

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.154.1:691.328-048.32

В. Д. ПЕТРЕНКО^{1*}, В. І. КРИСАН², В. В. КРИСАН³, В. М. КОНОВАЛ⁴

^{1*} 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

² ТОВ «Геопротект», вул. Новокримська, 5, кв. 308, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (067) 565 89 69, ел. пошта krysan.v.i@ukr.net

³ ТОВ «Геобуд», вул. Новокримська, 5, кв. 308, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (067) 631 31 22, ел. пошта geobuddnepr@gmail.com

⁴ Кафедра «Промислове і цивільне будівництво», Черкаський державний технологічний університет, бул. Шевченка, 460, Черкаси, Україна, 18006, тел. +38 (096) 735 50 84, ел. пошта konovalvolodymyr2019@gmail.com, ORCID 0000-0002-6740-6617

НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПІДСИЛЕННЯ ҐРУНТОВИХ ОСНОВ АРМОВАНИМИ ҐРУНТОЦЕМЕНТНИМИ ПАЛЯМИ

Мета. Метою роботи є обґрунтування технологічних параметрів ефективного застосування армованих ґрунтоцементних паль, отриманих бурозмішувальним способом. Такі дослідження необхідні для визначення можливості збільшення несучої здатності пальових фундаментів у тілі земляних конструкцій будівель та дорожніх колій. **Методика.** Визначення несучої здатності армованих ґрунтоцементних паль проведено шляхом обґрунтованого вибору конструкції, ґрунтової основи, матеріалу, глибини закладання паль відповідно до інженерно-геологічних умов, конструктивної схеми споруди та способу їх улаштування. **Результати.** Значні відмінності ґрунтових інженерно-геологічних елементів в плані та на глибині викликали необхідність поглибленого вивчення характеристик ґрунтів, тому було прийнято рішення для визначення їх міцності та деформативності на основі виконання статичного зондування армованих паль. Аналіз результатів виконаних статичних досліджень показав, що ґрунтоцементна паля, що підсилена арматурним каркасом, має більш високу несучу здатність по ґрунту та по матеріалу, а гілка розвантаження підтверджує той факт, що в конкретних умовах ґрунт та паля працюють в пружному режимі. **Наукова новизна.** Вона полягає в отриманні залежності зміни вертикальних навантажень на армовану ґрунтоцементну паля, створену на основі бурозмішувальної технології. Отримані графіки залежності величин деформацій, виникаючих під час дії на армовану ґрунтоцементну паля при статичному навантаженні та розвантаженні. **Практична значимість.** В практичних умовах на будівельному майданчику було реалізовано рішення по виготовленню та випробуванню статичним навантаженням дослідної армованої ґрунтоцементної палі. Технологія виготовлення розроблена так, що просторові каркаси ґрунтоцементного елемента довжиною 5...7 метрів занурюються під своєю вагою, а каркаси 12 та більше метрів опускаються з допомогою вібратора.

Ключові слова: ґрунтоцемент; бурозмішувальна технологія; ґрунтоцементний елемент; армована ґрунтоцементна паля; несуча здатність палі; статичне випробування палі

Вступ

Ґрунтоцемент, завдяки своїм характеристикам та економічним показникам, все частіше використовується в будівництві. Як вже відмічалось в багатьох публікаціях (Токин, & Шапошников, 1987; Зоценко, М. Л., Винников, & Зоценко, В. М., 2016; Крысан В. И., & Крысан, В. В., 2016), в залежності від розміщення ґрунтоцементні елементи можна використовувати для укріплення ґрунтових масивів, земляного полотна залізниць, а також пальових фундаментів (Петренко, Тютюкін, Крысан, В. И., & Кри-

сан, В. В., 2019; Петренко, Крысан, В. И., Крысан, В. В., & Чегодаев, 2021). Разом з тим в такій області такі елементи недостатньо поширені. Більш відомо про захист будівельних котлованів масивними підпирними стінками, що виготовлені з ґрунтоцементних елементів, та армування масивів (Зоценко, М. Л., Винников, & Зоценко, В. М., 2016; Крысан В. И., & Крысан, В. В., 2016). У багатьох випадках є можливість раціонально використовувати ґрунтоцементні палі, тому в наданій роботі наведено матеріали з випробувань ґрунтової основи, підсиленої армованою ґрунтоцементною палею.

Дослідження ґрунтоцементу виконувались і продовжують виконуватись в Національному технічному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Київському національному університеті будівництва і архітектури, Українському державному університеті науки і технологій та спеціалістами інших підприємств.

В зарубіжній практиці технологія виготовлення ґрунтоцементних конструкцій суттєво відрізняється від тієї, що використовується в наших умовах. Причому в більшості робіт основна увага приділяється обґрунтуванню розробленої технології високонапірної цементації (*jet grouting*) (Kutzner, 1996; Flora, Modoni, Lirer, & Croce, 2013; Modoni, Croce, & Mongiovi, 2008). Разом з тим, дана технологія має один достатньо відомий недолік, обумовлений високими рівнями тиску в сотні атмосфер у всій системі, починаючи з насосів для нагнітання розчинів, так і у всій трубної інфраструктурі (Петренко, Крисан, В. І., Крисан, В. В., & Чегодаєв, 2021).

В діючий на сьогоднішній день нормативній документації (ДБН В.1.1-45:2017, 2017; ДБН В.2.1-10:2018, 2018) зазначено, що проектування пальових фундаментів повинно включати обґрунтований вибір конструкції, матеріалу, глибини закладання паль відповідно до інженерно-геологічних умов, конструктивної схеми споруди, несучої здатності паль за властивостями ґрунтової основи та матеріалу конструкції паль і способу (технології) їх улаштування.

Механічні характеристики, такі як щільність, наявність різних включень на етапі підготовки до роботи дають змогу розробляти конструкцію інструменту, що буде задіяний при виконанні робіт, оскільки для різних ґрунтів конструкція ріжучого інструменту та форсунка подачі закріплюючих розчинів в свердловину повинні бути різні. До технологічних параметрів буріння слід віднести швидкість обертання інструменту, швидкість подачі його на забій свердловини, зусилля різання ґрунту, кількість подачі закріплюючого розчину.

Виходячи з цих умов, основне завдання, вирішенню якого присвячена дана стаття, полягає в визначенні несучої здатності ґрунтоцементних паль, в тому числі і армованих, за властивостями ґрунтової основи.

Мета

Мета роботи полягає в науково-технічному обґрунтуванні закріплення ґрунтових основ армованими ґрунтоцементними пальями. Важливим кроком до вирішення такої науково-технічної задачі є обґрунтування технологічних параметрів ефективного застосування армованих ґрунтоцементних паль, отриманих бурозмішувальним способом.

Методика

При аналізі лабораторних досліджень необхідно звертати увагу на пластичність, консистенцію та пористість ґрунту. Як відомо, інженерно-геологічний переріз складається з інженерно-геологічних елементів (ІГЕ), що значно відрізняються по своїх характеристиках та обумовлюють необхідність усереднювати конструкцію вузла різання. В свою чергу виникає необхідність в процесі виготовлення ґрунтоцементних елементів коригувати технологічні параметри.

Ґрунти являють складну багатокомпонентну систему, що складається з мінеральних частин, повітря та води в різному агрегатному стані, яка заповнює тріщини та пори. Процес подрібнення ґрунту потребує затрат доволі значної потужності, при цьому виділяється тепло, яке негативно впливає на ріжучий інструмент. Разом з тим конструкція вузла подрібнення повинна бути розроблена так, що закріплюючий розчин виконує його охолодження.

Мінеральні частки, що складають ґрунти, здебільшого мають неправильну форму та розмір, що обумовлює наявність пористості ґрунту. Пори заповнені повітрям та водою, що знаходяться в різних фазових станах, та їх взаємодія з ґрунтом дуже складна. І при виконанні робіт по виготовленню ґрунтоцементних елементів величина пористості та кількість вологи мають дуже важливе значення. Теоретично всі пори можна заповнити закріплюючим розчином, тому максимальна кількість закріплюючого розчину буде дорівнювати пористості ґрунту. Практично такі параметри мають деякі відмінності, обумовлені геологічними чинниками, технологією робіт та особливостями конкретних умов виконання робіт.

Вивчення процесів підсилення ґрунтів, в першу чергу фізико-хімічної взаємодії закріплю-

ючих розчинів з різними мінеральними агрегатами є дуже важливою складовою при створенні якісного ґрунтоцементу. Для цього важливо знати хіміко-мінералогічний склад ґрунту. Ґрунти, що представлені глинистими та лесовими породами мають в сухому стані значну міцність, яка обумовлена проявом молекулярних, електростатичних і частково магнітних сил. Значну роль в міцності ґрунтів відіграє кількість та фазовий склад води (Токин, & Шапошников, 1987; Зоценко, М. Л., Винников, & Зоценко, В. М., 2016).

Технологія виготовлення ґрунтоцементу передбачає подрібнення ґрунту та змішування з закріплюючим розчином (Токин, & Ветштейн, 1981). Ґрунти мають вологість з певним вмістом розчинених солей, і ця волога реагує з закріплюючим розчином. Хімічний склад ґрунтів дуже різноманітний, що також зумовлює відмінність їх фізико-механічних властивостей, і тільки завдяки кількості закріплюючого матеріалу та поверхнево активних добавок виконується досягнення необхідних параметрів ґрунтоцементу. Неврахування хімічного складу може змінювати процеси гідратації, а при недостатніх дозах цементу в ґрунті не створюється розгалужена кристалічна структура.

Міцність ґрунтоцементного матеріалу визначається не тільки кристалічним та хімічними особливостями і станом тонкодисперсної частини ґрунту, а й розподілом в'язучого у всій його масі. Цемент розподіляється на поверхні мікро- і макроструктурних частинок і заповнює пори між ними.

Реакція гідратації починається відразу після замішуванні цементу з водою і вже через кілька хвилин розчин, що заповнює простір між зернами цементу стає перенасиченим відносно сульфату і гідроксиду, що виділяються під час гідролізу аліту (C_3S). Оскільки аліт – основний мінерал портландцементу, то процес гідратації проходить в два етапи (Рунова, Дворкін, Л. Й., Дворкін, О. Л., & Носовський, 2012): 1) *твердіння* – розчинення мінералів цементу у воді і утворення перенасичених нестійких систем; 2) *колоїдація (тужавлення)* – характеризується новоутвореннями у колоїдальній системі в гель.

До першого етапу гідратних новоутворень належать: гіросилікат Са, який утворюється з аліту й беліту; до другого етапу відноситься утворення $Ca(OH)_2$ з аліту та беліту. Навколо

зерен виникають оболонки з новоутворень, що перешкоджають проникненню води до частинок клінкеру.

У зв'язку з переходом новоутворень у стійку термодинамічну форму відбуваються явища, які супроводжуються зміною сил взаємодії частинок. В середині них розміщуються більш крупні кристалічні новоутворення, що створюють каркас цементного каменю, який пронизує основну масу гелеподібного гіросилікату Са.

В третьому етапі наступає явище *контракції (стягування)*, тобто ущільнення цементного каменю. Кількість вільної води зменшується і наступає загусання цементного тіста й бетонна суміш втрачає рухливість. Цей період називають періодом тужавлення, тобто це третій етап твердіння. В подальшому йде фізико-хімічний процес переходу бетонної суміші в штучно створений кам'яний матеріал, що відповідає заданій міцності, а також іншим важливим якісним характеристикам.

З наростанням механічної міцності за рахунок ущільнення структури та збільшення її кристалічної фази період твердіння супроводжується явищем *кристалізації*, при цьому діється процес перетворення колоїдної гелевої фази в кристалічну.

Процес твердіння й гідратації триває довгий час, але із затухаючою інтенсивністю. В кінці процесу наступає такий період, коли гідратні оболонки навколо зерен цементу стають щільними й проникнення води до центру цементного зерна призупиняється. Тоді і закінчується зростання міцності цементного тіста (Саницький, Соболь, & Марків, 2010; Малинин, Жемчугов, & Гладков, 2011).

В процесі гідратації цементу і кристалізації новоутворень створюється нерівномірний по міцності і складний по конфігурації каркас, що перетворює ґрунт в камінь (Малинин, Жемчугов, & Гладков, 2011).

При укріпленні ґрунтів вода відіграє двояку роль. Протягом відносно короткого часу вона потрібна як мастило, що забезпечує досягнення необхідної щільності ґрунту. Надалі вона необхідна в певній кількості для забезпечення процесів гідролізу і гідратації цементу і подальшого твердіння ґрунтоцементу. Так як випаровування води з ґрунтоцементних елементів практично відсутнє, кількість гідратованого цементу в ґрунтоцементі більша, чим в бетоні.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Як відомо, реакція гідратації починається відразу після змішування цементу з водою і вже через кілька хвилин розчин, що заповнює простір між зернами цементу стає перенасиченим відносно сульфату і гідроксиду. В подальшому проходять процеси кристалізації ґрунтоцементу. Тому виготовлення ґрунтоцементної палі та занурення каркасу повинно виконуватись в проміжок часу, коли ще не сформовано структурні зв'язки в матеріалі палі.

В Києво-Святошинському районі Київської області було необхідно виконати реконструкцію торгівельного комплексу будівельних матеріалів. Проектом передбачалась побудова перехресних фундаментів на основі з ґрунтоцементними елементами. Крім того було необхідно виконати захист стін котловану, який примикав до наявної будови. В зв'язку з тим, що простір був обмежений, було прийнято рішення в частину ґрунтоцементних елементів опустити арматурні каркаси, які повинні були збільшити опір конструкції горизонтальному навантаженню та виконати визначення несучої здатності ґрунтоцементної палі за властивостями ґрунту.

Достатньо складні інженерно-геологічні умови будівельного майданчика, що видно з матеріалів вишукування, що наведені нижче, диктували необхідність підсилення ґрунтів основи фундаментів.

При проведенні інженерно-геологічних вишукувань майданчик був вивчений до глибини 25 м від денної поверхні, та виявлений комплекс ґрунтових відкладень, а за результатами польових та лабораторних робіт виділені наступні інженерно-геологічні елементи (ІГЕ):

ІГЕ-1р – рослинний шар, складений пилюватими гумусовими супісками;

ІГЕ-1 – насипний шар, що має в своєму складі супісок, суглинок, дрібний пісок, будівельне сміття, потужністю 0,5...2,6 м;

ІГЕ-2а – супісок пилюватий, твердий, підвищеної пористості, від жовто-коричневого до бурувато-жовтого, з тонкими (до 1...3 см) прошарками пилюватого піску, потужністю 0,5..1,4 м;

ІГЕ-2 – пісок кварцовий середньої крупності, середньої щільності, малого ступеню насичення водою, з розводами озалізнення, сірувато-жовтий, місцями до бурувато-жовтого, потужністю 0,3...7,7 м;

ІГЕ-3 – пісок кварцовий середньої крупності, місцями до дрібного, неоднорідний, щільний, малого ступеню водонасичення, в зоні капілярно підняття середнього ступеню водонасичення до насиченого водою нижче рівня ґрунтових вод, жовто-сірий, сірий, потужністю 2,0...8,0 м;

ІГЕ-3а – супісок піщанистий, твердий, з тонкими прошарками озалізненого буро-сірого пилюватого піску, від голубувато-сірого до сіро- і буро-коричневого, потужністю 1,4...3,0 м;

ІГЕ-3б – супісок піщанистий, текучий, з прошарками жовто-сірого дрібного піску, в підшві шару з окремими включеннями уламків кристалічних порід, гравію до 3...5 %, залишків грудок строкатої глини (до 2...3 см), від голубувато-сірого до сірого, потужністю 2,1...2,5 м;

ІГЕ-4 – суглинок легкий пилюватий, твердий, з тонкими (до 3...5 см) прошарками твердого супіску та маловологого піску, уламками гравію та гальки кристалічних порід до 10...20 %, від червоно-коричневого до буро-коричневого, потужністю 1,6...5,5 м;

ІГЕ-4а – суглинок важкий пилюватий, напівтвердий, з прошарками супіску та піску, уламками гравію порід до 5...10 %, від зеленувато-сірого та сірого до коричнево-сірого потужністю 3,2...5,1 м;

ІГЕ-5 – пісок кварцовий середньої крупності, щільний, неоднорідний, глинистий, малого ступеню водонасичення, в зоні капілярного підняття – середнього ступеню водонасичення, нижче рівня підземних вод – насичений водою, жовто-сірий до сіро-жовтого, потужністю 2,7...5,9 м;

ІГЕ-6 – глина важка пилювата (строката), тверда, в плямах та розводах, з включеннями бобовин та стяжінь Fe – Mn, світло-сіра, жовто-сіра, червоно-бура, місцями до малинової, потужністю 0,7...2,4 м;

ІГЕ-7 – суглинок легкий, пилюватий, неоднорідний за складом, місцями супісок каолінистий, напівтвердий, світло-жовтий та біло-жовтий, потужністю 0,8...2,7 м;

ІГЕ-8 – пісок кварцовий, каолінистий, дрібний, місцями з гніздами піску середньої крупності, щільний, насичений водою, світло-жовтий та біло-жовтий з розкритою потужністю 4,2...7,0 м.

Паля випробувалась шляхом прикладання вертикального навантажування. Несуча здат-

ність палі за властивостями ґрунту по даних польових випробувань визначалась, як це передбачено ДСТУ Б В.2.1-27:2010.

Виготовлення ґрунтоцементних паль потребує необхідної кількості механізмів, обладнання та підготовки інженерно-технічного персоналу для виконання робіт. Крім цього, оскільки в роботі використовуються хімічні реагенти та цементи, то необхідно враховувати специфіку фізико-хімічних процесів. Річ в тім, що виготовлення ґрунтоцементних паль – це процес, що включає в себе механічне та гідравлічне подрібнення ґрунтів та змішування їх з закріплюючими реагентами. Одночасно з цим включаються фізичні та хімічні процеси. Тому дуже важливим є забезпечення виконання проєктних робіт з застосуванням якісних матеріалів інженерно-геологічних вишукувань.

Як уже зазначалось вище, необхідно виконувати аналіз матеріалів інженерно-геологічних вишукувань для оцінки механічних та фізичних характеристик ґрунтів, а також прогнозувати хід процесів твердіння закріплюючих розчинів.

Програмою випробувань було задано максимальне навантаження на палю 1200 кН. Навантаження виконувалось ступенями по 100 кН гідравлічним домкратом ДГО-200, який через розподільчу площадку був установлений на палю. Навантаження фіксувались по показам манометра, вмонтованого в гідравлічну систему випробувального стенду (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд випробувального стенду

Осадка палі замірювалась двома прогиномірами БПАО, що були установлені на реперних пристроях з точністю 0,01 мм. За максимальну величину осадки при навантаженні ступені приймалось при її відсутності протягом 30 хви-

лин. Результати вимірів заносились в журнал статичних випробувань паль.

Результати

Ґрунтоцемент, з якого виготовляється по розробленій технології паля, має високу рухливість і це дає змогу занурювати в нього каркаси довжиною більше 12 метрів (рис. 2-4).



Рис. 2. Підготовлені каркаси



Рис. 3. Етап опускання каркасу всередину палі

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА



Рис. 4. Занурення каркасу в проектне положення під власною вагою

На відміну від інших технологій створення паль, запропонована технологія є такою, що найменше вторгається в систему «фундамент–основа» при проведенні операцій по створенню елементів підсилення. Проведене до початку підсилення палями ґрунтової основи дозволяє значно підняти несучу здатність ґрунту, підготувавши його до додаткового збільшення навантаження.

Значні відмінності інженерно-геологічних елементів в плані та по глибині викликали необхідність визначення характеристик міцності, деформативності та неоднорідності ґрунтів шляхом проведення статичного зондування (рис. 5).

За результатами вимірів збудовані графіки зміни осадки палі в залежності від навантаження (рис. 6).

Як видно з графіка, при вдавлюючому навантаженні 1200 кН, осадка палі склала 4,84 мм. Розвантаження палі показало залишкову деформації її 0,8 мм.

В результаті виконаних досліджень отримані показники зондування (табл. 1).

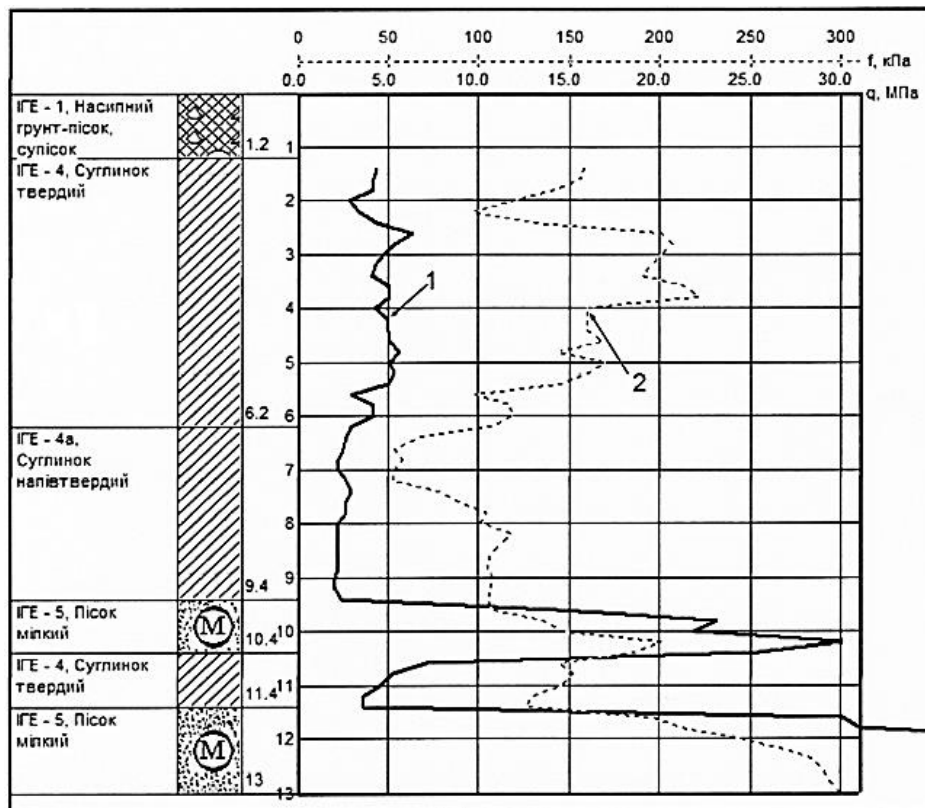


Рис. 5. Графіки змінення показника питомого опору ґрунту при заглибленні конуса в МПа (1) та муфти тертя в кПа (2)

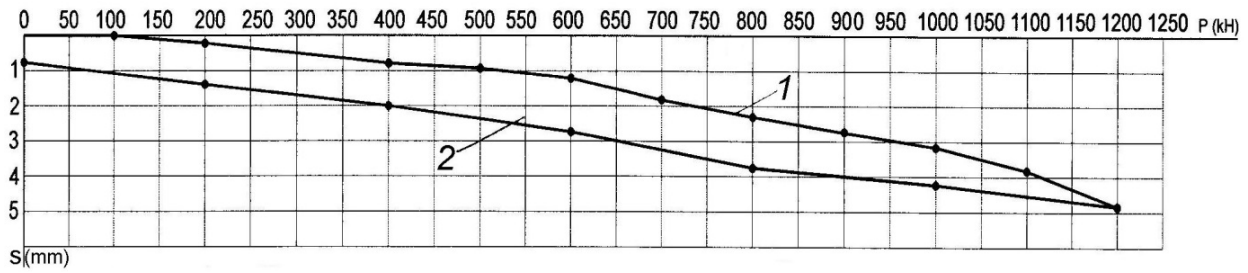


Рис. 6. Графіки залежності величин деформацій, виникаючих під час дії на армовану ґрунтоцементну палю при статичному навантаженні (1) та розвантаженні (2)

Таблиця 1

Узагальнені показники зондування

№ ПГЕ	Короткий опис ПГЕ	Показники зондування	
		Питомий опір ґрунту заглибленню зонда	
		конуса, МПа	муфти тертя, кПа
1р	Рослинний шар		
1	Насипний шар	4,5	25,3
2а	Супісок твердий, підвищеної пористості	1,8	24,7
2	Пісок середньої крупності середньої щільності	9,0	60,1
3	Пісок дрібний щільний	24,4	156,3
3а	Супісок твердий	5,7	99,4
3б	Супісок текучий, із залишками глини та гравію, текучий	1,3	17,7
4	Суглинок легкий моренний твердий	2,3	80,4
4а	Суглинок важкий моренний напівтвердий	4,3	143,6
5	Пісок середньої крупності щільний	28,8	184,0
6	Глина строката тверда	–	–
7	Суглинок напівтвердий	–	–
8	Пісок каоліністий щільний	32,5	205,7

Занурення армокаркасу можна ефективно виконувати, опускаючи його за допомогою електровібратора (рис. 7). При цьому використовуються майданчикові вібратори типу ІВ-99А 380В 2800, або «Кентавр МВ-750Е». Вузол з'єднання виготовляється під діаметр каркасу, на який закріплюється вібратор (рис. 8).



Рис. 7. Загальний вигляд вібратора «Кентавр МВ-750Е»



Рис. 8. Осадження арматурного каркасу електровібратором

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Технологія виготовлення розроблена таким чином, що просторові каркаси довжиною 5...7 метрів занурюються під своєю вагою, а каркаси 12 та більше метрів опускаються з допомогою вібратора.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна полягає в отриманні залежності зміни вертикальних навантажень на армовану ґрунтоцементну палю, створену на основі бурозмішувальної технології. Отримані графіки залежності величин деформацій, виникаючих під час дії на армовану ґрунтоцементну палю при статичному навантаженні та розвантаженні.

Практичну значимість складає те, що в практичних умовах на будівельному майданчику було реалізовано рішення по виготовленню та випробуванню статичним навантаженням дослідної армованої ґрунтоцементної палі.

Висновки

Результати виконаних дослідних робіт показують, що ґрунтоцементна паля, що підсилена арматурним каркасом, має високу несучу здатність по ґрунту та по матеріалу, а гілка розвантаження указує на те, що в конкретних умовах ґрунт та паля працювали в пружному режимі.

Такі дослідження і в подальшому необхідні для визначення можливості збільшення несучої здатності палових фундаментів, що підсилюються армованими ґрунтоцементними елементами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 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. *Geotechnique*, 63(11), 934-945.
- Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*. A. A. Balkema.
- Modoni, G., Croce, P., & Mongiovì, L. (2008). Theoretical modelling of jet grouting: Closure. *Geotechnique*, 58(6), 533-535.
- ДБН В.1.1-45:2017 (2017). *Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Загальні положення*. Київ: Мінрегіонбуд.
- ДБН В.2.1-10:2018 (2018). *Основи і фундаменти*

будівель та споруд. 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.
- Крисан, В. І., & Крисан, В. В. (2007). Армвання насипу підходів земляного полотна до шляхопроводу ґрунтоцементними палями. *Армування основ при будівництві та реконструкції будівель*, 66, 204-211.
- Крысан В. И., & Крысан, В. В. (2016). Использование ґрунтоцемента при наличии слабых ґрунтов. *Сборник научных трудов Азербайджанского научно-исследовательского института строительства и архитектуры*, 123-126.
- Малинин, А. Г., Жемчугов, А. А., & Гладков, И. Л. (2011). Определение физико-механических свойств ґрунтоцемента в ходе натурных исследований. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*, 1, 325-330.
- Петренко, В. Д., Крисан, В. І., Крисан, В. В., & Чегодаев, І. С. (2021). Досвід спорудження пальново-плитного фундаменту в складних інженерно-геологічних умовах. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 19, 78-84.
- 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.
- Рунова, Р. Ф., Дворкін, Л. Й., Дворкін, О. Л., & Носовський, Ю. Л. (2012). *В'яжучі речовини*. Київ: Основа.
- Саницький, М. А., Соболев, Х. С., & Марків, Т. Є. (2010). *Модифіковані композиційні цементні*. Львів: Вид-во Львівської політехніки.
- Токин, А. Н., & Ветштейн, А. И. (1981). Влияние влажности цементогрунтовой смеси на качество перемешивания ее компонентов бурсмесительным способом. *Строительство и архитектура*, 10, 36-41.
- Токин, А. Н., & Шапошников, А. Н. (1987). Закрепление ґрунтов бурсмесительным способом. *Ускорение научно-технического прогресса фундаментостроения: новейшие методы исследования строительных свойств ґрунтов, прогрессивные способы возведения фундаментов и устройства оснований*, 1, 254-255.

V. D. PETRENKO^{1*}, V. I. KRYSAN², V. V. KRYSAN³, V. M. KONOVAL⁴

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

² Geoprotect LLC, app. 308, Novokrimska Str., 5, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (067) 565 89 69, e-mail krysan.v.i@ukr.net

³ Geobud LLC, app. 308, Novokrimska Str., 5, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (067) 631 31 22, e-mail geobuddnepr@gmail.com

⁴ Department «Industrial and Civil Construction», Cherkassy State Technological University, Shevchenko Boul., 460, Cherkassy, Ukraine, 18006, tel. +38 (096) 735 50 84, e-mail konovalvolodymyr2019@gmail.com, ORCID 0000-0002-6740-6617

SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUBSTANTIATION OF SOIL BASES STRENGTHENING WITH REINFORCED SOIL-CEMENT PILES

Purpose. The aim of the work is to substantiate the technological parameters of effective use of reinforced soil-cement piles obtained by jet mixing technology. Such studies are needed to determine the possibility of increasing the bearing capacity of pile foundations in the body of earthen structures of buildings and roads. **Methodology.** Determination of bearing capacity of reinforced soil-cement piles was carried out by reasonable choice of structure, soil base, material, depth of piles in accordance with engineering and geological conditions, structural scheme of the structure and method of their arrangement. **Findings.** Significant differences in soil engineering and geological elements in plan and depth necessitated an in-depth study of soil characteristics, so it was decided to determine their strength and deformability based on static probing of reinforced piles. Analysis of the results of static studies showed that the soil-cement pile, reinforced with a reinforcing frame, has a higher bearing capacity in soil and material, and the unloading branch confirms the fact that in specific conditions the soil and piles work in elastic mode. **Originality.** It consists of the obtained dependences of the change of vertical loads on the reinforced soil-cement pile, created on the basis of brown mixing technology. Graphs of the dependence of the values of deformations occurring during the action on the reinforced soil-cement pile under static loading and unloading are obtained. **Practical value.** In practical conditions, the solution for the manufacture and testing of static load of the experimental reinforced soil-cement pile was implemented at the construction site. The manufacturing technology is designed so that the spatial frames of the soil-cement element with a length of 5...7 meters are immersed under their own weight, and the frames of 12 and more meters are lowered with a vibrator.

Keywords: soil cement; jet mixing technology; soil-cement element; reinforced soil-cement pile; bearing capacity of the pile; static pile test

REFERENCES

- 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)
- Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*. A. A. Balkema. (in English)
- Modoni, G., Croce, P., & Mongiovì, L. (2008). Theoretical modelling of jet grouting: Closure. *Géotechnique*, 58(6), 533-535. (in English)
- DBN V.1.1-45:2017 (2017). *Budivli i sporudy v skladnykh inzhenerno-heolohichnykh umovakh. Zahalni polozhennia*. Kyiv: Minrehionbud. (in Ukrainian)
- DBN V.2.1-10:2018 (2018). *Osnovy i fundamenti budivel ta sporud. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Minrehionbud. (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)
- Krysan, V. I., & Krysan, V. V. (2007). Armuvannia nasypu pidkhodiv zemlianooho polotna do shliakhoprovodu gruntotsementnyu paliamy. *Armuvannia osnov pry budivnytstvi ta rekonstruktsii budivel*, 66, 204-211. (in Ukrainian)
- Krysan V. I., & Krysan, V. V. (2016). Ispolzovanie gruntotsementa pri nalichii slabykh gruntov. *Sbornik nauchnykh trudov Azerbaydzhanskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta stroitel'stva i arkhitektury*, 123-126. (in Russian)
- Malinin, A. G., Zhemchugov, A. A., & Gladkov, I. L. (2011). Opredelenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- gruntotsementa v khode naturnykh issledovaniy. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*, 1, 325-330. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Krysan, V. I., Krysan, V. V., & Chehodaiev, I. S. (2021). Dosvid sporudzhennia palovo-plytneho fundamentu v skladnykh inzhenerno-heolohichnykh umovakh. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 19, 78-84. (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 gruntotsementnyy elementamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 16, 65-74. (in Ukrainian)
- Runova, R. F., Dvorkin, L. Y., Dvorkin, O. L., & Nosovskyi, Yu. L. (2012). *Viazhuchi rehovyny*. Kyiv: Osnova. (in Ukrainian)
- Sanytskyi, M. A., Sobol, Kh. S., & Markiv, T. Ye. (2010). *Modyfikovani kompozytsiini tsementy*. Lviv: Vyd-vo Lvivskoi politekhnyky. (in Ukrainian)
- Tokin, A. N., & Vetshteyn, A. I. (1981). Vliyanie vlazhnosti tsementogruntovoy smesi na kachestvo peremeshivaniya ee komponentov burosmesitelnyy sposobom. *Stroitelstvo i arkhitektura*, 10, 36-41. (in Russian)
- Tokin, A. N., & Shaposhnikov, A. N. (1987). Zakreplenie gruntov burosmesitelnyy sposobom. *Uskorenie nauchno-tekhnicheskogo progressa fundamentostroeniya: noveyshie metody issledovaniya stroitelnykh svoystv gruntov, progressivnye sposoby vozvedeniya fundamentov i ustroystva osnovaniy*, I, 254-255. (in Russian)

Надійшла до редколегії 09.02.2022.

Прийнята до друку 11.04.2022.