

УДК 624.131.37

DOI 10.52167/1609-1817-2025-138-3-77-86

М.Я. Квашнин, М.Н. Махметова, В.Г. Солоненко, Н. Ивановцева

Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Казахстан

E-mail: m.narzankul@alt.edu.kz

ПРОЧНОСТЬ СУГЛИНКОВ, ЗАКРЕПЛЕННЫХ МЕТОДОМ ОДНОРАСТВОРНОЙ СИЛИКАТИЗАЦИИ

Аннотация. Возведение инфраструктуры подземных объектов транспортной отрасли в городских условиях должно сопровождаться мероприятиями, которые должны обеспечивать устойчивость прилегающих грунтовых массивов, подпорных стен, зданий, сооружений и других различных коммуникаций. Эти мероприятия состоят из применения, как специальных технологий подземного строительства, так и различных способов и методов усиления прилегающих фундаментов зданий и сооружений.

Как правило, сложные инженерно-геологические условия, наличие рыхлых песчаных и неустойчивых глинистых грунтов, плывунов и мягких пластичных глин, требуют применения специальных методов и способов подземного строительства при проведении строительных работ. Инженерно-геологические и гидрогеологические условия площадки строительства в значительной степени влияют на выбор того или иного способа закрепления грунтов, а также и водопонижения. По сравнению с другими способами, инъекционные способы усиления грунтов оснований, отличаются высокой степенью механизации всех технологических операций, возможностью закрепления грунтов до заданных параметров, относительно малыми стоимостью и трудоёмкостью производства работ. Сущность данных способов закрепления грунтов заключается в заполнении пустот и трещин массива грунта раствором, повышающим его механические свойства и снижающим его водопроницаемость.

В данной работе изложены результаты проверки эффективности закрепления грунтов способом однорастворной однокомпонентной силикатизации и обоснована возможность применения данного метода в районе строительства комплекса «Garden Ville» г. Алматы.

Ключевые слова: химическое закрепление, прочность грунта, глинистый грунт, песчаный грунт, коэффициент фильтрации.

Введение.

В местах распространения слабых глинистых и лессовых просадочных грунтов строительство гражданских и промышленных зданий и сооружений вызывает определенные трудности по причине недостаточной прочности и устойчивости оснований, сложенных из этих грунтов, при воздействии нагрузки от сооружения. Для усиления грунтов необходимо производить специальные мероприятия, которые зависят от геологических и гидрологических условий площадки строительства, технической оснащенности подрядчика и экономических возможностей заказчика. В качестве мероприятий по закреплению можно применить: уплотнение грунта тяжелыми трамбовками, закрепление грунта цементирующими или химическими составами.

Уплотнение грунта тяжелыми трамбовками дает достаточно положительный эффект при строительстве относительно «легких» сооружений в местностях с ровным рельефом. Однако, практически не приемлемо в горных и предгорных районах при

возведении «тяжелых» многоэтажных зданий. Закрепление грунта способом цементации без нарушения его структуры возможно только в грунтах с пустотами большого размера, трещиноватых скальных, крупнообломочных и песчаных с высоким коэффициентом фильтрации.

Технология закрепления грунтов оснований химическими составами включает два направления:

- реагенты в виде растворов или газов вводятся под давлением в грунты оснований в условиях естественного залегания без нарушения структуры (инъекционное химическое закрепление);

- закрепление грунтов осуществляется механическим перемешиванием грунта с цементами или другими реагентами или добавками с нарушением их естественной структуры (буромесительное химическое закрепление грунтов).

Буромесительное химическое закрепление грунтов можно использовать для всех видов песчаных и глинистых грунтов с различными коэффициентами фильтрации, но при производстве работ, данный метод является достаточно дорогостоящим и трудоемким. Инъекционное закрепление используется в грунтах, которые обладают значительной водопроницаемостью, а именно, в песчаных, крупнообломочных, трещиноватых скальных и полускальных грунтах, просадочных лессовых грунтах.

Инъекционное химическое закрепление значительно увеличивает механическую прочность и устойчивость массива, снижает водопроницаемость и сжимаемость грунтов, исключает возникновение явлений просадочности при замачивании лессовых грунтов.

Материалы и методы.

Основой инъекционного химического закрепления грунтов является конденсация органических и неорганических крепителей (полимеров) в процессе их взаимодействии с отвердителями (коагулянтами), которое заключается в отверждении полимеров в порах и трещинах грунтов, что обеспечивает повышение прочностных и деформационных характеристик закрепляемых грунтов.

Крепителями являются водные растворы силиката натрия $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ (неорганические полимеры), а также органические полимеры (растворы карбамидных и других синтетических смол). Различные неорганические и органические кислоты, соли и химические добавки к ним, а также некоторые газы используют в качестве отвердителей.

Закрепление грунтов на основе цементных растворов называется цементацией, на основе карбамидных смол - смолизацией, на основе растворов силиката натрия, независимо от применяемых отвердителей, - силикатизацией.

Смеси растворов отвердителей и крепителей в рабочих концентрациях при однорастворном химическом закреплении грунтов называются гелеобразующими смесями.

В случае закреплении просадочных грунтов силикат натрия должен иметь модуль упругости (деформации) в пределах 2,7 – 3 МПа и плотность 1,13 - 1,2 г/см³.

С технической позиции способы инъекционного химического закрепления грунтов включают в себя нагнетание под давлением в поры отверждающихся и закрепляющих грунты различных химических реагентов в виде:

- двухрастворного способа (два отдельно нагнетаемых раствора);
- однорастворного одно или двухкомпонентного способа (одного раствора, состоящего из двух компонентов).

С использованием сжатого воздуха из специальных пневмобаков или газовых баллонов, производится нагнетание закрепляющих реагентов в грунты оснований

насосами, по технологиям с вертикальным и наклонным заглублением сверху вниз инъекционных скважин или инъекторов, как с поверхности земли, так и с отмолок или из внутренних помещений (условно-вертикальная технология).

Для геологических условий предгорных зон г. Алматы наиболее целесообразным способом закрепления грунтов является однорастворная однокомпонентная силикатизация, основой которой является раствор силиката натрия.

В лаборатории «Геотехники» КазГАСА, для проверки эффективности закрепления грунтов способом однорастворной однокомпонентной силикатизации, были проведены лабораторные испытания. просадочного суглинка из основания подпорной стенки природного склона в районе строительства комплекса «Garden Ville» г. Алматы плотностью 1,643 г/см³, влажностью 16,7% [1-2].

По схеме, представленной на рисунке 1 [1] был собран прибор для лабораторного закрепления просадочных лессовых грунтов, общий вид которого показан на рисунке 2.

Алгоритм технологии закрепления грунтов в приборе состоит из следующих этапов:

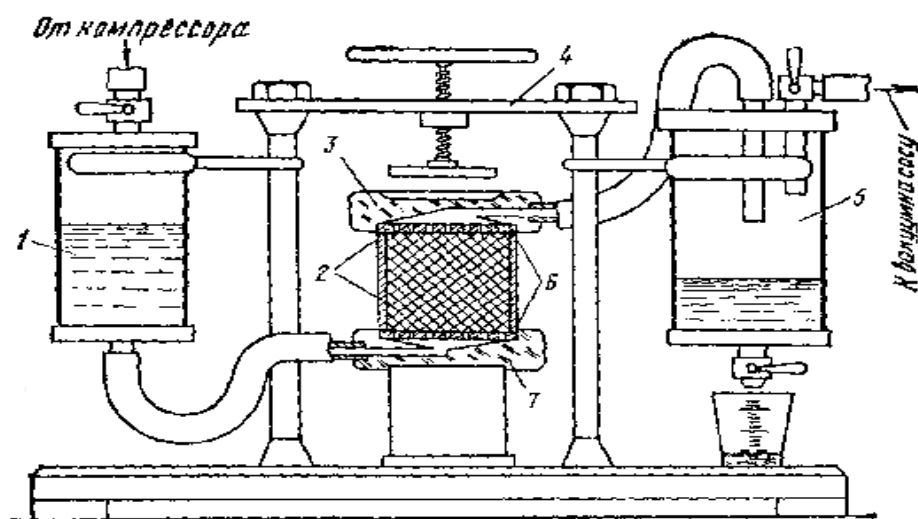
- образец грунта располагается между нижней и верхней крышками колбы. Во время инъекции раствором грунт предохраняется от разрушения решетками, расположенными снизу и сверху образца.

- гибким шлангом к нижней части крышки присоединяется колба с силикатом натрия ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n \text{SiO}_2$), а к верхней – колба с фильтратом. Струбцинами, резиновыми прокладками и шлангами образец герметически соединяется с обеими колбами;

- сжатый воздух от компрессора поступает в колбу и выталкивает силикат в грунт. Пройдя через грунт силикат попадает в пустую колбу и в стакан.

Следует отметить, что силикат натрия разбавлялся водой до плотности 1,14 г/см³.

Температура закрепляющего раствора была около 20°C, объем закрепляющего раствора составил 15 объемов самого образца, а скорость нагнетания не превышала 13 см³/мин. После закрепления образцы выдерживались в течение 2-х суток в воздушно-влажностной среде (в эксикаторе), а затем испытывались на сжатие и на сдвиг (рисунок 3).



1 - сосуд с раствором; 2 - закрепляемый грунт; 3 и 7 – верхняя и нижняя крышки; 4 – крепежный элемент; 5 - сосуд с фильтратом; 6 - прокладки из резины

Рисунок 1 - Схема прибора для лабораторного закрепления просадочных лессовых грунтов по методике Ростовского Промстрой НИИ проекта



Рисунок 2 – Общий вид прибора для лабораторного закрепления просадочных лессовых грунтов



а)

б)

а – испытание на сжатие; б – испытание на сдвиг

Рисунок 3 – Испытание закрепленных образцов грунта на сжатие и на сдвиг

Результаты.

Для измерения усилий при испытании образцов грунта на сжатие и сдвиг использовался образцовый динамометр ДОСМ-3-1 с индикатором часового типа ИЧ-10 I-го класса точности, график тарировки которого при нагружении и разгрузке показан на рисунке 4. Результаты испытаний образцов грунта на одноосное сжатие представлены в таблице 1. Как видно из табл.1 сопротивление грунта осевому сжатию через двое суток после силикатизации увеличилось почти в 4 раза практически для всех образцов.

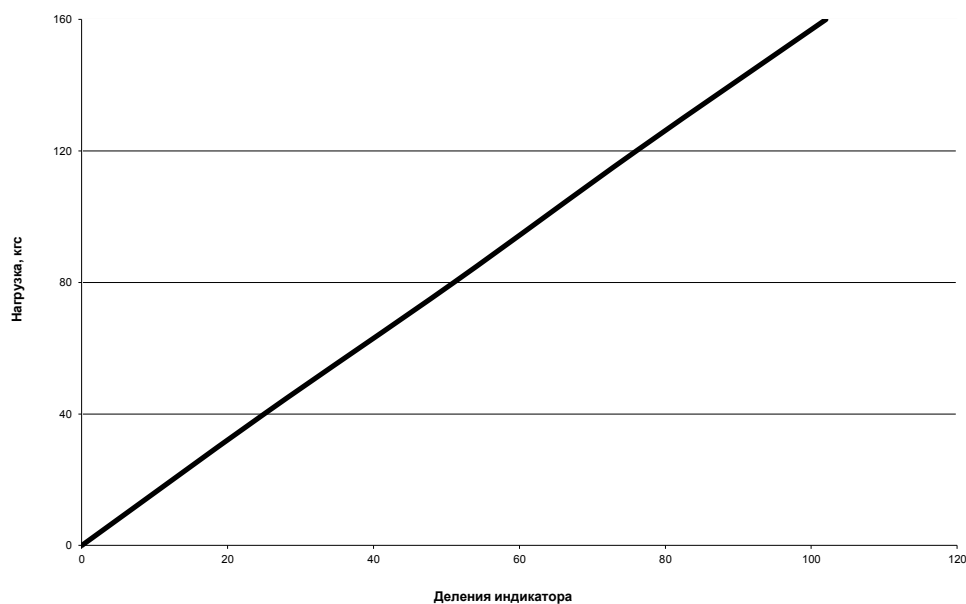


Рисунок 4 – Тарировочная кривая рабочего динамометра

Таблица 1 – Результаты испытаний грунта на одноосное сжатие

Состояние грунта	№ образца	Масса образца, г	Габариты образца, см			Плотность, г/см ³	Показания динамометра, мм	Разрушающее усилие, кгс	Предельное сопротивление, кПа
			a	b	h				
Силикатизированный грунт									
влажное	1	67,92	3.5	3.5	3	1,85	0,42	61,74	504
влажное	2	50,43	3	2.9	3.2	1,81	0,33	48,51	557
влажное	3	69,84	3.5	3	3.6	1,85	0,38	55,86	532
Несиликатизированный грунт									
влажное	4	47,63	3	3	3	1,76	0,08	11,76	131

Обсуждение.

Так как в практике строительства, при расчете устойчивости грунтовых массивов, используются параметры сопротивления сдвигу (угол внутреннего трения φ и сцепление C), были проведены испытания на сдвиг в кинематическом режиме нагружения на сдвиговом приборе ВСВ-25 [3-5].

Испытание грунта на сдвиговом приборе выполнены в соответствии с ГОСТ 12248-2010 [2]. По результатам испытаний получены значения угла внутреннего трения φ и сцепления C для состояния грунта до и после силикатизации [6-8].

Отобранный грунт испытывали при нормальных напряжениях 100, 300, 500 кПа. Результаты испытаний образцов грунта на сдвиг до и после силикатизации представлены на рисунках 5-7. По диаграмме предельного состояния грунта до силикатизации получено: угол внутреннего трения $\varphi=17.5^\circ$, удельное сцепление $C=82,9\text{кПа}$ (рисунок 5, б). После силикатизации, соответственно, $\varphi=18,4^\circ$, $C=115,7\text{кПа}$ [9,10].

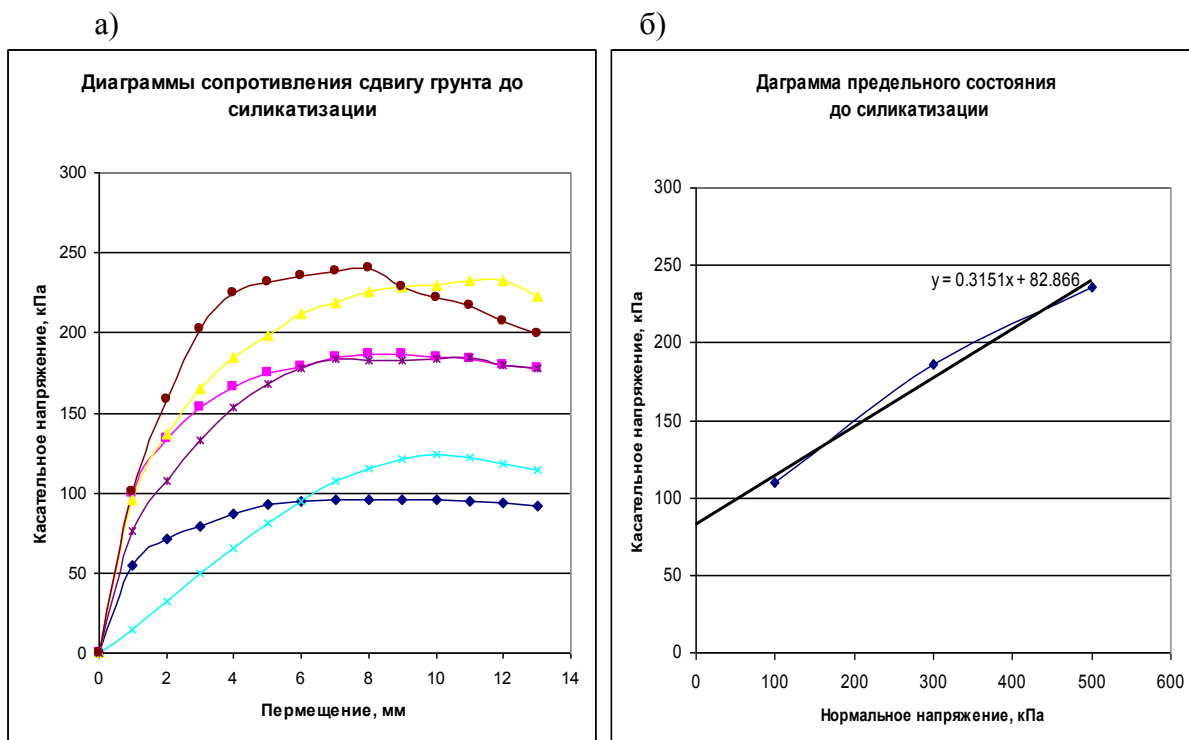


Рисунок 5 – Диаграммы сопротивления грунта сдвигу до силикатизации

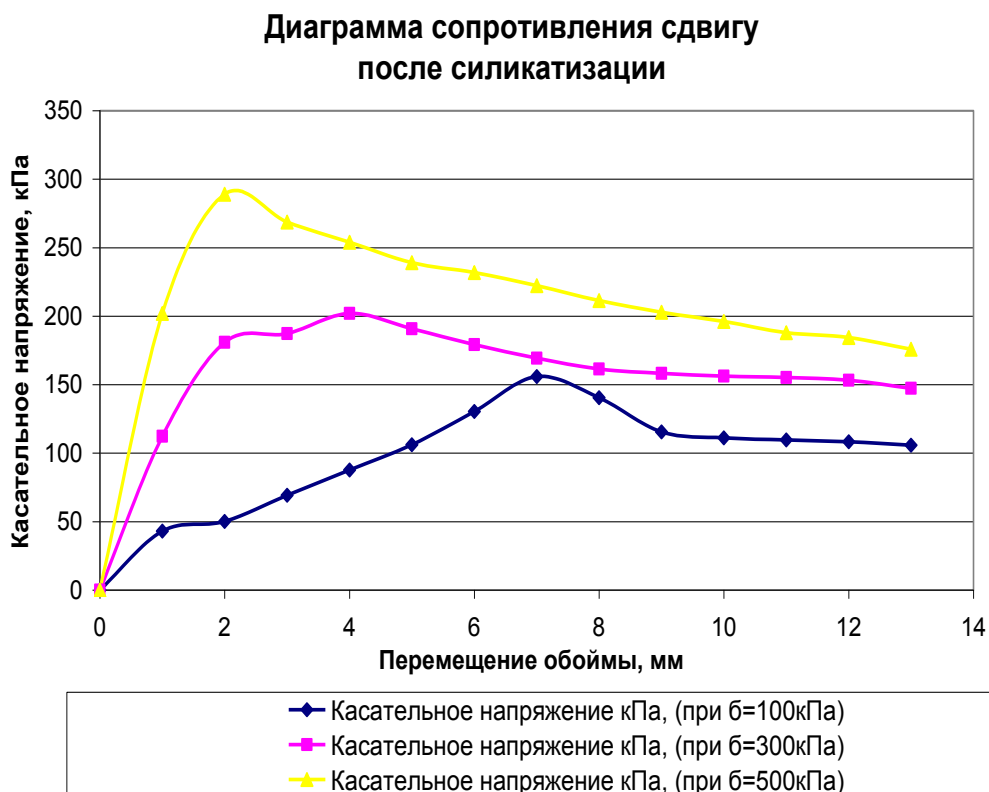


Рисунок 6 – Диаграмма сопротивления грунта сдвигу до силикатизации

Диаграмма предельного состояния после силикатизации

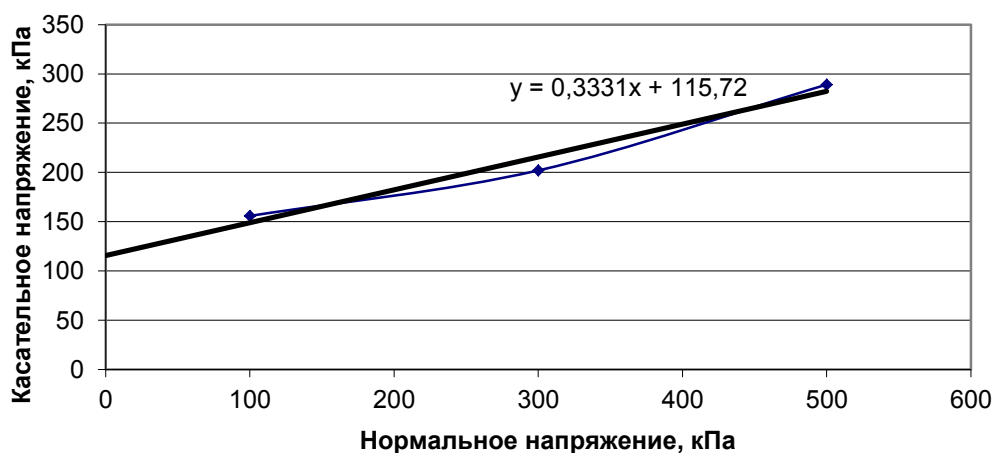


Рисунок 7 – Диаграмма предельного состояния грунта после силикатизации

Заключение.

В завершение к вышеизложенному можно сделать следующие выводы:

- лабораторными исследованиями лессового грунта I типа просадочности, выявлено, что его механические характеристики могут быть улучшены способами однорастворной силикатизации;
- основными показателями процесса силикатизации являются изменения прочности и фильтрационной способности грунта. Сопротивление грунта одноосному сжатию через двое суток после силикатизации увеличилось (в 3-4 раза).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Пособие по химическому закреплению грунтов инъекций в промышленном и гражданском строительстве (к СНиП 3.02.01-83): утв. 01.02.1985/Госстрой СССР, НИИОСП. - М.: Стройиздат, 1986. - 127 с.

[2] ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости», НИИОСП им. Н.М.Герсеванова. - М.: Стройиздат, 2010. - 69 с.

[3] Махметова Н.М., Солоненко В.Г. Метод конечных элементов в задачах транспортного строительства: учебное пособие/Н.М. Махметова, В.Г. Солоненко. – Алматы: КазАТК, 2013. – 441 с.

[4] Агапов В.П., Николаев В.Б., Голованов Р.О. Расчет железобетонных плит, усиленных композитными тканями, методом конечных элементов. Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, МГСУ, 2018 - 14(2), с. 120-131. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-2-120-131>

[5] Ivan S. Bondar, Michael Ya. Kvashnin, Dinara Aldekeyeva, Saule Bekzhanova, Aliya Izbaïrova, Assem Akbayeva. Influence of the deformed state of a road bridge on operational safety. Influence of the deformed state of a road bridge on operational safety. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (7 (116)), Pages 29–34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255275>

[6] ТКП EN 1992-2-2009 (02250) Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 2. Железобетонные мосты. Правила проектирования и расчета. 2009 – 96с.

[7] Бондарь И.С., Салман Дауд Салман Аль-Дулайми, Алдекеева Д.Т., Имамбаева Р.С. Исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных балок, армированных углепластиков. Вестник КазГАСА. – Алматы, 2021. – № 4(82). – С. 101-110. <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2021.4-05>

[8] Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных расчетах пространственных железобетонных конструкций/Клованич С.Ф., Безушко Д.И. – Одесса: изд-во ОНМУ, 2009. – 89 с

[9] Zienkiewicz O.C. and Taylor R.L. (2005). The Finite Element for Solid and Structural. Mechanics. Sixth edition. McGraw-Hill, 631.

[10] V. Solonenko, N. Mahmetova, V. Nikolaev, S. Bekzhanova, M. Ya. Kvashnin, I.S. Bondar, S. Mirzabaev. Analysis of the stress-strain state of travel pipes with the use of hardware and software complex. News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. Volume 1, Number 439 (2020), Pages 181 – 188, <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.22>

REFERENCES

[1] Manual on chemical consolidation of injection soils in industrial and civil construction (to SNiP 3.02.01-83): approved on 01.02.1985/Gosstroy USSR, NIIOSP. - Moscow: Stroyizdat, 1986. – 127 p.

[2] GOST 12248-2010 “Soils. Methods of laboratory determination of strength and deformability characteristics”, N.M.Gersevanov NIIOSP. - Moscow: Stroyizdat, 2010. – 69 p.

[3] Makhmetova N.M., Solonenko V.G. Metod konechnykh ehlementov v zadachakh-transportnogo stroitelstva [In Russian: Method of finite elements in the problems of transport construction. Textbook]//Almaty: KazATC, 2013. – 441s.

[4] Agapov V.P., Nikolaev V.B., Golovanov R.O. Raschet zhelezobetonnykh plit, usilennykh kompozitnymi tkaniami, metodom konechnykh elementov [In Russian: Calculation of reinforced concrete slabs reinforced with composite fabrics by finite element method. Construction mechanics of engineering structures and constructions], MSCU, 2018 - 14(2), pp. 120-131. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-2-120-131>

[5] Ivan S. Bondar, Michael Ya. Kvashnin, Dinara Aldekeyeva, Saule Bekzhanova, Aliya Izbaierova, Assem Akbayeva. Influence of the deformed state of a road bridge on operational safety. Influence of the deformed state of a road bridge on operational safety. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (7 (116)), Pages 29–34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255275>

[6] ТКП EN 1992-2-2009 (02250) Еврокод 2. [In Russian: ТКП EN 1992-2-2009 (02250) Eurocode 2. Design of Reinforced Concrete Structures. Part 2. Reinforced concrete bridges. Design and calculation rules], 2009. – 96с.

[7] Bondar I.S., Salman Daud Salman Al-Dulaimi, Aldekeyeva D.T., Imambaeva R.S. Issledovaniia napriazhenno-deformirovannogo sostoiianiia zhelezobetonnykh balok, armirovannykh ugleplastikami [In Russian: Studies of the stress-strain state of reinforced concrete beams reinforced with carbon plastics], Bulletin of the KazGASA. - Almaty, 2021. - № 4(82). - P. 101-110. <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2021.4-05>

[8] Klovaniich S.F. Metod konechnykh elementov v nelineinykh raschetakh prostranstvennykh zhelezobetonnykh konstruksii [In Russian: Method of finite elements in the nonlinear calculations of spatial reinforced concrete structures. Textbook for students and

postgraduates of railway transport universities]//Odessa: publishing house ONMU, 2009. -89 s.

[9] Zienkiewicz O.C. and Taylor R.L. (2005). The Finite Element for Solid and Structural. Mechanics. Sixth edition. McGraw-Hill, 631p.

[10] V. Solonenko, N. Mahmetova, V. Nikolaev, S. Bekzhanova, M. Ya. Kvashnin, I.S. Bondar, S. Mirzabaev. Analysis of the stress-strain state of travel pipes with the use of hardware and software complex. News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. Volume 1, Number 439 (2020), Pages 181 – 188, <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.22>

Михаил Квашнин, т.ғ.к., доцент, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Қазақстан, k.michail@alt.edu.kz

Нарзанкуль Махметова, т.ғ.д., профессор, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Қазақстан, n.mahmetova@alt.edu.kz

Владимир Солоненко, т.ғ.д., профессор, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Қазақстан, s.vladimir@alt.edu.kz

Наталья Ивановцева, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Қазақстан, i.natalia@alt.edu.kz

БЕКІТІЛГЕН САЗДАҚТАРДЫҢ БЕРІКТІГІ БІР ЕРІТІНДІ СИЛИКАТТАНДЫРУ ӘДІСІМЕН

Аңдатпа. Қалалық жағдайларда көлік саласының жерасты объектілерінің инфрақұрылымын салу іргелес топырақ массивтерінің, тіреу қабырғаларының, ғимараттардың, құрылыстардың және басқа да түрлі коммуникациялардың тұрақтылығын қамтамасыз ететін іс-шаралармен сүйемелденуі тиіс. Бұл іс-шаралар жерасты құрылысының арнайы технологияларын, сондай-ақ ғимараттар мен құрылыстардың іргелес іргетастарын нығайтудың әртүрлі әдістері мен әдістерін қолданудан тұрады.

Әдетте, күрделі инженерлік-геологиялық жағдайлар, борпылдақ құмды және тұрақсыз сазды топырақтардың, жүзгіштердің және жұмсақ пластикалық саздардың болуы құрылыс жұмыстарын жүргізу кезінде жерасты құрылысының арнайы әдістерін қолдануды талап етеді. Құрылыс алаңының инженерлік-геологиялық және гидрогеологиялық жағдайлары топырақты бекітудің белгілі бір әдісін таңдауға, сондай-ақ суды төмендетуге айтарлықтай әсер етеді. Басқа әдістермен салыстырғанда, негіздердің топырақтарын күшейтудің инъекциялық әдістері барлық технологиялық операцияларды механикаландырудың жоғары деңгейімен, топырақты берілген параметрлерге бекіту мүмкіндігімен, салыстырмалы түрде төмен шығындармен және жұмыс өндірісінің күрделілігімен ерекшеленеді. Топырақты бекітудің бұл әдістерінің мәні топырақ массивінің бос жерлері мен жарықтарын оның механикалық қасиеттерін арттыратын және су өткізгіштігін төмендететін ерітіндімен толтыру болып табылады.

Бұл жұмыста топырақты бір ерітінділі бір компонентті силикаттандыру әдісімен бекітудің тиімділігін тексеру нәтижелері баяндалған және осы әдісті Алматы қаласының "Garden Ville" кешенінің құрылыс ауданында қолдану мүмкіндігі негізделген.

Түйінді сөздер: химиялық бекіту, топырақтың беріктігі, сазды топырақ, құмды топырақ, сүзу коэффициенті.

Mikhail Kvashnin, candidate of technical sciences, associate professor, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan, k.michail@alt.edu.kz

Narzankul Makhmetova, doctor of technical sciences, professor, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan, n.mahmetova@alt.edu.kz

Vladimir Solonenko, doctor of technical sciences, professor, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan, s.vladimir@alt.edu.kz

Ivanovtseva Natalia, candidate of technical sciences, associate professor, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan, i.natalia@alt.edu.kz

STRENGTH OF LOAMS CONSOLIDATED BY THE METHOD OF SINGLE-SOLUTION SILICIFICATION

Abstract. Erection of underground infrastructure of transportation facilities in urban areas should be accompanied by measures that should ensure the stability of adjacent soil massifs, retaining walls, buildings, structures and other various communications. These measures consist of application of both special technologies of underground construction and various methods and techniques of reinforcement of adjacent foundations of buildings and structures.

As a rule, complicated engineering-geological conditions, presence of loose sandy and unstable clay soils, floating and soft plastic clays, require application of special methods and techniques of underground construction during construction works. Engineering-geological and hydrogeological conditions of the construction site significantly influence the choice of one or another method of soil consolidation, as well as dewatering. Compared to other methods, injection methods of reinforcing soils of bases are characterized by a high degree of mechanization of all technological operations, the possibility of fixing soils to the specified parameters, relatively low cost and labor intensity of works. The essence of these methods of soil consolidation is to fill voids and cracks of the soil mass with a solution that increases its mechanical properties and reduces its water permeability.

This paper presents the results of testing the effectiveness of soil consolidation by single-solution single-component silicification method and substantiates the possibility of using this method in the area of construction of the complex “Garden Ville” in Almaty.

Keywords: chemical consolidation, soil strength, clayey soil, sandy soil, filtration coefficient.

Поступила: 18 ноябрь 2024 года
Рецензирована: 27 март 2025 года
Принята: 02 апрель 2025 года