

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.154.1:691.328-048.32

В. І. КРИСАН¹, В. В. КРИСАН², В. Д. ПЕТРЕНКО^{3*}, О. Л. ТЮТЬКІН⁴

¹ ТОВ «Геопротект», вул. Новокримська, 5, кв. 308, Дніпро, Україна, 49000,
тел. +38 (067) 565 89 69, ел. пошта krysan.v.i@ukr.net, ORCID 0000-0001-7497-4615

² ТОВ «Геобуд», вул. Новокримська, 5, кв. 308, Дніпро, Україна, 49000,
тел. +38 (067) 631 31 22, ел. пошта vavilon1612@ukr.net, ORCID 0000-0002-9683-7838

^{3*} 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

⁴ Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій,
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18,
ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАННЯ ПІДСИЛЕННЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АРМОВАНИМИ ГРУНТОЦЕМЕНТНИМИ ПАЛЯМИ

Мета. Метою роботи є аналіз результатів випробування підсилення земляного полотна армованими грунтоцementeментними палями. **Методика.** Проведено аналіз ситуації підсилення земляного полотна із визначенням сучасних тенденцій застосування геосинтетичних матеріалів та грунтоцementeментних паль. Розроблено і впроваджено на практиці алгоритм підсилення земляного полотна армованими грунтоцementeментними палями із застосуванням спеціального шарошечного долота. Проведено визначення несучої здатності армованих грунтоцementeментних паль шляхом обґрунтованого вибору конструкції, ґрунтової основи, матеріалу, глибини закладання паль відповідно до інженерно-геологічних умов, конструктивної схеми споруди та способу їх улаштування. **Результати.** Було випробувано 6 паль довжиною від 21 м до 23 метрів. У ході виготовлення паль №№ 1, 4 і 6, довжина яких складала 22...23 м, під час буріння з'ясовано, що в їх основі залягає масивний монолітний граніт (заглиблення в граніт виконувалось на 0,5 м), наявність тріщин в якому не фіксувалась. Палі №№ 2, 3, 5 своєю основою мали граніти тріщинуваті, заглиблення в них також проводилось на 0,5 м. Для цих армованих грунтоцementeментних паль отримані величини вертикального переміщення палі під час її навантаження і розвантаження ступенями. Розрахункове навантаження вдавлення на палю, що випробувалася, становить від 268,3 т·с до 275,0 т·с. **Наукова новизна.** Вона полягає в отриманні залежностей осідань армованих грунтоцementeментних паль, створених на основі бурозмішувальної технології, під час їх випробування в режимах навантаження та розвантаження. **Практична значимість.** Визначено, що при зміні жорсткості земляного полотна, оскільки грунтоцementeментні армовані елементи виготовляються з модулем деформації 300...600 МПа, вирішується проблема його підсилення. Практично є можливість зменшити різницю в жорсткості штучної споруди та конструкції верхньої будови колії, що дозволить ліквідувати баластові поглиблення.

Ключові слова: земляне полотно; ґрунтова основа; грунтоцемент; грунтоцементні палі; бурозмішувальна технологія; випробування палі

Вступ

Як відомо з практики виникнення аварійних ситуацій на залізничному транспорті, необхідно приділяти більше уваги стану земляного полотна та його основи. Під час збільшення швидкості та навантаження на ось також значно зростає і навантаження на земляне полотно та ґрунтову основу, а нормативні документи, на основі яких виконується будівництво нових ліній та реконструкція вже існуючих, не дають чіткої оцінки ризиків, які при цьому виникають.

Creative Commons Attribution 4.0 International

Технологія спорудження земляного полотна в останні десятиріччя кардинально не змінилась (Даніленко, 2010). Більшість робіт в ній пов'язана з розробкою і переміщенням ґрунтів для створення виїмки або будівництва насипу земляного полотна. Це потребує великої кількості механізмів і трудовитрат. Значний вплив на ці роботи мають кліматичні умови, оскільки ґрунти під впливом опадів змінюють свій стан. Найбільш залежним від кліматичних умов є земляне полотно та ґрунти його основи.

© В. І. Крисан, В. В. Крисан, В. Д. Петренко, О. Л. Тютєкін, 2023

Спорудження земляного полотна виконується шляхом ущільнення ґрунту (Даніленко, 2010). Разом з тим необхідно, щоб під впливом кліматичних умов та різних інших факторів, ґрунти мали стабільні фізико-механічні характеристики. Проте досягнути рекомендованого коефіцієнту ущільнення, що дорівнює $1,03 \dots 0,95$, можливо тільки при оптимальній вологості ґрунту. Під час дощів, які призводять до перезволоження ґрунту, укладання й ущільнення зв'язних ґрунтів потрібно припиняти до їх висихання.

Відповідно до державних будівельних норм (ДБН В.2.1-10:2018, 2018) модуль деформації ґрунту основної площадки земляного полотна ділянок з швидкістю руху більше ніж 160 км/год повинен складати не менше 100 МПа, менше 160 км/год – 80 МПа. Досягти таких характеристик земляного полотна достатньо важко, тому виникають проблеми його реконструкції та утримання в належному експлуатаційному стані. Наслідком цього є значні

вертикальні і горизонтальні деформації земляного полотна та зміна геометрії залізничної колії (Fischer, 2022).

Деформації земляного полотна відбуваються тому, що його напружено-деформований стан змінюється під впливом різних факторів. Баласт, що складається з щебеню різних фракцій, є фільтруючим матеріалом. Його коефіцієнт фільтрації на декілька порядків більший від коефіцієнту фільтрації земляного полотна. Тому підготовку основної площадки земляного полотна необхідно виконувати так, щоб дощові та талі води стікали повністю. Такий варіант можливо реалізувати за рахунок застосування геотекстильного полотна під баластним шаром. Дана технологія реально використовується під час ремонту верхньої будови колії за допомогою машини RM-80.

В знижених ділянках відбувається замочування ґрунту, і в нього проникає щебінь з баласту, утворюючи баластне поглиблення (ложе). Схему його утворення наведено на рис. 1.

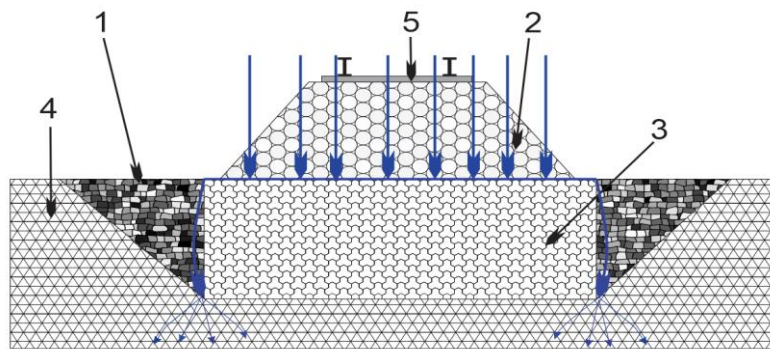


Рис. 1. Схема утворення баластового поглиблення (ложа):
1 – ґрунти зворотної засипки; 2 – шар баласту; 3 – земляне полотно;
4 – природний ґрунт; 5 – рейко-шпальна решітка

Найбільш складним є випадок, коли верхня частина насипу складена слабкими ґрунтами, що мають малі значення кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення. Дощові води через щебеневий баласт фільтруються, проникаючи на основну площадку. В її верхній шар під час ущільнення проникає щебінь, в результаті чого зменшується його водопроникність і на ньому скупчується вода. Потім вода стікає та попадає в зворотну засипку, а потім відбувається фільтрація в природний ґрунт, що є основою земляного полотна. В залежності від кількості води, що фільтрується в ґрунти основи земляного полотна, змінюються його механічні характе-

ристики в сторону їх зменшення, що призводить до негативних наслідків.

Накладання нерівномірних динамічних навантажень від рухомого потягу та наявні конструктивно-технологічні похибки і неякісна експлуатація є одними з причин виникнення баластових лож. Крім того, причинами замкнутих поглиблень під шпалами є мала товщина баластного шару, недостатнє ущільнення або міцність ґрунту основної площадки, перезволоження ґрунту з-за незабезпечення відведення води. Якщо не ліквідувати ці поглиблення, то поступово вони збільшуються і захоплюють більшу довжину вздовж шляху.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Останнім часом під час будівництва земляного полотна в якості матеріалу, що підсилює ґрунт, застосовуються горизонтальні елементи армування в вигляді геосинтетичних полотен і сіток різних розмірів, що безумовно покращує фізико-механічні характеристики масиву, але досить затратне і не знімає проблему фактору кліматичних умов.

За кордоном доволі широко застосовується технологія «jet-grouting» (технологія струминної цементації ґрунтів) (Зоценко, М. Л., Винников, & Зоценко, В. М., 2016; Briançon, & Simon, 2017). Технологія передбачає використання струменя цементного розчину з високим (100...300 МПа) тиском для руйнування природного ґрунту і заміщення його матеріалом, основну частину якого складає цемент. Під час виконання робіт утворюється значна кількість шламу, який необхідно вивозити з місця робіт до його твердіння. Окремою тенденцією в останній час є комбінування геосинтетичних матеріалів з палями (Ariyaratne, & Liyanapathirana, 2015; Alsirawan, Koch, & Alnmr, 2023; Briançon, & Simon, 2017).

Нагальна потреба в збільшенні швидкостей перевезення вантажів та пасажирів висвітили проблеми динамічної стійкості ґрунтів як земляного полотна, так і його основи, проблему стійкості баластної конструкції. Практично всі ці питання можуть бути вирішені шляхом застосування технології армування ґрунтів вертикальними жорсткими елементами (неармованими або армованими ґрунтоцементними палями), як це практикується під час будівництва будівель та споруд житлового та виробничого призначення та фундаментів верстатів з динамічними навантаженнями.

На наш погляд, під час виконання будівельних робіт на залізничному транспорті найбільшої уваги заслуговують ті технології підсилення слабких ґрунтів, що виконуються без виїмки ґрунту. Виконавши критичний аналіз способів підсилення слабких та насипних слабоущільнених ґрунтів, можна свідчити, що такою є бурозмішувальна технологія (Крисан, В. І., & Крисан, В. В., 2007; Петренко, Тютюкін, Крисан, В. І., & Крисан, В. В., 2019; Петренко, Крисан, В. І., Крисан, В. В., & Чегодаєв, 2021; Петренко, Крисан, В. І., Крисан, & В. В., Коновал, 2022). На її основі можливо провести підсилення насипних ґрунтів різного складу, в тому числі

з залишками будівельного бруду, заторфовані супіщані та глинисті ґрунти, лесові просадні ґрунти.

Методика

Нормативною базою проведення випробувань з підсиленням земляного полотна та його основи армованими або неармованими ґрунтоцементними палями є будівельні норми (ДБН В.1.1-45:2017, 2017; ДБН В.2.1-10:2018, 2018). І якщо в першому з них надані основні положення виконання цих робіт, то другий ДБН містить конкретні вказівки по виконанню робіт. У вказаних державних нормах визначено, що масив, який підсилено ґрунтоцементними елементами, слід розглядати як умовний фундамент.

В ДБН В.2.1-10-2009 (2010) підкреслювалось, що «Модуль деформації E і розрахунковий опір підсиленої основи слід визначати за даними штампових випробувань. При цьому рекомендується використовувати штампи великих розмірів з діаметром 1000...1500 мм. Модуль деформації слід визначати за формулою з урахуванням масштабного коефіцієнту». В розділі 6 цього ж ДБН підкреслено, що для попередніх розрахунків стисливості підсиленої основи можна користуватися середньозваженим модулем деформації $\bar{E}$, який визначається за формулою:

$$\bar{E} = (A_e E_e + A_{ey} E_{ey}) / A, \quad (1)$$

де E_e і E_{ey} – модулі деформації відповідно ґрунту і ґрунтоцементу, МПа; A_e і A_{ey} – площі відповідно ґрунту і ґрунтоцементу в загальній площі A горизонтальної проекції підсиленого масиву, м².

Таким чином, можливо попередньо визначати основні характеристики масиву шляхом виконання експериментів, які необхідно виконувати у ході інженерно-геологічних вишукувань. З цією метою з ґрунту, що закріплюється, відбираються проби необхідного об'єму. З цих проб виготовляються зразки в формі рівностороннього куба з розрахунковою кількістю цементу і випробуються на одновісний стиск (табл. 1). Відповідно до цих результатів, згідно наведеної таблиці, можна прогнозувати поведінку ґрунтоцементу, що в подальшому дозволяє виконати розрахунок основи будь-якої споруди, в тому числі і земляного полотна.

Значення характеристик ґрунтоцементу (за ДБН В.2.1-10:2018, 2018)

Характеристики ґрунтоцементу	Позначення, розмірність	Значення характеристик у віці 28 діб при марці ґрунтоцементу		
		50	75	100
Нормативний опір на одновісний стиск	R , МПа	2	3	5
Модуль деформації за випробовуванням на одновісний стиск	E , МПа	250	350	600
Модуль деформації для розрахунків пальової основи	E_p , МПа	70	75	80
Структурне зчеплення	C_s , кПа	100	110	120

Основною характеристикою оцінки деформаційних властивостей паль слугує модуль деформації. Комплекс практичних дій, що надають можливості керування деформаційними характеристиками ґрунтоцементу за рахунок зміни кількості закріплюючого розчину, варіації діаметру та потужності необхідної глибини закріпленої товщі масиву, підсилення ґрунтоцементних елементів каркасами, є запорукою забезпечення надійності земляного полотна.

Оскільки виготовлення буронабивних паль є доволі трудомісткою та фінансово затратною операцією, то слід обирати способи виготовлення ґрунтоцементних паль, що забезпечують максимально ефективне використання матеріалів. Розглянемо це на прикладі спорудження земляного полотна на неоднорідній основі.

Інженерно-геологічне вишукування виявило геологічну будову (рис. 2) з такими інженерно-геологічними елементами (ІГЕ):

ІГЕ-1 – насипні злежані ґрунти, що представлені щебенем, шлаком з супіщано-піщаним заповнювачем до 45 % та карманами пісків середньої щільності без органічних включень;

ІГЕ-1а – насипні ґрунти, супіски темно-сірі пластичні з карманами пісків та включенням будівельного бруду до 30 % та включенням органічних включень від 0,5 % до 22 %;

ІГЕ-4а – гравійно-галькові ґрунти з супіщаним та піщаним заповнювачем рижувато-сірого кольору, водонасичені, з тонкими прошарками суглинків та глин;

ІГЕ-5 – плагіограніти сірі, рожеві, середньозернисті масивні, $R_c=21,29/21,84$ МПа, дуже тріщинуваті, вивітрілі, водонасичені. Тріщини заповнені піском.

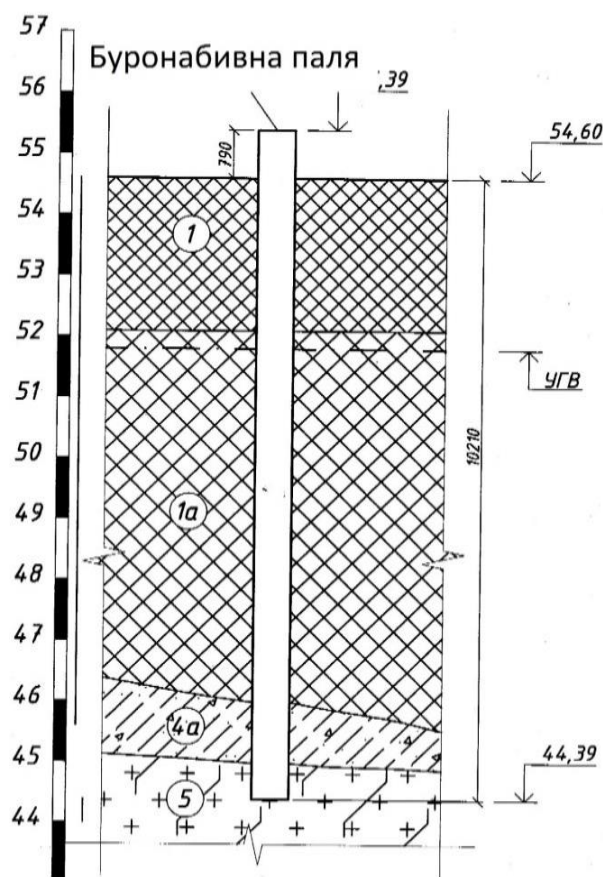


Рис. 2. Інженерно-геологічна колонка, що побудована по одній із паль

У геоструктурному відношенні територія спорудження земляного полотна розташована в межах Середньо-Придніпровського блоку Українського кристалічного щита. Поверхня кристалічного фундаменту хвиляста, на відносно невеликій довжині профілю глибина заля-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

гання нерівномірна, що виявлено під час виконання буріння свердловин та за допомогою геофізичних методів. Щоб відповідати поверхні кристалічного фундаменту, кожна паля мала бути різної довжини, щоб забезпечувалося необхідне заглиблення в ПГЕ-5.

Значною проблемою для виготовлення паль була велика товща насипних неоднорідних ґрунтів, на які повинні опиратись паля. Крім того, вимогами було визначено, що несуча здатність палі повинна бути не менше 250 т·с, а максимальна осадка не повинна перевищувати 8 см. Таким чином, слід застосувати скориговану технологію робіт, що забезпечить необхідні вимоги. Відповідно, прийнято улаштування буронабивних паль з цементациєю основи палі.

Набивні палі можуть виготовлятися в пробурених свердловинах (буронабивні палі) та в свердловинах, улаштованих пробивкою, розкачуванням, віброзаглибленням інвентарного лідера чи обсадної труби. Зважаючи на таку складну інженерно-геологічну будову, було запропоновано виготовлення буронабивних паль на основі бурозмішувальної технології з армуванням. Ця технологія передбачає виконання буріння свердловини під захистом розчину бентонітової глини шарошечними долотами (рис. 3).



Рис. 3. Шарошечне долото

Такі долота застосовуються під час геолого-розвідувальних робіт, виконання буріння для водозабезпечення, пошуку та розвідки корисних копалин. Долота дозволяють пробурити граніти, чим забезпечиться опирання палі на

щільні ґрунти. Оскільки необхідно було виготовити палі діаметром 600 мм, було виготовлено спеціальне шарошечне долото. Для цього було використано декілька стандартних долот, які були розрізані і потім зварені в суцільну конструкцію.

З огляду на складність інженерно-геологічних умов, розчин для буріння на основі бентонітової глини підбирався з розрахунку такої її питомої ваги, яка забезпечує утримання стінок свердловини в слабких ґрунтах від обрушення. В функцію бурового розчину також входить охолодження бурового інструменту та видалення на поверхню часток зруйнованого ґрунту. Крім того, при бурінні гранітів на інтервалі 0,5 м від забою свердловини для промивки використовується суміш, основу якої складає цемент М400 з добавками. Її питома вага залежить від глибини свердловини та повинна забезпечити витискування промивного розчину та води з щілин між обломками граніту. Завдяки такій технології на забої свердловини формується ядро з гранітного щебеню та цементної суміші, що забезпечує надійне опирання палі. По інтенсивності буріння, швидкості заглиблення та характеристиці шламу визначається тип ґрунту, що буриться, а також забезпечується необхідне заглиблення в граніті.

Після виконання буріння свердловини в неї опускався арматурний каркас діаметром 420 мм і довжиною 12 м. Бетонолітна труба діаметром 100 мм опускалась в середині каркасу з таким розрахунком, щоб вона не доходила до забою свердловини на 0,5 м. Труба заповнювалась цементним розчином, а потім бетононасосом під тиском проводилось заповнення свердловини мілкозернистим бетоном до виходу на поверхню чистого бетону.

Після 28 діб, необхідних для повного твердіння бетону, паля була підготовлена до випробування. Якщо навантаження під час статичного випробування паль на вдавлювання доведене до навантаження, що викликає безперервне зростання їх осідання s без збільшення навантаження (при $s \leq 20$ мм), то це навантаження береться за окреме значення граничного опору F_u випробовуваної палі.

У всіх інших випадках для фундаментів будівель і споруд (окрім мостів і гідротехнічних

споруд) за окреме значення граничного опору палі F_u навантаженню вдавнення необхідно приймати осьовий тиск, під впливом якого випробовувана паля отримає осідання s , що визначається за формулою:

$$s = z \cdot s_{u,mt} \quad (2)$$

де z – коефіцієнт переходу від граничного значення середнього осідання фундаменту або земляного полотна $s_{u,mt}$ до осідання палі, отриманого при статичних випробуваннях з умовною стабілізацією (загасанням) осідання; $s_{u,mt}$ – граничне значення середнього осідання фундаменту запроектованої будівлі або споруди.

Виконання випробування палі ускладнювало виготовлення анкерів для монтажу стенда. Звичайно монтаж стенду для випробувань виконується на анкерах, що закручені в ґрунтового основу. Однак склад ґрунту, що був наявним на майданчику, не дозволяв закручування анкера. Тому було прийнято рішення про випробування паль стендом з вантажною платформою,

що була упором для двох домкратів, які створювали навантаження по 200 т·с. В якості вантажу використовувались фундаментні блоки. Проте, коли на стенд навантажили 350 т, він почав давати осадку, тому було вирішено обмежитись цим навантаженням. В програму випробувань було внесено корективи, на основі яких було вирішено завершувати випробування при значенні навантаження в 330 т·с.

Результати

Вимірювання величини вертикального переміщення палі під час її навантаження ступенями виконувалось прогиномірами типу 6ПАО. Для навантаження передбачалося 11 ступенів навантаження, як це детально відображено в табл. 2.

Розвантаження палі велось після досягнення установленого програмою навантаження з витримкою кожної ступені 15 хв., як це показано в табл. 3.

Таблиця 2

Таблиця ступенів навантаження під час випробуванні ґрунтів палями

Ступені	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Збільшення навантаження, т·с	50	50	50	25	25	25	25	25	25	15	15
Загальне навантаження, т·с	50	100	150	175	200	225	250	275	300	315	330

Таблиця 3

Таблиця ступенів розвантаження під час випробуванні ґрунтів палями

Ступені	1	2	3	4	5	6	7
Зменшення навантаження, т·с	–	30	50	50	50	50	100
Загальне навантаження, т·с	330	300	250	200	150	100	0

На кожному ступені навантаження палі по приладах фіксувались показання в такій послідовності: 1) початковий відлік, нульове показання – перед навантаженням палі; 2) перший відлік – одразу після прикладання навантаження, потім чотири відліки з інтервалом 30 хв., далі через кожні 60 хв. до умовної стабілізації, за критерій якої було прийнято осадку не більше 0,1 мм за останні 60 хв. спостереження; 3) на наступних ступенях навантаження операції відліку повторюються.

Було випробовувано 6 паль довжиною від 21 м до 23 метрів. У ході виготовлення паль №№ 1, 4 і 6, довжина яких складала 22...23 м, під час

буріння з'ясовано, що в їх основі залягає масивний монолітний граніт (заглиблення в граніт виконувалось на 0,5 м), наявність тріщин в якому не фіксувалась. Палі №№ 2, 3, 5 своєю основою мали граніти тріщинуваті, заглиблення в них також проводилось на 0,5 м.

Під час випробування паль було отримано результати, які представлено на графіках. Випробуванням виявлено деякі відмінності паль, тому надалі наведені лише деякі графіки для паль, що мають в основі однорідні ґрунти. Оскільки графіки випробування паль №№ 1, 4 та 6, а також №№ 2, 3 та 5 близькі, наведено характерні графіки їх випробування (рис. 4-5).

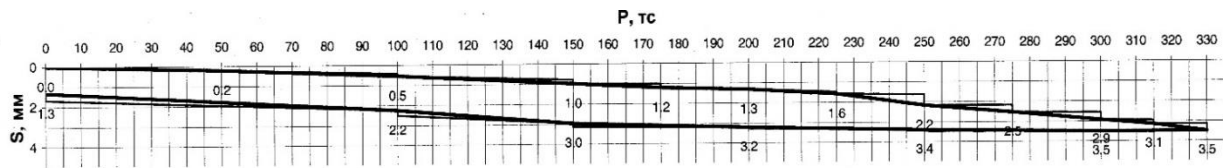


Рис. 4. Графік, характерний для випробування паль №№ 1, 4 та 6

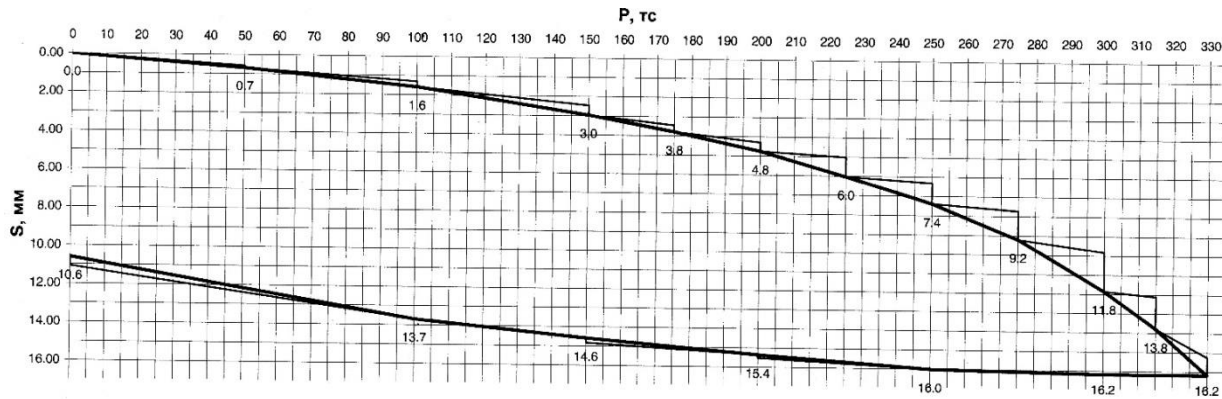


Рис. 5. Характерний графік випробувань паль №№ 2, 3 та 5

Особливим є той факт, що навіть при наявності на забої свердловини ґрунтів, що представлені корою вивітрювання гранітів, технологія цементації основи палі забезпечує їй високу несучу здатність при незначній різниці по виготовлених палях. Так, розрахункове навантаження вдавлювання на палю становить від 268,3 т·с до 275,0 т·с.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна полягає в отриманні залежностей осідань армованих ґрунтоцементних паль, створених на основі бурозмішувальної технології, під час їх випробування в режимах завантаження та розвантаження.

Практичну значимість складає те, що за рахунок зміни жорсткості земляного полотна, оскільки ґрунтоцементні армовані елементи можна виготовляти з модулем деформації 300...600 МПа, вирішується проблема його підсилення. Практично є можливість зменшити різницю в жорсткості штучної споруди та конструкції верхньої будови колії, що дозволить ліквідувати баластові поглиблення.

Висновки

Застосування технології підсилення земляного полотна армованими ґрунтоцементними елементами відкриває можливості для проведення кардинальних змін, що забезпечують збі-

льшення безпеки на залізничному транспорті та швидкості переміщення вантажів.

Крім того, наявна економія за рахунок зменшення об'ємів земляних робіт під час спорудження земляного полотна, а також значні матеріальні ресурси та кошти, що потребуються для реалізації цього процесу. При вирішенні переходу на безбаластну конструкцію, крім усього перерахованого, значно знизяться експлуатаційні витрати на обслуговування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Alsirawan, R., Koch, E., & Alnmr, A. (2023). Proposed Method for the Design of Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported (GRPS) Embankments. *Sustainability*, 15(7), 6196.
- Ariyaratne, P., & Liyanapathirana, D. S. (2015). Review of existing design methods for geosynthetic-reinforced pile-supported embankments. *Soils and Foundations*, 55(1), 17-34.
- Briançon, L., & Simon, B. (2017). Pile-supported embankment over soft soil for a high-speed line. *Geosynthetics International*, 24(3), 293-305.
- Fischer, S. (2022). Investigation of the Horizontal Track Geometry regarding Geogrid Reinforcement under Ballast. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(3), 89-101.
- Даніленко, Е. І. (2010). *Залізнична колія: підручник для вищих навчальних закладів (у 2-х т.)*. Київ: Інпрес.
- ДБН В.1.1-45:2017 (2017). *Будівлі і споруди в склад-*

- них інженерно-геологічних умовах. Загальні положення. Київ: Мінрегіонбуд.
- 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.
- Крисан, В. І., & Крисан, В. В. (2007). Армування насипу підходів земляного полотна до шляхопроводу ґрунтоцементними палями. *Армування основ при будівництві та реконструкції будівель*, 66, 204-211.
- Петренко, В. Д., Крисан, В. І., Крисан, В. В., & Чегодаєв, І. С. (2021). Досвід спорудження пальово-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.
- Петренко, В. Д., Крисан, В. І., Крисан, В. В., & Коновал, В. М. (2022). Науково-технічне обґрунтування підсилення ґрунтових основ армованими ґрунтоцементними палями. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 21, 70-79.

V. I. KRYSAN¹, V. V. KRYSAN², V. D. PETRENKO^{3*}, O. L. TIUTKIN⁴

¹ Geoprotect LLC, app. 308, Novokrimsk Str., 5, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (067) 565 89 69, e-mail krysan.v.i@ukr.net, ORCID 0000-0001-7497-4615

² Geobud LLC, app. 308, Novokrimsk Str., 5, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (067) 631 31 22, e-mail vavilon1612@ukr.net, ORCID 0000-0002-9683-7838

^{3*} Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 50 69, e-mail petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

⁴ Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

ANALYSIS OF TEST RESULTS OF THE ENBANKMENT REINFORCEMENT WITH REINFORCED SOIL-CEMENT PILES

Purpose. The purpose of the work is to analyze the results of the test of the embankment reinforcement with reinforced soil-cement piles. **Methodology.** An analysis of the ground reinforcement situation was carried out with the definition of modern trends in the use of geosynthetic materials and soil-cement piles. An algorithm for strengthening the embankment with reinforced soil-cement piles using a special square bit has been developed and implemented in practice. The load-bearing capacity of reinforced soil-cement piles was determined by reasoned selection of the structure, soil base, material, depth of pile laying in accordance with engineering and geological conditions, the structural scheme of the building and the method of their arrangement. **Findings.** 6 piles with a length of 21 m to 23 m were tested. During the manufacture of piles Nos. 1, 4 and 6, the length of which was 22...23 m, during drilling it was found that massive monolithic granite lies at their base (the granite was sunk by 0.5 m), the presence of cracks in which was not fixed. Piles Nos. 2, 3, 5 had cracked granites as their base, they were also deepened by 0.5 m. For these reinforced soil-cement piles, the values of the vertical displacements of the pile during its loading and unloading in stages were obtained. The calculated pressing load on the tested pile ranges from 268.3 t·s to 275.0 t·s. **Originality.** It consists in obtaining dependences of settlements of reinforced soil-cement piles, created on the basis of jet mixing technology, during their testing in loading and unloading modes. **Practical value.** It was determined that by changing the stiffness of the embankment, since soil-cement reinforced elements can be manufactured with a deformation modulus of 300...600 MPa, the problem of its strengthening is solved. Practically, it is possible to reduce the difference in the stiffness of the artificial structure and the structure of the track superstructure, which will allow eliminating ballast recesses.

Keywords: embankment; soil base; soil cement; soil-cement piles; jet mixing technology; pile test

REFERENCES

- Alsirawan, R., Koch, E., & Alnmr, A. (2023). Proposed Method for the Design of Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported (GRPS) Embankments. *Sustainability*, 15(7), 6196. (in English)
- Ariyaratne, P., & Liyanapathirana, D. S. (2015). Review of existing design methods for geosynthetic-reinforced pile-supported embankments. *Soils and Foundations*, 55(1), 17-34. (in English)
- Briançon, L., & Simon, B. (2017). Pile-supported embankment over soft soil for a high-speed line. *Geosynthetics International*, 24(3), 293-305. (in English)
- Fischer, S. (2022). Investigation of the Horizontal Track Geometry regarding Geogrid Reinforcement under Ballast. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(3), 89-101. (in English)
- Danilenko, E. I. (2010). *Zaliznychna koliia: pidruchnyk dlia vyshchykh navchalnykh zakladiv (u 2-kh t.)*. Kyiv: Inpres. (in Ukrainian)
- 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)
- DBN V.2.1-10-2009 (2010). *Zmina № 2. Fundamenti 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 burozmishuvalnym metodom*. Kharkiv: Drukarnia Madryd. (in Ukrainian)
- Krysan, V. I., & Krysan, V. V. (2007). Armuvannia nasypu pidkhodiv zemlianooho polotna do shliakhoprovodu gruntotsementnyimi paliamy. *Armuvannia osnov pry budivnytstvi ta rekonstruktsii budivel*, 66, 204-211. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. D., Krysan, V. I., Krysan, V. V., & Chehodaiev, I. S. (2021). Dosvid sporudzhennia palovo-plytnoho 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 gruntotsementnyimi elementamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 16, 65-74. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. D., Krysan, V. I., Krysan, V. V., & Konoval, V. M. (2022). Naukovo-tekhniche obgruntuvannia pidsylennia gruntovykh osnov armovanymi gruntotsementnyimi paliamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 21, 70-79. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 25.10.2022.

Прийнята до друку 08.05.2023.