

УДК 624.1:691.3

ПРОЦЕС ФОРМУВАННЯ ГРУНТОВОГО КОМПОЗИТУ ІЗ СЛАБКОГО, НАСИЧЕНОГО ВОДОЮ, ГЛИНИСТОГО ГРУНТУ НА ОСНОВІ ШЛАКУ В ОСНОВІ ПІДЗЕМНОЇ СПОРУДИ**Д. В. Ткач**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
пров. Ковальський, 22а, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: tka4_dima@meta.ua

Розглянуто механізм формування ґрунтового композиту на основі слабкого перенасиченого глинистого ґрунту із застосуванням доменного шлаку та хімічного активатора. Приведений хімічний склад доменного шлаку. Наведені основні хімічні рівняння процесів модифікації слабкого ґрунту, показана роль активаторів в процесі формування глинистого композиту. Приведені результати досліджень отриманого матеріалу, що був утворений в лабораторних умовах. Даний матеріал отримав нові якісні властивості, що дозволяють застосовувати його в основі підземної споруди. На основі виконаних дослідів запропонована та описана технологія для закріплення слабкого ґрунтового масиву в основі підземної споруди.

Ключові слова: слабкий глинистий ґрунт, доменний шлак, глибинне змішування, підземна споруда.

ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ГРУНТОВОГО КОМПОЗИТА СО СЛАБОГО, НАСЫЩЕННОГО ВОДОЙ, ГЛИНИСТОГО ГРУНТА НА ОСНОВЕ ШЛАКА В ОСНОВАНИИ ПОДЗЕМНОГО СООРУЖЕНИЯ**Д. В. Ткач**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
пер. Ковальский, 22а, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: tka4_dima@meta.ua

Рассмотрен механизм формирования ґрунтового композита на основе слабого перенасыщенного глинистого ґрунта с применением доменного шлака и химического активатора. Приведен химический состав доменного шлака. Приведены основные химические уравнения процессов модификации слабого ґрунта, показана роль активаторов в процессе формирования глинистого композита. Приведены результаты исследований полученного материала, который был создан в лабораторных условиях, данный материал получил новые качественные свойства позволяющие применять его в основании подземного сооружения. На основе выполненных исследований предложена и описана технология для закрепления слабого ґрунтового массива в основании подземного сооружения.

Ключевые слова: слабый глинистый ґрунт, доменный шлак, глубинное смешивания, подземное сооружение.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Боротьба зі слабкими ґрунтами в основі підземної споруди на даний момент має велике значення, так як все частіше під забудову освоюються території з несприятливими гідрогеологічними умовами, на яких планується зводити об'єкти зі значними статичними і динамічними навантаженнями, що обумовлює актуальність досліджень в області стабілізації ґрунтових масивів. Насичені водою слабкі глинисті ґрунти неможливо закріпити існуючими методами (цементация, бітумізація, полімеризація), а процес зміцнення за допомогою консолідація дуже трудомісткий і недоцільний процес у багатьох випадках геотехнічного будівництва.

Мета роботи – проаналізувати механізм формування ґрунтового композиту за допомогою технології глибинного змішування ґрунту з доменним шлаком. Розробити теоретичні передумови, спрямовані на регулювання параметрів закріпленого ґрунтового масиву.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Метод глибинного змішування почав застосовуватись і досліджуватись в Індії та Японії з 1975 р. [1–3]. Основні роботи в цьому напрямку виконувалися зарубіжними вченими. Всі дослідження були спрямовані на вивчення закріплених ґрунтів стандартними цементними в'язкими [4–6]. У даній роботі розглянуто процес формування посиленого ґрунтового масиву за допомогою добавки шлаку.

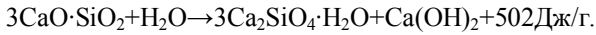
Доменний шлак є набором різних мінералів на основі оксидів металів і неметалів. Від видів мінералів залежать гідралічні властивості шлаку і, відповідно, його придатність для зміцнення насичених водою слабких глинистих ґрунтів. Використання шлаку як компоненту в'язучого в кінцевому підсумку буде визначатися гідралічної активністю його мінералів. Чим менше фракція шлаку, тим більша частина хімічних складових прореагують з активатором твердіння і ґрунтовою водою. Тонке подрібнення доменного шлаку може істотно підвищити його гідралічну активність і привести до формування прихованої (потенційної активності). Приблизний склад доменного шлаку, який відповідає ГОСТ 3476-74, показаний в табл. 1.

Таблиця 1 – Склад доменного шлаку, %

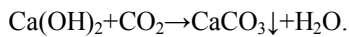
FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	CaO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MgO
1	9	18	1	45	5	–	11

Для створення ґрунтового композиту необхідно застосовувати мелений шлак з питомою поверхнею $S = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$. Дозування шлаку, згідно досліджень, повинна знаходитися в діапазоні 10...30 % від об'єму ґрунтового масиву, що закріплюється. При додаванні шлаку застосовується активатор для активізації пов'язаних хімічних сполук.

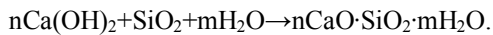
Процес твердіння при змішуванні ґрунту відбувається за рахунок взаємодії основних складових шлаку, таких як оксид кальцію CaO і оксид магнію MgO. Як правило оксид кальцію CaO у вільному вигляді у складі шлаку відсутній, тому реакції з ним протікають через реакції з мінералами, в яких міститься CaO. Шлак в своєму складі має такі системи мінералів як CaO - SiO₂, які представлені бредігідом α-2CaO·SiO₂ і псевдоволластонітом α-CaO·SiO₂, які мають в'язучі властивості і при реакції з водою твердіють.



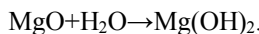
Так як компоненти в ґрунт подаються разом зі стисненим повітрям, то також триває тверднення суміші за рахунок реакції:



Вивільнена вода продовжує взаємодіяти з мінералами шлаку і таким чином при циклічних хімічних реакціях вивільняється зв'язана вода, ґрунтова маса твердіє, змінює свої фізико-механічні показники і зменшується її вологість. Продукти реакції гідратації, такі як Ca(OH)₂ реагують також з оксидом кремнію SiO₂, який у великих кількостях міститься як у самому шлаку, так і в ґрунтовій масі, в результаті виходить стійкий гідросилікат кальцію.



При внесенні шлаку в насичений водою ґрунт із ретельним змішуванням, вільний оксид MgO взаємодіє з ґрунтовою вологою, в тому числі і зв'язною водою. У результаті реакцій гідратації з часом утворюється сіль, що також зменшує вологість ґрунтового масиву:



Шлаки здатні самостійно тверднути за нормальних умов лише при істотному вмісті в них гідравлічно активних фаз, наприклад, таких як бредігід α-2CaO·SiO₂ і псевдоволластоніт α-CaO·SiO₂. Вміст таких фаз у шлаках, зазвичай, незначний, і вони за нормальних умов або при пропарюванні в умовах атмосферного тиску, не твердіють або твердіють дуже повільно і характеризуються невисокою міцністю.

При використанні гранульованих шлаків із високим вмістом скла їх твердіння можна викликати введенням добавок-активаторів, що сприяють прояву потенційних в'язучих властивостей шлакового скла. Розрізняють лужну, сульфатну та комбіновану активацію шлаків.

Як лужні активатори шлаку використовують вапно, а також натрієві та калієві лужні сполуки.

При сульфатній активації в шлаки вводиться добавка сульфату кальцію зазвичай у вигляді гіпсу або ангідриду.

Введення добавок-активаторів порушує термодинамічно нестійку рівновагу шлакового скла, сприяє його перебудові з утворенням гідросилікатів, гід-

роалюмосилікатів, що супроводжується твердінням і синтезом штучного каменю. При підвищеному вмісті лужної добавки, характерному для шлакоплавних в'язучих, можливе утворення лужних гідроалюмосилікатів, що сприяють твердненню шлаків.

Додавання до складу в'язучого каустичної соди NaOH, кальцинованої соди Na₂CO₃ або гіпсу CaSO₄·2H₂O і додаванні незначної кількості портландцементу сприяє залученню в хімічні процеси речовин, як із боку шлаку, так і з боку глинистого ґрунту.

Нами були досліджені зразки ґрунтового композиту, створеного в лабораторних умовах шляхом змішування доменного шлаку, сульфатного активатора (гіпсу CaSO₄·H₂O) і невеликої кількості портландцементу в співвідношенні 16:3:1 відповідно. Кількість в'язучого в ґрунтовому композиті складало не більше 20 % від обсягу ґрунту, що закріплюється. Як вихідний матеріал застосовувався насичений водою суглинок із такими основними фізико-механічними показниками: щільність γ=18,1 кН/м³; кут внутрішнього тертя φ = 13°; зчеплення С = 18 кПа; число пластичності I_L = 0,7; ступінь водонасичення S_r=0,95; модуль пружності E=4 МПа. Проводилися випробування на одновісьовий стиск та одноплощинний зсув, внаслідок чого отримана наступна залежність відносної деформації від осьового навантаження (рис. 1) і залежність дотичних напружень від осьових (рис. 2).



Рисунок 1 – Результати випробування глинокомпозиту в умовах одноосного стискання; 1–5 – результати випробувань по зразкам; с.зн. – середнє значення

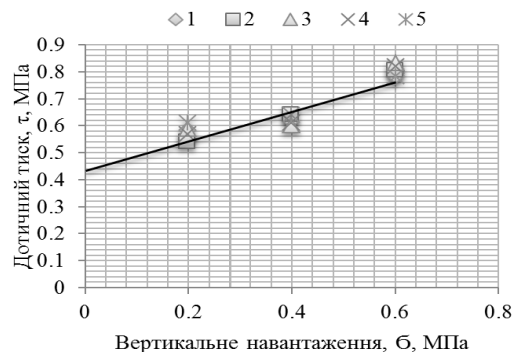


Рисунок 2 – Визначення параметрів міцності φ та с із використанням умов міцності Кулона за результатами дослідів на осьове стискання та одноплощинний зсув

У даному експерименті в результаті формування глинокомпозиту шляхом внесення стабілізатора на основі доменного шлаку отримали зростання модуля пружності в 20 разів, кут внутрішнього тертя зріс майже в два рази, зчеплення зросло в 2,4 рази, матеріал утратив пластичні властивості.

Для внесення шлаку в ґрунтовий масив на велику глибину найбільше підходить технологія глибинного змішування. Суть даної технології полягає в руйнуванні природної структури ґрунтового масиву спеціальним бурозмішувачем інструментом.

За способом подачі в'язучого розрізняють два методи сухий і мокрий.

У сухому методі в'язуча речовина подається у вигляді сухої суміші під тиском повітря до 20 атм.

У мокрому методі в'язуча речовина подається у вигляді водного розчину також під тиском до 20 атм. Вибір методу подачі в'язучого залежить від виду ґрунту і його вологості, у разі насиченого водою глинистого ґрунту ефективно застосовувати сухий метод; мокрий метод ефективно застосовувати в ґрунтах, вологості яких недостатньо для протікання процесів гідратації.

У процесі занурення робочого органу в ґрунт, відбувається роздрібнення і перемішування ґрунту з в'язучою речовиною, яка подається по пустотній штанзі.

Процес має п'ять основних етапів (рис. 3):

- 1) встановлення мішалки на робочу позицію;
- 2) змішувальний вал занурюється на необхідну для зміцнення ґрунту глибину, мішалки одночасно розмішують ґрунти;
- 3) по досягненню проектної глибини змішувач поступово виводять, одночасно заповнюючи простір сумішшю в'язучих матеріалів в зернистій або порошковій формі;
- 4) мішалка обертається в горизонтальній площині, змішуючи ґрунт з хімічною речовиною.

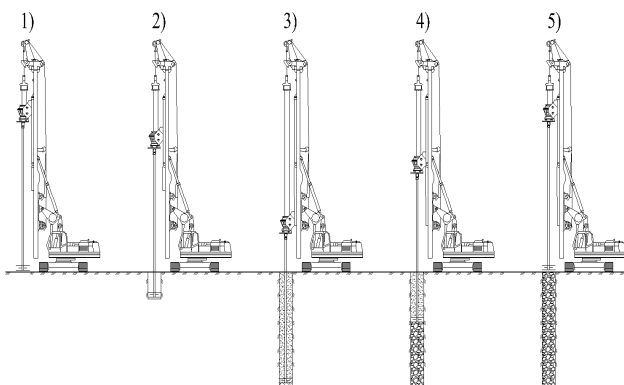


Рисунок 3 – Технологія глибинного змішування

Основною метою процесу глибинного змішування є рівномірне розсіювання в'язучих елементів у ґрунті в заданих геометричних кордонах, з метою швидкого і продуктивного отримання реакції гідра-

тації. Частота обертання поворотного пристрою (пристроїв) та інтенсивність занурення і витягання змішувача повинні бути налаштовані для отримання досить однорідного обробленого ґрунту. В результаті виходять колони закріпленого ґрунту, ефективний діаметр яких приймається рівним діаметру змішувального інструменту – 0,6...1,3 м.

Кореляція між характеристиками міцності лабораторних зразків і тими ж властивостями ґрунтового композиту, що виконувався в польових умовах, точно не визначена. Для цього необхідно виконати дослідження зразків, виконаних в польових умовах. Після проведення таких випробувань, може бути виведений стабільний коефіцієнт кореляції між лабораторними і польовими зразками. При цьому для виготовлення зразків потрібно використовувати той же тип змішування, в'язучу речовину і ту ж її кількість, що й на місцевості.

ВИСНОВКИ. Лабораторні дослідження показали достатньо обнадійливі результати використання шлаку як в'язучого матеріалу в геотехнічному будівництві.

Отриманий ґрунтовий композит показав високі фізико-механічні характеристики, що дозволяє використовувати його при статичних та динамічних впливах.

Укріплення слабкого, глинистого, насиченого водою ґрунту можливе без використання великої кількості дорогих матеріалів, але необхідно виконати додаткові польові випробування та провести кореляцію результатів дослідів, для більш точного розуміння властивостей модифікованого ґрунтового масиву.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lime stabilized column / B.B. Broms, P. Boman // Proc. 5th Asian Regional Conf. Indian Institute of Science, Bangalore, India, 1, 1975. – PP. 227–234.
2. Okumura T., Terashi M. Deep lime mixing method of stabilization of marine clays, Proc. 5th Asian Regional Conf. Indian Institute of Science, Bangalore, India, 1, 1975, pp. 69–75.
3. Prediction of strength development by cement admixture based on water content / T.S. Nagaraj et al. // Proc. 2nd Int. Conf. on n Ground Improvement Geosystems, Grouting and Deep Mixing, Tokyo, 1, 1996. – PP. 431–436.
4. Overconsolidated behavior of cement treated soft clay / M. Kamaluddin, A.S. Balasubramaniam // Proc. 10 Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engrg., Thailand, 1995. – PP. 407–412.
5. Engineering behavior of cement treated Bangkok soft clay / K. Uddin, A.S. Balasubramaniam, D.T. Bergado // Geotechnical Engineering Journal, Vol. 28, No. 1, 1997. – PP. 89–119.
6. Strength and Stiffness of Hong Kong Marine Deposits Mixed with Cement / J.H. Yin, C.K. Lai // Geotech. Eng., Vol. 29 (1), 1998. – PP. 29–44.

**THE FORMATION PROCESS OF THE COMPOSITE BASED ON WATER-SATURATED SOIL
AND BLAST FURNACE SLAG IN THE BASE OF UNDERGROUND CONSTRUCTIONS**

D. Tkach

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

prov. Kowalski 22a, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: tka4_dima@meta.ua

In this article, the author considered the mechanism of stabilization of soft soil. In this research, the author used blast furnace slag and a chemical activator for the grouting and showed the chemical equations for the soil stabilization process. Also in this article, the author showed the chemical composition of blast furnace slag. It is shown that the chemical activator is essential in the process of soil stabilization. The research results are presented for the new material, which was created in the laboratory. The material has received the new properties that can be used in the base of the underground construction. In this article, the author described the technology of deep mixing for soft soils.

Key words: soft soil, blast furnace slag, underground construction, deep mixing technology.

REFERENCES

1. Broms, B.B. and Boman, P. (1975), "Lime stabilized column", *Proc. 5th Asian Regional Conf.*, Bangalore, Indian Institute of Science, vol. 1, pp. 227–234.
2. Okumura, T. and Terashi, M. (1975), "Deep lime mixing method of stabilization of marine clays", *Proc. 5th Asian Regional Conf.*, Bangalore, Indian Institute of Science, vol. 1, pp. 69–75.
3. Nagaraj, T.S. (1996), "Prediction of strength development by cement admixture based on water content", *Proc. 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geo-systems, Grouting and Deep Mixing*, Tokyo, vol. 1, pp. 431–436.
4. Kamaluddin, M. and Balasubramaniam, A.S. (1995), "Overconsolidated behavior of cement treated soft clay", *Proc. 10 Asian Regional Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Thailand, 1995, pp. 407–412.
5. Uddin, K., Balasubramaniam, A.S. and Bergado, D.T. (1997), "Engineering behavior of cement treated Bangkok soft clay", *Geotechnical Engineering Journal*, vol. 28, no. 1, pp. 89–119.
6. Yin, J.H. and Lai, C.K. (1998), "Strength and Stiffness of Hong Kong Marine Deposits Mixed with Cement", *Geotechnical Engineering Journal*, vol. 29, no. 1, pp. 29–44.

Стаття надійшла 04.12.2013.