

gies: Teaching manual / R. A. Mangushev, A. V. Ershov, A. I. Osokin. — 2nd iss., revised and enlarged — M.: ASV, 2010. — 240 p.]

7. Ischebeck. Novye puti v ankernoy tekhnike. Proektirovaniye i raschet. Ankernye svai Ischebek Titan. — Friedr. Ischebeck GmbH, 1997. [Ischebeck. New ways in anchors engineering. Projecting and calculation. Anchor piles Ischebek Titan. — Friedr. Ischebeck GmbH, 1997.]

8. Ischebeck. Burovye i vpressovyvaemye ankernye svai. — Friedr. Ischebeck GmbH. — 2000. [Ischebeck. Chisel and in-pressed anchor piles. — Friedr. Ischebeck GmbH — 2000.]

9. Novye puti v geotekhnike // Ofitsial'nyy sayt Friedr. Ischebeck GmbH. — URL: <http://www.ischebeck.ru> [«New ways in geoengineering» // Official site Friedr. Ischebeck GmbH. — URL: <http://www.ischebeck.ru>]

10. Tekhnologiya TITAN // Ofitsial'nyy sayt Friedr. Ischebeck GmbH. — URL: <http://www.ischebeck.ru> [TITAN technology // Official site Friedr. Ischebeck GmbH. — URL: <http://www.ischebeck.ru>]

11. Mikrosvai // Ofitsial'nyy sayt Friedr. Ischebeck GmbH. — URL: <http://www.ischebeck.ru> [Micro-piles // Official site Friedr. Ischebeck GmbH. — URL: <http://www.ischebeck.ru>]

УДК 624.154.51

© Р. И. Шенкман, аспирант

© А. Б. Пономарев, д-р техн. наук, профессор
(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет)

E-mail: rshen@list.ru, andreypab@mail.ru

© R. I. Shenkman, post-graduate student

© A. B. Ponomaryov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Perm National Research Polytechnic
University)

E-mail: rshen@list.ru, andreypab@mail.ru

ПОДБОР ГЕОСИНТЕТИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ДЛЯ ГРУНТОВЫХ СВАЙ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ г. ПЕРМИ

SELECTION OF GEOSYNTHETIC CASING FOR SOIL PILES AND THEIR EFFECTIVENESS IN APPLICATION IN THE GEOLOGICAL CONDITIONS OF PERM

Рассматривается проблема эффективности применения грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов в геологических условиях г. Перми, возможности проектирования подобных конструкций в рамках существующей нормативной литературы. Представлены результаты экспериментальных исследований, связанных с определением критериев прочности геосинтетических материалов, а также указаны направления дальнейших научных исследований.

Ключевые слова: грунтовые сваи, геосинтетическая оболочка, экспериментальные исследования.

The paper deals with issues related to the problem of applying soil piles in the geosynthetic casing in the geological conditions of Perm region, as well as the possibility of designing such structures within the existing normative literature. The results of experimental tests are presented in relation to the determination of the strength criteria for geosynthetic materials, a possible directions for future research are indicated.

Key words: soil piles, geotextile cover, experimental research.

На территории Пермского края встречается множество участков, представленных слабыми грунтами, например поймы рек, болота, торфяники и т. д. Использование грунтовых свай для улучшения слабых оснований — способ не новый, доказавший свою эффективность при строительстве насыпей. Данный метод по-

зволяет значительно снизить осадки и повысить несущую способность грунтов, в то же время он является механическим, а следовательно, наиболее эффективным в глинистых грунтах, которые преобладают на территории Пермского края. Применение современных геосинтетических материалов позволяет значительно повысить экс-

платационные качества конструкций данного типа, а также избежать характерных для них недостатков, связанных с постоянством геометрии поперечного сечения сваи, как во время производства, так и во время эксплуатации. Все эти факторы делают очень актуальным применение грунтовых свай для улучшения слабых грунтов на территории Пермского края.

Существует значительное количество исследований, подтверждающих эффективность грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов. Они выполнены такими учеными, как С. М. Кислов, А. Н. Краев, А. Б. Пономарев, J. Gniel, A. Paul, H. Kempfert, U. Trunk и другие [1–3, 9–11, 13–14]. По результатам исследований определено, что применением данных конструкций можно добиться снижения осадок основания до 60 %, повысить экономическую эффективность строительства фундаментов на 30 % и т. д. Практически все выполненные исследования сводятся к рассмотрению модели расчета основания, улучшенного грунтовыми сваями, которая заключается в выделении в грунтовом массиве элементарного участка (сваи и окружающего ее грунта) и решении уравнения предельного равновесия сил, действующих на данном участке. При этом в расчете учитывается действующая вертикальная нагрузка на сваю и межсвайное пространство, растягивающее усилие в геосинтетическом материале, боковое давление грунта сваи и окружающего грунтового массива.

Наиболее полно методика расчета основания, улучшенного грунтовыми сваями в оболочке из геосинтетического материала, представлена в работе Н. Kempfert [9]. Согласно этой модели при передаче на основание вертикальной нагрузки в материале заполнения грунтовой сваи возникает напряженное состояние, равномерно распределенное по сечению и по боковой поверхности оболочки сваи. Удерживающими усилиями при этом являются пассивное действие окружающего грунта и растягивающее усилие в геосинтетическом материале. В этом случае боковое давление грунта определяется в зависимости от величины вертикального давления через известный коэффициент бокового давления ξ , вычисляемый по формуле

$$\xi = \operatorname{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right).$$

В то же время использование данного коэффициента плохо согласуется с экспериментальными данными по его определению для конструкции с высокими замкнутыми стенками, которой, по сути, и является грунтовая свая [13]. Также, если проанализировать напряженное состояние грунтовой сваи при ее работе в глинистых грунтах, обладающих сцеплением, можно предположить, что взаимодействие ее с грунтовым массивом будет принципиально отличаться от классической работы сваи-стойки, а следовательно, в теле грунтовой сваи не будет наблюдаться равномерного распределения напряжений, поскольку при работе грунтовой сваи-стойки будут присутствовать вертикальные деформации сваи, связанные с уплотнением материала заполнения и деформированием поперечного сечения сваи (в отличие от железобетонной сваи), что в дальнейшем приведет к мобилизации сил трения окружающего массива по боковой поверхности и уменьшению величины вертикальных напряжений в теле сваи с глубиной.

Вопрос проектирования и устройства грунтовых свай в России слабо изучен, такие сваи сложно применять в рамках существующей жесткой устаревшей нормативной базы. По действующим регламентирующим документам [8] данный тип усиления можно рассматривать как отдельные сваи, то есть находить несущую способность отдельной грунтовой сваи по сумме несущих способностей острия и боковой поверхности (сил трения), определение которых основано на большом количестве эмпирических данных. Возможны и различные гипотезы расчета в зависимости от технологии изготовления грунтовой сваи, — как буровой или как сваи вдавливания (разное значение сопротивления по боковой поверхности), которые также будут влиять и на грунтовую сваю. Несущая способность отдельной сваи — важный вопрос, но в соответствии с нормативными требованиями основным является расчет по прогнозируемым деформациям оснований и фундаментов. Поэтому для их корректного определения требуется применение специальных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов, которые позволяют производить расчеты с учетом многообразных факторов, влияющих на работу отдельных свай и свайных групп.

Поскольку рассматриваемые грунтовые сваи предполагается использовать под фундаменты различных типов сооружений, что подразумевает передачу на них широкого спектра нагрузок, возникает вопрос рационального выбора геосинтетического материала для оболочки сваи. В настоящее время к геосинтетикам предъявляется множество требований, связанных с размером частиц заполнителя, дренажными свойствами, технологией изготовления, но основным требованием является прочность, поскольку грунтовые сваи — это деформируемые системы, жесткость которых обеспечивается материалом геосинтетической оболочки. При использовании данных свай в слабых грунтах оболочка будет воспринимать значительную нагрузку.

Изучению прочности оболочек грунтовых свай посвящена основная часть данного исследования. Авторами сформулированы следующие задачи:

- определение соответствия существующих методик расчета для оценки реальной работы грунтовых свай и возможности их использования для определения критериев прочности оболочки из геосинтетического материала;
- определение наиболее точного метода моделирования и расчета грунтовой сваи в оболочке из геосинтетического материала.

Для достижения этих целей проведена серия экспериментов, а также численное моделирование в программном комплексе Plaxis.

Для изучения напряженно деформированного состояния геосинтетической оболочки грунтовой сваи проведен ряд экспериментальных исследований, разбитых на два этапа:

- этап I: проведены экспериментальные исследования «упрощенной» модели работы грунтовой сваи — без учета действия окружающего грунта. При этом проверялось предположение, связанное с распределением бокового давления по высоте грунтовой сваи;

- этап II: проведены испытания маломасштабных моделей грунтовых свай с учетом действия окружающего грунта.

Эксперименты выполнялись на маломасштабных моделях грунтовых свай. Для экспериментальных исследований были изготовлены модели грунтовой сваи из мелкозернистого однородного песка, обернутого различными геосинте-

тическими материалами. Физико-механические характеристики песка были получены в результате лабораторных исследований. В качестве материала обертывания использовался «Дорнит» нетканый, иглопробивной.

Математическое описание эксперимента составлено на основе наиболее распространенной аналитической модели расчета улучшенных оснований [9]. По данной модели при вертикальном нагружении сваи на оболочку оказывается равномерно распределенное давление. Значение растягивающих усилий в оболочке из геосинтетика в дальнейшем легко определить по теории расчета тонкостенных цилиндрических оболочек. Расчетная схема эксперимента представлена на рис. 1.

Для определения механических характеристик материала обертывания были проведены лабораторные испытания на разрыв образцов используемого геосинтетического материала с построением диаграмм, по которым впоследствии определялись действующие в оболочке растягивающие усилия, соответствующие замерным значениям относительных радиальных деформаций сечения грунтовой сваи. Испытательный стенд с установленной грунтовой свайей представлен на рис. 2.

В процессе проведения эксперимента проводились замеры геометрических размеров поперечных сечений сваи в разных точках по длине. Затем по полученным замерам определялись относительные радиальные деформации поперечного сечения ϵ_0 . Примеры графиков распределения относительных радиальных деформаций ϵ_0 по высоте модели грунтовой сваи h представлены на рис. 3.

Затем результаты экспериментальных исследований сравнили с данными вычислений, выполненных по представленной выше аналити-

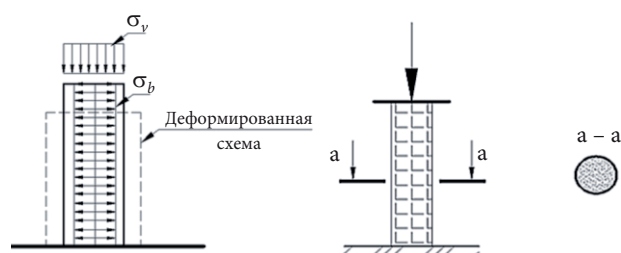


Рис. 1. Расчетная схема эксперимента

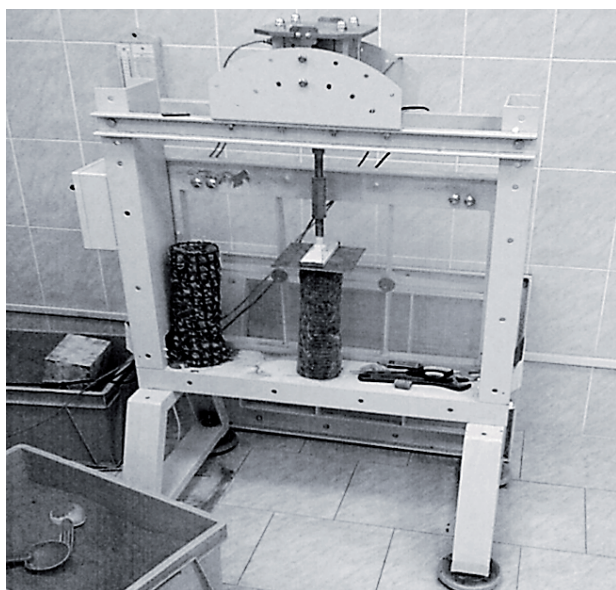


Рис. 2. Общий вид испытательного стенда

ческой модели. В соответствии с полученными данными испытаний радиальные деформации по высоте грунтовой сваи далеки от равномерных. Анализ экспериментальных данных показал, что отклонения растягивающих усилий в оболочке ниже вычисленных по аналитической модели для осредненных значений на 35 %, а для максимальных значений — на 13 %. Это говорит о значительной неравномерности растягиваю-

щих усилий, действующих в геосинтетической оболочке, связанной со сложным напряженным состоянием оболочки и неравномерностью плотности материала ее заполнения. Следовательно, представленная методика не позволяет точно определить требуемую прочность геосинтетического материала. Также в выполненном эксперименте не учитывались высокие контактные напряжения на границе материала заполнения и геосинтетической оболочки, в случае использования каменных материалов, что значительно снижает предельную нагрузку, передаваемую на геосинтетический материал. Это явление связано с формой зерен щебня и было исследовано в работах J. Gniel [13]. На втором этапе лабораторных исследований был выполнен эксперимент с учетом действия окружающего грунта (рис. 4).

Наиболее опасное сечение в данных условиях — сечение оболочки, непосредственно находящееся под грузовым штампом, так как в нем пассивное действие окружающего грунта стремится к нулю. Критерием разрушения оболочки было принято резкое нарастание деформаций штампа. В соответствии с данными аналитических расчетов разрыв оболочки грунтовой сваи должен произойти при нагрузке в 695 кПа, что соответствует 213,36 кН/м² бокового давления. По данным экспериментальных испытаний разрушение образца произошло при вертикальной

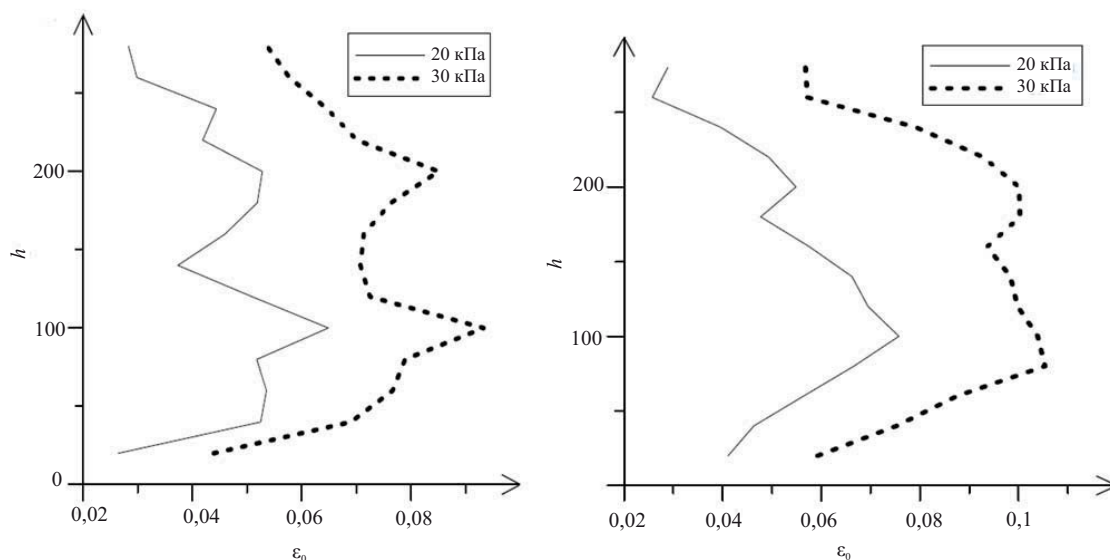


Рис. 3. Распределение относительных радиальных деформаций в сечениях грунтовой сваи при различном значении внешней нагрузки по высоте

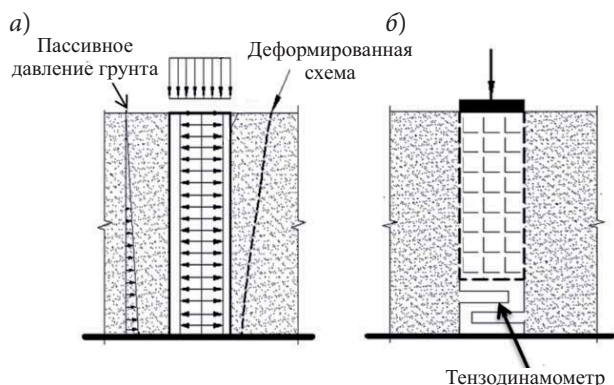


Рис. 4. Схемы эксперимента второго этапа: а — расчетная; б — нагружения

нагрузке в 750 кПа на глубине 50 мм. С учетом действия окружающего грунта (по методу суперпозиции) боковое давление на данном участке равно 227 кН/м^2 , что выше аналитического решения на 7 %. Значения напряжений в голове и в острие сваи на каждом этапе загрузки отличались между собой менее чем на 5 %. В данных условиях маломасштабная модель работала по схеме сваи-стойки, передавая фактически всю полезную нагрузку на острие, следовательно, полученные результаты сопоставимы с теоретическими расчетами. Однако в лабораторных условиях не удалось смоделировать влияние окружающего грунта, которое, по мнению авторов, должно значительно изменить напряженное состояние грунтовой сваи. Поэтому более достоверную картину взаимодействия грунтовой сваи с окружающим грунтом можно получить на основе натурных или полунатурных испытаний.

Далее в процессе исследования было проведено численное моделирование тестовых задач с применением программного комплекса Plaxis. Его цель — определение эффективности применения грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов в качестве метода улучшения слабого основания в геологических условиях г. Перми, а также определение напряженно-деформированного состояния грунтовой сваи и его соответствия основным существующим расчетным моделям.

Описание геологических условий г. Перми, использованных при численном моделировании, сделано на примерах конкретных геологических

изысканий, а также архивных данных изыскательских организаций, согласно которым слабый грунт основания представлен суглинками текуче-пластичной консистенции, а подстилающий — аргиллитами.

Для постановки тестовых примеров было принято решение рассмотреть плоскую осесимметричную задачу с использованием упруго-пластической модели грунта Мора–Кулона. Для сравнения эффективности принятых решений были рассмотрены модели фундамента на естественном основании с грунтовой свай с применением геосинтетической оболочки и без нее.

По результатам моделирования были получены поля напряжений в грунтовом массиве, пример которых представлен на рис. 5. При анализе представленных полей напряжений можно сделать некоторые выводы о напряженном состоянии грунтовой сваи. Одним из наиболее важных будет вывод, что в теле грунтовой сваи происходит рассеивание вертикальных напряжений с глубиной из-за сжатия грунтовой сваи и деформаций ее поперечного сечения.

Эпюра распределения вертикальных напряжений по длине грунтовой сваи s_v и растягивающих усилий T в геосинтетической оболочке по глубине z представлена на рис. 6.

По результатам численного моделирования были построены графики зависимости осадки фундамента на различных типах основания:

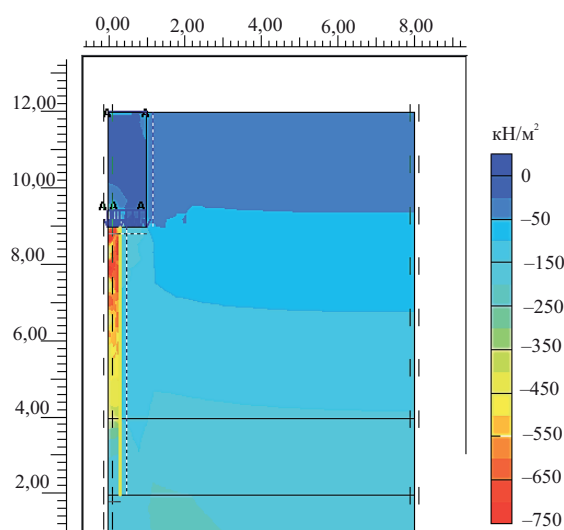


Рис. 5. Поля вертикальных напряжений в массиве грунта с использованием грунтовой сваи в оболочке

естественного (без улучшения); улучшенного грунтовой свай без применения геосинтетических материалов; улучшенного с применением геосинтетических материалов разной жесткости. Графики, представленные на рис. 7, демонстрируют эффективность применения грунтовых свай в данных геологических условиях.

При постановке тестовой задачи были использованы геосинтетические материалы трех различных погонных жесткостей: 500, 1000 и 1500 кН/м — соответственно Геос. 1, Геос. 2 и Геос. 3 (рис. 7). Из представленных данных видно, что увеличение жесткости геосинтетической оболочки положительно сказывается на величине осадок улучшенного основания.

По результатам численного моделирования установлено, что при применении грунтовых свай без армирования геосинтетическим материалом эффективность снижения осадок по сравнению с неулучшенным основанием составляет 27 %; с применением геосинтетического материала жесткостью 500 кН/м (Геос. 1) — 38 %; жесткостью 1000 кН/м (Геос. 2) — 42 %; жесткостью 1500 кН/м (Геос. 3) — 46 %.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- результаты численного моделирования во многом соответствуют выполненному анализу напряженного состояния грунтовой сваи в оболочке и являются наиболее корректным спосо-

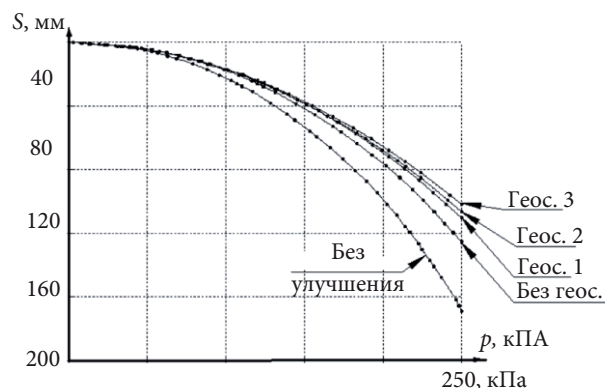


Рис. 7. Графики зависимости осадок основания от величины вертикальной нагрузки для различных типов основания

бом проектирования рассмотренного вида улучшенного основания;

- применение предложенного метода улучшения основания высоко эффективно в геологических условиях г. Перми;
- существующие аналитические методы недостаточно точно описывают реальную работу конструкции грунтовой сваи в оболочке;
- данная тема недостаточно изучена как в России, так и в других странах и требует значительных дополнительных исследований для дальнейшего успешного развития; в частности, отсутствует апробированная инженерная методика подбора геосинтетических материалов для оболочки грунтовой сваи.

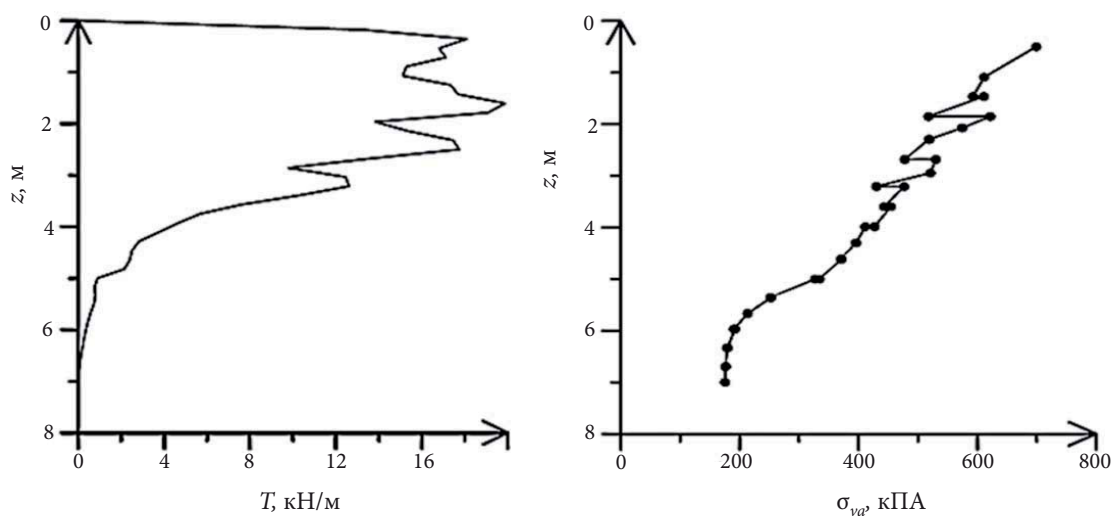


Рис. 6. Эюры распределения растягивающих усилий в оболочке из геосинтетического материала по глубине грунтовой сваи

Дальнейшие исследования в данной области авторы предполагают вести в направлении, связанном с более глубоким изучением напряженно-деформированного состояния оболочки грунтовой сваи и выработкой конкретных рекомендаций по подбору геосинтетических материалов в инженерной практике. Предполагается провести испытания масштабных моделей грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов с использованием установок трехосного сжатия, что позволит получить модифицированные прочностные и деформационные характеристики грунтовых элементов для использования их в перспективной разработке инженерных методик расчета.

Список литературы

1. Краев, А. Н. Повышение несущей способности водонасыщенного глинистого основания за счет внедрения песчаных армированных свай / А. Н. Краев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2008. — № 4. — С. 146–150.
2. Пономарев, А. Б. Исследование несущей способности грунтовой колонны в оболочке из геосинтетической решетки / А. Б. Пономарев, С. М. Кислов // Материалы междунар. науч.-практ. конф. — Архангельск, 2003.
3. Пономарев, А. Б. О некоторых теоретических подходах к расчету свай из щебня в георешетке / А. Б. Пономарев, А. Пауль // Сб. науч. тр. междунар. конф. по механике грунтов. — Пермь, 2004.
4. Калошина, С. В. Оценка статического влияния вновь возводимых плитных фундаментов на дополнительную осадку зданий в условиях плотной застройки г. Перми: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. В. Калошина. — СПб., 2011. — 20 с.
5. Шенкман, Р. И. Применение грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов в геологических условиях г. Перми для возведения фундаментов зданий и сооружений / Р. И. Шенкман, А. Б. Пономарев // Вестник ПНИПУ Урбанистика. — 2012. — № 2. — С. 28–36.
6. Шенкман, Р. И. Эффективность применения грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов в геологических условиях г. Перми / Р. И. Шенкман, А. Б. Пономарев // Вестник ПГТУ Строительство и архитектура. — № 1. — С. 89–94.
7. Цытович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. — 4-е изд., перераб. — М., 1963. — 636 с.
8. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная версия СНиП 2.02.03–85. Введ.

20.05.2011. — М.: Минрегион России, 2011. — 86 с.

9. Kempfert, H. Excavations and Foundations in Soft Soil / H. Kempfert, B. Gebreselassie. — Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. — 591 p.
10. Gniel, Joel. Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns / Joel Gniel, Abdelmalek Bouazza // Geotextiles and Geomembranes. — 2009. — № 27. — P. 167–175.
11. Geogrid wrapped vibro stone columns / U. Trunk, G. Heerten, A. Paul, E. Reuter // Materials of Eurogeo 3 conference. — 2004. — P. 289–294.
12. Castro, Jorge. Deformation and consolidation around encased stone columns / Jorge Castro, Cesar Sagasetta // Geotextiles and Geomembranes, 2011. — № 29. — P. 268–276.
13. Gniel, J. Construction of geogrid encased stone columns: A new proposal based on laboratory testing / J. Gniel, A. Bouazza // Geotextiles and Geomembranes. — 2010. — № 28. — P. 108–118.
14. Paul, A. The bearing behavior of geogrid reinforced, crushed stone columns in comparison to non-reinforced concrete pile foundations / A. Paul, A. Ponomaryov // Proceedings of the Eurogeo 3. — Vol. II. — Munich, 2004. — P. 285–289.

References

1. Kraev, A. N. Povyshenie nesushchey sposobnosti vodonasyshchennogo glinistogo osnovaniya za schet vnedreniya peschanykh armirovannykh svay / A. N. Kraev // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. — 2008. — № 4. — S. 146–150. [Kraev, A. N. Improving the bearing ability of the water saturated clay basis at the expense of introducing sandy reinforced piles / A. N. Krayev // Bulletin of Tomsk state university of architecture and construction. — 2008. — № 4. — P. 146-150.]
2. Ponomarev, A. B. Issledovanie nesushchey sposobnosti gruntovoy kolonny v obolochke iz geosinteticheskoy reshetki / A. B. Ponomarev, S. M. Kislov // Materialy mezhhdunar. nauch.-prakt. konf. — Arkhangel'sk, 2003. [Ponomarev, A. B. Research of bearing ability of the soil column in a case of geosynthetic lattice / A. B. Ponomarev, S. M. Kislov // Materials of the intern. sci. pract. conf. — Arkhangel'sk, 2003.]
3. Ponomarev, A. B. O nekotorykh teoreticheskikh podkhodakh k raschetu svay iz shchebnya v georeshetke / A. B. Ponomarev, A. Paul // Sb. nauch. tr. mezhhdunar. konf. po mekhanike gruntov. — Perm', 2004. [Ponomarev, A. B. About some theoretical approaches to calculation of piles from rubble in geolattice / A. B. Ponomarev, A. Paul // Coll. of sci. works of the intern. conf. on soil mechanics. — Perm, 2004.]

4. *Kaloshina, S. V.* Otsenka staticheskogo vliyaniya vnov' vozvodimyykh plitnykh fundamentov na dopolnitel'nuyu osadku zdaniy v usloviyakh plotnoy zastroyki g. Permi: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk / S. V. Kaloshina. — SPb., 2011. — 20 s. [*Kaloshina, S. V.* Evaluation of static influence of newly erected plate bases on additional settlement of buildings in the conditions of dense building development of Perm: author's abstract of diss. work for ... PhD in Sci. Tech. / S. V. Kaloshina. — SPb., 2011. — 20 p.]
5. *Shenkman, R. I.* Primeneniye gruntovykh svay v obolochke iz geosinteticheskikh materialov v geologicheskikh usloviyakh g. Permi dlya vozvedeniya fundamentov zdaniy i sooruzheniy / R. I. Shenkman, A. B. Ponomarev // Vestnik PNIPU Urbanistika. — 2012. — № 2. — S. 28-36. [*Shenkman, R. I.* Using soil piles in casing from geosynthetic materials in geological conditions of Perm for construction of buildings bases and constructions / R. I. Shenkman, A. B. Ponomarev // Bulletin of PNRPU Urbanistics. — 2012. — № 2. — P. 28-36.]
6. *Shenkman, R. I.* Ehfektivnost' primeneniya gruntovykh svay v obolochke iz geosinteticheskikh materialov v geologicheskikh usloviyakh g. Permi / R. I. Shenkman, A. B. Ponomarev // Vestnik PGTU Stroitel'stvo i arkhitektura. — № 1. — S. 89-94. [*Shenkman, R. I.* Efficiency of application of soil piles in a cover from geosynthetic materials in geological conditions of Perm / R. I. Shenkman, A. B. Ponomarev // Bulletin of PGTU Construction and architecture. — № 1. — P. 89-94.]
7. *Tsytoovich, N. A.* Mekhanika gruntov / N. A. Tsytoovich. — 4-e izd., pererab. — M., 1963. — 636 s. [*Tsytoovich, N. A.* Soil mechanics / N. A. Tsytoovich. — 4th issue, revised. — M., 1963. — 636 p.]
8. SP 24.13330.2011. Svaynye fundamenty. Aktualizirovannaya versiya SNIIP 2.02.03-85. Vved. 20.05.2011. — M.: Minregion Rossii, 2011. — 86 s. [SP 24.13330.2011. Pile bases. The actualized version SNIIP 2.02.03-85. Intr. 20.05.2011. — M.: Ministry of Regional Development of Russia, 2011. — 86 p.]
9. *Kempfert, H.* Excavations and Foundations in Soft Soil / H. Kempfert, B. Gebreselassie. — Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. — 591 p.
10. *Gniel, Joel.* Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns / Joel Gniel, Abdelmalek Bouazza // Geotextiles and Geomembranes. — 2009. — № 27. — P. 167-175.
11. Geogrid wrapped vibro stone columns / U. Trunk, G. Heerten, A. Paul, E. Reuter // Materials of Eurogeo 3 conference. — 2004. — P. 289-294.
12. *Castro, Jorge.* Deformation and consolidation around encased stone columns / Jorge Castro, Cesar Sagasetta // Geotextiles and Geomembranes, 2011. — № 29. — P. 268-276.
13. *Gniel, J.* Construction of geogrid encased stone columns: A new proposal based on laboratory testing / J. Gniel, A. Bouazza // Geotextiles and Geomembranes. — 2010. — № 28. — P. 108-118.
14. *Paul, A.* The bearing behavior of geogrid reinforced, crushed stone columns in comparison to non-reinforced concrete pile foundations / A. Paul, A. Ponomaryov // Proceedings of the Eurogeo 3. — Vol. II. — Munich, 2004. — P. 285-289.