

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.131.543:517.9

О. Л. ТЮТЬКІН^{1*}, Д. Ю. ІГНАТЕНКО²

^{1*}Каф. «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

²Каф. «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 442 36 63, ел. пошта ihnatenkodmytro@gmail.com, ORCID 0000-0001-6805-6703

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІДПІРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ГРУНТОЦЕМЕНТНИХ ПАЛЬ НА ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ СХИЛАХ

Мета. У статті передбачено розробити метод визначення раціональних параметрів підпірних конструкцій з ґрунтоцементних паль на зсувонебезпечних схилах. **Методика.** Для досягнення поставленої мети автори виконали порівняльні розрахунки скінченно-елементних моделей зсувонебезпечного шаруватого схилу з влаштуванням підпірних конструкцій із ґрунтоцементних паль: вертикальних, розташованих під кутом до вертикальної осі, об'єднаних бетонним ростверком, без ростверку, різного діаметру, із різною відстанню між палями, але однакової довжини, що обумовлена розташуванням визначеної за попередніми розрахунками поверхні ковзання. **Результати.** За результатами розрахунків контактної задачі взаємодії ґрунтового масиву та підпірної конструкції було отримано закономірності формування міцності та стійкості зсувонебезпечного укріпленого схилу, що дає можливість прогнозування його геомеханічної стійкості залежно від можливого розташування кривої поверхні ковзання. Обґрунтовано спосіб підвищення коефіцієнта стійкості ґрунтового схилу залежно від варіації параметрів ґрунтоцементної підпірної пальової конструкції. Чисельними розрахунками обґрунтовано параметри ґрунтоцементних пальових підпірних конструкцій – довжину паль, діаметр паль, відстань між палями, кут їх нахилу та доцільність об'єднання паль бетонним ростверком. **Наукова новизна.** Уперше отримано закономірності формування міцності та стійкості ґрунтоцементної підпірної конструкції для укріплення зсувонебезпечних схилів, що дає можливість прогнозування їх геомеханічної стійкості залежно від можливого розташування кривої поверхні ковзання. Також уперше встановлено залежності зміни абсолютних зміщень, відносних деформацій, коефіцієнтів запасу міцності, стійкості та напружень за Мізесом в елементах підпірних конструкцій із ґрунтоцементних паль від кута їх нахилу, відстані між палями та наявності бетонного ростверку, що їх об'єднує. Набули подальшого розвитку методи оцінки та прогнозування зсувонебезпечності ґрунтових схилів, що дозволило обґрунтувати спосіб підвищення коефіцієнта запасу стійкості залежно від варіації параметрів ґрунтоцементної підпірної конструкції. Уперше обґрунтовано параметри способу підвищення стійкості зсувонебезпечного схилу з пальовими підпірними конструкціями на основі комплексного математичного та відцентрового моделювання з використанням реальних ґрунтів зсувонебезпечного схилу та критеріїв подібності. **Практична значимість.** Автори розробили та запатентували метод укріплення зсувонебезпечних схилів за допомогою ґрунтоцементних паль, об'єднаних бетонним ростверком та розташованих перпендикулярно до вектора руху тіла зсуву.

Ключові слова: ґрунтоцементні палі; бетонний ростверк; скінченно-елементне моделювання; зсувонебезпечний схил; коефіцієнт стійкості схилу

Вступ

В роботах відомих науковців доведено вплив природно-кліматичних чинників на виникнення зсувів природного та техногенного походження, досліджено дію технології виготовлення ґрунтоцементних паль і зміни рівня ґрунтових вод на стійкість ґрунтових схилів, зокрема їх армування [1, 5, 6]. У наш час порядок

розрахунку ґрунтоцементних паль як підпірних конструкцій на зсувонебезпечних схилах не регламентовано жодними державними будівельними нормами України. Саме тому необхідно дослідження зосередити саме на методах розрахунку таких підпірних конструкцій.

Із великої кількості наявних методів укріплення ґрунтів найбільш ефективним можна вважати метод бурозмішувальної цементациі,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

або jet-grouting [2–4, 10]. Грунтоцементні палі є економічно вигідним варіантом укріплення зсувонебезпечного схилу, і вони мають велику кількість переваг для застосування саме на зсувонебезпечних схилах порівняно з іншими типами укріплення.

У ході роботи було визначено, яким чином необхідно розраховувати несучу здатність грунтоцементних паль. Було також визначено параметри підпірної конструкції, за якими наведено обґрунтування, а саме: діаметр, відстань між палями, їх довжину, кут нахилу та можливість або об'єднання паль бетонним ростверком. Результати досліджень із цієї теми представлені в наукових публікаціях [4, 7–9].

Мета

У статті передбачено обґрунтувати параметри грунтоцементної пальової підпірної конструкції на основі результатів аналітичних та експериментальних досліджень стійкості зсувонебезпечного шаруватого схилу, а також визначити раціональні параметри цієї конструкції шляхом розв'язання контактної задачі взаємодії ґрунтового масиву та підпірних елементів.

Методика

Автори статті розробили методику визначення раціональних параметрів підпірної конструкції з грунтоцементних паль, в основі якої лежить аналіз і порівняння результатів розрахунку моделей шаруватого ґрунтового схилу,

складеного суглинистими ґрунтами, виконаного за допомогою методу скінченно-елементного моделювання в сучасних програмних комплексах.

На першому етапі розрахунку параметрів підпірної конструкції з грунтоцементних паль необхідно визначити найбільш небезпечну форму та місце розташування кривої поверхні ковзання тіла зсуву, згідно з якою коефіцієнт стійкості зсувонебезпечного схилу буде мінімальним [11]. Визначення мінімального коефіцієнта стійкості схилу є найбільш важливим етапом для подальшого розрахунку міцності підпірної конструкції з грунтоцементних паль. Не менш важливим є також вибір місця розташування грунтоцементних паль. Запропонований метод – це новий погляд і підхід у проектуванні конструкцій такого типу. Новим рішенням є саме комплексний розрахунок, який можна структурувати в такій послідовності:

- визначення найбільш небезпечного місця розташування кривої поверхні ковзання тіла зсуву;
- визначення місця розташування підпірної конструкції з грунтоцементних паль;
- визначення згинального моменту, що діє на одну палю;
- розрахунок контактної задачі взаємодії ґрунтового схилу та підпірної конструкції за допомогою скінченно-елементного моделювання (рис. 1).

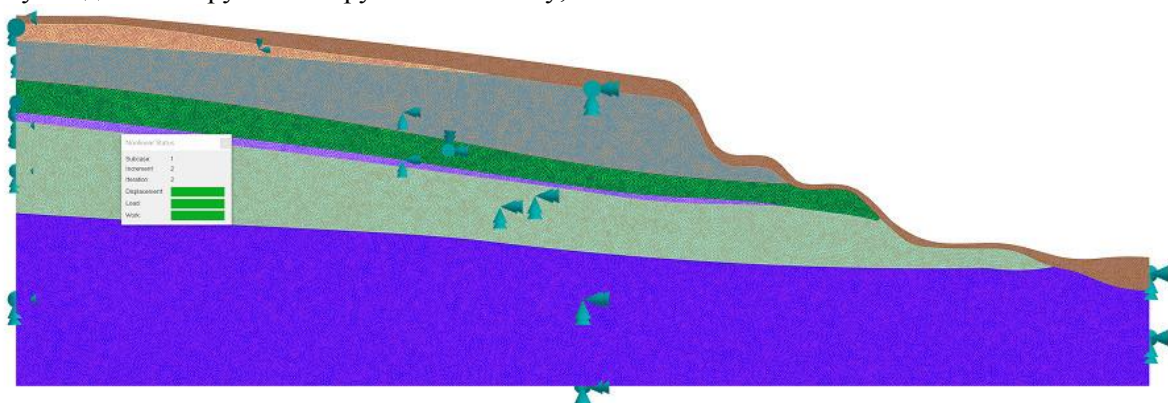


Рис. 1. Скінченно-елементна модель зсувонебезпечного схилу в програмному комплексі «Autodesk Inventor Nastran»

Fig. 1. Finite-element model of landslide-prone slope in Autodesk Inventor Nastran software package

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

На останньому етапі розрахунку для визначення раціональних параметрів необхідно змінювати вихідні дані задачі, а саме діаметр паль, їх довжину, кут нахилу відносно вертикальної осі, відстань між палями, а також параметри бетонного ростверку, що об'єднує пальі.

Від зміни параметрів фізико-механічних до геометричних існує велика кількість та обсяг проміжних розрахунків, без яких, власне, порівняння ефективності роботи підпірної конструкції з різними параметрами взагалі неможливе. Для полегшення розрахунку контактної задачі взаємодії ґрунтового схилу та підпірної конструкції необхідно визначити параметри (вихідні дані задачі), зміна яких не є критично важливою і не впливає значною мірою на результати розрахунків. До таких параметрів можна віднести фізико-механічні властивості матеріалів – ґрунтоцементу, бетону та ґрунтів. Вони заздалегідь відомі і залежать в основному від фізико-механічних характеристик ґрунту, який зміцнюється в процесі виготовлення ґрунтоцементних паль. Міцність ґрунтоцементу складає близько 3...5 МПа.

Керуючись цими даними, можна визначити

фізико-механічні властивості ґрунтоцементу в кожному конкретному випадку, залежно від інженерно-геологічних умов для контактної задачі, а також залежно від технологічних параметрів виготовлення паль.

Необхідно також зазначити, що для розв'язання контактної задачі взаємодії ґрунтоцементних паль та ґрунтового шаруватого схилу за допомогою скінченно-елементного моделювання потрібна досить велика обчислювальна потужність комп'ютера. Кількість скінченних елементів у задачі такого типу може сягати понад 13 млн елементів. При цьому під час моделювання характеру нерівної поверхні паль, що не є ідеально гладким циліндром, контакт скінченних елементів ґрунту та скінченних елементів паль відтворений максимально точно й досягається саме великою деталізацією скінченно-елементної сітки з середнім розміром скінченних елементів 10 см.

Реалізація моделювання нелінійної роботи об'ємних скінченних елементів ґрунту можлива за допомогою програмного комплексу «Autodesk Inventor Nastran» (рис. 2) або «ЛІРА-САПР» у процесорі «Монтаж».

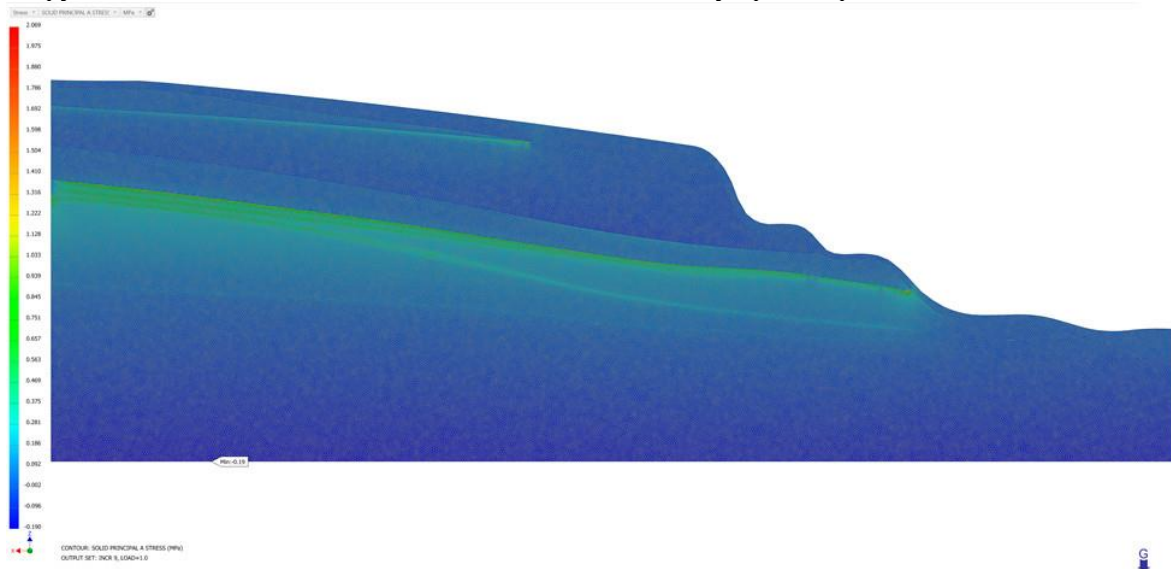


Рис. 2. Ізополя напружень у програмному комплексі «Autodesk Inventor Nastran»

Fig. 2. Stress isofields in Autodesk Inventor Nastran software package

Побудова графіків (залежностей), за якими можна оцінити ефективність роботи підпірної конструкції з ґрунтоцементних паль, обробка та аналіз отриманих результатів розрахунків скін-

ченно-елементного моделювання контактної задачі взаємодії ґрунтового схилу, що підсилений ґрунтоцементними палями, можливі за допомогою програми Microsoft Excel.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Результати

Обсяг отриманих результатів повною мірою дозволяє провести аналіз та обґрунтування параметрів підірних конструкцій із ґрунтоцементних паль. Уперше встановлено залежності зміни абсолютних зміщень, відносних деформацій, коефіцієнтів запасу міцності та стійкості, а також напружень за Мізесом в елементах підірних конструкцій із ґрунтоцементних паль від кута їх нахилу, відстані між палями та наявності бетонного ростверку, що їх об'єднує. Розроблено та запатентовано метод укріплення зсувонебезпечних схилів за допомогою ґрунтоцементних паль, об'єднаних бетонним ростверком, розташованих перпендикулярно до вектора руху тіла зсуву [4, 11].

Отримані в ході розв'язання контактної задачі залежності параметрів ґрунтоцементної підірної конструкції з варіацією відстані між палями діаметром 1,2 м дозволяють для випадку зсувонебезпечного шаруватого схилу, складеного суглинистими ґрунтами з модулем пружності в діапазоні 20...30 МПа, отримати мінімальні значення переміщень та напружень за Мізесом, а також максимальне значення коефіцієнта стійкості.

За результатами розрахунків скінченно-елементних моделей було отримано залежності (рис. 3–6). Обґрунтування параметрів підірних конструкцій із ґрунтоцементних паль (діаметр ґрунтоцементних паль 1,2 м, відстань між палями в просвіті 0,6 м) та порівняння ефективності роботи підірної конструкції з різними параметрами виконано саме завдяки цим залежностям.

За результатами порівняльних розрахунків скінченно-елементних моделей шаруватого зсувонебезпечного схилу, підсиленого ґрунтоцементними палями, визначено, що за заданого діаметра ґрунтоцементних паль 1,2 м й наявності бетонного ростверку коефіцієнт запасу міцності підірної конструкції має мінімум, що дорівнює 1,7, при цьому відстань між палями дорівнює 0,6 м, що дозволяє проектувати досить надійні підірні конструкції такого типу (рис. 3).

Коефіцієнт запасу стійкості ґрунтового схилу, який підсилено ґрунтоцементними палями діаметром 1,2 м, що розташовані ортогонально до поверхні ковзання тіла зсуву, перебуває в ступеневій залежності від відстані між палями та за її величини, що дорівнює 0,6 м, становить 1,7, що забезпечує достатню стабільність зсувонебезпечного схилу.

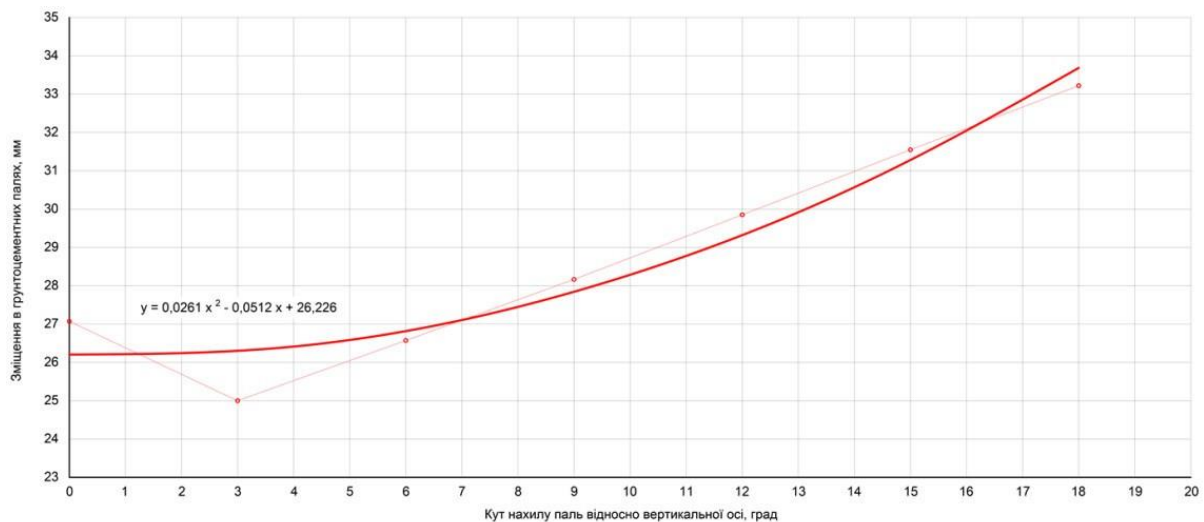


Рис. 3. Залежність зміщення в ґрунтоцементних палях від кута нахилу паль відносно вертикальної осі

Fig. 3. Dependence of displacement in soil-cement piles on the angle of inclination of piles relative to the vertical axis

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

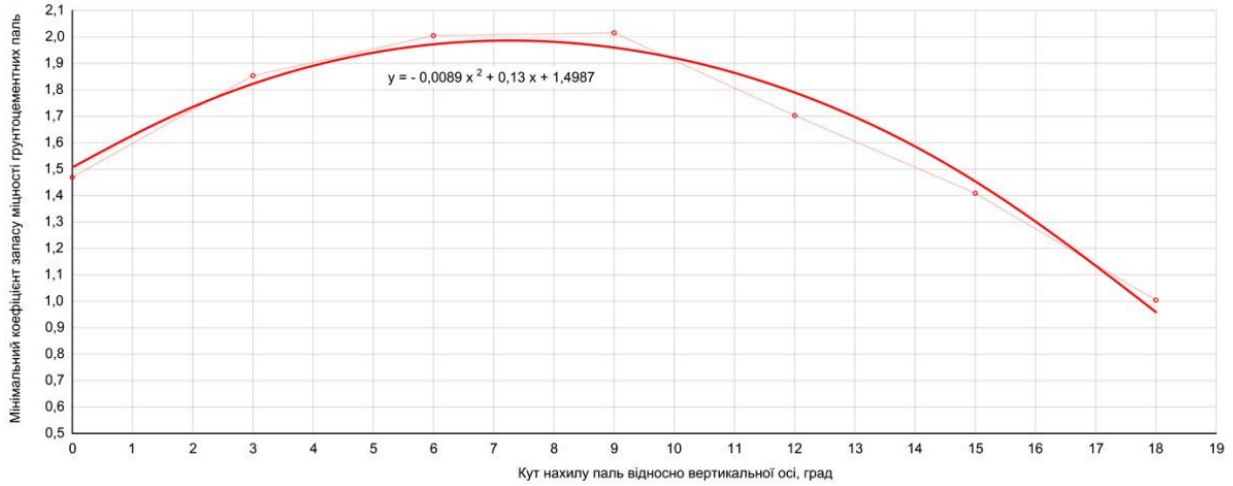


Рис. 4. Залежність мінімального коефіцієнта запасу міцності ґрунтоцементних палів від кута нахилу палів відносно вертикальної осі

Fig. 4. Dependence of the minimum strength coefficient of soil-cement piles on the angle of inclination of the piles relative to the vertical axis

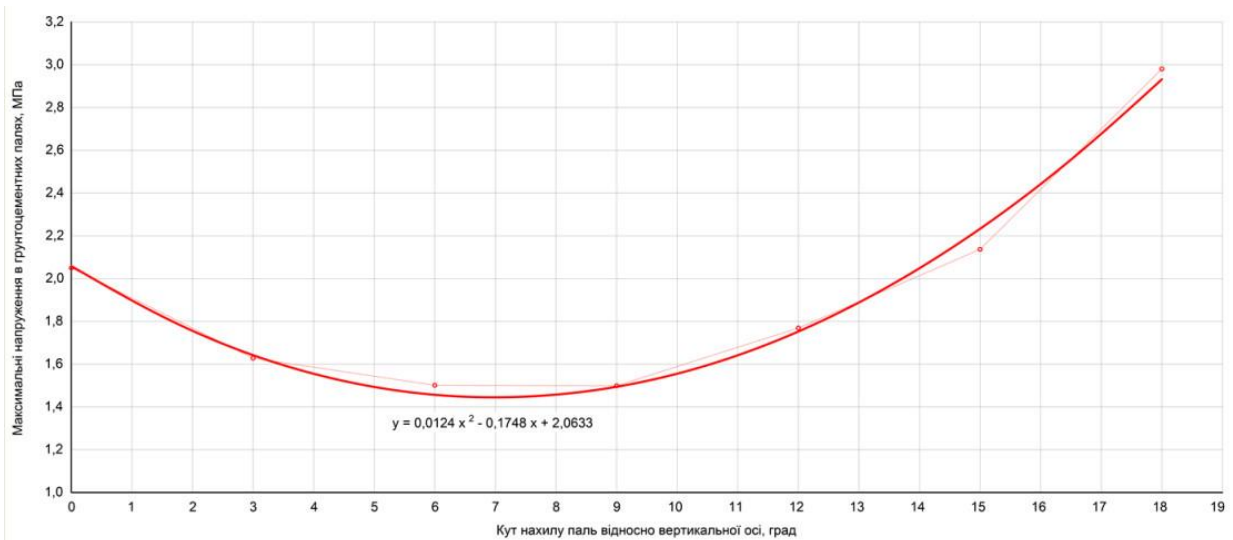


Рис. 5. Залежність максимальних напружень у ґрунтоцементних палях від кута нахилу палів відносно вертикальної осі

Fig. 5. Dependence of maximum stresses in soil-cement piles on the angle of inclination of piles relative to the vertical axis

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

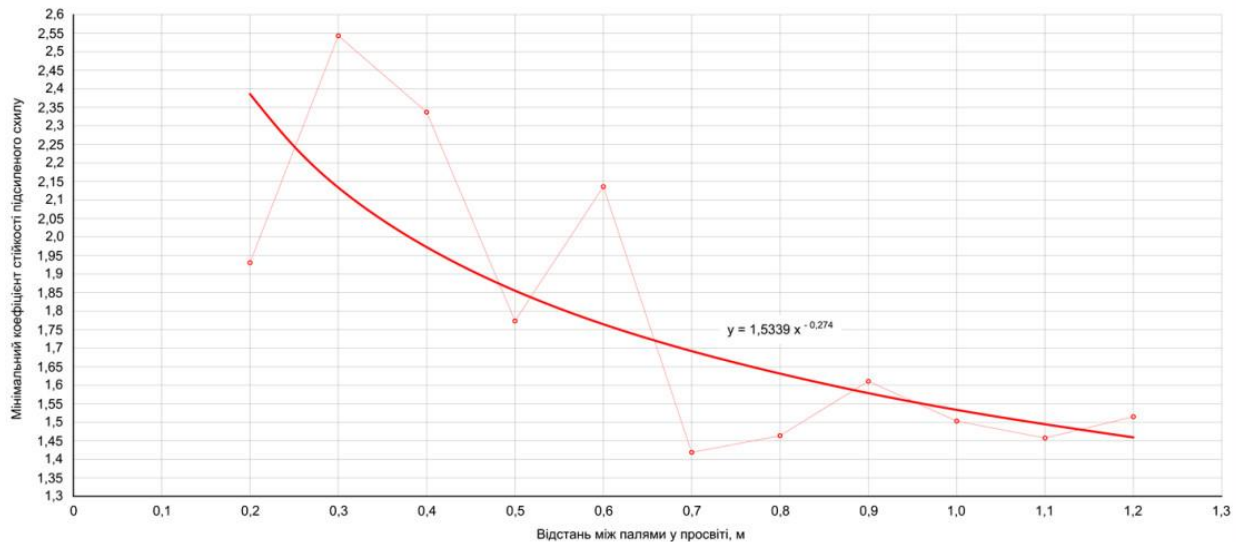


Рис. 6. Залежність мінімального коефіцієнта стійкості підсиленого схилу від відстані між палями у простві

Fig. 6. Dependence of the minimum strength coefficient of the reinforced slope on the distance between the piles in the gap

Наукова новизна та практична значимість

Уперше отримано закономірності формування міцності та стійкості ґрунтоцементної підпірної конструкції для укріплення зсувонебезпечних схилів, що дає можливість прогнозування їх геомеханічної стійкості залежно від можливого розташування кривої поверхні ковзання.

Уперше встановлено залежності зміни абсолютних зміщень, відносних деформацій, коефіцієнтів запасу міцності та стійкості, а також напружень за Мізесом в елементах підпірних конструкцій із ґрунтоцементних паль від кута їх нахилу, відстані між палями та наявності бетонного ростверку, що їх об'єднує.

Необхідно зазначити, що отримані результати дослідження являють собою узагальнений висновок щодо методу визначення раціональних параметрів підпірних конструкцій із ґрунтоцементних паль. Розрахунок нелінійної задачі стійкості ґрунтових схилів, підсилених ґрунтоцементними палями, – складна задача, яка потребує великої кількості часу й розв'язання якої можливе лише за допомогою скінченно-елементного моделювання в програмних ком-

плексах із реалізацією моделювання нелінійної роботи матеріалів. У кожному окремому випадку для різних інженерно-геологічних умов отримані результати будуть відрізнятися від тих, які представлені в цій статті.

Висновки

Найбільш раціонально розташовувати ґрунтоцементні палі таким чином, щоб кут між ними відносно нормалі до кривої поверхні ковзання був 90 градусів. Зі збільшенням відстані між палями, яка має оптимальне значення, що становить близько 0,6 від діаметра паль, залежно від інженерно-геологічних умов може відбуватися зменшення ефективності роботи підпірної конструкції за рахунок неутримання частини ґрунту, що розташована між палями (у проміжку по всій довжині паль).

Один з основних принципів визначення та обґрунтування раціональних параметрів підпірної конструкції з ґрунтоцементних паль полягає в тому, що довжина паль повинна бути такою, що перерізає поверхню ковзання на достатню глибину для утримання тіла зсуву. При цьому не менш важливим є кут нахилу паль відносно вертикальної осі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bromhead E. N. *The stability of slopes*. London and New York : Taylor & Francis, 2005. 411 p.
2. Croce P., Flora A., Modoni G. *Jet Grouting : Technology, Design and Control*. CRC Press, 2014. 448 p.
3. Covil C. S., Skinner A. E. Jet grouting : A review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process. *Grouting in the Ground*. 1994. P. 605–627.
DOI: <https://doi.org/10.1680/gitg.19287.0041>
4. Dubinchyk O., Petrenko V., Ihnatenko D., Kildieiev V. Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900020>
5. Gariano S. L., Guzzettia F. Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*. 2016. Vol. 162. P. 227–252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
6. Greco V. R., Gulla G. Slope stability charts for slip surfaces of general shape. *5th International Symposium on Landslides*. 1988. P. 637–641.
7. Ihnatenko D. Y., Petrenko V. D., Tiutkin O. L. Interaction of soil-cement pile supporting structures with the body of a landslide. *Science and Transport Progress*. 2017. № 5 (71). P. 115–123.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/113619>
8. Kovrov O. S., Prychyna K. S. Slope stability assessment of hydraulic-fill soil dams and fill-up embankments. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. № 6. P. 115–123.
9. Kovrov O., Kolesnik V., Buchavyy Yu. Evaluation of the influence of climatic and geomorphological factors on landslides development. *Environmental Safety and Natural Resources*. 2018. Vol. 25. Iss. 1. P. 52–63.
DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2018.1.52-63>
10. Modoni G., Croce P., Mongiovi L. Theoretical modelling of jet grouting. *Géotechnique*. 2008. Vol. 58. Iss. 6. P. 533–535. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.5.335>
11. Petrenko V. D., Tiutkin O. L., Ihnatenko D. Y., Kovalchuk V. V. Comparative Calculation of the Stability of the Landslide Slope in the Software Complexes «Otkos» and «Lira-Cad 2017». *Bridges and tunnels : Theory, Research, Practice*. 2018. № 14. P. 101–109. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/152921>

А. Л. ТЮТЬКИН^{1*}, Д. Ю. ИГНАТЕНКО²

^{1*}Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, эл. почта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

²Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (097) 442 36 63, эл. почта ihnatenkodmytro@gmail.com, ORCID 0000-0001-6805-6703

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ СВАЙ НА ОПОЛЗНЕОПАСНЫХ СКЛОНАХ

Цель. В статье предусмотрено разработать метод определения рациональных параметров подпорных конструкций из грунтоцементных свай на оползнеопасных склонах. **Методика.** Для достижения поставленной цели авторы выполнили сравнительные расчеты конечно-элементных моделей оползнеопасного слоистого склона с устройством подпорных конструкций из грунтоцементных свай: вертикальных, расположенных под углом к вертикальной оси, объединенных бетонным ростверком, без ростверка, различного диаметра, с разным расстоянием между сваями, но одинаковой длины, которая обусловлена расположением определенной по предварительным расчетам поверхности скольжения. **Результаты.** По результатам расчета контактной задачи взаимодействия грунтового массива и подпорной конструкции были получены закономерности формирования прочности и устойчивости оползнеопасного укрепленного склона, что дает возможность прогнозирования его геомеханической устойчивости в зависимости от возможного расположения кривой поверхности скольжения. Обоснован способ повышения коэффициента устойчивости почвенного склона в зависимости от вариации параметров грунтоцементной подпорной свайной конструкции. Численными расчетами обоснованы параметры грунтоцементных свайных подпорных конструкций – длина свай,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

диаметр свай, расстояние между сваями, угол их наклона и целесообразность объединения свай бетонным ростверком. **Научная новизна.** Впервые получены закономерности формирования прочности и устойчивости грунтоцементной подпорной конструкции для укрепления оползнеопасных склонов, что дает возможность прогнозирования их геомеханической устойчивости в зависимости от возможного расположения кривой поверхности скольжения. Также впервые установлены зависимости изменения абсолютных смещений, относительных деформаций, коэффициентов запаса прочности, устойчивости и напряжений по Мизесу в элементах подпорных конструкций из грунтоцементных свай от угла их наклона, расстояния между сваями и наличия бетонного ростверка, который их объединяет. Получили дальнейшее развитие методы оценки и прогнозирования оползнеопасности почвенных склонов, что позволило обосновать способ повышения коэффициента запаса устойчивости в зависимости от вариации параметров грунтоцементной подпорной конструкции. Впервые обоснованы параметры способа повышения устойчивости оползнеопасных склонов со свайными подпорными конструкциями на основании комплексного математического и центробежного моделирования с использованием реальных почв оползнеопасного склона и критериев подобия. **Практическая значимость.** Авторы разработали и запатентовали метод укрепления оползнеопасных склонов с помощью грунтоцементных свай, объединенных бетонным ростверком, расположенных перпендикулярно вектору движения тела оползня.

Ключевые слова: грунтоцементные сваи; бетонный ростверк; конечно-элементное моделирование; оползнеопасный склон; коэффициент устойчивости склона

O. L. TIUTKIN^{1*}, D. Y. IHNATENKO²

^{1*}Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

²Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 442 36 63, e-mail ihnatenkodmytro@gmail.com, ORCID 0000-0001-6805-6703

DETERMINATION OF RATIONAL PARAMETERS OF SUPPORTING STRUCTURES MADE OF SOIL-CEMENT PILES ON LANDSLIDE-PRONE SLOPES

Purpose. The article proposes a method for determining the rational parameters of supporting structures made of soil-cement piles on landslide-prone slopes. **Methodology.** To achieve this purpose, the authors performed comparative calculations of finite-element models of landslide-prone layered slope with the arrangement of supporting structures of soil-cement piles: vertical, located at an angle to the vertical axis, combined with a concrete grillage, without grillage, with different diameters, with different distances between piles, but of the same length, which is justified by the location determined by preliminary calculations of the sliding surface. **Findings.** According to the results of calculating the contact problem of the interaction of the soil mass and the supporting structure, the regularities of formation of strength and stability of the reinforced landslide-prone slope were obtained, which makes it possible to predict its geomechanical stability depending on the possible location of the sliding surface curve. The method of increasing the stability coefficient of the soil slope depending on the variation of the parameters of the soil-cement supporting pile structure is substantiated. Numerical calculations substantiate the parameters of soil-cement pile supporting structures – the length of the piles, their diameter, the distance between the piles, the angle of their inclination and the feasibility of combining the piles with a concrete grillage. **Originality.** For the first time, the formation regularities of strength and stability of soil-cement supporting structure for strengthening the landslide-prone slopes are obtained, which makes it possible to predict their geomechanical stability depending on the possible location of the sliding surface curve. For the first time, the dependences of changes in absolute displacements, relative deformations, coefficients of strength, stability, as well as Mises stresses in the elements of supporting structures of soil-cement piles on the angle of their inclination, distance between piles and the presence of a concrete grillage that joins them. Methods for assessing and predicting the landslide danger of soil slopes were further developed, which allowed to substantiate the method of increasing the strength coefficient depending on the variation of the parameters of the soil-cement supporting structure. For the first time, the parameters of the method of increasing the stability of landslide-prone slopes with pile supporting structures based on the complex mathematical and centrifugal

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

modeling using real landslides and similarity criteria are substantiated. **Practical value.** The authors have developed and patented a method of strengthening landslide slopes with the help of soil-cement piles, combined with a concrete grillage, located perpendicular to the movement vector of the landslide body.

Keywords: soil-cement piles; concrete grillage; finite element modeling; landslide slope; slope stability coefficient

REFERENCES

1. Bromhead, E. N. (2005). *The stability of slopes*. London and New York: Taylor & Francis. (in English)
2. Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. CRC Press. (in English)
3. Covil, C. S., & Skinner, A. E. (1994). Jet grouting: A review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process. *Grouting in the Ground*, 605-627. DOI: <https://doi.org/10.1680/gitg.19287.0041> (in English)
4. Dubinchyk, O., Petrenko, V., Ihnatenko, D., & Kildieiev, V. (2019). Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods. *E3S Web of Conferences*, 109, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900020> (in English)
5. Gariano, S. L., & Guzzettia, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227-252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011> (in English)
6. Greco, V. R., & Gulla, G. (1988). Slope stability charts for slip surfaces of general shape. *5th International Symposium on Landslides* (pp. 637-641). (in Italian)
7. Ihnatenko, D. Y., Petrenko, V. D., & Tiutkin, O. L. (2017). Interaction of soil-cement pile supporting structures with the body of a landslide. *Science and Transport Progress*, 5(71), 115-123. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/113619> (in English)
8. Kovrov, O. S., & Prychyna, K. S. (2017). Slope stability assessment of hydraulic-fill soil dams and fill-up embankments. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 115-123. (in English)
9. Kovrov, O., Kolesnik, V., & Buchavyi, Yu. (2018). Evaluation of the influence of climatic and geomorphological factors on landslides development. *Environmental Safety and Natural Resources*, 25(1), 52-63. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2018.1.52-63> (in English)
10. Modoni, G., Croce, P., & Mongiovi, L. (2008). Theoretical modelling of jet grouting. *Géotechnique*, 58(6), 533-535. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.5.335> (in English)
11. Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Ihnatenko, D. Y., & Kovalchuk, V. V. (2018). Comparative Calculation of the Stability of the Landslide Slope in the Software Complexes «Otkos» and «Lira-Cad 2017». *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 14, 101-109. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/152921> (in English)

Надійшла до редколегії: 14.08.2020

Прийнята до друку: 15.12.2020