

УДК 625.7/.8

Кривобок О. В., <https://orcid.org/0000-0002-5424-8664>Островерхий О. Г., канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-2182-2209>

Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна

СУЧАСНІ МЕТОДИ УКРІПЛЕННЯ ҐРУНТІВ В ДОРОЖНЬОМУ БУДІВНИЦТВІ ТА СПОСОБИ ЇХ ПОКРАЩЕННЯ

Анотація

Вступ. У статті розглянуто основні методи укріплення ґрунтів у будівництві автомобільних доріг. Проведено детальний аналіз основних методів укріплення з точки зору інженерно-геологічних умов, економічної ефективності та довговічності. Визначено, що найбільш оптимальний вибір технології забезпечить підвищення несучої здатності дорожньої основи, зниження деформацій і збільшення строку служби дорожнього одягу.

Проблематика. В умовах воєнного стану в Україні, вибір ділянок для будівництва дорожньої інфраструктури стає особливо важливим. Обмеженість придатних територій змушуватиме використовувати ділянки зі слабкими ґрунтами для будівництва автомобільних доріг. Для забезпечення надійності та безпеки дорожнього одягу на таких територіях необхідно застосовувати спеціальні інженерні рішення та технології для укріплення шарів дорожнього одягу. Це дозволить ефективно використовувати наявні ресурси з несприятливими ґрунтовими умовами, оперативно відновлювати дорожню мережу та забезпечувати потреби населення і військових в умовах надзвичайних ситуацій.

Мета. Проаналізувати основні методи укріплення ґрунтів та вибір оптимальних рішень щодо укріплення для забезпечення надійності та довговічності дорожнього одягу.

Висновки. Розглянуті методи укріплення ґрунтів та вибору оптимальних рішень задля підвищення надійності конструкцій дорожнього одягу є однією з ключових задач у дорожньому будівництві оскільки це гарантує довговічність автомобільних доріг та безперервну роботу транспортної мережі, знижує потребу у частих ремонтних роботах та, відповідно, зменшує витрати на утримання доріг при обмеженому фінансуванні дорожньої галузі.

Ключові слова: автомобільна дорога, ґрунт, довговічність, дорожній одяг, технологія, укріплення ґрунтів.

Вступ

Одним із способів укріплення конструкції є укріплення шарів дорожнього одягу для підвищення несної здатності. Однак неоднорідність напружень і міцності в укріплених шарах значно більша, ніж в покритті. У перспективі це може мати негативний вплив на довговічність конструкції та сприяти виникненню передчасних пошкоджень.

Також необхідно зазначити, що в умовах сьогодення основне навантаження від рухомої техніки сприймає дорожня основа. Основна проблема полягає в тому, що вона не є стабільною. Укріплені шари, що слугують основою для дорожнього покриття, схильні до просочування вологою під впливом атмосферних опадів. Взаємодія вологи з ґрунтом у поєднанні з циклічними перепадами температур (зокрема, замерзання-відтавання) та динамічними навантаженнями від транспортних засобів призводить до нерівномірного просідання основи дорожнього одягу. Цей процес спричиняє деформацію структури дорожнього одягу та проявляється у вигляді тріщин, вибоїн та інших пошкоджень дорожнього покриття, незалежно від його матеріалу чи якості виконання. Нерівномірне просідання є критичним фактором, що знижує термін експлуатації дорожнього покриття та підвищує витрати на його ремонт і обслуговування.

Основна частина

У проектах дорожнього будівництва ґрунт використовують як основу дорожнього одягу. Одним із методів покращення фізико-механічних показників є стабілізація за допомогою цементуючих матеріалів (цемент, вапно, зола-виносу, бітум або їх комбінація). Стабілізацію можна здійснювати двома способами: на місці та поза місцем будівництва.

Стабілізація ґрунту є ключовим процесом у дорожньому будівництві, спрямованим на покращення фізико-механічних властивостей ґрунту для забезпечення міцності, довговічності та стійкості дорожнього одягу. Стабілізація не завжди є універсальним засобом для поліпшення характеристик ґрунту. Вибір технології залежить від того, які саме властивості ґрунту необхідно модифікувати.

Стабілізація з використанням добавок

Стабілізація з використанням добавок передбачає введення цементуючих матеріалів для покращення властивостей ґрунту. Основними методами стабілізації є:

Стабілізація вапном

Вапно є економічно вигідним способом стабілізації ґрунту. Цей метод передбачає додавання вапна до ґрунту для покращення його властивостей, таких як міцність і стійкість до вологи. Використовують різні типи вапна: гідратоване вапно з високим вмістом кальцію, моногідратоване доломітове вапно, кальцитне негашене вапно або доломітове вапно. Зазвичай кількість вапна становить від 5 % до 10 % за масою ґрунту. Це робить глинисті ґрунти більш сухими та менш чутливими до змін вмісту вологи [6]. Така стабілізація також може включати пуцоланову реакцію, під час якої пуцоланові матеріали реагують з вапном у присутності води, утворюючи цементуючі сполуки [5,7]. Для цього можна використовувати як негашене вапно, так і гідратоване вапно. Найпоширенішим є негашене вапно через переваги порівняно з гідратованим вапном [7].

Стабілізація цементом

Стабілізація ґрунту цементом полягає у зв'язуванні частинок ґрунту внаслідок гідратації цементних частинок, які утворюють кристали, що можуть зчіплюватися між собою, забезпечуючи високу міцність на стиск. Для досягнення ефективного зв'язування цементні частинки повинні покривати більшість частинок матеріалу. Щоб забезпечити хороший контакт між частинками ґрунту та цементом, а отже, ефективну стабілізацію, необхідно змішувати цемент із ґрунтом із певним гранулометричним складом. Ґрунтоцемент — це високоушільнена суміш ґрунту / заповнювача, цементу та води. Ґрунтоцемент стає твердим і довговічним матеріалом у міру гідратації цементу та розвитку його міцності. Стабілізацію цементом виконують під час процесу ущільнення. Оскільки цемент заповнює порожнини між частинками ґрунту, коефіцієнт пористості ґрунту зменшується. Після додавання води до ґрунту цемент реагує з водою і твердне, що приводить до збільшення об'ємної ваги ґрунту. Завдяки твердінню цементу також зростають міцність на зсув і несна здатність. Цемент сприяє зниженню рідинної межі, підвищенню індекса пластичності та оброблюваності глинистих ґрунтів. Реакція цементу не залежить від мінералів ґрунту, а ключову роль відіграє його реакція з водою, яка може бути наявною у будь-якому ґрунті [10]. Це пояснює, чому цемент використовують для стабілізації широкого спектра ґрунтів. На ринку доступні різні типи цементу, зокрема звичайний портландцемент, доменний цемент, сульфатостійкий цемент і високоалюмінатний цемент. Вибір цементу зазвичай залежить від типу ґрунту, що підлягає обробці, та бажаної кінцевої міцності. Процес гідратації — це процес, під час якого відбувається реакція цементу. Він починається, коли цемент змішується з водою та іншими компонентами для певного застосування, що призводить до явища твердіння.

Хімічна стабілізація

Хімічна стабілізація ґрунту передбачає зміну фізико-хімічних властивостей навколо та всередині глинистих частинок, завдяки чому ґрунт потребує менше води для задоволення статичного дисбалансу. Хлорид кальцію, який є гігроскопічним, використовується як добавка для утримання води в механічно стабілізованих ґрунтових основах. Температура замерзання чистої води знижується, що сприяє

запобіганню або зменшенню морозного пучення. Завдяки пригніченню електричного подвійного шару сіль зменшує поглинання води та, відповідно, втрату міцності дрібнозернистих ґрунтів. Хлорид кальцію діє як флокулянт ґрунту та полегшує ущільнення. Для компенсації втрати хімікату через вимивання може знадобитися періодичне застосування хлориду кальцію. Щоб сіль була ефективною, відносна вологість атмосфери повинна перевищувати 30 %. Хлорид натрію є ще однією хімічною речовиною, яку можна використовувати для цієї мети з подібною стабілізуючою дією, як у хлориду кальцію. Силікат натрію — це ще одна хімічна речовина, яка використовується для цієї мети в комбінації з іншими хімікатами, такими як хлорид кальцію, полімери, хром. Ці речовини сприяють зміні фізико-хімічних властивостей ґрунту, зменшуючи його потребу у воді та покращуючи стабільність.

Стабілізація золю-винесення

Одним із перспективних методів удосконалення фізико-механічних властивостей ґрунтів є застосування золи-винесення — побічного продукту теплових електростанцій.

Зола-винесення містить активні сполуки кремнезему та кальцію, які в поєднанні з водою вступають у пуцоланові реакції. У результаті утворюються цементуючі речовини, що зменшують пористість, покращують зв'язність частинок ґрунту та забезпечують зростання його міцності. Стабілізації ґрунтів за допомогою золи-винесення є ефективним та екологічно орієнтованим рішенням, що дозволяє одночасно підвищити якість основ і раціонально використовувати промислові відходи. Однак для досягнення оптимального результату важливим є контроль складу золи та правильний вибір умов застосування.

Стабілізація бітумом

Стабілізація ґрунту бітумом — це процес, при якому контрольована кількість бітумного матеріалу ретельно змішується з наявним ґрунтом або заповнювачем для формування стабільної основи або поверхневого шару. Бітум підвищує когезію та несну здатність ґрунту, а також робить його стійким до дії води. Тип бітуму, який використовують, залежить від типу ґрунту, що стабілізується, методу будівництва та погодних умов. У районах із низькими температурами слід уникати використання смоли як в'язучого матеріалу через її високу температурну чутливість. При додаванні бітумних матеріалів до ґрунту вони забезпечують когезію та зменшують водопоглинання.

Чинники, що впливають на міцність стабілізованого ґрунту

Наявність органічних речовин, сульфатів, сульфідів і вуглекислого газу в стабілізованих ґрунтах може бути причиною зниження міцності стабілізованих матеріалів [5].

Органічні речовини

У багатьох випадках верхні шари ґрунту містять значну кількість органічних речовин. Однак у дренуючих ґрунтах органічна речовина може проникати на глибину до 1,5 м [5]. Органічні речовини в ґрунті реагують із продуктами гідратації, наприклад, гідроксидом кальцію, що призводить до зниження рН. Низьке значення рН може уповільнити процес гідратації та вплинути на твердіння стабілізованих ґрунтів, ускладнюючи або унеможливаючи їх ущільнення.

Сульфати

Використання стабілізаторів на основі кальцію в ґрунтах, багатих на сульфати, призводить до того, що в умовах надлишкової вологи стабілізований ґрунт реагує з утворенням кальцієвого сульфоалюмінату (етрингіту) або таумаситу. Ці продукти займають більший об'єм, ніж сумарний об'єм реагентів. Для розчинення сульфатів і перебігу реакції може знадобитися додаткова вода, крім тієї, що була присутня під час змішування [5, 11].

Сульфіди

У багатьох відходах і промислових побічних продуктах можуть бути присутні сульфіди, наприклад, у вигляді піриту заліза. Окислення утворює сірчану кислоту, яка в присутності карбонату кальцію може реагувати з утворенням гіпсу. Утворений гідратований сульфід у присутності надлишкової води може атакувати стабілізований матеріал подібно до сульфатів. Гіпс також може бути присутнім у природних ґрунтах [5, 10].

Ущільнення

На практиці додавання в'язучого суттєво впливає на щільність ґрунту. Стабілізована суміш має нижчу максимальну суху щільність, ніж нестабілізований ґрунт, за однакового ступеня ущільнення. Оптимальний вміст води зростає зі збільшенням кількості в'язучого [5]. У цементно-стабілізованих ґрунтах процес гідратації починається одразу після контакту цементу з водою. Цей процес передбачає твердіння ґрунтової суміші, що означає необхідність ущільнення суміші якомога швидше. Затримка в ущільненні може призвести до затвердіння стабілізованої ґрунтової маси, що вимагатиме додаткових зусиль для досягнення того ж ефекту. Це може спричинити серйозне руйнування зв'язків і, відповідно, втрату міцності. На відміну від цементу, затримка в ущільненні для вапно-стабілізованих ґрунтів може мати певні переваги. Вапно-стабілізований ґрунт потребує періоду дозрівання, щоб вапно могло дифундувати через ґрунт, забезпечуючи максимальний вплив на пластичність. Після цього періоду вапно-стабілізований ґрунт можна повторно змішати та остаточно ущільнити, що приводить до значної міцності порівняно з іншими методами [5].

Вологість

У стабілізованих ґрунтах достатній вміст води є важливим не лише для перебігу процесу гідратації, але й для ефективного ущільнення. Повністю гідратований цемент поглинає приблизно 20 % своєї ваги води з навколишнього середовища [5], тоді як негашене вапно поглинає близько 32 % своєї ваги води [5, 9]. Недостатній вміст води призводить до того, що значна її частина поглинається ґрунтом, унаслідок чого в'язучий матеріал не отримує достатньої кількості води для повноцінної гідратації. Для ґрунтів із високою водоутримувальною здатністю (глинистих, торф'яних та органічних) це може уповільнювати перебіг гідратаційних процесів і, відповідно, знижувати кінцеву міцність стабілізованого шару [9].

Температура

Пуцоланова реакція чутлива до змін температури. У польових умовах температура постійно змінюється протягом дня. Пуцоланові реакції між в'язучими матеріалами та частинками ґрунту сповільнюються за низьких температур, що призводить до зниження міцності стабілізованої маси. У холодних регіонах рекомендується проводити стабілізацію ґрунту в теплу пору року [5].

Висновки

Стабілізація ґрунтів є ключовим етапом дорожнього будівництва, спрямованим на підвищення несної здатності та довговічності основ дорожнього одягу. Використання різних стабілізаторів дозволяє керувати фізико-механічними властивостями ґрунту, зокрема об'ємною стабільністю, міцністю, стисливістю, водопроникністю та стійкістю до зовнішніх впливів. Вибір оптимального типу стабілізатора має ґрунтуватися на результатах лабораторних і натурних випробувань, що враховують геотехнічні характеристики та умови експлуатації. Подальший розвиток технологій стабілізації пов'язаний із впровадженням інноваційних матеріалів і комплексних методів зміцнення основ, які забезпечують підвищення якості ущільнення, морозостійкості й тріщиностійкості. Для підтвердження ефективності стабілізаторів необхідне системне проведення випробувань у різних кліматичних умовах, з урахуванням можливого впливу глобальних змін клімату на їхню довговічність і стабільність властивостей.

Список літератури

1. ДСТУ Б В.2.1-2-96 Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Класифікація. Київ. 1996. 52 с. (Інформація та документація).
2. ДСТУ ISO 14688-1:2021 Геотехнічні дослідження та випробування. Ідентифікація та класифікація ґрунтів. Частина 1. Ідентифікація та опис. Київ. 2001. 55 с. (Інформація та документація).
3. ДСТУ ISO 14688-2:2021 Геотехнічні дослідження та випробування. Ідентифікація та класифікація ґрунтів. Частина 2. Класифікація (ISO 14688-2:2017, IDT). Київ. 2021 35 с. (Інформація та документація).

4. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ. 2015. 52 с. (Інформація та документація).
5. Sherwood, P. (1993). Soil stabilization with cement and lime. State of the Art Review. London: Transport Research Laboratory, HMSO. (5)
6. Keller Inc., (2011). Improvement of Weak Soils by the Deep Soil Mixing Method. Keller Bronchure, 32-01E: URL: <http://keller-foundations.co.uk/technique/deep-dry-soilmixing>.
7. White, D. (2005). Fly Ash Soil Stabilization for Non-Uniform Subgrade Soils. IHRB Project TR-461, FHWA Project 4.
8. EuroSoilStab. (2002). Development of Design and Construction Methods to Stabilize Soft Organic Soils: Design Guide for soft soil stabilization. CT97-0351, European Commission, Industrial and Materials Technologies Programme (Rite-EuRam III) Bryssel.
9. Hicks, R. (2002). Alaska Soil Stabilization Design Guide.
10. Al-Tabbaa, A. and Evans, W. C. (2005). Stabilization-Solidification Treatment and Remediation: Part I: Binders and Technologies-Basic Principal. Proceedings of the International Conference on Stabilization/Solidification Treatment and Remediation. P. 367–385. Cambridge, UK: Balkema.
11. Hebib, S. and Farrell, E. R. (1999). Some Experiences of Stabilizing Irish Organic Soils. Proceeding of Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. P. 81–84. Stockholm: Balkema.

References

1. DSTU B V.2.1-2-96 Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Klastyfikatsiia (Foundations and bases of buildings and structures. Soils. Classification). Kyiv. 1996. 52 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
2. DSTU ISO 14688-1:2021 Heotekhnichni doslidzhennia ta vyprobuvannia. Identyfikatsiia ta klastyfikatsiia gruntiv. Chastyna 1. Identyfikatsiia ta opys (Geotechnical investigations and testing. Identification and classification of soils). Kyiv. 2001. 55 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
3. DSTU ISO 14688-2:2021 Heotekhnichni doslidzhennia ta vyprobuvannia. Identyfikatsiia ta klastyfikatsiia gruntiv. Chastyna 2. Klastyfikatsiia (Geotechnical investigations and testing. Identification and classification of soils. Part 2. Classification) (ISO 14688-2:2017, IDT). Kyiv. 2021 35 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
4. ДБН В.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo (Motorways. Part I. Design. Part II. Construction). Kyiv. 2015. 52 s. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
5. Sherwood, P. (1993). Soil stabilization with cement and lime. State of the Art Review. London: Transport Research Laboratory, HMSO. (5) [in English].
6. Keller Inc., (2011). Improvement of Weak Soils by the Deep Soil Mixing Method. Keller Bronchure, 32-01E: URL: <http://keller-foundations.co.uk/technique/deep-dry-soilmixing> [in English].
7. White, D. (2005). Fly Ash Soil Stabilization for Non-Uniform Subgrade Soils. IHRB Project TR-461, FHWA Project 4 [in English].
8. EuroSoilStab. (2002). Development of Design and Construction Methods to Stabilize Soft Organic Soils: Design Guide for soft soil stabilization. CT97-0351, European Commission, Industrial and Materials Technologies Programme (Rite-EuRam III) Bryssel [in English].
9. Hicks, R. (2002). Alaska Soil Stabilization Design Guide [in English].
10. Al-Tabbaa, A. and Evans, W. C. (2005). Stabilization-Solidification Treatment and Remediation: Part I: Binders and Technologies-Basic Principal. Proceedings of the International Conference on Stabilization/Solidification Treatment and Remediation P. 367–385. Cambridge, UK: Balkema [in English].
11. Hebib, S. and Farrell, E. R. (1999). Some Experiences of Stabilizing Irish Organic Soils. Proceeding of Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. P. 81–84. Stockholm: Balkema [in English].

Oleksandr Kryvobok, <https://orcid.org/0000-0002-5424-8664>

Oleg Ostroverkhyi, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-2182-2209>

National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

MODERN METHODS OF SOIL STABILIZATION IN ROAD CONSTRUCTION AND WAYS TO IMPROVE THEM

Abstract

Introduction. The article discusses the main methods of soil stabilization in road construction. A detailed analysis of the main methods of reinforcement is carried out from the point of view of engineering and geological conditions, economic efficiency, and durability. It is determined that the most optimal choice of technology will ensure an increase in the bearing capacity of the road base, a reduction in deformations, and an increase in the service life of the road surface.

Issues. In the context of martial law in Ukraine, the selection of sites for road infrastructure construction is becoming particularly important. The limited availability of suitable areas will force the use of sites with weak soils for road construction. To ensure the reliability and safety of road surfaces in such areas, special engineering solutions and technologies must be used to reinforce the layers of the road surface. This will allow for the effective use of available resources with unfavorable soil conditions, the rapid restoration of the road network, and the provision of the needs of the population and the military in emergency situations.

Objective. To analyze the main methods of soil reinforcement and select optimal reinforcement solutions to ensure the reliability and durability of road surfaces.

Conclusions. The methods of soil reinforcement and the selection of optimal solutions to improve the reliability of road pavement structures are one of the key tasks in road construction, as this guarantees the durability of motorways and the continuous operation of the transport network, reduces the need for frequent repairs and, accordingly, reduces road maintenance costs with limited funding for the road industry.

Keywords: road, durability, soil reinforcement, soil, pavement, technology.