamenty zahlybleni i hlybokoho zakladannia. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Minrehionbud. (in Ukrainian)
- Zotsenko, M. L., Vynnykov, Yu. L., & Zotsenko, V. M. (2016). *Burovi gruntotsementni pali, yaki vyhotovliaiutsia za buroznishivalnym metodom*. Kharkiv: Drukarnia Madryd. (in Ukrainian)
- Zotsenko, M. L., Kovalenko, V. I., Khilobok, V. H., & Yakovliev, A. V. (2004). *Inzhenerna heolohiia: Mekhanika gruntiv, osnovy ta fundamenty*. Kyiv: Vyshcha shkola. (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 sverdlovyh. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 18, 96-105. (in Ukrainian)
- Shvets, V. B., Shapoval, V. G., Petrenko, V. D., & al. (2008). *Fundamenty promyshlennykh, grazhdanskikh i transportnykh sooruzheniy na sloistykh gruntovykh osnovaniyakh*. Dnepropetrovsk: Nova ideolohiia. (in Russian)

Надійшла до редколегії 01.05.2023.

Прийнята до друку 26.05.2023.