

DOI: 10.32347/2076-815x.2025.88.254-263

УДК 624.137.5

к.т.н., доцент **Анісімов К.І.**,

anisimov@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-0447-3927,

Бааджи В.Г., baadzhi@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-6974-9082,к.т.н., доцент **Осадчий В.С.**,

ovs1455@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8153-8635,

д.т.н., професор **Сур'янінов М.Г.**,

sng@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0003-2592-5221,

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

НАПРУЖЕННЯ В ШАРІ ҐРУНТУ ПРОТИЗСУВНОЇ СПОРУДИ

Зсуви ґрунту є одними з найнебезпечніших і поширених природних явищ. Зсуви непередбачувані, швидкість зміщення зсуву може коливатись від кількох метрів на рік, до кількох метрів за секунду. Зсув може залишатися неактивним протягом століть, а потім раптом знову почати рухатися. Зсувні процеси можуть привести до серйозних пошкоджень та руйнувань будівель, споруд, доріг, трубопроводів, які збудовані на схилах або поряд з ними.

Зсуви можуть бути ініційовані на схилах, які вже знаходяться на межі руху, через дощі, танення снігу, абразію, ерозію, зміни рівня ґрунтових вод на плато схилу і в зсувних накопиченнях, землетруси, вулканічну активність, вплив людської діяльності або будь-яку комбінацію цих факторів. Стабілізація зсувних процесів і підвищення загальної стійкості схилів можливі при застосуванні заходів інженерного захисту територій, будівель і споруд, що розташовані на схилах. В тих випадках, коли неможливо усунути всі причини, що викликають зсуви, застосовуються утримуючі протизсувні споруди. Утримуючі протизсувні споруди забезпечують можливість сприйняття зсувного тиску за рахунок реактивного опору стійкого ґрунту по поверхнях опор глибокого закладання, а також не допускають продавлювання та переповзання через них ґрунту зсувного масиву.

Розглядається один з ефективних методів боротьби з зсувами ґрунту - влаштування ряду контрфорсів з буросічних паль. При утримуванні зсуву такою конструкцією, між буросічними палями утворюється склепіння з ґрунту. Розроблено методику обчислення напружень в шарі ґрунту при влаштуванні протизсувної споруди у вигляді контрфорсів з буросічних паль. Шар ґрунту між буросічними палями розглядається, як безшарнірна кругова арка прямокутного перерізу, на яку діє зсувний тиск, рівномірно розподілений по її прольоту. Найбільші внутрішні зусилля та напруження в арках такого типу виникають поблизу опор.

Розрахунок двошарнірної безшарнірної арки, що має три зайві зв'язки, виконується методом сил. Наведено формули для обчислення нормальних і дотичних напружень. Задаючись міцністю ґрунту та реалізуючи розроблений алгоритм, можна визначити відстань між контрфорсами з буросічних паль.

Ключові слова: схил; протизсувна споруда; буросічні палі; контрфорс; безшарнірна арка; метод сил; напруження.

Вступ. Зсуви ґрунту є одними з найнебезпечніших і поширених природних явищ. Зсуви непередбачувані, швидкість зміщення зсуву може коливатись від кількох метрів на рік, до кількох метрів за секунду. Зсув може залишатися неактивним протягом століть, а потім раптом знову почати рухатися. Зсувні процеси можуть привести до серйозних пошкоджень та руйнувань будівель, споруд, доріг, трубопроводів, які збудовані на схилах або поряд з ними.

Зсуви можуть бути ініційовані на схилах, які вже знаходяться на межі руху, через дощі, танення снігу, абразію, ерозію, зміни рівня ґрунтових вод на плато схилу і в зсувних накопиченнях, землетруси, вулканічну активність, вплив людської діяльності або будь-яку комбінацію цих факторів. Стабілізація зсувних процесів і підвищення загальної стійкості схилів можливі при застосуванні заходів інженерного захисту територій, будівель і споруд, що розташовані на схилах. В тих випадках, коли неможливо усунути всі причини, що викликають зсуви, застосовуються утримуючі протизсувні споруди. Утримуючі протизсувні споруди забезпечують можливість сприйняття зсувного тиску за рахунок реактивного опору стійкого ґрунту по поверхнях опор глибокого закладання, а також не допускають продавлювання та переповзання через них ґрунту зсувного масиву.

Одним з ефективних методів боротьби з зсувами ґрунту є влаштування ряду контрфорсів з буросічних паль. При утриманні зсуву такою конструкцією, між буросічними палями утворюється склепіння з ґрунту.

Аналіз попередніх досліджень. Дослідженнями зсувів ґрунту та методів боротьби з ними активно займаються в усьому світі. У боротьбі зі зсувами прийнято наступні основні методи: розвантаження шляхом зміни геометрії поверхні землі, осушення шляхом будівництва поверхневих та підповерхневих дренажних споруд [1-4], а також утворення опору шляхом встановлення безперервних або окремих утримуючих конструкцій, таких як стіни або протизсувні палі [5-8]. Протизсувні палі, як підкреслюється в роботах [9-11], мають багато переваг у практичному застосуванні. По-перше, опір ковзанню палі є високим, а місце її встановлення гнучким. Були розроблені різні структури, які забезпечують прямий опір для підтримки стійкості проти зсуву.

Наприкінці цього огляду зазначимо, що у нашій країні існує досить розвинена нормативна база з інженерних методів захисту від зсувів ґрунту [12-14].

Мета. Метою роботи була розробка методики обчислення напружень в шарі ґрунту при влаштуванні протизсувної споруди у вигляді контрфорсів з буросічних паль (рис. 1).

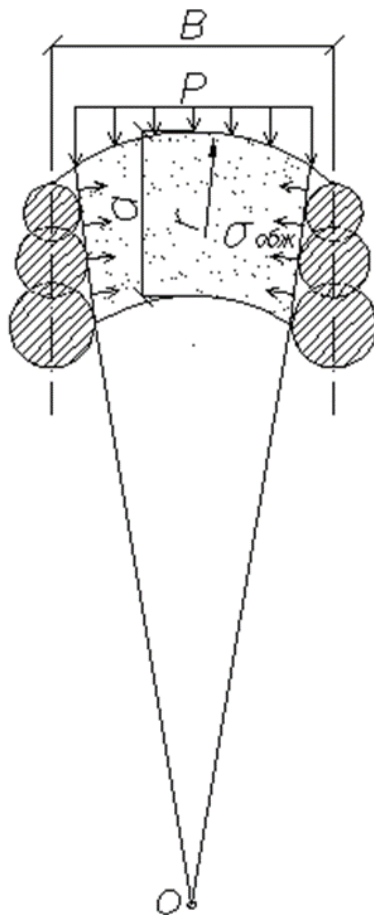


Рис. 1. Протизсувна споруда у вигляді контрфорсів з буросічних паль

Матеріали та методи дослідження. Викривуються методи механіки деформівного твердого тіла, будівельної механіки, опору матеріалів.

Результати та обговорення. З погляду будівельної механіки розглядатимемо шар ґрунту між буросічними палями як безшарнірну кругову арку радіусом r . Навантаженням на арку є зсувний тиск p , рівномірно розподілений по її прольоту (рис. 2, а). Поперечний переріз арки приймаємо прямокутним, висотою a та шириною L .

Безшарнірна арка – криволінійний стрижень, защемлений двома кінцями. Вона тричі статично невизначена, оскільки в опорах виникають шість реакцій – дві вертикальні, дві горизонтальні і два моменти, а рівнянь рівноваги для арки можна скласти тільки три. Найбільші внутрішні зусилля та напруження в арках такого типу виникають поблизу опор.

Розрахунок двошарнірної безшарнірної арки виконується методом сил. Безшарнірна арка має три зайві зв'язки. Тут для отримання основної системи арку розрізають у середньому перерізі.

Вибираємо симетричну еквівалентну систему, розрізаючи арку посередині прольоту. Тоді із трьох невідомих залишаються лише дві — X_1 , X_2 , а обертально симетричне невідоме дорівнює нулю (рис. 2, б).

Вводимо жорсткі консолі, в результаті чого отримуємо два незалежні рівняння методу сил:

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} = 0; \delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} = 0.$$

Оскільки арка має постійний поперечний переріз, положення пружного центру збігається з положенням центру тяжкості півкола $y_c = \frac{2r}{\pi} = 0,637r$.

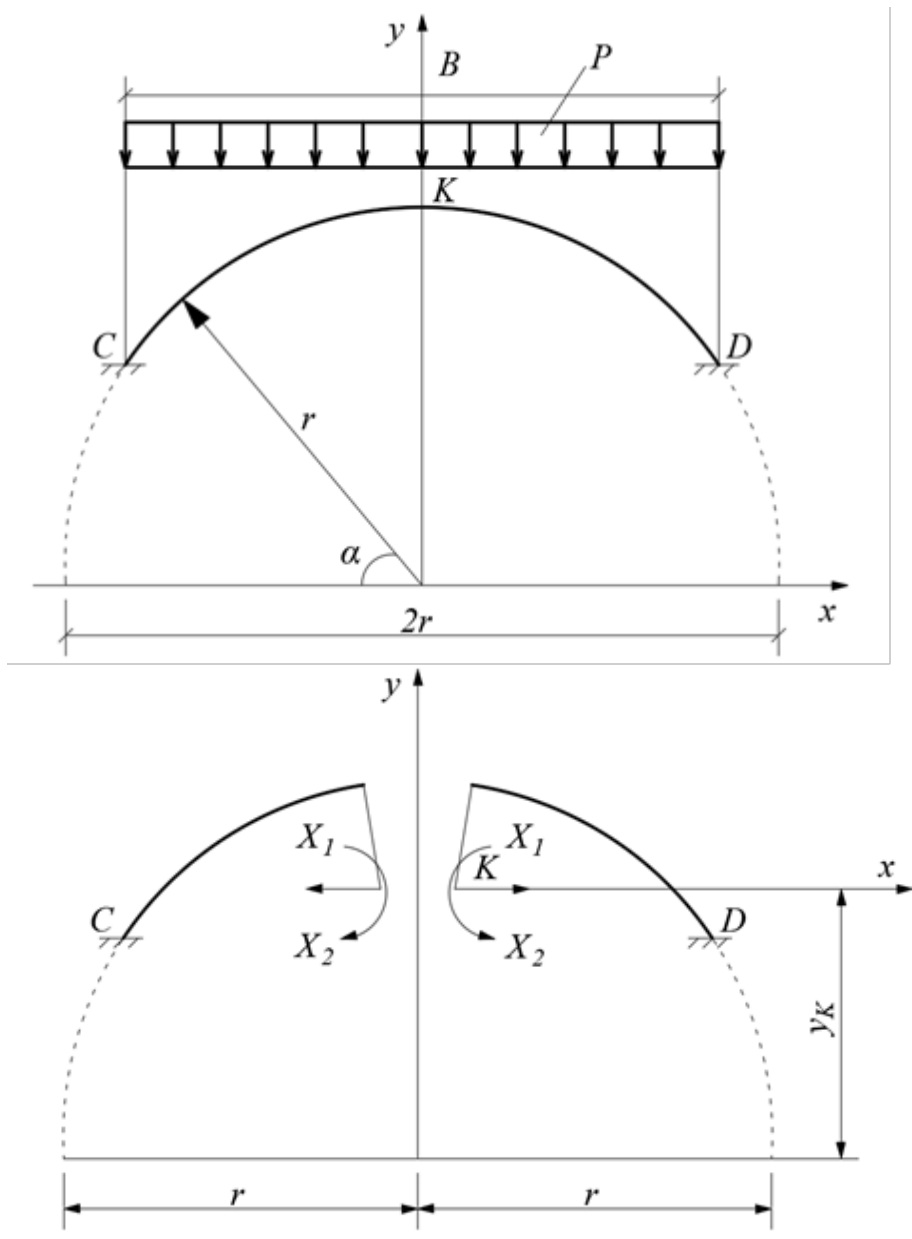


Рис. 2. Безшарнірна арка, окреслена по дузі кола

Складемо вирази для моментів $\bar{M}_1$, $\bar{M}_2$, M_F , враховуючи, що

$$x = r \cos \alpha - r \cos \alpha_C;$$

$$y = r \sin \alpha - r \sin \alpha_C - y_K = r \sin \alpha - r \sin \alpha_C - \frac{2r}{\pi}; \quad ds = r d\alpha.$$

$$\alpha_C = \arccos \frac{B}{2r}. \quad (1)$$

$$\bar{M}_1 = -1 \cdot y = -(r \sin \alpha - r \sin \alpha_C - \frac{2r}{\pi}) = -r \sin \alpha + r \sin \alpha_C + \frac{2r}{\pi};$$

$$\bar{M}_2 = -1;$$

$$M_p = -\frac{px^2}{2} = -\frac{p(r \cos \alpha - r \cos \alpha_C)^2}{2}.$$

Визначаємо одиничні та вантажні переміщення:

$$\delta_{11} = 2 \int_{\alpha_C}^{\pi/2} \left(-r \sin \alpha + r \sin \alpha_C + \frac{2r}{\pi} \right)^2 r d\alpha = 2r^3 \int_{\alpha_C}^{\pi/2} \left(-\sin \alpha + \sin \alpha_C + \frac{2}{\pi} \right)^2 d\alpha.$$

$$\delta_{22} = 2 \int_{\alpha_C}^{\pi/2} r d\alpha.$$

$$\Delta_{1p} = 2 \int_{\alpha_C}^{\pi/2} \left(-r \sin \alpha + r \sin \alpha_C + \frac{2r}{\pi} \right) \left[-\frac{p(r \cos \alpha - r \cos \alpha_C)^2}{2} \right] d\alpha =$$

$$= p \int_{\alpha_C}^{\pi/2} \left(-r \sin \alpha + r \sin \alpha_C + \frac{2r}{\pi} \right) (r \cos \alpha - r \cos \alpha_C)^2 d\alpha.$$

$$\Delta_{2p} = 2 \int_{\alpha_C}^{\pi/2} \frac{1}{2} p (r \cos \alpha - r \cos \alpha_C)^2 d\alpha = p \int_{\alpha_C}^{\pi/2} (r \cos \alpha - r \cos \alpha_C)^2 d\alpha.$$

Визначаємо невідомі зусилля X_1 , X_2 :

$$X_1 = -\Delta_{1p} / \delta_{11};$$

$$X_2 = -\Delta_{2p} / \delta_{22}.$$

Визначаємо згинальні моменти в опорних та середньому перерізах:

$$M_C = M_D = -\frac{p(r - x_C)^2}{2} + X_1 y_C - X_2;$$

$$M_K = -X_1(r - y_C) - X_2.$$

Згинальний момент у довільному перерізі арки:

$$M = -\frac{p(x - x_C)^2}{2} - X_1(y - y_C) - X_2. \quad (2)$$

Кут, що визначає положення перерізу, в якому діє максимальний за абсолютною величиною згинальний момент, визначаємо з умови

$$\frac{dM}{d\alpha} = 0.$$

Поперечні та поздовжні сили визначаються за формулами:

$$Q = X_1 \cos \alpha + p \sin \alpha (x - x_c). \quad (3)$$

$$N = X_1 \sin \alpha + p \cos \alpha (x - x_c). \quad (4)$$

Вирази (2)-(4) містять у неявному вигляді кут α_c , який, враховуючи (1), виражається через відстань між рядами буросічних паль B .

Нормальні напруження в довільному перерізі арки (шару ґрунту) визначаються так:

$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{A}, \quad (5)$$

Дотичні напруження можна визначити за формулою Журавського:

$$\tau = \frac{QS_{x_1}}{aI_{x_1}}, \quad (6)$$

де a – ширина поперечного перерізу; S_{x_1} і I_{x_1} – статичний момент та момент інерції перерізу щодо його головної центральної осі відповідно.

Задаючись міцністю ґрунту τ_0 та реалізуючи наведений вище алгоритм, можна визначити відстань між рядами буросічних паль B .

Висновки

Таким чином, розроблено методику обчислення напружень в шарі ґрунту при влаштуванні протизсувної споруди у вигляді контрфорсів з буросічних паль. Шар ґрунту між буросічними палями розглядається, як безшарнірна кругова арка прямокутного перерізу, на яку діє зсувний тиск, рівномірно розподілений по її прольоту. Найбільші внутрішні зусилля та напруження в арках такого типу виникають поблизу опор.

Розрахунок двошарнірної безшарнірної арки, що має три зайві зв'язки, виконується методом сил. Наведено формули для обчислення нормальних і дотичних напружень. Задаючись міцністю ґрунту та реалізуючи розроблений алгоритм, можна визначити відстань між рядами буросічних паль.

Список літератури

1. Godt, J.W., Baum, R.L., and Lu, N. (2009). Landsliding in partially saturated materials. *Geophys. Res. Lett.* 36. doi:10.1029/2008GL035996
2. Chen, Z., Shuai, F. X., Cao, C.X., Xu, H.L., Shang, Y.Q., and Sun, H.Y. (2021b). A new method to prevent seepage erosion of loess slope toe using the combination of filter pipe and siphon drainage. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 80, 4171–4190. doi:10.1007/s10064-021-02182-w.
3. Medina, V., Hurlimann, M., Guo, Z.Z., Lloret, A., and Vaunat, J. (2021). Fast physicallybased model for rainfall-induced landslide susceptibility assessment at regional scale. *Catena* 201, 105213. doi: 10.1016/j.catena.2021.105213.

4. Fang, K., Tang, H.M., Li, C. D., Su, X.X., An, P.J., and Sun, S. X. (2023). Centrifuge modelling of landslides and landslide hazard mitigation: A review. *Geosci. Front.* 14, 101493. doi: 10.1016/j.gsf.2022.101493
5. Hassiotis, S., Chameau, J. L., and Gunaratne, M. (1997). Design method for stabilization of slopes with piles. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 123, 314–323. doi:10.1061/(asce)1090-0241(1997)123:4(314).
6. Ausilio, E., Conte, E., and Dente, G. (2001). Stability analysis of slopes reinforced with piles. *Comput. Geotech.* 28, 591–611. doi:10.1016/S0266-352X(01)00013-1.
7. Chen, G.F., Zou, L.C., Wang, Q., and Zhang, G.D. (2020). Pile-spacing calculation of anti-slide pile based on soil arching effect. *Adv. Civ. Eng.* 2020, 1–6. doi:10.1155/2020/7149379.
8. Liu, X.L., Yan, J.K., Tong, B., and Liu, L. (2021). Evaluation of micropiles with different configuration settings for landslide stabilization based on large scale experimental testing. *Front. Earth Sci.* 9, 693639. doi:10.3389/feart.2021.693639.
9. Wang, L.P., and Zhang, G. (2014). Centrifuge model test study on pile reinforcement behavior of cohesive soil slopes under earthquake conditions. *Landslides* 11, 213–223. doi:10.1007/s10346-013-0388-2.
10. Al-Defae, A.H., and Knappett, J.A. (2015). Newmark sliding block model for pile reinforced slopes under earthquake loading. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 75, 265–278. doi: 10.1016/j.soildyn.2015.04.013.
11. Chen G, Guo F, Zhang G, Liu J and Ding L (2023) Anti-slide pile structure development: New design concept and novel structure. *Front. Earth Sci.* 11:1133127. doi: 10.3389/feart.2023.1133127.
12. ДБН В.1.1-46:2017 "Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення". Київ, Мінрегіон України, 2017. 53с. 13. ДБН В 1.1-25:2009 "Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення". Київ, Мінрегіон України, 2010. 34с.
13. ДБН В 1.1-25:2009 "Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення". Київ, Мінрегіон України, 2010. 34с.
14. Розробка ДБН "Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення" та ДСТУ-Н Б "Інженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів та обвалів" до нього / Ю.С. Слюсаренко, Ю.І. Калюх, В.Д. Шумінський, В.А. Титаренко, О.М. Трофимчук, О.А. Кліменков, Я.О. Берчун, М.Л. Зоценко, Ю.Л. Винников, Ю.Й. Біда, С.В. Великодний // Будівельні конструкції. 2016. Вип. 83(1). С. 195-205.

PhD Konstantin Anisimov,
Assistant Vladimir Baadzhi, PhD Vladimir Osadchy
Doctor of Science, Professor Mykola Surianinov,
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa

STRESS IN THE SOIL LAYER OF ANTI-SLIDE STRUCTURE

Landslide soil erosion is one of the most dangerous and common natural phenomena. Landslides are unpredictable, the rate of displacement of a landslide can vary from several meters per year to several meters per second. A landslide can remain dormant for centuries and then suddenly start moving again. Landslide processes can lead to serious damage and destruction of buildings, structures, roads, pipelines, which are built on slopes or next to them.

Landslides can be initiated on slopes already at the limit of movement by rainfall, snowmelt, abrasion, erosion, changes in ground water levels on the slope plateau and in landslide accumulations, earthquakes, volcanic activity, human activity, or any combination of these. factors Stabilization of landslide processes and improvement of the overall stability of slopes are possible with the application of engineering protection measures for territories, buildings and structures located on slopes. In cases where it is impossible to eliminate all causes of landslides, retaining anti-slide structures are used. Retaining anti-slide structures provide the ability to perceive shear pressure due to the reactive resistance of stable soil on the surfaces of deep-laying supports, and also prevent the soil of the landslide massif from pushing and crawling through them.

One of the effective methods of combating landslides is considered - the arrangement of a number of buttresses from bored piles. When the landslide is held by the specified structure, a soil vault is formed between the bored piles. A method for calculating stresses in the soil layer when arranging a landslide-resistant structure in the form of buttresses from bored piles has been developed. The soil layer between the bored piles is considered as a hingeless circular arch of rectangular cross-section, on which shear pressure acts, evenly distributed over its span. The greatest internal forces and stresses in arches of this type arise near the supports.

The calculation of a two-hinged hingeless arch, which has three redundant links, is performed by the force method. Formulas for calculating normal and tangential stresses are given. Given the soil strength and implementing the developed algorithm, it is possible to determine the distance between the buttresses made of bored piles.

Keywords: slope; anti-slide structure; bored piles; buttress; hingeless arch; force method; stresses.

REFERENCES

1. Godt, J.W., Baum, R.L., and Lu, N. (2009). Landsliding in partially saturated materials. *Geophys. Res. Lett.* 36. doi:10.1029/2008GL035996. {in English}
2. Chen, Z., Shuai, F.X., Cao, C.X., Xu, H.L., Shang, Y.Q., and Sun, H.Y. (2021b). A new method to prevent seepage erosion of loess slope toe using the combination of filter pipe and siphon drainage. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 80, 4171–4190. doi:10.1007/s10064-021-02182-w. {in English}
3. Medina, V., Hurlimann, M., Guo, Z.Z., Lloret, A., and Vaunat, J. (2021). Fast physicallybased model for rainfall-induced landslide susceptibility assessment at regional scale. *Catena* 201, 105213. doi: 10.1016/j.catena.2021.105213. {in English}

4. Fang, K., Tang, H.M., Li, C.D., Su, X.X., An, P.J., and Sun, S.X. (2023). Centrifuge modelling of landslides and landslide hazard mitigation: A review. *Geosci. Front.* 14, 101493. doi: 10.1016/j.gsf.2022.101493. {in English}
5. Hassiotis, S., Chameau, J. L., and Gunaratne, M. (1997). Design method for stabilization of slopes with piles. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 123, 314–323. doi:10.1061/(asce)1090-0241(1997)123:4(314). {in English}
6. Ausilio, E., Conte, E., and Dente, G. (2001). Stability analysis of slopes reinforced with piles. *Comput. Geotech.* 28, 591–611. doi:10.1016/S0266-352X(01)00013-1. {in English}
7. Chen, G.F., Zou, L.C., Wang, Q., and Zhang, G.D. (2020). Pile-spacing calculation of anti-slide pile based on soil arching effect. *Adv. Civ. Eng.* 2020, 1–6. doi:10.1155/2020/7149379. {in English}
8. Liu, X.L., Yan, J.K., Tong, B., and Liu, L. (2021). Evaluation of micropiles with different configuration settings for landslide stabilization based on large scale experimental testing. *Front. Earth Sci.* 9, 693639. doi:10.3389/feart.2021.693639. {in English}
9. Wang, L. P., and Zhang, G. (2014). Centrifuge model test study on pile reinforcement behavior of cohesive soil slopes under earthquake conditions. *Landslides* 11, 213–223. doi:10.1007/s10346-013-0388-2. {in English}
10. Al-Defae, A. H., and Knappett, J. A. (2015). Newmark sliding block model for pile reinforced slopes under earthquake loading. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 75, 265–278. doi: 10.1016/j.soildyn.2015.04.013. {in English}
11. Chen G, Guo F, Zhang G, Liu J and Ding L (2023) Anti-slide pile structure development: New design concept and novel structure. *Front. Earth Sci.* 11:1133127. doi: 10.3389/feart.2023.1133127. {in English}
12. DBN V.1.1-46:2017 "Inzhenernyi zakhyst terytorii, budivel i sporud vid zsuiv ta obvaliv. Osnovni polozhennia". Kyiv, Minrehion Ukrainy, 2017. 53s. 13. DBN V 1.1-25:2009 "Inzhenernyi zakhyst terytorii ta sporud vid pidtoplennia ta zatoplennia". Kyiv, Minrehion Ukrainy, 2010. 34s. {in Ukrainian}.
13. DBN V 1.1-25:2009 "Inzhenernyi zakhyst terytorii ta sporud vid pidtoplennia ta zatoplennia". Kyiv, Minrehion Ukrainy, 2010. 34s. {in Ukrainian}.
14. Rozrobka DBN "Inzhenernyi zakhyst terytorii, budivel i sporud vid zsuiv ta obvaliv. Osnovni polozhennia" ta DSTU-N B "Inzhenernyi zakhyst terytorii, budynkiv i sporud vid zsuiv ta obvaliv" do noho / Yu.S. Sliusarenko, Yu.I. Kaliukh, V.D. Shuminskyi, V.A. Tytarenko, O.M. Trofymchuk, O.A. Klimenkov, Ya.O. Berchun, M.L. Zotsenko, Yu.L. Vynnykov, Yu.I. Bida, S.V. Velykodnyi // *Budivelni konstruktsii*. 2016. Vyp. 83(1). S. 195-205. {in Ukrainian}.