Зуєвська Н.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шайдецька Л.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Губашова В.Є.

ТОВ СП «Основа-Солсиф»

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУМЕНЕВОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ В ЗАТОРФОВАНОМУ СУГЛИНКУ

Технологія формування елементів струменевої цементациї передбачає застосування процесів зі зміни характеристик ґрунтів, створення на їхній основі матеріалів із необхідними властивостями й формування із зазначених матеріалів підземних елементів заданих форми й розмірів. У роботі розглянуті й досліджені процеси, що відбуваються під час виконання струменево-цементацийних елементів і їхній вплив на напружено-деформований стан навколишнього ґрунтового масиву. Такі процеси досліджені на прикладі будівельного об'єкта, де ґрунто-цементні елементи виконувалися в складних інженерно-геологічних умовах – заторфованих ґрунтах в м. Львові, Україна.

У статті проаналізовано вплив високонапірного струменя цементного розчину на навколишнє ґрунтове середовище, зокрема представлені результати дослідження фізико-механічних характеристик ґрунтів, що розташовані в зоні впливу ґрунто-цементних колон, які були виконані за струменевою технологією. Виділені зони з покращеними параметрами ґрунтів. Проведено аналіз чисельних змін показників фізико-механічних характеристик і визначено зони максимального впливу. Запропоновано використання дослідних даних наявності зон покращеного ґрунту для моделювання та дослідження зміни напружено-деформованого стану масиву ґрунту з ґрунто-цементними елементами підсилення при включенні в розрахунок покращених зон ґрунту, що в майбутньому дозволить зменшити кількість ґрунто-цементних елементів під час підсилення ґрунтових масивів.

Також у статті описаний відомий в літературі «кореневий ефект», коли в навколишньому ґрунтовому середовищі знаходяться горизонтальні лінзи ґрунто-цементної пульпи, що в підсумку приводить до отримання вищих деформаційних характеристик основи.

Ключові слова: струменова цементация, ґрунто-цементні колони, джет-колони, напружено-деформований стан, зона впливу.

Постановка проблеми. У прогресивному ритмі забудови міської території гостро стоїть питання виконання нового будівництва в безпосередній близькості до наявних будівель, що часто знаходяться в аварійному стані. А у зв'язку з тим, що технологія струменевої цементациї характеризується відсутністю ударних і вібраційних навантажень, а малогабаритні бурові машини дозволяють виконувати роботи в обмеженому просторі, однією з найпоширеніших областей застосування струменевого ін'єктування є підсилення основ фундаментів наявних будівель при будівництві й реконструкції.

Основною ідеєю технології струменевої цементациї є здійснення процесів із метою зміни характеристик ґрунтів, створення на їхній основі матеріалів із необхідними властивостями й фор-

мування із зазначених матеріалів підземних елементів заданих форми й розмірів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У світовій практиці широко відомі дослідження явища руйнування природної структури ґрунту струменевою цементациєю з проникненням у ґрунтовий масив, який потім перемішується та цементується розчином, що нагнітається, вченими G. Miki [1; 2], R. Tornaghi [3], M. Shibazaki [4; 5], J.L. Kauschinger [6; 7].

Дослідження технологічних параметрів і міцності отриманого ґрунто-цементного матеріалу були проведені І.І. Бройдом [8; 9; 10] й А.Г. Малініним [11; 12; 13; 14; 15].

Постановка завдання. Через відсутність на території України відповідної нормативної бази

інженери-геотехніки часто постають перед труднощами розуміння суті технології та особливостей її застосування під час посилення фундаментів. Внаслідок чого вивчення та дослідження процесів, що відбуваються під час виконання струменево-цементацийних елементів, та їхній вплив на напружено-деформований стан навколишнього ґрунтового масиву актуальний.

Поставленої мети можна досягти, дослідивши міцність матеріалу елементів, утворених у результаті виконання струменевої цементациї, а також експериментальним шляхом відстежити вплив формування елементів струменевої цементациї на фізико-механічні характеристики ґрунтового масиву.

Виклад основного матеріалу дослідження. На території України діапазон ґрунтів, в яких існує можливість виконувати струменево-цементацийні елементи різної форми, досить широкий.

У статті описується застосування технології струменевої цементациї в заторфованих суглинках м. Львова на прикладі об'єкту, виконаного спільним україно-французьким підприємством «Основа-Солсиф».

Проект підсилення, як і роботи із цього об'єкту, були виконані товариством з обмеженою відповідальністю сільськогосподарським підприємством «Основа-Солсиф» у 2006 році. Будівля, яка потребувала підсилення основи, належить Банку «Універсальний» і знаходиться в м. Львові по проспекту Шевченка, 27.

Рис. 1. Будівля Банку «Універсальний», м. Львів

Рис. 2. Схема підсилення фундаментів

Будівля, яка потребує реконструкції, побудована з цегли й каменю в 1909 році, чотириповерхова. Фундаменти під зовнішні й внутрішні стіни – стрічкові, цегляні на бетонних подушках товщиною 300 мм, ширина плит стрічкових фундаментів під зовнішніми й внутрішніми стінами дорівнює 2,6 м. Зовнішні й внутрішні стіни – опорні з повнотілої цегли.

У зв'язку з погіршенням фізико-механічних характеристик ґрунтів внаслідок їхнього водонасичення, будівля до реконструкції зазнавала значних вертикальних деформацій, про що свідчать вертикальні й похилі тріщини на стелях, у перекриттях і в опорних стінах будівлі (30–80 мм). Підземні води залягають на глибині 3,6–3,9 м від поверхні землі, безпосередньо під подошвою фундаменту.

Проектне рішення представляло влаштування джет-колон в основі фундаментів таким чином, щоб при обраному куті нахилу буріння колон були максимально наближені до осі фундаментів для рівномірного розподілу навантаження від будівлі на джет-колони. Проектний діаметр – 700 мм. Довжина джет-колон (7–8 м) приймалася в залежності від геологічних умов майданчика, так, щоб нижня частина колон заходила в мергель. Принцип і схема підсилення фундаментів колонами, сформованими струменевим ін'єктуванням, вказані на рис. 2.

Для дослідження впливу високонапірного струменя цементного розчину на навколишній

грунтовий масив у процесі виконання грунтоцементної колони в між колонному просторі були відібрані зразки ґрунту, що оточує колони, й виконані лабораторні тести (рис. 3).

Рис. 3. Фактичні розміри виконаної грунтоцементної колони (800, 750 і 910 мм)

Рис. 4. Схема відбору ґрунтових зразків в навколишньому масиві грунтоцементної колони

Кількість зразків, відібраних у прилеглої до джет-колон ґрунтовій області, склало 13 (рис. 4), ще 3 зразки було відібрано в природному (непорушеному) заляганні ґрунту для порівняння. На момент відбору кілець із ґрунтовим матеріалом колони № 34 і 35 мали вік 67 і 69 діб відповідно.

З огляду на те, що колони струменевої цементатії виконувалися в ґрунті із заторфованими прошарками, в навколишньому ґрунтовому масиві спостерігалися прошарки пульпи товщиною

20–30 см. Такі прошарки послужили додатковим армуванням ґрунту, й для визначення впливу їхнього утворення на ґрунт були відібрані додаткові 4 ґрунтових кільця на відстані 5 і 10 см вище й нижче прошарку (рис. 6, 7.).

У процесі досліджень також спостерігався вихід пульпи в ґрунт (насипний ґрунт) на відстані 1,5 м від поверхні колони струменевого ін'єктування та прошарки пульпи над залізобетонною плитою фундаменту на відстані 200–300 мм від краю колони струменевого ін'єктування (№ 35).

Рис. 6. Схема відбору ґрунтових зразків

Рис. 7. Прошарок пульпи над залізобетонною плитою фундаменту

Як визначальний фактор для порівняння зміни в ґрунтовому масиві була обрана щільність, для кількох відібраних зразків були також визначені зчеплення та кут внутрішнього тертя. Результати лабораторних випробувань занесені в таблицю 1.

За результатами інженерно-геологічних вишукувань до початку робіт із підсилення фундаментів було визначено, що ґрунт, який залягає під підшоною фундаменту – суглинок м'яко пластичний із домішками органічних речовин, із лінзами й прошарками слабо заторфованих глин, темно-сірих, коричнево-сірих. Результати лабораторних випробувань зразків непорушеної структури внесені до таблиці 2.

Результати зміни щільності ґрунтових зразків у залежності від відстані від поверхні колон струменевого ін'єктування показані на рис. 8.

На графіку спостерігається наступна залежність щільності від відстані: зона 0–150 мм від поверхні – зона розуцільнення ґрунту, яка відбувається в процесі, коли ґрунто-цементний матеріал знаходиться в рідкому стані; 150 мм – максимальна межа впливу струменя розчину

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості відібраних зразків ґрунту

Розташування зразків зверху-донизу	Номер проби*	Відстань від поверхні джет- колони, мм	Щільність, т/м ³	Вологість	Питоме зчеплення, МПа	Кут внутрішнього тертя, град
			γ	W	c	φ
1-й ряд	к6	50	1,81	0,333		
	7	100	1,87	0,310	0,038	8
	61	150	1,96	0,352	0,028	16
	11	200	1,89	0,420		
	к6л	250	1,83	0,392		
2-й ряд	14	50	1,71	0,399		
	110	100	1,73	0,860	0,020	19
	3	150	1,80	0,398		
3-й ряд	19	50	1,73	0,424		
	24	100	1,74	0,350	0,026	10
	43	150	1,75	0,369		
Між колонами № 34 і 35	5л	45	1,84	0,357		
	10л	45	1,82	0,358		
В області розташування пульпи	7	вгору на 50	1,58	0,246		
	1л	вгору на 100	1,56	0,244		
	л4	вниз на 50	1,58	0,221		
	2л	вниз на 100	1,49	0,276		

* розташування зразків вказано на рис. 4, 5

Таблиця 2

Фізико-механічні характеристики зразків ґрунту непорушеної структури

Розташування зразків зверху-вниз	Номер проби*	Відстань від поверхні джет- колон, мм	Щільність, т/м ³	Вологість	Питоме зчеплення, МПа	Кут внутрішнього тертя, град
			γ	W	c	φ
Зразок непорушеної структури	1	-	1,66	0,500	0,019	6
	2	-	1,68	0,481	-	-
	3	-	1,72	0,505	-	-

* розташування зразків вказано на рис. 4, 5

Рис. 8. Залежність зміни щільності ґрунтів від відстані від поверхні ґрунтоцементних колон

під час формування колони; 150–250 мм – зона зниження впливу високонапірного струменя на щільність ґрунту (характерна для 1-го ряду).

Сам процес формування виділених зон відбувається таким чином: під час проходження високонапірного струменя цементного розчину в ґрунті утворюється циліндричний елемент, заповнений ґрунто-цементною сумішшю, велика частина енергії струменя витрачається на руйнування та перемішування ґрунту. На межі утвореного елемента здатність струменя падає, але він ще здійснює деякий тиск на ґрунтовий масив, відбувається ущільнення навколишнього ґрунту на певну максимальну відстань впливу. Після формування струменево-цементацийного елемента й знаходження його в рідкому стані формується зона розуцільненого ґрунту на деякій відстані від поверхні колони до максимальної відстані впливу струменя на ґрунтовий масив. Слідом за межею максимального впливу відбувається зниження щільності до його початкових значень.

Слід зазначити, що таке явище спостерігалось лише на досліджуваній ділянці в заторфованому суглинку.

Під час порівняння значень ґрунту природного залягання та ґрунту із зон впливу високонапірного струменя розчину можна зробити наступні висновки:

- у зоні розуцільнення ґрунту зниження щільності суглинку в порівнянні з її максимальними значеннями відбувається від 2 до 8%, відповідно, з 1,96 т/м³ до 1,81 т/м³ і з 1,75 т/м³ до 1,73 т/м³ для 1-го і 3-го рядів відібраних ґрунтових зразків;

- у порівнянні із середнім значенням щільності суглинку з домішками органічних речовин,

відібраного при природному його заляганні – 1,69 т/м³, – максимальне збільшення щільності ґрунту після впливу на нього високонапірного струменя розчину склало 16%, мінімальне – 4% (відповідно 1,96 і 1,75 т/м³);

- щільність ґрунту, що знаходиться між двома виконаними колонами, збільшилася на 9% у порівнянні із середнім значенням щільності при природному заляганні (з 1,69 т/м³ до 1,84 т/м³);

- пульпа, витісняючи слабкі заторфовані прошарки ґрунту, ущільнила навколишній масив насипного шару на відстані 50 мм на 6% у порівнянні з ґрунтом, розташованим у розглянутій площині на відстані 100 мм (з 1,49 т/м³ до 1,58 т/м³).

Висновки. Особливість інженерно-геологічної будови майданчика, наявність у ґрунтовому масиві заторфованих прошарків дала можливість дослідити так званий «кореневий ефект», коли пульпа (відпрацьований цементний розчин зі зруйнованим ґрунтом) замість виходу на поверхню ґрунту заміщує слабкі прошарки навколишнього ґрунтового середовища. Причина такого явища полягає в тому, що прошарки торфу в суглинку відрізняються незначною міцністю та великою стискальністю, і залишкової енергії струменя цементного розчину, своєю чергою, досить, щоб витіснити слабкі прошарки ґрунту й заповнити їх ґрунто-цементною сумішшю.

Такий ефект, своєю чергою, вказує на додаткове армування ґрунтової основи горизонтальними лінзами ґрунто-цементної пульпи, що в підсумку приводить до отримання вищих деформаційних характеристик основи.

Результати дослідів, що представлені в роботі, показують можливість ефективного застосу-

вання технології струменевої цементації для підсилення заторфованих ґрунтів.

Дані про зміну фізико-механічних характеристик ґрунтів навколо ґрунто-цементних елементів дають можливість дослідити напру-

жено-деформований стан масиву й використовувати характеристики покращених зон в інженерних розрахунках, що дозволить зменшити витрати під час проектування підсилення основ.

Список літератури:

1. Miki G. Soil improvement by jet grouting. *Geotechnical Seminar on Soil Improvement Method*. Proc. 3rd Int. Singapore, 1985. P. 45–52.
2. Miki G., Nakanishi W. Technical progress of jet grouting method and its newest type. *Proceeding of the international conference on in situ soil and rock reinforcement*. Paris, 1984. P. 195–200.
3. Tornaghi R., Pettinaroli A. Design control criteria of jet grouting treatment. *Symposium International Sur l'Amélioration des Sols en Place*. Paris, 2004. P. 295–319.
4. Shibazaki M. State of practice of jet grouting. *Geotechnical Special Publication No. 120 : Grouting and Ground Treatment*. 2003. Vol. 1. P. 198–217.
5. Shibazaki M., Yokoo M., Yoshida H. Development oversized Jet Grouting. *Grouting and ground treatment : Proceedings of the Third International Conference*. February, 2003. Vol. 1. No. 120. P. 294–302.
6. Kauschinger J.L., Perry E.B., Hankour R. Jet grouting: state-of-the-practice. *Groutingsoil improvement and geosynthetics*. ASCE Geotech. Spec. Publ. Vol. 1. No. 30. P. 169–181.
7. Kauschinger J.L., Hankour R., Perry E.B. Methods to estimate composition of Jet Grout bodies. *Grouting soil improvement and geosynthetics*. Vol. 1. No. 30. P. 194–205.
8. Бройд И.И., Мельник Г.В. Ликвидация суфозионных полостей и областей разуплотненных ґрунтов с использованием струйной геотехнологии. *Основания, фундаменты и механика ґрунтов*. 1997. № 3. С. 12–15.
9. Бройд И.И. Струйная геотехнология : учебное пособие. Москва : Издательство ассоциации Строительных вузов, 2004. 448 с.
10. Бройд И.И. Нетрадиционные гидравлические прикладные задачи и технологии. Москва : Издательство ассоциации Строительных вузов, 2008. 256 с.
11. Малинин А.Г. Струйная цементация ґрунтов : монография. Пермь : Пресстайм, 2007. 168 с.
12. Малинин А.Г. Струйная цементация ґрунтов в городском строительстве. *Геотехническая компания GeoSet* : веб-сайт. URL: https://jet-grouting.info/wp-content/uploads/2019/02/JET-GROUTING_book_Malinin_AG.pdf.
13. Малинин А.Г. Ограждение котлованов с помощью технологии струйной цементации ґрунта. *DocPlayer* : веб-сайт. URL: <https://docplayer.ru/34255710-Ograzhdenie-kotlovanov-s-pomoshchyu-tehnologii-struynoy-cementacii-grunta.html>.
14. Малинин А.Г., Гладков И.Л. Экспериментальные исследования диаметра ґрунтоцементных колон в различных ґрунтах. *Геотехническая компания GeoSet* : веб-сайт. URL: <https://jet-grouting.info/wp-content/uploads/2019/02/eksperimentalnyye-issledovaniya-diametra-gruntocementnyh-kolonn-v-razlichnyh-gruntah.pdf>.
15. Малинин А.Г., Гладков И.Л., Жемчугов А.А. Исследование прочностных и деформационных характеристик ґрунтоцемента в зависимости от технологических параметров струйной цементации. *Промышленное и гражданское строительство*. 2011. № 6. С. 53–55.

Zuievskaya N.V., Shaidetska L.V., Gubashova V.Ye. PECULIARITIES OF FORMATION OF THE JET-GROUTED ELEMENTS IN PEAT CLAY LOAM

The technology of forming elements of jet grouting involves the application of processes to change the characteristics of soils, the creation of materials based on them with the necessary properties and the formation of the specified materials underground elements of the given shape and size. The processes that occur during the execution of jet-grouted elements and their influence on the stress-strain state of the surrounding soil mass are considered and investigated. These processes are considered as an example of a construction site where soil-cement elements were executed in difficult engineering-geological conditions – peat soils in Lviv, Ukraine.

The influence of high-pressure jet of cement solution on the environment of the soil is analyzed in the article, namely, the results of the study of the physical and mechanical characteristics of soils located in the area of influence of soil-cement columns, which were performed by jet grouting technology, are presented. Highlighted areas with improved soil parameters. The analysis of the numerical changes in the indicators of physical and mechanical characteristics is carried out and the zones of maximum influence are determined. It is suggested to use the experimental data of the presence of improved soil zones for modeling and investigation of the change of the stress-strain state of the soil massif with soil-cement elements of reinforcement, when included in the calculation of improved soil zones, which in the future will allow to reduce the number of soil-cement elements.

The article also describes the well-known “root effect” in the literature when horizontal soil-cement spoil lenses are found in the soil environment, which ultimately results in higher deformation characteristics of the soil basement.

Key words: jet grouting, soil-cement columns, jet columns, stress-strain state, impact zone.