Численные исследования работы забивной сваи на аргиллитоподобных глинах

Е.Н. Сычкина, В.В. Антипов, Я.В. Офрихтер

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ),
614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены особенности работы сваи на аргиллитоподобных глинах пермского возраста при помощи численных и натурных экспериментов, аналитических расчетов.

Материалы и методы. Численное моделирование выполнено в программных комплексах Plaxis 3D и Midas GTS NX. Натурные испытания забивных свай проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 20276-2012. Полученные результаты сопоставлены с результатами аналитических расчетов по СП 24.13330.2011.

Результаты. Научная новизна работы — в сравнительном анализе результатов численного моделирования взаимодействия забивной сваи с аргиллитоподобными глинами с результатами полевых испытаний и аналитических расчетов. Расчет методом конечных элементов в программном комплексе Plaxis 3D с использованием модели Hardening Soil показал завышенные значения осадки (до 6 раз) по отношению к стабилизированным осадкам натурных свай. Расчеты в программном комплексе Midas GTS NX выявили завышенные по отношению к натурным испытаниям значения осадки свай (13–24 раза). Аналитические расчеты в соответствии с СП 24.13330.2011 также показали завышенные (до 3 раз) значения максимальной осадки сваи по отношению к стабилизированной осадке при натурных испытаниях свай.

Выводы. Расчеты методом конечных элементов в программных комплексах Plaxis 3D и Midas GTS NX, аналитическим методом по СП 24.13330.2011 показали завышенные значения осадки по отношению к стабилизированным осадкам свай на аргиллитоподобных глинах. Использование модели Linear-Elastic для аргиллитоподобных глин при численных расчетах в Plaxis 3D позволяет получить значения осадок близкие к натурным. Однако применение данной модели не в полной мере оправдано для аргиллитоподобной глины в связи с наличием остаточных деформаций и нелинейным характером осадки сваи при нагружении. Необходима корректировка существующих численных и аналитических методов расчета свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах. Следует продолжать работы по дальнейшему обобщению опыта устройства свай на выветрелых аргиллитоподобных глинах для оценки длительной работы не только одиночной сваи, но и свайного фундамента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: свая, фундамент, аргиллитоподобная глина, осадка, несущая способность, метод конечных элементов, Plaxis 3D, Midas GTS NX, реология, ползучесть

Благодарности. Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду (исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда — проект № 18-79-00042).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сычкина Е.Н., Антипов В.В., Офрихтер Я.В. Численные исследования работы забивной сваи на аргиллитоподобных глинах // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 2. С. 188–198. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.188-198

Numerical investigations of work of driven pile on claystones

Evgeniya N. Sychkina, Vadim V. Antipov, Yan V. Ofrikhter

Perm National Research Polytechnic University (PNRPU),
29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Reviewed the features of the work of the pile on Permian claystones with the help of numerical and field experiments, analytical calculations.

Materials and methods. Numerical modeling was performed in the Plaxis 3D and Midas GTS NX software packages. Full-scale tests of driven piles are made in accordance with the requirements of GOST 20276-2012. The obtained results are compared with the results of analytical calculations according to SP 24.13330.2011.

Results. The scientific novelty of the investigation consists in a comparative analysis of the results of numerical modeling of the interaction of a driving pile with claystones with the results of field tests and analytical calculations. Finite element analysis in software package Plaxis 3D using Hardening Soil model shows higher values of settlement (up to 6 times) in relation to stabilized settlement of full-scale pile tests. Calculations in the software package Midas GTS NX showed overestimated values of pile settlements in relation to full-scale pile tests (13–24 times). Analytical calculations in accordance with SP 24.13330.2011 also showed overestimated (up to 3 times) values of the maximum pile settlement in relation to the stabilized settlement during full-scale pile tests.

Conclusions. The calculations by the finite element method in the package Plaxis 3D and Midas GTS NX, by the analytical method according to SP 24.13330.2011, show overestimated values of settlement in relation to the stabilized settlement of piles on claystones. Using the Linear-Elastic model for claystones in numerical calculations in Plaxis 3D provides a value

close to the settlement of full-scale pile. However, the use of this model is not fully justified for claystones due to the presence of residual deformations and the nonlinear character of pile settlement during loading. Necessary to correct the existing numerical and analytical methods for calculating pile foundations on claystones. It is necessary to continue the work on the further generalization of the experience of arranging piles on weathered claystones in order to evaluate the long-term work of not only a single pile, but also a pile foundation.

KEYWORDS: pile, foundation, claystone, settlement, bearing capacity, finite element method, Plaxis 3D, Midas GTS NX, rheology, creep

Acknowledgements. The authors are grateful to the Russian Science Foundation (the research was carried out by a grant from the Russian Science Foundation — project No. 18-79-00042).

FOR CITATION: Sychkina E.N., Antipov V.V., Ofrikhter Y.V. Numerical investigations of work of driven pile on claystones. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:2:188-198. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.188-198 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время свайные фундаменты широко применяются при строительстве высоконагруженных зданий и сооружений. В работах [1–4] было доказано, что механические свойства грунта основания фундамента определяются особенностями его формирования. В данном исследовании рассмотрены результаты численного моделирования работы забивных свай на грунтовом основании, сложенном аргиллитоподобными глинами пермского возраста, имеющими широкое распространение в европейской и южной части России, странах Западной Европы и Центральной Азии [5, 6]. Под действием нагрузки от фундамента в аргиллитоподобных глинах формируется особое напряженно-деформированное состояние (НДС), отличное от НДС в современных глинистых грунтах. В ходе истории формирования литифицированные пермские аргиллитоподобные глины испытали разуплотнение, выветривание и техногенные воздействия. В настоящее время массив аргиллитоподобных глин представляет собой неоднородную, слоистую, трещиноватую среду. В отличие от дисперсных грунтов аргиллитоподобные глины имеют цементационные связи. Результаты исследований [6–9] свидетельствуют о том, что выветривание аргиллитоподобных глин может приводить к снижению несущей способности и увеличению осадки фундамента. Во многом эта неустойчивость к механическим и температурным воздействиям обусловлена наличием у данных грунтов слабого глинистого, железистого и карбонатного цемента.

Актуальность данной работы заключается в том, что длительные натурные испытания фундаментов на аргиллитоподобных глинах практически отсутствуют. Поэтому выполнение комплексных исследований (натурных и численных экспериментов, аналитических расчетов) является актуальной задачей для многих стран мира, где данные отложения используются в качестве оснований фундаментов.

Научная новизна исследования — в сравнительном анализе значений стабилизированной длительной осадки сваи на аргиллитоподобных глинах пермского возраста, численного моделирования в программных комплексах Plaxis 3D и Midas GTS NX и аналитического расчета по СП 24.13330.2011.

Вопросами функционирования свайных фундаментов в глинистых грунтах, в том числе опирающихся на аргиллитоподобные глины, занимались многие ученые [2–4, 10–28]. В работах [2–4] было выявлено, что характер взаимодействия одиночной сваи с массивом аргиллитоподобных глин значительно отличается от характера взаимодействия сваи с дисперсными глинистыми грунтами. Экспериментальные и теоретические исследования [11, 12] свидетельствуют о том, что при проектировании свайных фундаментов по предельным состояниям первостепенное значение будет иметь расчет осадок и их накопление во времени. В труде [11] доказано, что свайные фундаменты работают как единый массив и для развития зон пластических деформаций и достижения предельного состояния грунта нужны значительно большие нагрузки, чем для достижения предельной осадки.

Анализируя краткосрочные испытания свай на выветрелых скальных грунтах необходимо учитывать, что осадки при таких испытаниях имеют заниженные значения. При нагружении сваи в грунтах основания возникают процессы закрытия существующих микротрещин, в активной зоне наблюдается уменьшение пористости грунта. На основаниях, обладающих реологическими свойствами, необходимо прогнозировать длительное взаимодействие свайного фундамента и грунтового основания [11, 18]. Реологические процессы в твердых глинах и песчаниках не завершаются по окончании фильтрационного уплотнения и продолжают длительное время. Особенностью кривых ползучести является то, что в первые часы после передачи нагрузки на сваю развивается до 90 % упруго-вязких деформаций. В дальнейшем деформируемость существенно

замедляется, и кривые асимптотически стремятся к некоторому пределу, зависящему от величины заданной нагрузки. Форма кривых зависит от генезиса, состава и строения грунта. В работе [18] подтверждено, что осадка свай-штампа на основании из вендских глин возрастает за 16 сут не менее чем в 2 раза. Существенные отличия характерны для работы одиночной сваи и куста свай. В исследовании [11] доказано, что осадка одиночной сваи в пределах участка линейной зависимости на графике нагрузка — осадка меньше осадки куста свай. Краткосрочные осадки одиночной сваи не превышали 2–3 мм, а стабилизированные длительные осадки одиночной сваи в глинах тугопластичной и твердой консистенции превышали краткосрочные осадки свай примерно в 3–4 раза. Осадки однорядного свайного фундамента с шагом свай $6d$ — в 2–2,5 раза, а при шаге $3d$ были в 3–4 раза больше осадки одиночной сваи. Стабилизированные осадки таких фундаментов по абсолютной величине не превышали 25–35 мм. Осадка свайного фундамента из девяти свай в глинистых грунтах туго- и мягкопластичной консистенции была в 3–6 раз больше осадки одиночной сваи при соответствующих нагрузках. Неравномерность осадок и относительные прогибы также были значительно меньше предельно допустимых [11].

В исследованиях [29, 30] доказано, что на несущую способность сваи на выветрелых скальных грунтах будет влиять ряд факторов: структурные особенности массива грунта, свойства контакта сваи с грунтом, отношение глубины заделки сваи в скальный массив к ее диаметру. Необходимость учета всех указанных факторов усложняет решение задачи о взаимодействии сваи с выветрелыми аргиллитоподобными глинами пермского возраста. Несущая способность забивных свай, опирающихся на кембрийские глины полутвердой консистенции, изучена в работе [31]. По данным испытаний, проведенных через 8–26 сут после забивки, предельное сопротивление сваи составляло 330–480 кН. Дальнейший «отдых» способствовал восстановлению структурных связей в глинистом грунте, перемятом при забивке свай. Испытания, проведенные через 240 сут и через 18 лет после забивки, показали, что предельное сопротивление сваи возросло через 240 сут в 1,4 раза (до 370–450 кН), а через 18 лет — в 1,6–2,0 раза (до 420–630 кН). По экспериментальным данным [11] несущая фундамента из девяти свай в глинистых грунтах мягко- и тугопластичной консистенции через 6 сут составляет 1600 кН, через 45 сут — 2450 кН. Для фундамента из четырех свай несущая способность через 6 сут составила 595 кН, через 40 сут — 1100 кН.

Данная работа призвана решить вопрос о предельных значениях и характере развития осадки сваи на основании, сложенном аргиллитоподобными глинами. Для достижения этой цели в ходе

исследования авторами были решены следующие задачи:

1. Описана методика и выполнены экспериментальные исследования работы сваи на аргиллитоподобных глинах.
2. Выполнено численное моделирование работы забивных свай на аргиллитоподобных глинах в программных комплексах Plaxis 3D и Midas GTS NX.
3. Выполнен анализ результатов полевых испытаний, численных экспериментов и аналитических расчетов, сформулированы выводы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки функционирования свайных фундаментов в ходе экспериментального исследования были выполнены испытания натурных забивных свай № 407, 592, 403, 587. Методика испытаний соответствовала методике, приведенной в ГОСТ 20276-2012. Под острием свай встречена аргиллитоподобная глина коричневого цвета, низкой и средней прочности, средней плотности, сильнопористая, выветрелая. На площадках испытаний аргиллитоподобные глины перекрыты слоем современных песчано-глинистых отложений мощностью от 5,0 до 13,0 м. Все испытанные натурные сваи забивные железобетонные, сечением $0,3 \times 0,3$ м, из бетона класса В25. Заглубление в аргиллитоподобные глины и песчаники забивных свай составляло от 1,0 до 2,0 м. Глубина испытаний для забивных свай — 8–10 м.

Всего в данной работе рассмотрено четыре испытания одиночных забивных свай на аргиллитоподобной глине. Значения некоторых физических и механических характеристик, определенных для аргиллитоподобных глин, представлены в табл. 1.

Для моделирования материала сваи была использована линейно-упругая модель с параметрами материала согласно СП 63.13330.2012. Деформационные и прочностные характеристики аргиллитоподобной глины определены из компрессионных испытаний и испытаний на трехосное сжатие. Значения параметров для грунтов принимались по данным трехосных испытаний откалиброванных с помощью модуля SoilTest в программном комплексе Plaxis 3D. Начальные напряжения генерировались с помощью процедуры K_0 с использованием коэффициентов $OCR = 1,8$ и $K_0 = 1,62$ для аргиллитоподобной глины для учета состояния переуплотнения. Нагружение свай при расчете производилось аналогично натурным испытаниям ступенями. При численном моделировании нагрузка передавалась на голову сваи в виде равномерно распределенной нагрузки по площади $0,09 \text{ м}^2$.

Выполненные испытания забивных натурных свай были смоделированы в программных комплексах Plaxis 3D и Midas GTS NX. При расчетах в про-

Табл. 1. Значения физических и механических характеристик аргиллитоподобных глин**Table. 1.** The values of physical and mechanical characteristics of claystones

Наименование характеристики / The name of the characteristics	Единицы измерения / Units measurements	Аргиллитоподобная глина / Claystones
Весовая влажность / Weight humidity	доли ед. / share units	0,16
Плотность / Density	г/см ³ / g/cm ³	2,09
Плотность сухого грунта / Dry soil density	г/см ³ / g/cm ³	1,80
Плотность минимальной части грунта / The density of the minimum part of the soil	г/см ³ / g/cm ³	2,65
Пористость / Porosity	%	31,95
Коэффициент пористости / Porosity coefficient	доли ед. / share units	0,49
Секущий модуль E_{s0} / Secant module E_{s0}	кПа / kPa	10 342
Одометрический модуль / Odometric module	кПа / kPa	10 483
Модуль разгрузки / Module of unloading	кПа / kPa	32 501
Удельное сцепление / Specific clutch	кПа / kPa	23,3
Угол внутреннего трения / Internal friction angle	градус / degree	37,0
Угол дилатансии / Angle of dilatancy	градус / degree	15,0

граммном комплексе Plaxis 3D по каждой из двух схем для моделирования аргиллитоподобной глины были последовательно использованы две модели: линейно-упругая (Linear-Elastic) и упрочняющегося грунта (Hardening Soil). Моделирование вышележащих слоев осуществлялось с помощью модели Hardening Soil.

При расчетах в программном комплексе Midas GTS NX для моделирования аргиллитоподобной глины были также использованы две модели: линейно-упругая (Linear-Elastic) и упрочняющегося грунта (Hardening Soil). Моделирование вышележащих слоев осуществлялось с помощью модели Мора–Кулона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам натурных испытаний построены графики зависимости осадки от времени для каждой ступени нагрузки. На рис. 1 представлены графики время–осадка для свай № 403. Графики время–осадка для свай № 407, 592, 587 имели аналогичный характер.

Анализ полевых испытаний свай показал, что графики осадки забивных свай на аргиллитоподобных глинах имеют нелинейный характер, резкие перегибы отсутствуют. В ходе испытаний свай несущая способность аргиллитоподобных глин не была исчерпана, но был достигнут предел прочности ма-

Рис. 1. Осадка сваи № 403 во времени**Fig. 1.** Settlement of pile No. 403 in time

териала свай. На графиках осадки можно выделить начальный участок линейно-упругих деформаций (при нагрузках до 250 кН), за которым следует протяженный участок, где деформации нелинейны. Графики время–осадка имеют вид затухающей ползучести. Стабилизация осадок на всех этапах нагружения длилась 3 ч, резких срывов на последних ступенях не было зафиксировано. Более 90 % деформаций происходило в течение 1 ч после приложения ступени нагрузки. Осадку свай на аргиллитоподобных глинах во времени можно разделить на две части. Осадка под нагрузкой доминирует в первой фазе и развивается в течение одного часа. Далее развиваются деформации ползучести, при которых скорость осадки свай изменяется от 0,01 мм/мин и стремится к нулю. Максимальные осадки натуральных свай на аргиллитоподобных глинах не превышали 3,37 мм. Значения осадок для натуральных свай № 407, 592, 403, 587 изменялись в пределах 2,17–3,37 мм. При анализе полученных результатов полевых испытаний свай следует помнить, что натурные испытания свай являются краткосрочными испытаниями и поэтому имеют заниженные значения осадки. Опираясь на данные [11] можно предположить, что ожидаемые стабилизированные длительные осадки одиночной сваи на аргиллитоподобных глинах будут составлять примерно 6...12 мм. Разгрузка натуральных свай на аргиллитоподобных глинах показала, что остаточные деформации составляли в среднем 54 % от полной осадки сваи и вызваны необратимым разрушением цементационных связей между твердыми частицами грунта.

Поля перемещений, полученные в программных комплексах Plaxis 3D и Midas GTS NX, для

одной из испытанных свай, представлены на рис. 2 и 3, соответственно.

Результаты полевых испытаний свай и расчетов в программных комплексах Plaxis 3D и Midas GTS NX сведены в табл. 2.

Анализируя результаты, представленные в табл. 2, следует помнить, что при расчетах в программных комплексах получаются стабилизированные осадки свай. При максимальных нагрузках на сваю расчетные осадки для свай № 407, 592, 403, 587 при использовании модели Hardening Soil в Plaxis 3D изменялись от 14,32 до 66,59 мм. Наибольшие значения осадки были получены для более коротких свай № 407 и 587. При использовании модели Linear-Elastic в программном комплексе Plaxis 3D расчетные осадки для всех четырех исследуемых свай имели более равномерный характер и изменялись от 9,05 до 12,17 мм, что хорошо согласуется с ожидаемыми стабилизированными длительными осадками одиночной сваи, приведенными в работе [11]. На основании выполненного моделирования в программном комплексе Plaxis 3D можно сделать вывод, что модель Hardening Soil не всегда позволяет получить адекватные значения осадки одиночной сваи на аргиллитоподобных глинах. Для двух из четырех исследуемых свай расчет показал превышение над прогнозируемыми стабилизированными осадками до 6 раз. Использование линейно-упругой модели для аргиллитоподобных глин позволяет получить значения осадки свай близкие к стабилизированным натурным осадкам, однако применение данной модели не в полной мере оправдано для аргиллитоподобной глины в связи с наличием оста-

Рис. 2. Поля перемещений, полученные для сваи № 407 в программном комплексе Plaxis 3D, где для аргиллитоподобных глин применялась: *a* — модель Linear-Elastic; *b* — модель Hardening Soil

Fig. 2. The displacement fields obtained for the pile No. 407 in the software package Plaxis 3D, where for claystones was applied: *a* — Linear-Elastic model; *b* — Hardening Soil model

Рис. 3. Поля перемещений, полученные для сваи № 407 в программном комплексе Midas GTS NX, где для аргиллитоподобных глин применялась: *a* — модель Linear-Elastic; *b* — модель Hardening Soil

Fig. 3. The displacement fields obtained for the pile No. 407 in the software package Midas GTS NX, where for claystones was applied: *a* — Linear-Elastic model; *b* — Hardening Soil model

Табл. 2. Результаты расчета осадки забивных свай в программных комплексах

Table 2. The results of the calculation of the settlement of driven piles in software packages

Номер сваи / No. of pile	Давление, кПа / Pressure, kPa	Осадка сваи при использовании разных моделей для аргиллитоподобной глины, мм / Settlement pile draft when using different models for claystones, mm				Осадка натурной сваи (краткосрочная), мм / Settlement of production pile (short-term), mm
		Plaxis 3D		Midas GTS NX		
		Модель Hardening Soil / Hardening Soil model	Модель Linear-Elastic / Linear-Elastic model	Модель Hardening Soil / Hardening Soil model	Модель Linear-Elastic / Linear-Elastic model	
407	200	2,05	1,70	0,00	0,00	0,00
	400	4,89	3,60	7,23	8,16	0,34
	600	9,63	5,89	32,86	25,73	0,44
	700	13,07	7,09	54,89	35,74	0,66
	800	17,15	8,34	77,62	45,76	0,90
	900	21,99	9,57	101,57	55,78	1,23
	1000	27,42	10,89	122,41	65,83	1,75
	1100	33,75	12,17	146,66	75,89	2,17
403	240	2,10	1,65	11,56	13,83	0,09
	360	3,23	2,51	18,13	20,54	0,42
	480	4,43	3,39	24,99	27,25	0,72
	600	5,71	4,29	32,13	33,96	1,04
	720	7,08	5,21	39,54	40,69	1,41
	840	8,59	6,15	58,75	48,49	1,80
	960	10,27	7,11	87,81	61,48	2,31
	1080	12,15	8,07	118,08	75,09	2,81
	1200	14,32	9,05	146,40	88,75	3,37

Номер сваи / No. of pile	Давление, кПа / Pressure, kPa	Осадка сваи при использовании разных моделей для аргиллитоподобной глины, мм / Settlement pile draft when using different models for claystones, mm				Осадка натурной сваи (краткосрочная), мм / Settlement of production pile (short-term), mm
		Plaxis 3D		Midas GTS NX		
		Модель Hardening Soil / Hardening Soil model	Модель Linear-Elastic / Linear-Elastic model	Модель Hardening Soil / Hardening Soil model	Модель Linear-Elastic / Linear-Elastic model	
587	240	3,52	2,04	0,00	0,00	0,00
	480	11,68	4,29	27,92	28,10	0,23
	720	26,32	6,75	78,83	68,38	0,98
	840	35,18	8,01	107,82	95,06	1,30
	960	44,99	9,30	138,78	122,60	1,77
	1080	55,43	10,58	165,87	150,89	2,25
	1200	66,59	11,88	—	—	3,10
592	240	2,16	1,81	8,51	11,52	0,20
	480	4,60	3,75	18,77	22,61	0,62
	720	7,50	5,84	—	39,09	1,26
	840	9,26	6,94	—	51,28	1,52
	960	11,29	8,08	—	63,51	1,72
	1080	13,70	9,24	—	75,73	2,01
	1200	16,55	10,43	—	—	2,33

точных деформаций и нелинейной зависимости между нагрузкой и деформациями. Авторы подчеркивают, что особое внимание при расчете необходимо уделять анизотропному начальному напряженно-деформированному состоянию аргиллитоподобных глин и введению в расчеты коэффициентов OCR и K_0 , которые позволяют получить более близкие к натурным значения осадки сваи.

Расчеты в программном комплексе Midas GTS NX продемонстрировали завышенные по отношению к натурным испытаниям значения осадки свай. При расчетах в программном комплексе Midas GTS NX для свай № 587, 592 была превышена несущая способность грунта и расчет не был выполнен. Расчетные осадки для свай № 407, 592, 403, 587 при использовании модели Hardening Soil в Midas GTS NX изменялись от 146,40 до 165,87 мм. При использовании модели Linear-Elastic в программном комплексе Midas GTS NX максимальные расчетные осадки изменялись в пределах от 75,73 до 150,89 мм. Таким образом, превышение расчетных осадок в программном комплексе Midas GTS NX для моделей Hardening Soil и Linear-Elastic по отношению к прогнозируемым стабилизированным осадкам натурной сваи составило 13–24 раза. По мнению авторов, полученное несоответствие можно объяснить влиянием следующих факторов:

1. Полученные в лабораторных условиях значения модуля деформации аргиллитоподобной глины являются заниженными. В условиях естественного залегания аргиллитоподобные глины представляют собой неоднородный трещиноватый массив, об-

ладающий различной степенью выветрелости. Достоверное определение его прочностных и деформационных характеристик экспериментальным путем в лабораторных условиях затруднительно из-за наличия масштабного фактора. Кроме того, в результате процесса бурения, отбора и транспортировки образцы аргиллитоподобной глины могут испытывать разуплотнение.

2. Несовершенством методики оценки касательной сдвиговой жесткости для свай, опирающихся на аргиллитоподобные глины. Например, при расчете по действующим отечественным нормативным документам касательная сдвиговая жесткость (Shear Stiffness modulus) для сваи № 407 составляет приблизительно 2387 кН/м^3 , в то время как по данным исследований [29] это значение для скальных и полускальных грунтов обычно превышает $100\,000 \text{ кН/м}^3$.

Сравнение результатов аналитических расчетов осадки сваи по СП 24.13330.2011, представленных ранее в работе [32], и значений стабилизированных осадок, представленных в данном исследовании, показало завышение расчетной осадки одиночной сваи до трех раз по отношению к стабилизированной длительной осадке натурных свай на аргиллитоподобных глинах. По мнению авторов, необходима корректировка существующих численных и аналитических методов расчета осадки свай применительно к аргиллитоподобным глинам. Необходимо продолжать работы по обобщению опыта устройства свайных фундаментов на выветрелых аргиллитоподобных глинах для оценки длительного функциони-

рования не только одиночной сваи, но и свайного фундамента. Это позволит развивать и корректировать существующие нормативные документы, где в настоящее время недостаточно подробно освещены вопросы проектирования свайных фундаментов на выветрелых аргиллитоподобных глинах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Анализ результатов краткосрочных испытаний натуральных забивных свай позволил выделить два участка на графике нагрузка–осадка: короткий участок линейно-упругих деформаций и протяженный участок нелинейно-пластических деформаций. Все полученные кривые осадки свай во времени являются кривыми затухающей ползучести. Остаточные деформации составляли в среднем 54 % от полной осадки сваи и были вызваны необратимым разрушением цементационных связей между твердыми частицами грунта.

2. В ходе испытаний натуральных забивных свай на аргиллитоподобных глинах несущая способность грунта не была исчерпана, но был достигнут предел прочности по материалу свай.

3. Расчет методом конечных элементов в программном комплексе Plaxis 3D с использованием для аргиллитоподобных глин модели Hardening Soil показал завышенные значения осадки (до 6 раз) по отношению к прогнозируемым стабилизированным длительным осадкам натуральных свай.

4. Использование для аргиллитоподобных глин модели Linear-Elastic в программном комплексе Plaxis 3D позволило получить близкие к натурным испытаниям значения стабилизированных длительных осадок, однако применение данной модели не в полной мере оправдано для аргиллитоподоб-

ной глины в связи с наличием остаточных деформаций и нелинейным характером осадки сваи при нагружении.

5. Расчеты в программном комплексе Midas GTS NX показали завышенные по отношению к натурным испытаниям значения осадки свай (13–24 раза) как для модели Hardening Soil, так и для модели Linear-Elastic. По мнению авторов, такое несоответствие можно объяснить несовершенством методики оценки касательной жесткости для аргиллитоподобной глины, а также заниженными значениями модуля деформации аргиллитоподобной глины, получаемыми при лабораторных испытаниях.

6. Особое внимание при расчетах в программных комплексах необходимо уделять анизотропному начальному напряженно-деформированному состоянию аргиллитоподобных глин и введению в расчеты коэффициентов OCR и K_0 .

7. Сравнение с результатами аналитических расчетов, выполненных в соответствии с СП 24.13330.2011 и представленных ранее в работе [32], показало завышенные (до 3 раз) значения максимальной осадки сваи по отношению к прогнозируемой стабилизированной длительной осадке свай.

8. По мнению авторов, необходима корректировка существующих численных и аналитических методов расчета свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах. Необходимо продолжать работы по дальнейшему обобщению опыта устройства свай на выветрелых аргиллитоподобных глинах для оценки длительной работы не только одиночной сваи, но и свайного фундамента. Это позволит развивать и корректировать существующие нормативные документы, где в настоящее время недостаточно подробно освещены вопросы проектирования фундаментов на аргиллитоподобных глинах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хмелевцов А.А. Аргиллитоподобные глины в районе Большого Сочи и их физико-механические характеристики // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2011. № 6. С. 77–79.
2. Ponomaryov A.B., Sychkina E.N. Analysis of pile foundation behavior on modern and ancient clay bases // Challenges and Innovations in Geotechnics : Proceedings of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conference. 2016. Pp. 111–114.
3. Пономарев А.Б., Захаров А.В., Сурсанов Д.Н. К вопросу использования верхнепермских отложений в качестве грунтовых оснований // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. 2011. № 1. С. 74–80.
4. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. On the stress-strain state and load-bearing strength of argillite-like

- clays and sandstones // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2018. Vol. 55. Issue 3. Pp. 141–145. DOI: 10.1007/s11204-018-9517-1
5. Suxin Z., Yuanqiao P., Jianxin Y., Xinrong L., Yongqun G. Characteristics of claystones across the terrestrial Permian-Triassic boundary: Evidence from the Chahe section, western Guizhou, South China // Journal of Asian Earth Sciences. 2006. Vol. 27. Issue 3. Pp. 358–370. DOI: 10.1016/j.jseaes.2005.04.007
6. Ponomaryov A., Sychkina E. Analysis of strain anisotropy and hygroscopic property of clay and claystone // Applied Clay Science. 2015. Vol. 114. Pp. 161–169. DOI: 10.1016/j.clay.2015.05.023
7. Changdong L., Xiaoyi W., Huiming T., Guoping L., Junfeng Y., Yongquan Z. A preliminary study on the location of the stabilizing piles for colluvial

landslides with interbedding hard and soft bedrocks // Engineering Geology. 2017. Vol. 224. Pp. 15–28. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.04.020

8. Armand G., Conil N., Talandier J., Seyedi D.M. Fundamental aspects of the hydromechanical behaviour of Callovo-oxfordian claystone: From experimental studies to model calibration and validation // Computer and Geotechnics. 2017. Vol. 85. Pp. 277–286. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.06.003

9. Zhang F., Xie S.Y., Hu D.W., Shao J.F., Gatmiri B. Effect of water content and structural anisotropy on mechanical property of claystone // Applied Clay Science. 2012. No. 69. Pp. 79–86. DOI: 10.1016/j.clay.2012.09.024

10. Manica M., Gens A., Vaunat J., Ruiz D.F. A time-dependent anisotropic model for argillaceous rocks. Application to an underground excavation in Callovo-Oxfordian claystone // Computers and Geotechnics. 2017. Vol. 85. Pp. 341–350. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.11.004

11. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов. М.: Изд-во ГУП «НИАЦ» Москомархитектуры, 1994. 384 с.

12. Bartolomei A.A., Ponomarev A.B. Experimental investigations and prediction of settlement of conical-pile foundations // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2001. No. 38. Issue 2. Pp. 42–50. DOI: 10.1023/A:1010422029681

13. Готман Н.З., Алехин В.С., Сергеев Ф.В. Определение предельного сопротивления основания сваи в составе группы свай // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. № 3. С. 13–21. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.02

14. Ильичев В.А., Мариупольский Л.Г., Вахолдин В.В. Рекомендации по расчету, проектированию и устройству свайных фундаментов нового типа в г. Москва. М.: Изд-во ГУП «НИАЦ» Москомархитектуры, 1997. 93 с.

15. Катценбах Р. Последние достижения в области фундаментостроения высотных зданий на сжимаемом основании // Вестник МГСУ. 2006. № 1. С. 105–118.

16. Тер-Мартirosян З.Г., Сидоров В.В., Тер-Мартirosян А.З., Манукян А.В. Скорость осадки сваи, погруженной в толщу глинистого грунта, с учетом его упруговязких и упругопластических свойств // Жилищное строительство. 2016. № 11. С. 3–6.

17. Лузин И.Н., Тер-Мартirosян З.Г. Экспериментально-теоретические основы расчетов осадок фундаментов глубокого заложения в переуплотненных грунтах // Строительство и архитектура. 2016. Т. 4. № 2. С. 45–48. DOI: 10.12737/19908

18. Шулятьев О.А. Фундаменты высотных зданий // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2014. № 4. С. 202–244.

19. Малышкин А.П., Есипов А.В. Численные исследования взаимного влияния свай в группах // Академический вестник Уралниипроект РААСН. 2017. № 2 (33). С. 86–89.

20. Ладыженский И.Г., Сергиенко А.В. Опыт проектирования свайных и свайно-плитных фундаментов на участке ММДЦ «МОСКВА-СИТИ» // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 10. С. 46–54.

21. Уткин В.С. Работа висячих свай в грунте основания и их расчет по осадке // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 9 (119). С. 1125–1132. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.9.1125-1132

22. Bond A.J., Jardine R.J. Effects of installing displacement piles in a high OCR clay // Geotechnique. 1991. Vol. 41. Issue 3. Pp. 341–363. DOI: 10.1680/geot.1991.41.3.341

23. Hamderi M. Comprehensive group pile settlement formula based on 3D finite element analyses // Soils and foundations. 2018. Vol. 58. Issue 1. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.sandf.2017.11.012

24. Lehan B.M., Jardine R.J. Displacement pile behaviour in glacial clay // Canadian Geotechnical Journal. 1994. Vol. 31. Issue 1. Pp. 79–90. DOI: 10.1139/t94-009

25. Meyerhof G.G. Some recent research on the bearing capacity of foundations // Canadian Geotechnical Journal. 1963. Vol. 1. Issue 1. Pp. 16–26. DOI: 10.1139/t63-003

26. Randolph M.F., Carter J.P., Wroth C.P. Driven piles in clay — the effects of installation and subsequent consolidation // Geotechnique. 1979. Vol. 29. Issue 4. Pp. 361–393. DOI: 10.1680/geot.1979.29.4.361

27. Sheil B.B., McCabe B.A. An analytical approach for the prediction of single pile and pile group behaviour in clay // Computers and Geotechnics. 2016. Vol. 75. Pp. 145–158. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.02.001

28. Zhang Q., Liu S., Zhang S., Zhang J., Wang K. Simplified non-linear approaches for response of a single pile and pile groups considering progressive deformation of pile–soil system // Soils and foundations. 2016. Vol. 56. Issue 3. Pp. 473–484. DOI: 10.1016/j.sandf.2016.04.013

29. Зерцалов М.Г., Знаменский В.В., Хохлов И.Н. Об особенностях расчета несущей способности буронабивных свай в скальных массивах при действии вертикальной нагрузки // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2018. Т. 9. № 1. С. 52–59. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.05

30. Haberfield C.M., Lochaden A.L.E. Analysis and design of axially loaded piles in rock // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.10.001

31. Парамонов В.Н., Тихомирова Л.К. Изменение несущей способности забивных свай во време-

ни // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2000. № 1. С. 127–131.

32. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. Verification of the results of numerical and analytical estimates

of the settling of a single pile in argillite-like clay // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016. Vol. 53. Issue 2. Pp. 78–81. DOI: 10.1007/s11204-016-9368-6

Поступила в редакцию 26 ноября 2018 г.

Принята в доработанном виде 28 декабря 2018 г.

Одобрена для публикации 29 января 2019 г.

ОБ АВТОРАХ: Сычкина Евгения Николаевна — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29, aspirant123@mail.ru;

Антипов Вадим Валерьевич — аспирант кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29, spstf@pstu.ru;

Офрихтер Ян Вадимович — аспирант кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29, spstf@pstu.ru.

REFERENCES

1. Hmelevcov A.A. Argillite-like clays in the area of Greater Sochi and their physico-mechanical characteristics. *Proceedings of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural Sciences*. 2011; 6:77-79. (rus.).
2. Ponomaryov A.B., Sychkina E.N. Analysis of pile foundation behavior on modern and ancient clay bases. *Challenges and Innovations in Geotechnics : Proceedings of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conference*. 2016; 111-114.
3. Ponomarev A.B., Zaharov A.V., Sursanov D.N. To the question of the use of Upper Permian sediments as soil bases. *Proceedings of the Perm National Research Polytechnic University. Urbanistics*. 2011; 1:74-80. (rus.).
4. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. On the stress-strain state and load-bearing strength of argillite-like clays and sandstones. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2018; 55(3):141-145. DOI: 10.1007/s11204-018-9517-1
5. Suxin Z., Yuanqiao P., Jianxin Y., Xinrong L., Yongqun G. Characteristics of claystones across the terrestrial Permian-Triassic boundary: Evidence from the Chahe section, western Guizhou, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2006; 27(3):358-370. DOI: 10.1016/j.jseaes.2005.04.007
6. Ponomaryov A., Sychkina E. Analysis of strain anisotropy and hygroscopic property of clay and claystone. *Applied Clay Science*. 2015; 114:161-169. DOI: 10.1016/j.clay.2015.05.023
7. Changdong L., Xiaoyi W., Huiming T., Guoping L., Junfeng Y., Yongquan Z. A preliminary study on the location of the stabilizing piles for colluvial landslides with interbedding hard and soft bedrocks. *Engineering Geology*. 2017; 224:15-28. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.04.020
8. Armand G., Conil N., Talandier J., Seyedi D.M. Fundamental aspects of the hydromechanical behaviour of Callovo-oxfordian claystone: From experimental studies to model calibration and validation. *Computer and Geotechnics*. 2017; 85:277-286. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.06.003
9. Zhang F., Xie S.Y., Hu D.W., Shao J.F., Gattmiri B. Effect of water content and structural anisotropy on mechanical property of claystone. *Applied Clay Science*. 2012; 69:79-86. DOI: 10.1016/j.clay.2012.09.024
10. Manica M., Gens A., Vaunat J., Ruiz D.F. A time-dependent anisotropic model for argillaceous rocks. Application to an underground excavation in Callovo-Oxfordian claystone. *Computers and Geotechnics*. 2017; 85:341-350. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.11.004
11. Bartolomey A.A., Omelchak I.M., Yushkov B.S. *Forecast of settlement of pile foundations*. Moscow, 1994; 384. (rus.).
12. Bartolomei A.A., Ponomarev A.B. Experimental investigations and prediction of settlement of conical-pile foundations. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2001; 38(2):42-50. DOI: 10.1023/A:1010422029681
13. Gotman N.Z., Alekhin V.S., Sergeev F.V. Determination of the limiting resistance of the pile foundation as a part of the pile group. *Proceedings of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture*. 2017; 8(3):13-21. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.02 (rus.).

14. Ilyichev V.A., Mariupolsky L.G., Vakholdin V.V. *Recommendations for the calculation, design and installation of new pile foundations in Moscow*. Moscow, 1997; 93. (rus.).
15. Katzenbach R. The latest achievements in the field of foundation building of high-rise buildings on a compressible base. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2006; 1:105-118. (rus.).
16. Ter-Martirosyan Z.G., Sidorov V.V., Ter-Martirosyan A.Z., Manukyan A.V. The rate of settlement of the pile, immersed in the thickness of the clay soil, taking into account its elastic-viscous and elastoplastic properties. *Housing construction*. 2016; 11:3-6. (rus.).
17. Luzin I.N., Ter-Martirosyan Z.G. Experimental and theoretical bases of calculations of the deformations of deep foundations in overconsolidated soils. *Construction and architecture*. 2016; 4(2):45-48. DOI: 10.12737/19908 (rus.).
18. Shulyatiev O.A. Foundations of high-rise buildings. *Proceedings of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture Bulletin*. 2014; 4:202-244. (rus.).
19. Malyshkin A.P., Esipov A.V. Numerical research of the mutual influence piles in groups. *Academic Proceedings of the Uralniiproject RAASN*. 2017; 2(33):86-89. (rus.).
20. Ladyzhensky I.G., Sergienko A.V. Experience in the design of pile and pile-plate foundations on the site of MIBC "MOSCOW-CITY". *Industrial and civil construction*. 2016; 10:46-54. (rus.).
21. Utkin V.S. Friction piles behavior in soil base and piles settlement calculation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(9):1125-1132. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.9.1125-1132 (rus.).
22. Bond A.J., Jardine R.J. Effects of installing displacement piles in a high OCR clay. *Geotechnique*. 1991; 41(3):341-363. DOI: 10.1680/geot.1991.41.3.341
23. Hamderi M. Comprehensive group pile settlement formula based on 3D finite element analyses. *Soils and foundations*. 2018; 58(1):1-15. DOI: 10.1016/j.sandf.2017.11.012
24. Lehane B.M., Jardine R.J. Displacement pile behaviour in glacial clay. *Canadian Geotechnical Journal*. 1994; 31(1):79-90. DOI: 10.1139/t94-009
25. Meyerhof G.G. Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*. 1963; 1(1):16-26. DOI: 10.1139/t63-003
26. Randolph M.F., Carter J.P., Wroth C.P. Driven piles in clay — the effects of installation and subsequent consolidation. *Geotechnique*. 1979; 29(4):361-393. DOI: 10.1680/geot.1979.29.4.361
27. Sheil B.B., McCabe B.A. An analytical approach for the prediction of single pile and pile group behaviour in clay. *Computers and Geotechnics*. 2016; 75:145-158. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.02.001
28. Zhang Q., Liu S., Zhang S., Zhang J., Wang K. Simplified non-linear approaches for response of a single pile and pile groups considering progressive deformation of pile-soil system. *Soils and foundations*. 2016; 56(3):473-484. DOI: 10.1016/j.sandf.2016.04.013
29. Zertsalov M.G., Znamenskiy V.V., Khokhlov I.N. About peculiarities of calculating the bearing capacity of socketed shafts in rock under vertical load. *Proceedings of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture Bulletin*. 2018; 9(1):52-59. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.05 (rus.).
30. Haberfield C.M., Lochaden A.L.E. Analysis and design of axially loaded piles in rock. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.10.001
31. Paramonov V.N., Tikhomirova L.K. Change of bearing capacity of driven piles in time. *Reconstruction of cities and geotechnical construction*. 2000; 1:127-131. (rus.).
32. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. Verification of the results of numerical and analytical estimates of the settling of a single pile in argillite-like clay. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2016; 53(2):78-81. DOI: 10.1007/s11204-016-9368-6

Received November 26, 2018

Adopted in a modified form on December 28, 2018

Approved for publication January 29, 2019

ABOUT THE AUTHORS: **Evgeniya N. Sychkina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technology and Geotechnics, **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**, 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation, aspirant123@mail.ru;

Vadim V. Antipov — postgraduate student of Department of Construction Technology and Geotechnics, **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**, 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation, spstf@pstu.ru;

Yan V. Ofrikhter — postgraduate student of Department of Construction Technology and Geotechnics, **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**, 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation, spstf@pstu.ru.