

Роман САМЧЕНКО,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0003-1013-0047

Руслан КОНДРАТЮК,

аспірант

ORCID: 0009-0005-4153-3107

Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

ПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВЕРТИКАЛЬНОГО АРМУВАННЯ ГРУНТОВИХ ОСНОВ ЖОРСТКИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ НА ПІДВИЩЕННЯ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТА СТІЙКОСТІ СПОРУД

Стаття присвячена дослідженню визначення впливу вертикального армування ґрунтових основ жорсткими елементами на підвищення модуля деформації та загальної стійкості споруд. Основна мета полягає у встановленні оптимальних параметрів армування, включаючи вибір матеріалу жорстких елементів, для забезпечення підвищеної несучої здатності та зменшення деформацій основи. Додатково проводиться порівняльний аналіз елементів армування з різних матеріалів (залізобетон, сталь, ґрунтоцемент, композитні матеріали) з оцінкою їхніх переваг і недоліків.

У дослідженні використано методи аналітичного розрахунку, порівняльний аналіз існуючих експериментальних результатів, аналіз нормативної документації та емпіричних моделей для оцінки ефективності різних методів армування (бурозмішувальні палі, струменева цементация, композитна арматура, металеві елементи).

Для отримання результатів проведено порівняння впливу різних типів армування на збільшення модуля деформації ґрунту. Виявлено, що технологія бурозмішувальних паль дозволяє підвищити модуль деформації до 70%, а застосування струменевої цементации – більш ніж удвічі. Встановлено, що композитні матеріали мають низьку корозійну схильність, але поступаються за модулем пружності сталевим армуючим елементам. Запропоновано оптимальні сфери застосування різних технологій армування відповідно до типу ґрунтів та експлуатаційних умов.

Наукова новизна цього дослідження полягає у системному аналізі впливу вертикального армування жорсткими елементами на зміну модуля деформації ґрунтових основ, що дозволяє створити оптимальні параметричні рекомендації для проєктування фундаментів у різних геотехнічних умовах.

Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні фундаментних основ, для сприяння більш ефективному вирішенню проблеми забезпечення стійкості будівель та споруд у складних інженерно-геологічних умовах.

Ключові слова: вертикальне армування, ґрунтові основи, жорсткі елементи, модуль деформації, стійкість споруд, палі.

Постановка проблеми. У сучасному будівництві особливу увагу приділяють підвищенню надійності та довговічності споруд, зокрема шляхом удосконалення методів зміцнення ґрунтових основ. Одним із таких методів є вертикальне

армування жорсткими елементами, що дозволяє суттєво підвищити модуль деформації ґрунту та покращити його механічні характеристики.

Недостатня жорсткість основи може спричинити значні осідання фундаментів, диференціальні деформації та втрату експлуатаційної надійності будівель. Для мінімізації цих ризиків широко застосовуються технології глибокого зміцнення ґрунтів, зокрема буронабивні та бурозмішувальні палі, струменева цементация (Jet Grouting) та ґрунтоцементні палі.

Вибір оптимальних параметрів армування, таких як матеріал, діаметр, глибина занурення та схема розташування паль є важливим фактором ефективності зміцнення основи. Тому дослідження впливу цих параметрів на модуль деформації ґрунту є актуальним завданням сучасної геотехніки.

Метою статті є комплексний аналіз ефективності вертикального армування ґрунтів основ армуючими елементами різних матеріалів та визначення параметрів їх впливу на підвищення модуля деформації, зменшення осідань споруд та забезпечення стійкості фундаментів.

Вертикальне армування є одним із найефективніших методів зміцнення слабких і водонасичених ґрунтів, однак його параметри потребують детального аналізу. Важливо не лише визначити ефективність різних методів армування, але й оптимізувати геометричні та фізико-механічні параметри жорстких елементів з урахуванням специфіки геотехнічних умов.

Аналіз останніх досліджень. У 1960-х роках французький інженер Анрі Відаль (Henri Vidal) [1] розробив та запатентував метод «армованого ґрунту» (фр. *terre armée*), який передбачав використання металевих смуг для підвищення стійкості ґрунтових масивів. Ця технологія стала революційною в галузі геотехніки та отримала широке визнання у світі.

Подальші дослідження Schlosser & Elias [2] підтвердили ефективність армування ґрунтових основ, зокрема завдяки механізму тертя між ґрунтом і армуючими елементами.

При підготовці даної публікації також були використані попередні дослідження А.І. Юхименка [3], М.Л. Зоценка, Ю.Л. Винникова, В.М. Зоценка [4], Р.В. Раздуй [5] та інших вчених.

Виготовлення жорстких армуючих елементів здійснюється різними методами, які мають свої технологічні особливості, механічні властивості та вплив на довговічність конструкції. Аналіз досліджень [3, 7, 10] дозволяє виділити основні підходи до виробництва:

- буронабивні палі – виготовляються безпосередньо на будівельному майданчику шляхом буріння свердловин і подальшого заливання бетону. Цей метод забезпечує високу міцність, однак вимагає значних трудовитрат і суворого дотримання технології;

- бурозмішувальні палі (DMM) – формуються шляхом змішування ґрунту з цементно-бентонітовим розчином безпосередньо в процесі буріння. Це дозволяє підвищити модуль деформації основи та мінімізувати витрати на транспортування матеріалів;

- металеві армуючі елементи – виробляються на заводах з високоякісної сталі, що забезпечує їхню міцність і довговічність. Основний недолік – висока вартість та потреба у спеціальному антикорозійному захисті;

- композитні матеріали – виготовляються шляхом екструзії чи лиття полімерних смол із армуючими волокнами. Вони характеризуються високою

стійкістю до агресивних середовищ і малою масою, однак поступаються металевим аналогам за міцністю;

- струменева цементация (Jet Grouting) – процес включає впорскування високонапірного цементного розчину у ґрунт із подальшим формуванням армуючих стрижнів. Метод ефективний у водонасичених ґрунтах, проте потребує складного технічного обладнання.

Порівняльний аналіз показує, що вибір методу виготовлення жорстких елементів залежить від умов будівництва, економічної доцільності та геотехнічних особливостей основи.

Виклад основного матеріалу.

На основі аналізу було проведено комплексне порівняння ефективності різних методів вертикального армування ґрунтових основ жорсткими елементами. Основним критерієм оцінки є підвищення модуля деформації, що безпосередньо впливає на несучу здатність фундаментів, а також загальну стабільність споруд у складних геотехнічних умовах. Отримані результати демонструють суттєві відмінності у впливі різних технологій на механічні характеристики ґрунту.

Вплив вертикального армування ґрунтів основ жорсткими елементами на загальну стійкість споруд є важливим аспектом геотехнічного проектування. На основі аналізу попередніх досліджень [4, 6, 9] встановлено, що використання армуючих елементів дозволяє значно знизити ризик деформаційних процесів у фундаментних основах та запобігти нерівномірним осіданням конструкцій.

Одним із ключових показників стійкості споруд є їх здатність протистояти осіданням та горизонтальним переміщенням, викликаним нерівномірним ущільненням ґрунту. Дослідження показали, що:

- застосування бурозмішувальних паль (DMM) зменшує нерівномірні осідання на до 50%, забезпечуючи рівномірний розподіл навантаження;

- струменева цементация (Jet Grouting) дозволяє не лише підвищити модуль деформації, а й зміцнити периферію фундаменту, що зменшує ризик втрати стійкості на 40%;

- залізобетонні палі сприяють суттєвому підвищенню стійкості фундаментів при глибокому закладанні, особливо у випадках високих споруд.

Також дослідження [5, 8] показали, що використання композитних матеріалів має високу ефективність в агресивних середовищах, де традиційні матеріали швидко кородують. Завдяки стійкості до корозії, армування композитами забезпечує збереження механічних характеристик фундаментів на 70 років і більше.

Таким чином, вертикальне армування не тільки підвищує модуль деформації, а й значно покращує загальну стійкість споруд, знижуючи ризики руйнування фундаментних конструкцій у складних геотехнічних умовах.

Для забезпечення максимальної ефективності вертикального армування жорсткими елементами необхідно враховувати їхні геометричні та фізико-механічні параметри. Оптимальні характеристики армування:

- глибина занурення армуючих елементів: для слабких і водонасичених ґрунтів ефективною є глибина 1,5–2,5 м;

- діаметр армуючих елементів: оптимальним є діапазон 30–60 см, що забезпечує максимальне збільшення модуля деформації при мінімальних затратах матеріалів;

- крок розташування армуючих елементів: рекомендується 3–6 діаметрів елемента для рівномірного розподілу навантаження та забезпечення стійкості

основи;

- щільність розташування елементів: найкращі результати досягаються при щільності 5–10% від загального об'єму ґрунту.

Польові випробування ґрунтобетонних паль виконувалися на виробничому майданчику ТОВ «RSM». Пошаровий опис геолого-літологічної будови ділянки (згори донизу) наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Пошаровий опис геологічної будови ділянки

№ шару	Підоснова шару, м		Міцність шару, м	Опис шару	Фізико-механічні характеристики				
	Глибина	Відм.			E, МПа	C, МПа	φ, град	J _L Ro, МПа	ρ, г/см³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,4...1,6	350,5...351,9	0,4...1,6	Насипний ґрунт представлений суглинком, піском та щебнем.	7	0,007	13	-	2,02
2	6,3...11,5	340,6...346,0	5,9...9,9	Суглинки коричневі, з прошарками глини, супіску (m ≈ 10...20 см), піску середньої крупності (m ≈ 20 см).	25	0	33	-	1,94
3	8,8...10,6	340,1...345,4	0,5...0,6	Піски дрібні поліміктові, водонасичені.	30	0	35	-	1,98
4	8,1...8,3	342,2...344,1	0,9...1,2	Піски крупні поліміктові, водонасичені, з прошарками суглинку (m ≈ 5 см), піску гравелистого (m ≈ 10...15 см), піску середньої крупності (m ≈ 20 см).	30	0	36	-	2,0
5	6,8...7,9	339,6...344,9	1,5...2,0	Гравійні ґрунти, водонасичені, з прошарками піску крупного (m ≈ 20 см), суглинку (m ≈ 10...12 см), супіси (m ≈ 20 см).	-	-	-	0,35	-
6	11,2...12,5	343,6...345,3	1,2...11,7	Глини елювіальні, жовті, яскраво-жовті, тверді, напівтверді, тріщинуваті, по тріщинам з нальотами гідроксидів марганця і заліза, з прошарками суглинку (m ≈ 20 см), з включенням інших і рухливих обломків алевролітів до 25 % і прошарками щебня алевролітів, потужністю до 20 см.	-	-	-	0,4	-

Закінчення табл.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7	17,0	339,6...339,8	4,0...10,5	Суглинки елювіальні жовті, тверді, напівтверді, тріщинуваті, по тріщинах з нальотами гідроксидів заліза і марганцю, з прошарками щебенистого ґрунту ($m \approx 20$ см). Викриті вони повсюдно, під четвертинними ґрунтами та елювіальними глинами, з глибиною 10,0...19,0 м.	11	0,027	21	-	1,86
8			1,5...13,0	Щебеністі ґрунти сірувато-жовті, представлені міцними і рухливими відламками осадових порід із суглинистим заповнювачем до 30 %.					

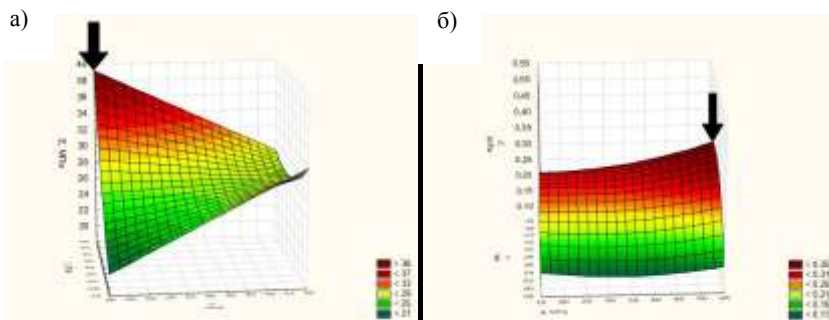


Рис. 1. Розподіл напружень в ґрунтовому середовищі
а – бурозмішувальними палями; б – струменевою цементацією

Після проведених математичних перетворень з використанням кореляційно-регресійного апарату отримані залежності, що входять в підсумкову модель визначення впливу значень навантажень на геологічні основи ділянки дослідження:

$$\begin{aligned} \text{Лопт1} &= -7,175 + 0,95 \cdot x + 0,7708 \cdot y + 9,0553E-15 \cdot x^2 - 0,0271 \cdot x \cdot y + 0,0057 \cdot y^2 \\ \text{Лопт2} &= -0,8602 - 0,0056 \cdot x + 0,0837 \cdot y + 4,9603E-5 \cdot x^2 + 0,0001 \cdot x \cdot y - 0,0015 \cdot y^2 \end{aligned}$$

Висновки. У результаті проведеного дослідження досягнуто основну мету – виконано аналіз ефективності вертикального армування ґрунтових основ жорсткими елементами, оцінено вплив геометричних параметрів та матеріалів армуючих елементів на модуль деформації ґрунтів та загальну стійкість споруд.

Отримані результати підтверджують ефективність використання вертикального армування ґрунтових основ жорсткими елементами для покращення їхніх механічних характеристик. Визначено оптимальні параметри

розташування жорстких елементів, оцінено економічну доцільність різних технологій та розроблено рекомендації для практичного застосування у фундаментобудуванні.

Основні висновки дослідження:

- струменева цементация (Jet Grouting) є найбільш ефективним методом збільшення модуля деформації (до 120%), однак має високу вартість та витратність матеріалів;
- металеві армуючі елементи забезпечують 90% покращення механічних характеристик ґрунту, мають високу довговічність, але потребують антикорозійного захисту;
- залізобетонні палі підвищують модуль деформації на 80% і є ефективними для фундаментів висотних будівель та конструкцій з великим навантаженням;
- бурозмішувальні палі (DMM) демонструють 70% підвищення модуля деформації та є економічно вигідними, особливо для зміцнення слабких ґрунтів;
- композитні матеріали забезпечують 50% покращення механічних характеристик, мають високу корозійну стійкість, але потребують подальших досліджень щодо їхньої довговічності та несучої здатності.

Встановлено, що вибір технології вертикального армування повинен базуватися на геотехнічних умовах будівництва, економічній доцільності та експлуатаційних вимогах до фундаментної основи.

Таким чином, результати цього дослідження підтверджують ефективність вертикального армування жорсткими елементами та дозволяють сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо їхнього застосування залежно від типу ґрунту та експлуатаційних вимог.

Результати дослідження можуть бути використані у проектуванні житлових, промислових та інженерних споруд, реконструкції фундаментів, зміцненні основ у складних інженерно-геологічних умовах.

Список літератури:

1. Vidal M.H. The Development and Future of Reinforced Earth-Keynote address. *Proceedings of the ASCE symposium on Earth Reinforcement ASCE*, Pittsburgh, Pennsylvania, Apr.,1978, pp. 1-61.
2. Schlosser F., Elias V. Friction in reinforced earth. *Proceedings of the ASCE symposium on Earth Reinforcement ASCE*, Pittsburgh, Pennsylvania, Apr.,1978, pp. 735-763.
3. Юхименко А.І. Технологія горизонтального бурозмішувального армування ґрунтів основ споруд: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.08 Одеса, 2017. 182 с.
4. Зоценко М.Л., Винников Ю.Л., Зоценко В.М. Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом: монографія. Харків: Друкарня Мадрид, 2016. 94 с.
5. Раздуй Р.В. Напружено-деформований стан системи «ґрунтоцементна основа – фундамент – будівля»: дис. ... д-ра філос.: 05.23.02; 192. Полтава, 2023. 194 с.
6. Блащук Н.В., Маєвська І.В. Визначення модуля деформації основи, армованої вертикальними елементами. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2021. Вип. 2. С. 45-53.
7. Гріщенко Р.П., Маєвська І.В. Аналіз параметрів ґрунтової основи, армованої ґрунтоцементними палями з використанням золи винесення. Матеріали конференції «XLIX Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького

національного технічного університету (2020)», Вінниця, 2020. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2020/paper/view/9082/7826>

8. Зоценко М.Л., Іванченко В.Г. Дослідження стисливості армованих ґрунтів методом пресіометрії. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Серія: галузеве машинобудування, будівництво*. 2015. Вип. 2 (44). С. 90-97.

9. Маєвська І.В., Неволя Л.І. Порівняльна оцінка ефективності армування ґрунту вертикальними стержнями з різних матеріалів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2022. Вип. 54. С. 54-60.

10. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. [Чинний від 2019-01-01]. К.: Мінрегіонбуд України, 2018. 34 с.

References:

1. Vidal, M.H. (1978). The Development and Future of Reinforced Earth-Keynote address. In *Proceedings of the ASCE symposium on Earth Reinforcement* (pp. 1-61). ASCE.

2. Schlosser, F., & Elias, V. (1978). Friction in reinforced earth. In *Proceedings of the ASCE symposium on Earth Reinforcement* (pp. 735-763). ASCE.

3. Yukhymenko, A.I. (2017). Tekhnolohiia horizontalnogo burozmishuvalnoho armuvannia gruntiv osnov sporud [Technology of horizontal bore-mixing reinforcement of soil bases of structures] (Candidate dissertation, 05.23.08). Odesa.

4. Zotsenko, M.L., Vynnykov, Yu.L., & Zotsenko, V.M. (2016). Burovi gruntotsementni pali, yaki vyhotovliaiutsia za burozmishuvalnym metodom1 [Drilled soil-cement piles, which are made by the bore-mixing method]. Drukarnia Madrid.

5. Razdui, R.V. (2023). Napruzhenno-deformovanyi stan systemy «gruntotsementna osnova – fundament – budivlia» [Stress-strain state of the system "soil-cement base - foundation - building"] (Doctoral dissertation, 05.23.02; 192). Poltava.

6. Blashchuk, N.V., & Maievska, I.V. (2021). Vyznachennia modulua deformatsiï osnovy, armovanoi vertykalnymy elementamy [Determination of the deformation modulus of a base reinforced with vertical elements]. *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi*, 2(2), 45-53.

7. Hrishchenko, R.P., & Maievska, I.V. (2020). Analiz parametriv gruntovoi osnovy, armovanoi gruntotsementnymy palamy z vykorystanniam zoly vynesennya [Analysis of parameters of soil base reinforced with soil-cement piles using fly ash]. *Materialy konferentsii «XLIX Naukovo-tekhnichna konferentsiia pidrozdiliv Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu (2020)»*. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2020/paper/view/9082/7826>

8. Zotsenko, M.L., Ivanchenko, V.H. (2015). Doslidzhennia styslyvosti armovanykh gruntiv metodom presiometrii [Study of the compressibility of reinforced soils by the pressuremeter method]. *Zbirnyk naukovykh prats Poltavskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu imeni Yurii Kondratiuka. Serii: haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, 2(44), 90-97.

9. Maievska, I.V., & Nevolia, L.I. (2022). Porivnialna otsinka efektyvnosti armuvannia ґрунту vertykalnymy stержnyamy z riznykh materialiv [Comparative evaluation of the effectiveness of soil reinforcement with vertical rods made of various materials]. *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi*, 54, 54-60.

10. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд [ДБН В.2.1-

10:2018. Foundations and foundations of buildings and structures]. (2018). B.

Ruslan KONDRATUK, Roman SAMCHENKO

Parametric analysis of the influence of vertical reinforcement of soil bases with rigid elements on increasing the deformation modulus and structural stability

This paper is dedicated to investigating the impact of vertical reinforcement of soil bases with rigid elements on enhancing the deformation modulus and overall structural stability. The primary objective is to establish optimal reinforcement parameters, including the selection of rigid element materials, to ensure increased bearing capacity and reduced base deformations. Furthermore, a comparative analysis of reinforcing elements made from various materials (reinforced concrete, steel, soil-cement, composite materials) is conducted, evaluating their advantages and disadvantages.

The study employs analytical calculation methods, a comparative analysis of existing experimental results, an examination of regulatory documentation, and empirical models to assess the effectiveness of different reinforcement techniques (soil mixing piles, jet grouting, composite reinforcement, metallic elements).

To obtain the results, a comparison of the influence of various reinforcement types on the increase in the soil deformation modulus was performed. It was found that soil mixing pile technology allows for an increase in the deformation modulus by up to 70%, while the application of jet grouting more than doubles it. It was established that composite materials exhibit low corrosion susceptibility but are inferior in terms of elastic modulus to steel reinforcing elements. Optimal application areas for different reinforcement technologies are proposed based on soil type and operational conditions.

The scientific novelty of this research lies in the systematic analysis of the influence of vertical reinforcement with rigid elements on the change in the deformation modulus of soil bases, which allows for the development of optimal parametric recommendations for foundation design in various geotechnical conditions.

The obtained results can be utilized in the design of foundation bases, contributing to a more effective solution to the problem of ensuring the stability of buildings and structures in complex engineering-geological conditions.

Keywords: vertical reinforcement, soil bases, rigid elements, deformation modulus, structural stability, piles.