

УДК 624.138

© А. А. Кузнецов, ведущий инженер-геотехник
© С. А. Щербинин, руководитель центра геотехнической экспертизы (ООО «Градрешения», Тюмень, Россия)
E-mail: aleks1998-98@mail.ru, Shcherbinin.sva@gmail.com
© С. В. Ланько, канд. техн. наук, доцент (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: s.v.lanko@yandex.ru
© А. А. Жемчугов, директор по производству (ООО «ГеоСпецТехнология», Пермь, Россия)
E-mail: aazhemchugov@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-1-44-54

© A. A. Kuznetsov, senior geotechnical engineer
© S. A. Shcherbinin, Head of Geotechnical Expertise Department (LLC «Gradreshenia», Tyumen, Russia)
E-mail: aleks1998-98@mail.ru, Shcherbinin.sva@gmail.com
© S. V. Lanko, PhD in Sci. Tech., Associate Professor (Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)
E-mail: s.v.lanko@yandex.ru
© A. A. Zhemchugov, Operations Director (LLC «GeoSpetsTekhnologiya», Perm, Russia)
E-mail: aazhemchugov@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ОСНОВАНИЯ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ КОЛОННАМИ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ

INCREASING THE RIGIDITY OF A PILE FOUNDATION USING SOIL-CEMENT COLUMNS: NUMERICAL MODELING AND EXPERIMENTAL VERIFICATION

Рассмотрен способ повышения жесткости основания свайного фундамента путем локального армирования грунта основания грунтоцементными колоннами на примере строительства многоквартирного жилого дома. Проведен анализ различных схем моделирования усиления линзы грунта в ПК Midas GTS NX. Описана технология отбора кернов с глубины с целью экспериментального подтверждения проектных значений модуля деформации грунтоцементных колонн. Описан метод расчета приведенного модуля деформации армированного грунта основания.

Ключевые слова: армирование грунта, струйная цементация, приведенный модуль деформации.

This article discusses a method for increasing the rigidity of a pile foundation base by locally reinforcing the foundation soil with soil-cement columns, using the construction of a multi-apartment residential building as a case study. An analysis of various modeling schemes for reinforcing soil pockets was performed using the Midas GTS NX software package. The technology for retrieving core samples from depth is described, aimed at the experimental confirmation of the design deformation modulus values of the soil-cement columns. A method for calculating the reduced deformation modulus of the reinforced foundation soil is described.

Keywords: soil reinforcement, jet grouting, reduced modulus of deformation.

Введение

Для предотвращения ненормативных осадок зданий возникает необходимость технических решений, направленных на повышение деформационных характеристик грунта основания. Одним из таких решений

является метод армирования грунта жесткими вертикальными элементами.

Сущность вертикального армирования заключается в формировании в массиве слабого грунта более жестких по сравнению с природным основанием вертикаль-

ных армирующих элементов, не имеющих конструктивной связи с фундаментом. Эти элементы работают совместно с вмещающей средой, воспринимая как сжимающие, так и растягивающие напряжения, что приводит к существенному повышению прочностных и деформационных характеристик грунта основания.

Расчет армированных оснований может выполняться с использованием ряда методов, представленных в научной литературе. В качестве аналитических подходов применяются метод приведенного модуля деформации [1–3] и метод условного фундамента [4, 5].

Существует несколько подходов к определению приведенного модуля деформации [2].

Метод равных деформаций. Приведенный модуль деформации определяется по формуле

$$\langle E \rangle = \frac{E_{гр} A_{гр} + E_{св} A_{св}}{A}, \quad (1)$$

где $E_{гр}$ и $E_{св}$ — модули деформации грунта и грунтоцементных колонн («свай») соответственно; $A_{гр}$ и $A_{св}$ — площади поперечного сечения грунта и грунтоцементных колонн соответственно; A — общая площадь грунта и грунтоцементных колонн.

Полидисперсная модель с цилиндрическими включениями. Данный метод основан на постоянстве отношения радиусов цилиндров и вмещающей среды. Радиус цилиндров при этом переменная величина.

$$E = mE_{св} + nE_{гр} + \frac{4nm(v_{св} - v_{гр})^2 G_{гр}}{m \frac{G_{гр}}{K_{св} + \frac{G_{св}}{3}} + n \frac{G_{гр}}{K_{гр} + \frac{G_{св}}{3}} + 1}, \quad (2)$$

где m — объемное содержание грунтоцементных колонн; n — объемное содержание грунта; $v_{св}$ и $v_{гр}$ — коэффициент Пуассона грунтоцементных колонн и грунта соответственно; $G_{св}$ и $G_{гр}$ — модуль сдвига деформации грунтоцементных колонн и грунта соответственно; $K_{св}$ и $K_{гр}$ — объемный мо-

дуль деформации грунтоцементных колонн и грунта соответственно.

Модуль деформации укрепленного грунта основания, *рассматриваемого как однородная среда, определяется по методу приведенных деформаций* согласно формуле

$$\langle E \rangle = 2G(1 + \nu), \quad \langle E \rangle = K(1 - 2\nu), \quad (3)$$

где K — объемный модуль деформации укрепленного основания, определяемый по формуле (4); G — модуль сдвига укрепленного основания, определяемый по формуле (5); ν — коэффициент Пуассона укрепленного основания, определяемый по формуле (6):

$$K = K_{св}n + K_{гр}m; \quad (4)$$

$$G = G_{св}n + G_{гр}m; \quad (5)$$

$$\nu = \frac{(K - 2G)}{2(K + G)}. \quad (6)$$

Особого внимания заслуживает методологический подход, разработанный в [1], предназначенный для оценки осадки глинистых грунтовых оснований с учетом формирования областей предельного состояния. В рамках данного подхода получены выражения для определения перемещений в различных зонах армированного основания.

Широкое распространение получили также численные методы, позволяющие моделировать нелинейное поведение как грунта, так и конструктивных элементов [2, 6–7]. При решении задач методом конечных элементов принимаются определенные допущения, в частности предполагается, что грунтовый массив и армирующие элементы образуют систему, работающую без проскальзывания на контакте.

Материалы и методы

Рассматривается комплекс зданий переменной этажности, состоящий из трех секций. Каждая секция в конструктивном отношении представляет собой монолитный железобетонный каркас, состоящий из монолитных железобетонных перекрытий, стен и пилонов (колонн). На рис. 1 приведе-

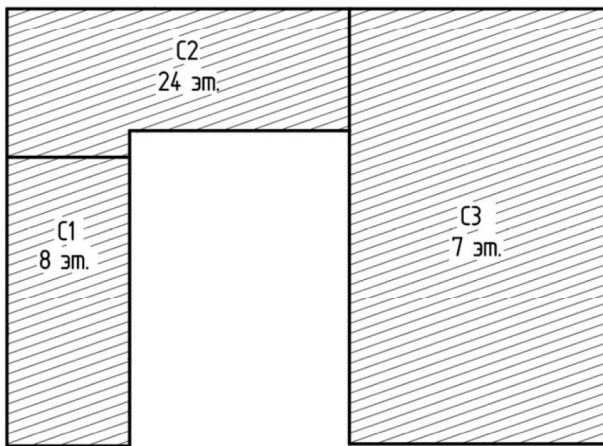


Рис. 1. Блокировочная схема

на блокировочная схема рассматриваемого комплекса зданий.

Основные конструктивные и объемно-планировочные характеристики рассматриваемых секций приведены в табл. 1.

Грунтовые условия рассматриваемой площадки характеризуются сложным строением и представлены современными техногенными отложениями, верхнечетвертичными озерно-аллювиальными образованиями, включающими слои песков, суглинков, глин и насыпных грунтов, а также палеогеновыми отложениями, сложенными тяжелой, твердой и опесчаненной глиной. Геоморфологически участок относится к правобережной пойменной части террасы р. Туры. Расчетные физико-механические характеристики грунтов представлены в табл. 2.

В ходе инженерно-геологических изысканий под секцией С2 (24 этажа) была выявлена линза сильнодеформируемого под-

стилающего грунта ИГЭ 7, представленного тяжелым твердым суглинком с примесью органического вещества и коэффициентом пористости $e = 0,94$.

Погружение свай до отметки, расположенной ниже данного слоя, при существующих инженерно-геологических условиях оказалось невозможным. По результатам пробных погружений установлено, что отказ свай происходит в толще плотных песков, залегающих в верхней части инженерно-геологического разреза. Вследствие этого линза сильнодеформируемого грунта остается в пределах сжимаемой толщи. Применение лидерных скважин, обеспечивающих погружение свай на большую глубину, в условиях водонасыщенных песков признано нецелесообразным в связи с оплытием скважины после ее устройства. Применение вибропогружения в данных грунтовых условиях также признано неэффективным, поскольку вибрационное воздействие приводит к разуплотнению рыхлых песков и снижению несущей способности свай.

В рамках настоящего исследования выполнено численное моделирование совместной работы здания и грунтов основания в программном комплексе Midas GTS NX. Результаты расчета осадки свайного фундамента без усиления линзы сильнодеформируемого грунта показали превышение нормативных предельных значений осадок. С целью предотвращения крена секции и уменьшения неравномерных осадок предусмотрено использование забивных свай

Таблица 1

Основные конструктивные и объемно-планировочные характеристики

Наименование параметра	Секция 1	Секция 2	Секция 3
Кол-во надземных этажей	8	24	7
Кол-во подземных этажей	1	1	1
Габариты в плане, м	39,0×15,86	45,24×19,5	58,4×34,0
Сваи	С130.30	С180.30	С130.30
Толщина ростверка, мм	600	1000	600

Расчетные физико-механические характеристики грунтов

№ ИГЭ	Наименование грунта	Влаж-ность, %	Показа-тель теку-чести	Кoeffи-циент по-ристости	Плот-ность, г/см ³	Удельное сцепление, кПа	Угол вну-треннего трения, град.	Модуль общей де-формации, МПа
		w	I_L	e	ρ_n	c_n	φ_n	E
2	Суглинок текучий	38,7	1,01	1,11	1,75	16	19	3,6
5	Суглинок мягкопласт.	36,0	0,64	1,05	1,77	15	17	5,6
7	Суглинок твердый	31,1	-0,06	0,94	1,80	29	17	8,9
8	Песок плотный	23,3	-	0,41	2,32	6	37	43,5
11	Глина твердая	26,1	-0,37	0,79	1,92	38	5	15,4
12	Песок рыхлый	24,7	-	0,78	1,86	1	27	17,9

меньшей длины в комбинации с локальным укреплением линзы сильнодеформируемого грунта путем его армирования грунтоцементными колоннами (ГЦК).

Укрепление грунтов основания предполагается проводить методом струйной цементации (Jet 1). Предлагаемая схема укрепления грунта представлена на рис. 2.

Расчеты по усилению линзы сильнодеформируемого грунта, расположенной в сжимаемой толще, выполнены в программном комплексе Midas GTS NX. Для числен-

ного описания поведения грунта использовалась упругопластическая модель Mohr-Coulomb (для песчаных грунтов ИГЭ 8, 12 и глинистых грунтов ИГЭ 2, 5) и модель Soft Soil, описывающая нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями (для глинистых грунтов, залегающих под подошвой фундамента в пределах сжимаемой толщи, — ИГЭ 7, 11).

Укрепление основания моделировалось двумя способами: заменой характеристик грунта в объеме армированного грунта на

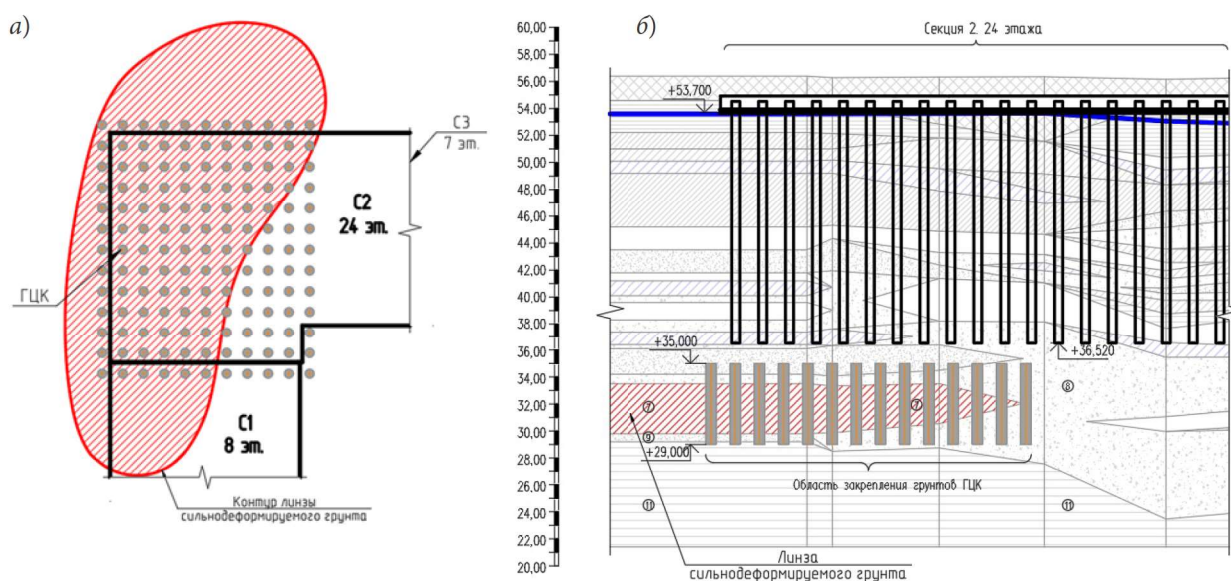


Рис. 2. Предлагаемая схема усиления грунта: а — схема расположения ГЦК; б — разрез по области закрепления грунта

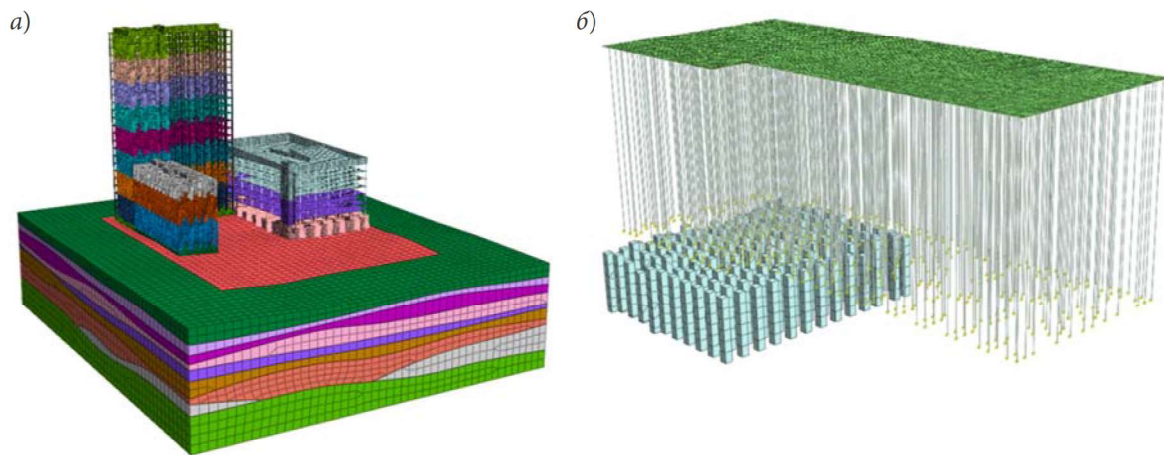


Рис. 3. Расчетная схема: а — общий вид; б — модель грунтоцементных колонн и фундамент секции 2

приведенный модуль деформации и моделированием грунтоцементных колонн в виде объемных элементов. Общий вид расчетной схемы и модель массива грунтоцементных колонн представлены на рис. 3.

Моделирование свай в программном комплексе выполнялось с использованием стержневых элементов с заданием взаимодействия «свая – грунт» через специализированный свайный интерфейс. Параметры работы свайных элементов были откалиброваны на основе результатов натурных статических испытаний [16] (рис. 4, а) с целью обеспечения корректности работы расчетной схемы. Сопоставление виртуальных испытаний свай с натурными приведено на рис. 4, б.

Грунтоцементные колонны выполнены диаметром 800 мм и длиной 6 м. Общее количество колонн составляет 143. Работы по устройству грунтоцементных колонн выполнялись методом струйной цементации грунтов по однокомпонентной технологии Jet 1.

Для расчета приведенного модуля деформации был использован метод равных деформаций. Данный метод основан на том, что при расчете приведенного модуля массив естественного грунта в зоне укрепления заменен однородной средой с расчетными деформационными характеристиками.

Приведенный модуль определяется из взаимодействия фундамента с армированным слоем грунта на несжимаемом основа-

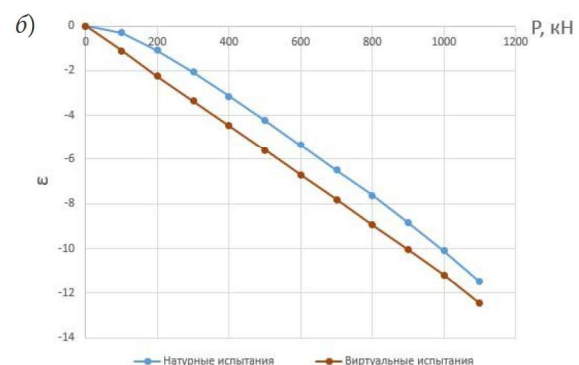


Рис. 4. Натурные испытания грунтов сваями: а — общий вид установки; б — верификация свайных интерфейсов

нии. При этом следует равенство деформаций грунтоцементных колонн и окружающего грунта, которые, согласно [2], определяются по формулам:

$$S_{св} = \frac{N_{св}}{A_{св}E_{св}}; S_{гр} = \frac{N_{гр}}{A_{гр}E_{гр}}; S = \frac{N}{A\langle E \rangle}. \quad (7)$$

Из равенства осадок

$$S = S_{гр} = S_{св} \quad (8)$$

получаем значения для приведенного модуля деформации (1):

$$\langle E \rangle = \frac{E_{гр}A_{гр} + E_{св}A_{св}}{A}.$$

Для отбора кернов с целью подтверждения проектных характеристик грунтоцемента предусмотрен специальный тип грунтоцементных колонн, конструкция которых

включает теряемую обсадную трубу. Наличие обсадной трубы позволяет исключить риск отклонения бурового инструмента при проходке скважины для отбора образца с глубины более 20 м. Принципиальная схема устройства грунтоцементной колонны для отбора кернов представлена на рис. 5.

Производство работ по устройству грунтоцементных колонн данного типа осуществляется в соответствии с программой, разработанной совместно с ООО «ГеоСпецТехнология», и выполняется в следующей последовательности:

- забуривание теряемой обсадной трубы $\varnothing 168$ мм от отметки +35,00 (абс.);
- бурение через обсадную трубу по грунту до проектной отметки низа грунтоцемент-

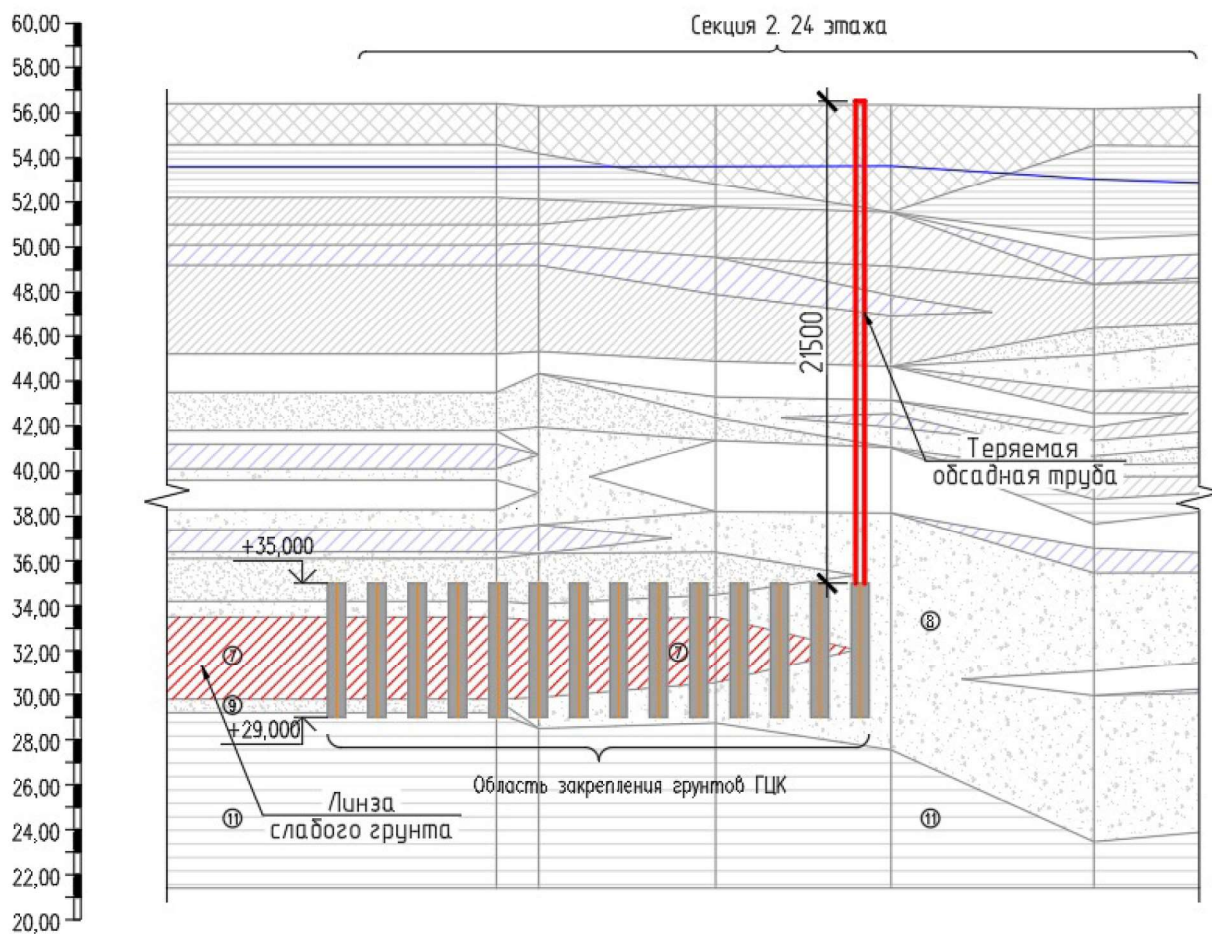


Рис. 5. Схема устройства ГЦК для отбора кернов

ной колонны роторным способом (прямой ход);

- устройство грунтоцементной колонны от низа зоны цементации до верха цементации под высоким давлением в процессе подъема и вращения бурового инструмента (обратный ход);

- производство роторного бурения через обсадную трубу с промывкой водой с целью прочистки внутреннего пространства обсадной трубы для последующего отбора кернов.

В результате полевых работ по истечении 14 суток после устройства ГЦК был выполнен отбор кернов из оголовков грунтоцементных колонн на глубину до 5,0 м [8–15].

Общее количество — 3 шт. с одной грунтоцементной колонны. Бурение и отбор кернов осуществляли через обсадную трубу. Диаметр кернов не менее 93 мм. Фотографии керна и процесса отбора представлены на рис. 6.

По результатам лабораторных испытаний на одноосное сжатие образцов грунтоцементов получено среднее значение модуля деформации грунтоцемента $E_{св} = 429$ МПа.

Средний предел прочности при одноосном сжатии ~3,05 МПа.

Результаты и обсуждение

В рамках настоящего исследования выполнено сравнение результатов численного моделирования, проведенного в программном комплексе Midas GTS NX. Расчет осадки свайного фундамента с плитным ростверком выполнен тремя различными методами:

1. Расчет основания без усиления линзы сильнодеформируемого грунта методом конечных элементов.

2. Расчет основания с использованием приведенных характеристик усиленного грунта. При этом расчетный эквивалентный модуль деформации, определенный методом приведенных деформаций, принят равным $E = 50$ МПа.

3. Расчет основания с учетом неоднородной структуры армированного массива путем моделирования каждой грунтоцементной колонны отдельными объемными элементами. Изополя вертикальных напряжений в объемных элементах, соответствующие



Рис. 6. Отбор кернов из оголовков грунтоцементных колонн: а — образец грунтоцемента; б — сбор образцов на строительной площадке

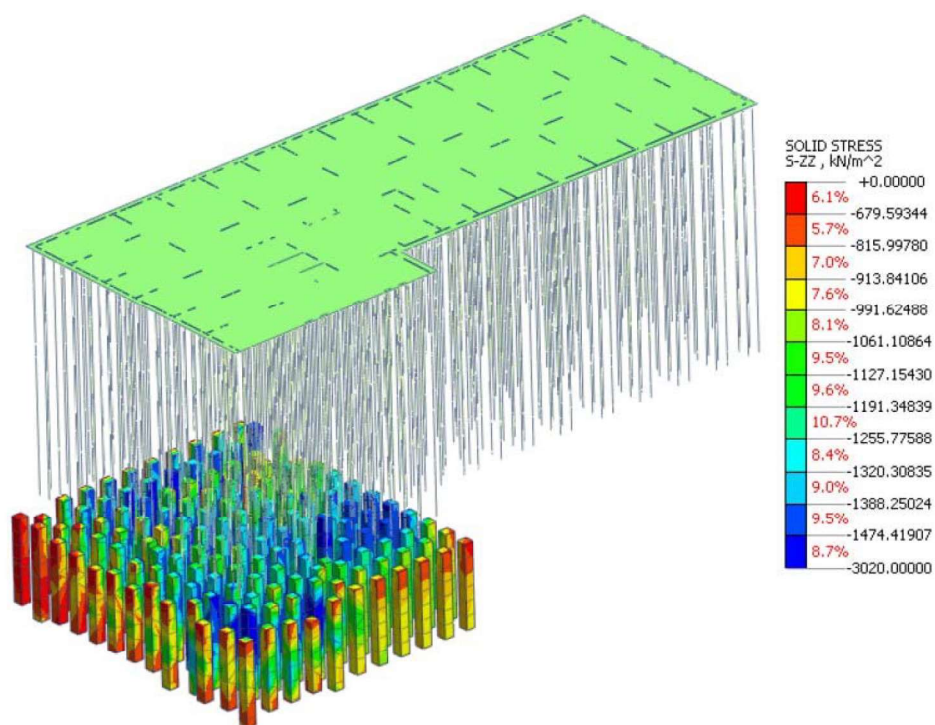


Рис. 7. Изополя вертикальных напряжений в объемных элементах грунтоцементных колонн

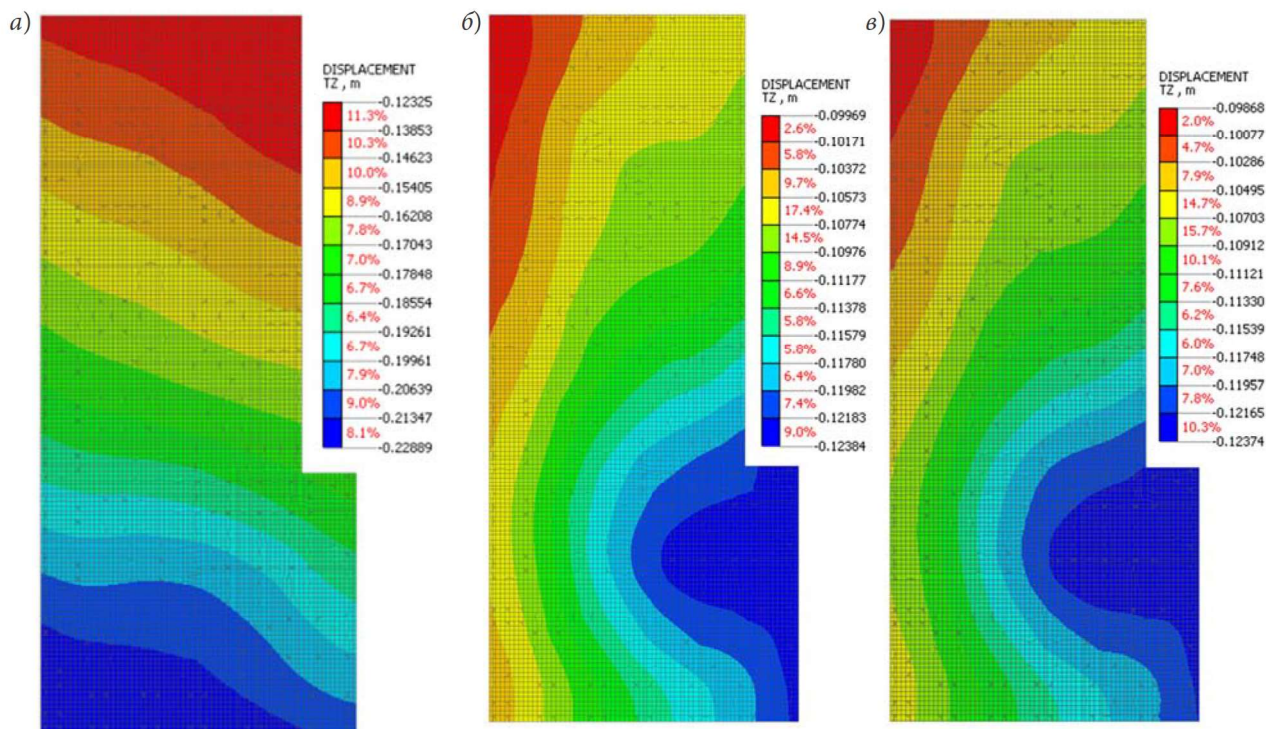


Рис. 8. Картины изополей осадок секции 2: а — естественное основание; б — моделирование трехмерных грунтоцементных колонн; в — приведенный модуль деформации армированного грунта

Таблица 3

Результат расчета осадки

Наименование параметра	Естественное основание	Приведенный модуль деформации армированного грунта	Моделирование трехмерных грунтоцементных колонн
Средняя осадка, м	0,177	0,111	0,112
Максимальная осадка, м	0,229	0,124	0,124
Минимальная осадка, м	0,123	0,099	0,100
Разность осадок, м	0,106	0,025	0,024

ющих моделируемым грунтоцементным колоннам, представлены на рис. 7.

В результате расчетов были получены изополя вертикальных перемещений плитного ростверка, которые представлены на рис. 8.

Результаты расчета осадки свайного фундамента с плитным ростверком на армированном основании, полученные при использовании различных методов моделирования армирования грунта, приведены в табл. 3.

Согласно результатам расчетов наблюдается существенное снижение неравномерности осадок, что уменьшает риск возникновения крена здания и позволяет сократить расход арматуры в плитном ростверке.

Расхождение между значениями осадок, полученными при расчетах с использованием эквивалентных характеристик и при моделировании неоднородной структуры грунта, составляет не более 1 %. Это свидетельствует о возможности применения упрощенного метода моделирования грунтоцементных элементов при решении инженерных задач, связанных с локальным армированием линз слабых грунтов.

Несмотря на доказанную эффективность методики в условиях рассмотренного объекта, ее применение на других площадках требует индивидуального технологического обоснования. Такое обоснование должно включать анализ возможности изготовления грунтоцементных колонн с требуемыми проектными параметрами (прочность, диаметр). В ряде случаев дополнительное повышение несущей способности может быть до-

стигнуто за счет жесткого соединения пяты сваи с телом ГЦК.

Выводы

1. Проведенные исследования подтверждают эффективность применения локального армирования слабых грунтов с основанием грунтоцементными колоннами при устройстве свайных фундаментов в сложных инженерно-геологических условиях.

2. Сопоставление различных методов включенного анализа показало, что упрощенный подход, основанный на применении приведенных характеристик армированного грунта, обеспечивает достаточную точность расчетов при инженерных оценках по сравнению с методом моделирования трехмерных грунтоцементных колонн. Расхождение между значениями осадок, полученными при расчетах с использованием эквивалентных характеристик и при моделировании неоднородной структуры грунта, составляет не более 1 %.

3. Разработанная технология устройства грунтоцементных колонн с теряемой обсадной трубой обеспечивает отбор кернов с глубиной более 20 м без нарушений структуры грунтоцемента, что позволяет эффективно контролировать качество выполненных работ.

Библиографический список

1. Попов А. О. Расчет конечной осадки глинистых оснований, армированных вертикальными элементами // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 4 (56). С. 19–27. DOI 10.5862/МСЕ.56.3.

2. Тер-Мартirosян З. Г., Струнин П. В. Усиление слабых грунтов в основании фундаментных плит с использованием технологии струйной цементации грунтов // Вестник МГСУ. 2010. № 4–2. С. 310–315. EDN RTSQUJ.

3. Desai C. S. Effects of driving and subsequent consolidation on behaviour of driven piles // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 1978. Vol. 2 (3). Pp. 283–301. DOI 10.1002/nag.1610020307.

4. Hegg U., Jammilkowski M. B., Parvis E. Behavior of oil tanks on soft cohesive ground improved by vertical drains // Improvement of ground: Proceedings of 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Helsinki, 23–26 May 1983. Iss. 2. Pp. 627–632.

5. Kawasaki T., Niina A., Saitoh S., Suzuki Y., Honjyo Y. Deep mixing method using cement hardening agent // Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm, 1981. Pp. 721–724.

6. Караулов А. М. Методика расчета вертикально армированного основания плитного фундамента // Материалы междунар. науч.-практ. конф. ПГАСА. Пенза: Изд-во ПГАСА, 2002. С. 66–69.

7. Есинов А. В., Демин В. А., Ефимов А. А. Численные исследования осадок плитных фундаментов на грунтовом и армированном сваями основаниях // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 181.

8. Мариничев М. Б., Ткачев И. Г., Шлее Ю. Практическая реализация метода вертикального армирования неоднородного основания для компенсации неравномерной деформируемости грунтового массива и снижения сейсмических воздействий на надземное сооружение // Научный журнал КубГАУ. 2013. № 94 (10). С. 279–299.

9. Сафин Д. Р. Исследование деформативности водонасыщенных глинистых грунтов, армированных вертикальными армирующими элементами // Известия КазГАСУ. 2008. № 2 (10). С. 81–84.

10. Мангушев Р. А., Осокин А. И., Сотников С. Н. Геотехника Санкт-Петербурга. Опыт строительства на слабых грунтах. М.: АСВ, 2018. 386 с.

11. Коновалов П. А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1988. 287 с.

12. Беспалова А. В., Беспалов А. Е., Тер-Мартirosян А. З. Применение методики приведенного модуля деформации при расчете массивных свайных ростверков в основании высотных зданий // Вестник МГСУ. 2008. № 2. С. 112–118.

13. Liu H. L., Ng C. W. W., Fei K. Performance of a Geogrid-Reinforced and Pile-Supported Highway

Embankment over Soft Clay: Case Study // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 2007. Vol. 133 (12). Pp. 1483–1493.

14. Chen Y., Cao W., Chen R. P. An Experimental Investigation of Soil Arching within Basal Reinforced and Unreinforced Piled Embankments // Geotextiles and geomembranes. 2008. Vol. 26 (2). Pp. 164–174.

15. Jones D. R. V., Dixon N. A comparison of geomebrane/geotextile interface shear strength by direct shear and ring shear // Proceeding of the 2nd European Geosynthetics Conference. Bologna, Italy. 2000. Vol. 2. 9 p.

16. Пат. 2800985, Российская Федерация, МПК E02D 33/00. Мобильная установка для проведения статических испытаний грунтов сваями / М. А. Самохвалов. № 2022125432; заявл. 28.09.2022, опубл. 01.10.2023.

References

1. Popov A. O. Raschet konechnoy osadki glinistykh osnovaniy, armirovannykh vertikal'nymi elementami [Calculation of final settlement of clay bases reinforced with vertical members]. *Inzhenerno-stroitel'niy zhurnal – Civil Engineering Journal*, 2015, no. 4 (56), pp. 19–27. DOI 10.5862/MCE.56.3.

2. Ter-Martirosyan Z. G., Strunin P. V. Usilenie slablykh gruntov v osnovanii fundamentnykh plit s ispol'zovaniem tekhnologii struynoy tsementatsii gruntov [Strengthening of weak soils at the base of foundation slabs using the technology of jet cementation of soils]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2010, no. 4–2, pp. 310–315.

3. Desai C. S. Effects of driving and subsequent consolidation on behaviour of driven piles. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1978, vol. 2 (3), pp. 283–301. DOI 10.1002/nag.1610020307.

4. Hegg U., Jammilkowski M. B., Parvis E. Behavior of oil tanks on soft cohesive ground improved by vertical drain. *Improvement of ground: Proceedings of 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Helsinki, 23–26 May 1983, iss. 2, pp. 627–632.

5. Kawasaki T., Niina A., Saitoh S., Suzuki Y., Honjyo Y. Deep mixing method using cement hardening agent. *Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, 1981, pp. 721–724.

6. Karaulov A. M. Metodika rascheta vertikal'no armirovannogo osnovaniya plitnogo fundamenta [Method for calculation of vertically reinforced base of slab foundation]. *Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. PGASA [Proceedings of the International. sci.-pract. conf. PGASA.]* Penza, PGASA Publ., 2002, pp. 66–69.

7. Esipov A. V., Demin V. A., Efimov A. A. *Chislennyye issledovaniya osadok plitnykh fundamentov na gruntovom i armirovannom svayami osnovaniyakh* [Numerical studies of the settlement of slab foundations on soil and pile-reinforced foundations]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2014, no. 6, p. 181.
8. Marinichev M. B., Tkachev I. G., Shlee Yu. *Prakticheskaya realizatsiya metoda vertikal'nogo armirovaniya neodnorodnogo osnovaniya dlya kompensatsii neravnomernoy deformiruemosti gruntovogo massiva i snizheniya seysmicheskikh vozdeystviy na nadzemnoe sooruzhenie* [Practical implementation of the method of vertical reinforcement of a heterogeneous base to compensate for uneven deformability of the soil mass and reduce seismic impacts on the aboveground structure]. *Nauchnyy zhurnal KubSAU – Scientific Journal of KubSAU*, 2013, no. 94 (10) pp. 279–299.
9. Safin D. R. *Issledovanie deformativnosti vodonasyshchennykh glinistyykh gruntov, armirovannykh vertikal'nymi armiruyushchimi elementami* [Study of deformability of water-saturated clay soils reinforced with vertical reinforcing elements]. *Izvestiya KazGASU – Bulletin of KazGASU*, 2000, no. 2 (10), pp. 81–84.
10. Mangushev R. A., Osokin A. I., Sotnikov S. N. *Geotekhnika Sankt-Peterburga. Opyt stroitel'stva na slabykh gruntakh* [Construction experience on weak soils]. Moscow, ASV Publ., 2018, 386 p.
11. Konovalov P. A. *Osnovaniya i fundamenty rekonstruiruemyykh zdaniy* [Bases and foundations of reconstructed buildings]. 2-nd ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 287 p.
12. Bespalova A. V., Bespalov A. E., Ter-Martirosyan A. Z. *Primenenie metodiki privedennogo modulya deformatsii pri raschete massivnykh svaynykh rostverkov v osnovanii vysotnykh zdaniy* [Application of the method of reduced modulus of deformation when calculating massive pile caps at the base of high-rise buildings]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2008, no. 2, pp. 112–118.
13. Liu H. L., Ng C. W. W., Fei K. Performance of Geogrid-Reinforced and Pile-Supported Highway Embankment over Soft Clay: Case Study. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, ASCE, 2007, vol. 133 (12), pp. 1483–1493.
14. Chen Y., Cao W., Chen R. P. An Experimental Investigation of Soil Arching within Basal Reinforced and Unreinforced Piled Embankments. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, vol. 26 (2), pp. 164–174.
15. Jones D. R. V., Dixon N. A comparison of geomembrane/geotextile interface shear strength by direct shear and ring shear. *Proceeding of the 2nd European Geosynthetics Conference. Bologna, Italy, 2000*, vol. 2, 9 p.
16. Samokhvalov M. A. *Mobil'naya ustanovka dlya provedeniya staticheskikh ispytaniy gruntov svayami* [Mobile unit for static testing of soils with piles]. Patent RF, 2023 no. 2022125432.