

Известия вузов. Строительство. 2023. № 3. С. 22–37.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2023; (3): 22–37.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 624.15

DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-22-37

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ, АРМИРОВАННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

**Петр Олегович Ломов, Алексей Леонидович Ланис,
Иван Олегович Гребенников**

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

Аннотация. Рассматривается существующий подход к оценке деформационных характеристик армированных грунтовых массивов. Проведено исследование, направленное на повышение достоверности определения модуля деформации грунтовых массивов, армированных вертикальными элементами, с использованием штамповочных испытаний. Разработана и обоснована численная модель усиленного вертикальным армированием грунтового массива. Усовершенствована методика обработки результатов штамповочных испытаний при контроле деформационных характеристик массивов, армированных вертикальными элементами.

Ключевые слова: грунтоцементные элементы (колонны/сваи/столбы), контроль качества, деформационные характеристики, армированный массив, штамповочное испытание

Для цитирования: Ломов П.О., Ланис А.Л., Гребенников И.О. Оценка деформационных характеристик грунтовых массивов, армированных вертикальными элементами // Известия вузов. Строительство. 2023. № 3. С. 22–37. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-22-37.

Original article

ASSESSMENT OF THE DEFORMATION CHARACTERISTICS OF SOIL MASSIF REINFORCED WITH VERTICAL ELEMENTS

Peter O. Lomov, Alexey L. Lanis, Ivan O. Grebennikov

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Abstract. This paper considers the existing approach to estimating the deformation modulus of reinforced soil massifs. A study aimed at increasing the reliability of determining the deformation modulus of soil massifs reinforced with vertical elements using die tests is carried out. Numerical model of vertically reinforced soil massif has been developed and justified. The method of processing the results of die tests to control the deformation characteristics of massifs reinforced with vertical elements has been improved.

Keywords: soil-cement elements (columns/piles/poles), quality control, deformation characteristics, reinforced massif, die testing

For citation: Lomov P.O., Lanis A.L., Grebennikov I.O. Assessment of the deformation characteristics of soil massif reinforced with vertical elements. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2023; (3): 22–37. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-22-37.

Введение. В практике строительства зданий и сооружений известен метод усиления грунтов основания фундаментов путем его армирования вертикальными элементами – колоннами, сваями, столбами и т.п. Такие элементы чаще изготавливаются из бетона, грунтобетона, грунтоцемента, уплотненного грунта или иных инертных материалов и составляют часть усиленного грунтового массива, образующего основание для фундаментов мелкого заложения, не выполняя функцию свайного фундамента. В настоящее время этап проектирования и приемки такого типа оснований обязательно должен сопровождаться проведением полевых опытных работ, при которых уточняются или проверяются прочностные и деформационные характеристики армированных массивов. В связи с этим весьма актуальной задачей считается обеспечение необходимой достоверности определения характеристик прочности и деформируемости армированных массивов.

При проектировании армирования грунтов с целью уменьшения сжимаемости основания для зданий и сооружений на фундаментах мелкого заложения основной целью усиления является повышение модуля деформации массива. В соответствии с СП 22.13330 значение эффективного (интегрального) модуля общей деформации армированного грунтового массива (E_{mac}) в направлении, параллельном направлению армирования, для предварительного расчета по деформациям допускается вычислять по формуле

$$E_{\text{mac}} = \alpha E_{\text{ap}} + (1 - \alpha) E_{\text{rp}}, \quad (1)$$

где $\alpha = V_{\text{ap}}/V_{\text{rp}}$ – коэффициент, характеризующий объемную долю армирующих элементов (коэффициент армирования);

V_{ap} – объем армирующих элементов;

V_{rp} – объем усиливающего армированием грунта;

E_{ap} , E_{rp} – расчетные значения модуля упругости армирующих элементов и модуля деформации грунта соответственно.

Ключевым показателем в данной формуле является коэффициент армирования α .

Вычисленное по формуле (1) значение модуля деформации должно уточняться и проверяться натурными испытаниями. Анализ требований и рекомендаций действующих нормативных документов по проектированию армирования грунтов позволяет выделить следующие методы оценки качества и определения прочностных и деформационных характеристик усиленных грунтовых массивов:

- 1) метод контрольного бурения армирующих элементов с отбором кернов (образцов) с последующим лабораторным испытанием;
- 2) метод испытаний армирующих элементов статической нагрузкой;
- 3) метод испытания армированных массивов статической нагрузкой с помощью штампов (штамповые испытания).

В ряде случаев нормативными документами предусматривается также применение геофизических методов контроля. Но поскольку такие методы позволяют лишь качественно оценить параметры усиления без возможности

количественной оценки характеристик прочности и деформируемости, в настоящем исследовании они не рассматриваются.

Метод контрольного бурения применим в случаях, когда армирующие элементы выполнены из бетона, грунтоцемента или иного подобного материала. При этом осуществляют колонковое бурение со сплошным отбором керна с определением физико-механических характеристик материала армирующих элементов (плотность, прочность на сжатие, модуль деформации/упругости и т.д.). Метод испытаний армирующих элементов статической нагрузкой фактически является аналогом испытаний грунтов сваями. В результате таких испытаний устанавливается несущая способность армирующего элемента по грунту. Указанные методы оценки качества позволяют определить прочностные и деформационные характеристики самих армирующих элементов. Данный подход к оценке качества армирования грунтовых массивов исследован в работах [1–6] и показывает свою эффективность и востребованность. Однако он позволяет выявить достижение требуемых параметров только части усиленного массива, при этом не рассматривается проверка совместной работы армирующего элемента и окружающего грунта в массиве. Таким образом, для оценки прочностных и деформационных характеристик армированного массива (интегральных значений) потребуется либо выполнять расчет соответствующих средневзвешенных значений с использованием формулы (1), что несет в себе ряд погрешностей и допущений, либо выполнять дополнительные испытания, но уже для всего массива.

В этой связи большой интерес представляют штамповые испытания, которые считаются наиболее достоверным способом определения деформационных характеристик грунтов. Для армированного грунтового массива штамповые испытания позволяют определить интегральное значение модуля деформации без промежуточных расчетов, с учетом совместной работы армирующих элементов и окружающего их грунта. Широкое применение данного способа затруднено из-за отсутствующей единой утвержденной методики проведения штамповых испытаний для армированных массивов.

В настоящее время модуль деформации грунта с использованием штампов определяется согласно методике ГОСТ 20276.1. При штамповом испытании регламентированная площадь штампа составляет от 600 до 5000 см² или с соответствующими значениями диаметров от 27,7 до 79,8 см. Применение стандартной методики испытаний и стандартных размеров штампов для армированных массивов в ряде случаев может привести к существенному завышению или занижению полученных деформационных характеристик, так как армирующие элементы могут иметь диаметры от нескольких сантиметров до полутора–двух метров. Для испытания грунтовых массивов, усиленных армирующими элементами большого диаметра, возможно использование штампов индивидуального изготовления, хотя это повлечет за собой необходимость устройства более масштабной нагрузочной системы, возникнут вопросы с назначением размера такого штампа и с интерпретацией результатов испытания ввиду необходимости учета соотношения площадей сечения армирующего элемента, самого штампа и грунта, попадающего в зону влияния штампа. Известны исследования, в которых данная проблема частично решена применением штампов больших размеров (площадью 7854 и 11 310 см² [2, 7]), например, для определения модуля деформации основа-

ния, усиленного вертикальными щебенистыми сваями. Эти данные примеры отражают частные случаи нестандартных испытаний, но в настоящее время отсутствует методика проведения и обработки результатов штамповых испытаний, обеспечивающая необходимую достоверность в определении характеристик армированных массивов.

Таким образом, для обеспечения достоверности определения характеристик прочности и деформируемости армированных массивов требуется разработать критерии назначения размера штампа и методику учета армирующего эффекта испытываемого массива.

Для решения указанных вопросов авторами проведено исследование работы массива грунта, армированного вертикальными элементами. Исследование разделено на три этапа:

– на первом этапе выполнен анализ существующего подхода к назначению параметров армирования грунтовых массивов с целью определения критерия назначения размера штампа для достоверной оценки деформационных характеристик усиленного массива;

– на втором этапе разработана и обоснована численная модель усиленного вертикальным армированием грунтового массива с целью последующего моделирования штамповых испытаний и оценки эффективности определенного критерия назначения размера штампа;

– на третьем этапе усовершенствована методика обработки результатов штамповых испытаний при контроле деформационных характеристик массива, армированных вертикальными элементами.

Далее приводится более подробное описание этапов проведенного исследования.

Первый этап. Существующий подход к проектированию усиления грунтового массива армированием заключается в преобразовании его свойств путем введения в него специальных элементов, обеспечивающих улучшение деформационных и прочностных характеристик. Значения требуемых характеристик устанавливаются в ходе итерационных расчетов основания фундаментов проектируемых объектов по первой и второй группам предельных состояний. Для обеспечения требуемых характеристик выполняется расстановка вертикальных армирующих элементов по площади фундамента сооружения. Шаг расстановки армирующих элементов, их диаметр и характеристики материала зависят от требуемых деформационных характеристик массива, которые необходимо достичь усилением. Анализируя имеющийся опыт авторов в усилении грунтов армированием вертикальными элементами [6, 8], а также примеры реализации подобного усиления грунтов, опубликованные другими авторами [9–11], и рекомендации нормативных документов, можно сделать вывод, что при армировании глинистых и песчаных грунтов армирующие элементы, как правило, расставляются в шахматном порядке с шагом от трех до пяти их диаметров.

Варьируя шаг расстановки армирующих элементов, зависящий от диаметра, можно добиться увеличения или уменьшения деформативности и прочности усиленного массива за счет соответствующего влияния материала армирующих элементов. При проектировании армирования грунтов предполагается, что достижение нужных деформационных характеристик усиленного массива в грунтовом основании здания обеспечивается определен-

ным соотношением объема армирующих элементов к объему всего усиленного массива под фундаментом – коэффициентом армирования $\alpha = V_{\text{ар}}/V_{\text{гр}}$. Дифференцируя расчет параметров армирования по глубине усиления, коэффициент армирования может быть выражен как отношение площади поперечного сечения армирующих элементов к площади усиливаемого массива, воспринимающего нагрузки от фундамента здания в плоскости, перпендикулярной направлению армирования ($\alpha = S_{\text{ар}}/S_{\text{мас}}$). Следовательно, при контроле деформационных характеристик армированного массива на участке испытания для пятна приложения нагрузки (пятна штампа) должно обеспечиваться проектное значение коэффициента армирования α , т.е. при штамповом испытании на опытном участке должны обеспечиваться аналогичные условия работы фрагмента массива (в пределах зоны, воспринимающей нагрузки от штампа), как для всего усиленного массива, воспринимающего нагрузки всего здания.

Критерий назначения размера штампа при контроле деформационных характеристик может быть сформулирован следующим образом: площадь штампа при контроле деформационных характеристик массива, армированного вертикальными элементами, должна быть прямо пропорциональна площади поперечного сечения армирующего элемента, причем коэффициент пропорциональности зависит от коэффициента армирования α и находится по формуле

$$S_{\text{ш}} = k_{\text{ш}} S_{\text{ар}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{ш}}$ – площадь штампа, см^2 ;

$k_{\text{ш}}$ – коэффициент пропорциональности назначения размера штампа, вычисляемый как $k_{\text{ш}} = \frac{1}{\alpha}$;

$S_{\text{ар}}$ – площадь поперечного сечения вертикального армирующего элемента, см^2 .

Следует отметить, что точное соблюдение предложенного критерия в ряде случаев приводит к необходимости изготовления штампов «неудобных» размеров, требующих организации масштабных нагрузочных платформ или анкерных систем, или потребует высокой точности к соблюдению геометрических параметров изделия, в связи с чем целесообразным является определение

1) допустимого интервала варьирования коэффициента пропорциональности $k_{\text{ш}}$ при изготовлении штампов;

2) корректирующего коэффициента $k_{\text{кор}}$ к результатам штамповых испытаний, необходимого в случае несоблюдения $k_{\text{ш}}$ при изготовлении штампа.

Интервал варьирования коэффициента пропорциональности $k_{\text{ш}}$ определяется исходя из выявленных ранее рекомендаций по соблюдению шага армирования $3-5d$ (где d – диаметр армирующего элемента). Для этого весь армированный массив можно разбить на одинаковые треугольные призмы, в основании которых лежат правильные треугольники с длиной стороны $l = 3-5d$ и вершины которых совпадают с осями цилиндрических армирующих элементов диаметром d (рис. 1).

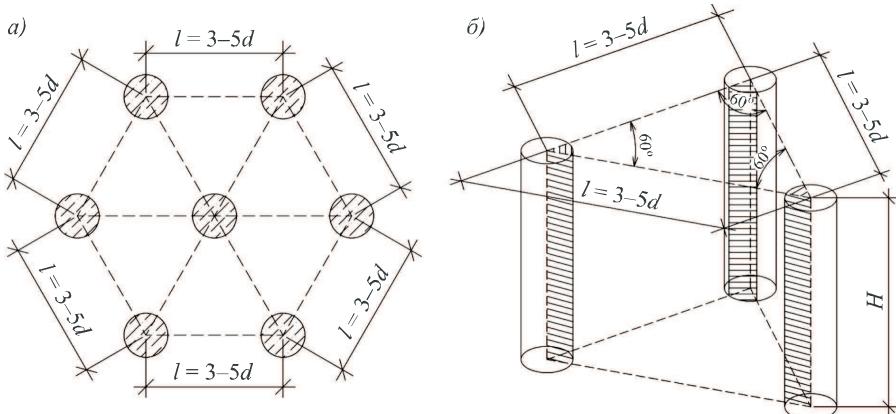


Рис. 1. Схема к расчету коэффициента пропорциональности $k_{ш}$

Fig. 1. Diagram for calculating the proportionality factor $k_{ш}$

Отношение объема части армирующих элементов в пределах одной призмы к объему этой призмы и будет коэффициентом армирования:

$$\alpha = \frac{V_{ap}}{V_{tp}}.$$

Выражая коэффициент пропорциональности назначения размера штампа $k_{ш}$ через коэффициент армирования α и выражая объем призмы и фрагмента армирующего элемента через произведение их площадей поперечного сечения на высоту, получим

$$k_{ш} = \frac{1}{\alpha} = \frac{S_{tp}H}{S_{ap}H}.$$

Далее, расписывая площади треугольника и полуокружности по известным математическим формулам, а также заменяя длину стороны треугольника на $l = n \cdot d$ (где n – рекомендуемая кратность диаметра при назначении шага расстановки армирующих элементов – от 3 до 5), находим

$$k_{ш} = \frac{\frac{1}{2} \sin 60 \cdot l^2}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{\sqrt{3}(n \cdot d)^2}{\pi d^2} = \frac{\sqrt{3}n^2}{\pi}. \quad (3)$$

Подставляя рекомендуемые значения n от 3 до 5 в формулу (3) вычисляем интервал варьирования коэффициента пропорциональности $k_{ш}$ – от 5 до 15. Таким образом, при контроле деформационных характеристик армированного массива путем проведения штамповочного испытания площадь штампа должна назначаться в зависимости от площади поперечного сечения армирующего элемента и проектного значения коэффициента армирования α , но при этом должна составлять не менее 5 и не более 15 площадей поперечного сечения армирующего элемента.

Вычисление корректирующего коэффициента $k_{кор}$ к результатам штамповочных испытаний для интервальных значений коэффициента пропорциональности $k_{ш}$ при изготовлении штампов, а также разработка методики его применения представлены в описаниях следующих этапов исследования.

Второй этап. Решается задача оценки эффективности установленного критерия назначения размера штампа с использованием численного моделирования. Для этого разработана и обоснована модель основания, усиленного армированием вертикальными элементами.

Поскольку целью армирования грунтов является обеспечение необходимой сжимаемости основания здания, то разработанная модель должна отражать результат усиления грунтового массива до получения требуемых характеристик деформируемости. Учитывая, что армированию подлежит грунтовый массив в основании здания, элементы усиления должны воспринимать преимущественно сжимающие усилия.

С учетом выполнения указанных выше требований авторами разработана модель основания, усиленного армированием вертикальными элементами, которая представлена на рис. 2.

К основным элементам такой модели относятся:

1 – инженерно-геологические слои в основании сооружения с исходными значениями физико-механических характеристик;

2 – границы распространения инженерно-геологических слоев, определяемые в ходе инженерно-геологических изысканий;

3 – вертикальные армирующие элементы, расположенные в пределах рассчитываемой глубины, обеспечивающей необходимую сжимаемость и прочность основания сооружения;

4 – подушка между армирующими элементами и фундаментами сооружения, обеспечивающая перераспределение напряжений между армирующими элементами и грунтом;

5 – контуры усиленного массива армированием вертикальными элементами, размеры которых устанавливаются в ходе расчетов из условия обеспечения необходимой сжимаемости и прочности основания сооружения;

6* – преобразованные грунты вокруг армирующих элементов. Данный элемент вводится в модель опционально в зависимости от применяемого спо-

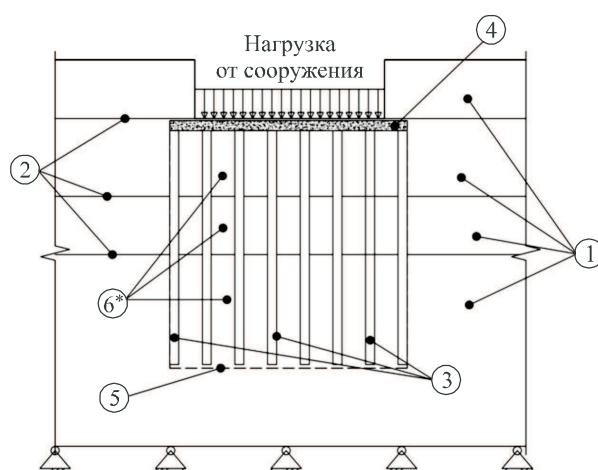


Рис. 2. Модель основания, усиленного армированием вертикальными элементами

Fig. 2. Model of the base reinforced with vertical elements

соба изготовления армирующих элементов. Например, в случае применения способа раскатки скважин происходит уплотнение грунта в ходе формирования тела армирующего элемента [7].

Предлагаемую модель следует использовать в программных комплексах МКЭ-анализа при решении соответствующих задач в трехмерной постановке. Армирующие элементы расставляются по площади фундамента здания в шахматном порядке с равномерным шагом $3-5d$, где d – диаметр армирующего элемента (см. рис. 1, a). Шаг расстановки армирующих элементов определяется в зависимости от назначаемого материала и диаметра армирующих элементов, обеспечивающих требуемую прочность и сжимаемость усиленного основания. Расчетная область модели снизу ограничивается глубиной, на которой выполняется соотношение бытовых и дополнительных нормальных напряжений равное $\frac{\sigma_{zp}}{\sigma_{zg}} = 0,5$.

Для создания модели необходима база вводных данных, содержащая информацию о грунтовой среде, параметрах армирующих элементов, нагрузках и т.п. Часть таких параметров возможно определить из анализа исходных данных и конструктивных соображений. При этом для получения специфических данных, к которым относятся параметры армирующих элементов и, в ряде случаев, преобразованного грунта вокруг армирующих элементов, необходимы дополнительные экспериментальные исследования.

Для подтверждения адекватности разработанной модели выполнена ее верификация путем сопоставления результатов моделирования фрагмента усиленного грунтового массива по предлагаемой модели с результатами прямых испытаний.

Для верификации модели была выбрана строительная площадка в Октябрьском районе г. Новосибирска, на которой реализовано усиление грунтов армированием вертикальными грунтоцементными элементами, изготовленными по технологии глубинного перемешивания (рис. 3). Ди-



Рис. 3. Изготовление вертикальных армирующих элементов по технологии глубинного перемешивания

Fig. 3. Production of vertical reinforcement elements using depth-mixing technology

метр армирующих элементов составляет 700 мм, шаг расстановки – $3d$ (в шахматном порядке). Глубина армирующих элементов – 8 м. При изготовлении армирующих элементов грунты перемешивались с цементом в пропорции цемента 300 кг на 1 м³ тела грунтоцементного элемента. Последующие лабораторные испытания образцов грунтоцементных элементов, изготовленных по указанной выше рецептуре, показали значения модуля упругости материала 310 МПа.

Основание опытной площадки в пределах исследуемой глубины сложено двумя инженерно-геологическими слоями:

ИГЭ-1 – техногенный грунт (супесь песчанистая с включением строительного мусора), мощность слоя в среднем составляет 80 см;

ИГЭ-2 – супесь песчанистая пластичная непросадочная с прослойками песка. Грунты ИГЭ-2 имеют следующие физико-механические характеристики: плотность 2,02 г/см³; влажность 19,4 %; число пластиичности 5 %; модуль деформации 9,8 МПа; удельное сцепление 12,1 кПа; угол внутреннего трения 26°. Мощность слоя – более 8 м.

Инженерно-геологический разрез на опытной площадке, совмещенный с армирующими элементами (грунтоцементными колоннами), показан на рис. 4.

Определение деформационных характеристик на опытной площадке выполнялось путем проведения штамповочного испытания. Размер штампа устанавливался по разработанному ранее критерию и его площадь составила 38 000 см². Коэффициент пропорциональности назначения размера штампа $k_{ш}$ при этом был равен 10.

В состав установки для испытания усиленного массива штампом входили:

- жесткий штамп круглой формы диаметром 2,2 м;
- устройство для создания и измерения нагрузки на штамп (домкрат, маслостанция);
- анкерное устройство (балка и анкерные армирующие элементы);

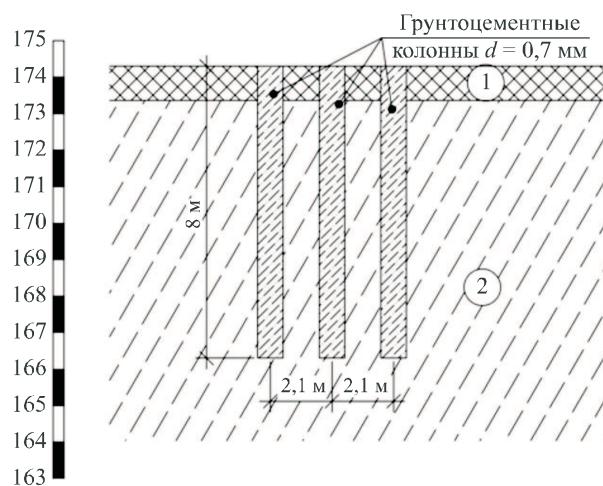


Рис. 4. Инженерно-геологический разрез на опытной площадке

Fig. 4. Engineering geological cross-section at the test site

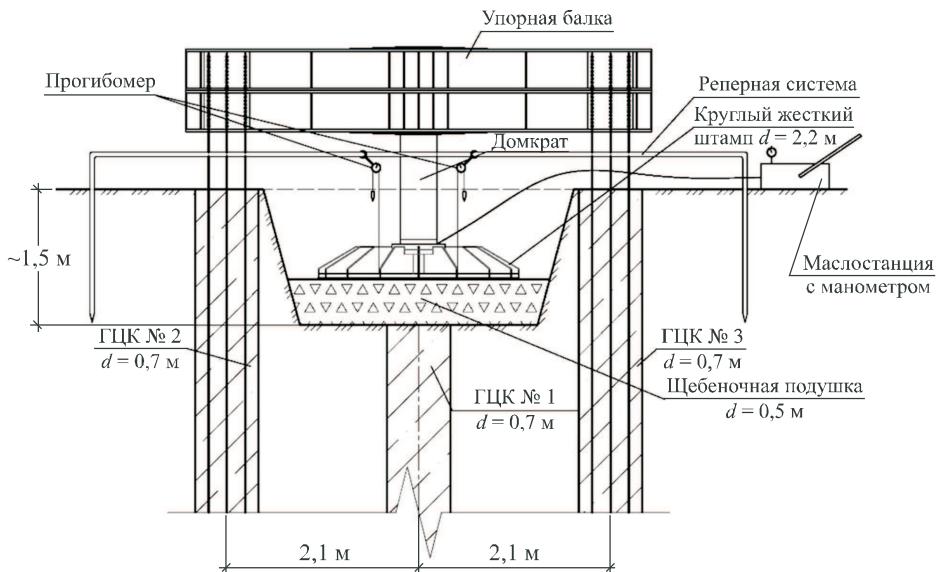


Рис. 5. Схема установки штамповального испытания

Fig. 5. Schematic diagram of the die test set-up

– устройство для измерения осадок штампа (прогибомеры, датчики перемещений).

Между армирующими элементами и подошвой штампа выполнялась щебеночная подушка, обеспечивающая перераспределение нагрузки от штампа между армирующим элементом и окружающим грунтом.

Общая схема установки штамповального испытания приведена на рис. 5, фотография смонтированной установки – на рис. 6.

Трехмерная цифровая модель армированного массива создавалась в программном комплексе Midas GTS NX (рис. 7, а).

В цифровой модели также, как при натурном исследовании, учитывался круглый штамп площадью $38\,000 \text{ см}^2$. Передача нагрузки на штамп



Рис. 6. Смонтированная установка штамповального испытания

Fig. 6. Assembled stamping test rig

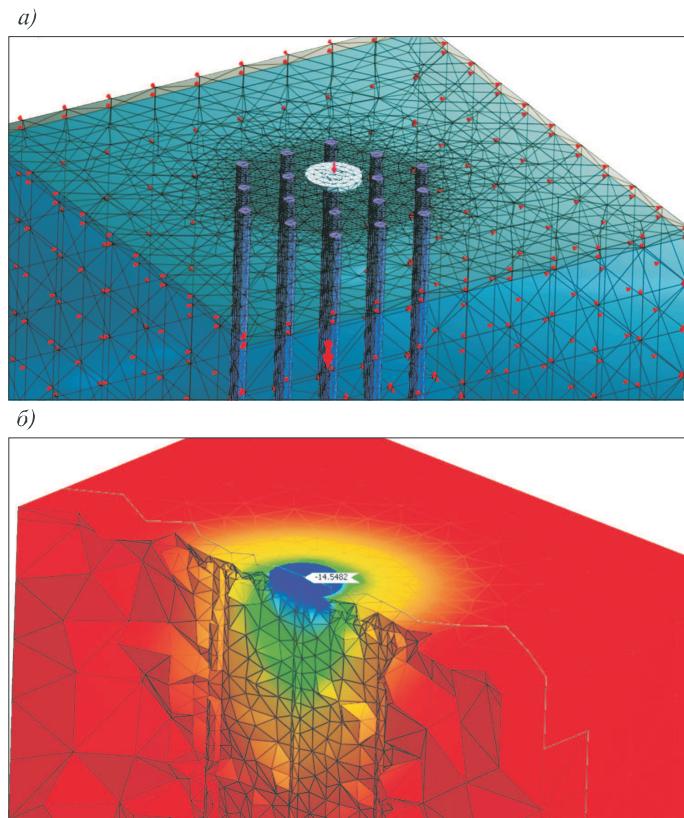


Рис. 7. Цифровая модель армированного массива со штампом (а) и фрагмент деформированного вида модели (б)

Fig. 7. Digital model of a stamped reinforced array (a) and fragment of the deformed model view (b)

моделировалась ступенями до достижения давления 300 кПа под подошвой штампа.

Вычисление модуля деформации по результатам штамповочного испытания (как натурного, так и цифрового) осуществлялось по формуле

$$E_{ш} = (1 - \nu^2) K_1 D \frac{\Delta p}{\Delta S}, \quad (4)$$

где ν – коэффициент поперечного расширения (Пуассона), принимаемый 0,27;

K_1 – коэффициент, принимаемый для жесткого круглого штампа равным 0,79;

D – диаметр штампа, см;

Δp – приращение давления на штамп кПа, равное $p_2 - p_1 = 300 - 200 = 100$ кПа;

ΔS – приращение осадки штампа, соответствующее Δp , см.

На рис. 8 приведены графики осадки штампа до достижения предельной при испытаниях нагрузки (300 кПа) как при натурном испытании, так и при численном моделировании (цифровом испытании).

Анализируя результаты штамповочного испытания и численного моделирования, можно сделать вывод о хорошей сходимости результатов. Расхождения в данных определения сжимаемости армированного грунтового массива

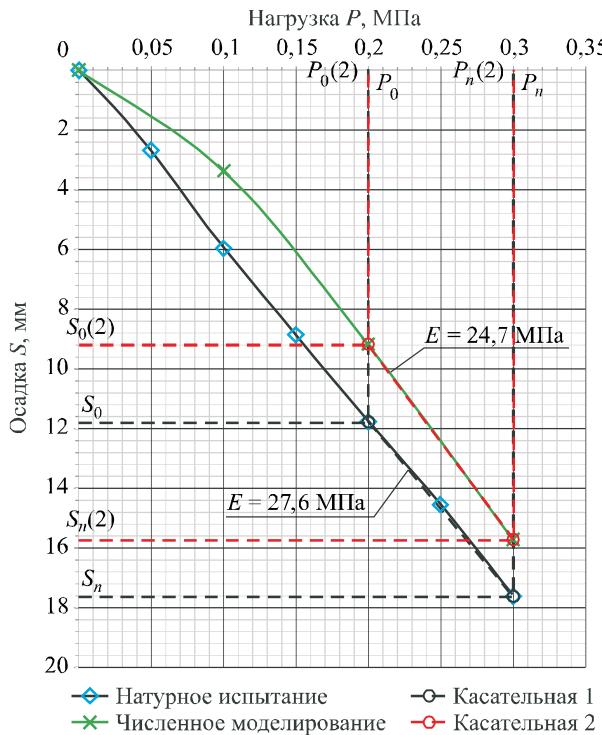


Рис. 8. Графики осадки штампа

Fig. 8. Stamping precipitation graphs

не превышают 10 %, в результате чего сделан вывод об адекватности предложенной модели.

С использованием верифицированной модели проведено дальнейшее исследование оценки влияния размера штампа на достоверность определения деформационных характеристик усиленного массива. Для этого смоделировано 12 опытных участков армированного массива, сжимаемость которых оценивается штампами различных размеров. Коэффициент пропорциональности назначения размера штампа $k_{\text{ш}}$ при назначении размеров штампа составлял 5, 10 и 15.

В цифровой модели нагрузка на штамп моделируется двумя ступенями из условия обеспечения давлений под подошвой штампа $p_1 = 200$ и $p_2 = 300$ кПа.

Фрагмент деформированного вида модели в процессе цифровой имитации нагружения штампа приведен на рис. 7, б.

В результате моделирования 12 участков армированных массивов была получена база данных о сжимаемости этих массивов под воздействием штампов различных размеров и рассчитаны модули деформации усиленных массивов.

Исследование показало, что применение штампов, не обеспечивающих проектное соотношение площади армирующих элементов к площади всего армированного массива, может завышать или занижать полученные по результатам испытаний значения модуля деформации. Результаты моделирования в виде зависимости модуля деформации усиленного массива от коэффициента пропорциональности штампа $k_{\text{ш}}$ представлены на рис. 9.

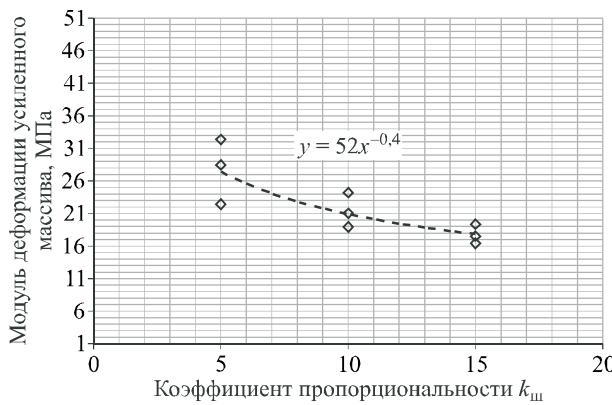


Рис. 9. Функциональная зависимость модуля деформации усиленного массива от коэффициента пропорциональности $k_{ш}$

Fig. 9. Functional dependence of the deformation modulus of the reinforced massif on the proportionality factor $k_{ш}$

Дальнейшая статистическая обработка результатов моделирования с определением величины корректирующего коэффициента, при несоблюдении необходимого размера штампа при испытаниях, а также методика его применения выполнены на третьем этапе исследования.

Третий этап. Статистическая обработка полученных в ходе моделирования значений модулей деформации позволяет получить функциональную зависимость, определяющую величину корректирующего коэффициента к результатам штамповых испытаний с учетом примененного размера штампа.

Влияние размера штампа, описываемого через коэффициент пропорциональности $k_{ш}$, на значение модуля деформации усиленного массива находится по уравнению

$$E_y = \frac{C}{2,5 \sqrt{k_{ш}}}, \quad (5)$$

где C – постоянный коэффициент, определенный по статистической обработке результатов моделирования.

Вычисление корректирующего коэффициента к результатам штамповых испытаний в случае, если коэффициент пропорциональности $k_{ш}$ для назначенного штампа не соответствует коэффициенту армирования для всего усиленного массива, осуществляется следующим образом:

$$K_{\text{кор}} = \frac{C \sqrt[2,5]{\alpha}}{\sqrt[2,5]{k_{ш\phi}}} = \sqrt[2,5]{\alpha \cdot k_{ш\phi}}, \quad (6)$$

где α – проектное значение коэффициента армирования для всего усиленного основания, модуль деформации которого проверяется штамповым испытанием;

$k_{шф}$ – фактическое значение коэффициента пропорциональности для штампа, использованного при определении модуля деформации армированного массива и рассчитываемого по формуле (2).

Достоверное значение модуля деформации усиленного массива $E_{\phi \text{ ap}}$, определяемое по результатам штамповых испытаний, можно рассчитать как

$$E_{\phi \text{ ap}} = K_{\text{кор}} E_{ш}, \quad (7)$$

где $K_{\text{кор}}$ – корректирующий коэффициент, определяемый по формуле (6); $E_{ш}$ – значение модуля деформации усиленного массива, полученное по результатам штамповового испытания с использованием штампа с коэффициентом пропорциональности $k_{шф}$ (рассчитываемым по формуле (2)) в пределах от 5 до 15.

Заключение. Определен критерий назначения размера штампа для достоверной оценки деформационных характеристик усиленного массива прямыми штамповыми испытаниями.

Разработана, обоснована и верифицирована модель усиленного основания армированием вертикальными элементами.

Получена функциональная зависимость, позволяющая определить величину корректирующего коэффициента к результатам штамповых испытаний в зависимости от примененного размера штампа.

Усовершенствована методика расчета деформационных характеристик армированных грунтовых массивов путем применения корректирующего коэффициента к результатам штамповых испытаний, учитывающего размеры назначенного для испытания штампа.

Список источников

1. Гребенников И.О. Особенности проектирования усиления грунтовых оснований зданий и сооружений армированием грунтоцементными колоннами // Вестн. Сиб. гос. ун-та путей сообщения. 2022. № 2(61). С. 123–130.
2. Тер-Мартиросян З.Г., Тер-Мартиросян А.З., Сидоров В.В. Опыт преобразования слабых водонасыщенных грунтов сваями конечной жесткости // Вестн. МГСУ. 2018. Т. 13, № 3(114). С. 271–281.
3. Лукпанов Р., Енкебайев С., Цыгулев Д. Assessment of the bearing capacity of piles in soil, determined by static and dynamic load tests // Engineering Journal of Satbayev University. 2021. Vol. 143, no. 2. P. 252–260.
4. Семкин В.В., Шапошников А.В., Ибрагимов М.Н. Методические рекомендации «Методы контроля качества искусственных оснований из закрепленных грунтов». 2020. (НИИОСП им. Н.М. Герсеванова).
5. Семкин В.В., Шапошников А.В., Ибрагимов М.Н. Методическое пособие по укреплению грунтов методами струйной цементации, глубинным перемешиванием, инъекции растворами на основе микроцементов, манжетной инъекцией в режиме гидроразрывов. 2020. (НИИОСП).
6. Lanis A.L., Razuvayev D., Lomov P. Deformation properties of a subgrade in structures reinforced with full displacement piles // MATEC Web of Conferences. X International Scientific and Technical Conference «Polytransport Systems». 2018. Vol. 216. P. 01006.
7. Анжело Г.О. Взаимодействие щебеночной сваи с окружающим грунтом и ростверком (плитой) при статической и вибрационной нагрузках: дис. канд. техн. наук / Анжело Георгий Олегович. М., 2020.

8. Ланис А.Л., Попов А.М., Ломов П.О. Устройство оснований методом раскатки скважин с инъектированием твердеющего раствора // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 7(703). С. 29–38.
9. Малинин А.Г., Салмин И.А. Контроль качества работ по струйной цементации грунтов в соответствии с действующими нормативными документами // Фундаменты. 2021. № 1(3). С. 51– 57.
10. Киричек Ю.А., Комиссаров Г.В. Методы устройства искусственных оснований из грунтоцемента под фундаменты мелкого заложения // Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture. 2014. № 7(196). С. 15–19.
11. Зехниев Ф.Ф., Внуков Д.А., Корпач А.И. Преобразование грунтовых оснований с применением технологии глубинного перемешивания грунта // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8, № 4. С. 116–125.

References

1. *Grebennikov I.O.* Features of designing reinforcement of soil bases of buildings and structures by reinforcing with soil-cement columns. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya = Siberian Transport University*. 2022; (2): 123–130. (In Russ.).
2. *Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Sidorov V.V.* Experience of transforming weak water-saturated soils with piles of finite stiffness. *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU*. 2018; 13(3): 271–281. (In Russ.).
3. *Lukpanov R., Enkebayev S., Tsygulev D.* Assessment of the bearing capacity of piles in soil, determined by static and dynamic load tests. *Engineering Journal of Satbayev University*. 2021; 143(2): 252–260.
4. *Semkin V.V., Shaposhnikov A.V., Ibragimov M.N.* Methodical Recommendations for Quality Control of Artificial Foundations of Strengthened Soils. 2020. (NIIOSP named after N.M. Gersevanov). (In Russ.).
5. *Semkin V.V., Shaposhnikov A.V., Ibragimov M.N.* Methodological Manual for Soil Strengthening by Methods of Jet Cementation, Deep Mixing, Injection by Micro-Cement Solutions, and Cuff Injection in Hydrofracture Mode. 2020. (NIIOSP). (In Russ.).
6. *Land A.L., Razuvayev D., Lomov P.* Deformation properties of a subgrade in structures reinforced with full displacement piles. MATEC Web of Conferences. X International Scientific and Technical Conference “Polytransport Systems”. 2018; 216: 01006.
7. *Anzhelo G.O.* Interaction of rubble pile with surrounding soil and rooftop (slab) under static and vibration loads: Diss. PhD / Anzhelo Georgiy Olegovich. Moscow, 2020. (In Russ.).
8. *Land A.L., Popov A.M., Lomov P.O.* Arrangement of bases by the method of rolling wells with injection of hardening mortar. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2017; (7): 29–38. (In Russ.).
9. *Malinin A.G., Salmin I.A.* Quality control of works on jet grouting of soils in accordance with the current normative documents. *Fundamenty = Foundations*. 2021; (1): 51–57. (In Russ.).
10. *Kirichek Yu.A., Komissarov G.V.* Methods of artificial foundations of soil-cement for shallow foundations. *Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2014; (7): 15–19. (In Russ.).
11. *Zekhniev F.F., Vnukov D.A., Korpach A.I.* Conversion of ground bases using deep soil mixing technology. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture*. 2017; 8(4): 116–125. (In Russ.).

Информация об авторах

П.О. Ломов – кандидат технических наук, доцент, lomovPO@mail.ru

А.Л. Ланис – доктор технических наук, профессор, alangeo@bk.ru

И.О. Гребенников – научный сотрудник, io.stu@mail.ru

Information about the authors

P.O. Lomov – PhD, Ass. Professor, lomovPO@mail.ru

A.L. Lanis – DSc, Professor, alangeo@bk.ru

I.O. Grebenников – Scientist, io.stu@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.01.2023

The article was submitted 26.01.2023

Одобрена после рецензирования 27.02.2023

Approved after reviewing 27.02.2023

Принята к публикации 02.03.2023

Accepted for publication 02.03.2023