

УДК 624.159

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО УСИЛЕНИЮ ГРУНТОВ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИЕЙ

С.С. Зимин¹, М.В. Мартынов²

^{1,2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

Аннотация. В данной статье рассматривается моделирование в программно-вычислительном комплексе Plaxis 3D серии полевых испытаний по усилению грунтового массива струйной цементацией. Данная технология характерна для усиления слабых грунтовых оснований зданий (в условиях плотной застройки) и линейных сооружений (дамбы, плотины и т.п.). В рамках полевых испытаний проводилось исследование грунтоцементной одиночной сваи, а также куста свай 1*2 и 2*2 на нагрузку и фиксация осадки на каждой фазе загрузки. Грунты на площадке испытаний (100 м от р. Евфрат в г. Аль-Насирия) представлены легкими суглинками и глинами с секущим модулем деформации от 0,89 до 10 МПа. Для усиливаемых слоев даны компрессионные испытания. В статье представлена методика численного исследования (от вводимых характеристик до последовательности выполнения расчета) и результаты сравнения осадок в рамках поэтапной нагрузки и разгрузки грунтоцементного элемента (натурные данные). Также дано описание трех способов задания грунтоцементных элементов в ПБК Plaxis 3D. Возможность предварительной оценки осадки зданий и сооружений продемонстрирована в рамках сравнения результатов численного и полевого эксперимента. Приведена методика калибровки параметров расчета.

Ключевые слова: проблемы грунтовых оснований и фундаментов, укрепление грунта, струйная цементация, осадки грунтового основания, объемные конечные элементы, трехмерная модель.

Ссылка для цитирования: Зимин С.С., Мартынов М.В. Численное моделирование полевого эксперимента по усилению грунтов струйной цементацией // Инженерные исследования. 2022. №2 (7). С. 3-10. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/2/3-10.pdf>

NUMERICAL SIMULATION OF A FIELD EXPERIMENT ON STRENGTHENING SOILS BY JET CEMENTATION

S.S. Zimin¹, M.V. Martynov²

^{1,2} Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. This article discusses modeling in the Plaxis 3D software package complex of a series of field tests to strengthen the soil mass by jet cementation. This technology is characteristic for strengthening weak soil foundations of buildings (in conditions of dense development) and linear structures (dams, weir, etc.). As part of field tests, a single pile of soil cement, as well as a pile bush 1 *2 and 2*2 for loading and fixing precipitation at each loading phase was studied. Soils at the test site (100 m from the Euphrates River in Al-Nasiriyah) are represented by light loams and clays with a secant modulus of deformation from 0.89 to 10 MPa. Compression tests are given for the reinforced layers. The article presents the methodology of numerical research (from the input characteristics to the sequence of calculation) and the results of comparing sediments within the framework of phased loading and unloading of a soil-cement element (full-scale data). There is also a description of three ways of setting soil-cement elements in software package complex Plaxis 3D. The possibility of a preliminary assessment of the precipitation of buildings and structures is demonstrated by comparing the results of a numerical and field experiment. A technique for measuring the parameters of the calculation is given.

Keywords: Problems of soil bases and foundations; strengthening of soil; «jet grouting»; settlements of soil base; volumetric finite elements; three-dimensional model.

For citation: Zimin S.S., Martynov M.V. Numerical simulation of a field experiment on strengthening soils by jet cementation // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.2 (7). Pp. 3-10. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/2/3-10.pdf>

ВВЕДЕНИЕ

При залегании слабых грунтов в основании, существует проблема усиления оснований на всех стадиях реализации объекта (проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкции). Слабыми грунтами являются, в частности, заторфованные, водонасыщенные, илистые текучепластичные и текучие супеси и суглинки, а также рыхлые и мелкодисперсные пески. Повреждение конструкций и превышение нормативных осадков, возможно ввиду сильной сжимаемости этих грунтов. Стоит также отметить, что стабилизация осадков в слабых основаниях протекает достаточно длительно, порой достигая 10 лет. Изначально исследованием таких мелкодисперсных грунтовых структур и коллоидных глин занимались специализированные институты [1]. Впоследствии подключились и специалисты инженерной отрасли [2-3]. Прорывом в плане усиления грунтового массива стало появление технологии высоконапорной струйной цементации («jet grouting»), представленной коллективом ученых из Японии на 8-ой международной конференции «Механика грунтов и фундаментостроение», прошедшей в 1973 г. в Москве [4]. Метод струйного цементирования основан на высокоскоростном впрыске одной или нескольких жидкостей (раствора, воздуха, воды) в грунт в рамках обратного хода после бурения скважины до проектной отметки. При инъектировании происходят следующие процессы: дезагрегации грунта и его смешивание с цементирующим раствором и частичная замена им [5-7]. Современные исследования по методу струйной цементации в литературе можно разделить на 4 темы [8]:

1. Контроль качества. Исследование ключевых параметров (процентное отношение цемента, давление впрыска, скорость подъема и т.д.) влияющих на производство грунтоцементных колонн. Произведены испытание на неограниченное сжатие, а также определена несущая способность колонны под действием внешней загрузки [9-10].

2. Подбор оптимальных параметров, влияющих на несущую способность. Изменение прочности на одноосное сжатие в зависимости от характеристик грунта, влияние в/ц отношения, получение проектных значение модуля Юнга колонны в зависимости от н.у. [11-12].

3. Рассмотрение грунтоцементных элементов в качестве подпорных стен. Определение изгибающих моментов, боковых смещений [13-14].

4. Численное моделирование. Сравнение теоретических, полуэмпирических методов с моделированием в геотехнических программных комплексах, подбор грунтовой модели отвечающей упрочнению грунта [15-16].

Ввиду недостаточного раскрытия темы №4 касательно сравнения экспериментальных данных и результатов численного моделирования осадков конструкции, существует необходимость проведения верификационного расчета в специализированном геотехническом комплексе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных была выбрана серия полевых испытаний, проведенных коллективом ученых из Ирана [17-18]. В качестве программного комплекса был выбран лицензируемый и широко используемый на территории Российской Федерации – Plaxis 3D [19].

Грунтовые условия площадки испытаний представлены в (табл. 1-4). Основные характеристики грунтоцементных колонн приведены в (табл. 5) [17].

Таблица 1. Свойства грунта
Table 1. Soil Properties

Глубина (м)	Тип образца	L.L % Граница текучести (w_L)	P.L % Граница текучести (w_p)	P.I% Число пластичности	Gs (γ_s/γ_w)	Содержание воды, %
0.0-1.0	DS (нарушенный)	32	15	17	2,61	34,73
1.0-2.5	US (ненарушенный)	34	19	15	2,62	35,26
2.5-3.5	US (ненарушенный)	60	29	31	2,78	37,95
3.5-4.5	US (ненарушенный)	59	30	29	2,76	38,22
4.5-7.5	US (ненарушенный)	35	21	14	2,58	33,71
7.5-8.0	DS (нарушенный)	36	21	15	2,61	34,78

Таблица 2. Описание и классификация грунтов
 Table 2. Soil description and classification

Глубина (м)	Глубина залегания УГВ (м)	Плотность естественной влажности γ_{wet} , кН/м ³	Глинистые частицы %	Ил %	USCS Единая Система Классификации грунтов
0.0-1.0	0,75	-	-	-	Засыпка (Суглинок легкий)
1.0-2.5		20,48	61	39	Суглинок легкий
2.5-3.5		21,02	70	30	Глина легкая
3.5-4.5		21,98	72	28	Глина легкая
4.5-7.5		21,5	60	40	Суглинок легкий
7.5-8.0		21,4	62	38	Суглинок легкий

Таблица 3. Краткое изложение результатов теста на консолидацию
 Table 3. Summary of consolidation test results

Глубина (м)	P_c (кПа)	C_c	C_r	C_v (мм ² /сек)	e_0	e_f
0.0-2.0	70	0,529	0,0598	0,02	0,63	0,475

Таблица 4. Зависимость неограниченной прочности на сжатие от глубины залегания
 Table 4. Dependence of unlimited compressive strength on the depth of occurrence

Глубина (м)	$q_{unconfined}$ (кПа)
1.0-1.5	60
1.5-2.5	73
2.5-3.5	42
3.5-4.5	76
4.5-5.5	86
5.5-7.5	87
7.5-8.0	100

Таблица 5. Параметры грунтоцементной колонны
 Table 5. Parameters of the soil-cement column

Диаметр (м)	Длина (м)	$q_{unconfined}$ (МПа)	E (МПа)	C (кПа)	ϕ (град)
0,150	2,0	4,57	800	680	38

Для численного исследования в ПВК Plaxis 3D использовалась модель упрочняющегося грунта («Hardening soil model») наиболее полно отражающая работу грунтовых оснований при усилении по технологии «jet grouting». Сваи моделировались с помощью конструктивного элемента «Embedded beams». Данный элемент учитывает форму сваи (полное сечение, без полостей), сопротивления по боковой поверхности и сопротивление под нижним концом сваи. Передача нагрузки на грунтоцементный элемент выполнена через моделирование жестких балок высотой 0,5 м из бетона В25. Расстояние между осями свай в кусте составляет $3d = 450$ мм. Размеры модели в плане приняты 12*12 м. В связи с выбором модели упрочняющегося грунта появилась необходимость в дополнительном использовании эмпирических зависимостей [20] для получения не представленных авторами полевых испытаний сведений [17-18]. Дополнительные данные, вводимые в ПВК Plaxis 3D приведены в (табл. 6).

Последовательность расчета в ПВК Plaxis 3D сведена в (табл. 7). Стоит отметить, что в фазах 4-5 после каждого этапа нагрузки/разгрузки вводилась подфаза консолидации под внешней силой. Эта подфаза с зависимостью от времени необходима для рассеивания избыточного порового давления в рамках расчета и отражает реальную поэтапность загрузки полевого эксперимента.

Модель грунтового основания приведена на (рис.1). Расположение стержневых элементов для трех конструктивных схем представлено на (рис.2-4).

Таблица 6. Дополнительные данные
 Table 6. Additional data

Глубина (м)	e	C (кПа)	φ (град)	E ₅₀ (МПа)
0.0-1.0	0,63	30	5	0,89*(по рез-там компрессионного теста)
1.0-2.5	0,53	34,34	7	6,87
2.5-3.5	0,67	21	6	4,2
3.5-4.5	0,5	38	7	7,6
4.5-7.5	0,51	43,34	8	8,67
7.5-8.0	0,51	50	9	10

Таблица 7. Последовательность расчета
 Table 7. Calculation sequence

№ фазы	Фаза расчета (<i>Phase ID</i>)	Тип расчета (<i>Calculation type</i>)	Режим приложения нагрузок (<i>Loading type</i>)
1	Период до начала строительства – <i>Initial phase</i> (начальная фаза)	<i>K0 procedure</i> (генерирование н.у.)	<i>Staged construction</i> (поэтапное строительство)
2	Погружение сваи/свай	<i>Plastic</i> (пластический)	<i>Staged construction</i> (поэтапное строительство)
3	Консолидация грунтового массива	<i>Consolidation</i> (Консолидация)	<i>Staged construction</i> (поэтапное строительство)
4	Поэтапное нагружение с шагом: 3,75 кН (одиночная свая) До нагрузки 30кН включительно	<i>Plastic (пластический)</i>	<i>Staged construction (поэтапное строительство)</i>
	6 кН (группа свай 1*2) До нагрузки 60кН включительно		
	7,5 кН (группа свай 2*2) До нагрузки 120кН включительно		
	Поэтапное разгружение: С шагом 7,5 кН (одиночная свая) До полной разгрузки		
5	До 36 кН, до 12 кН, затем полное разгружение (группа свай 1*2)	<i>Plastic (пластический)</i>	<i>Staged construction (поэтапное строительство)</i>
	До 97,5 кН, до 75 кН, до 45 кН, затем полное разгружение (группа свай 2*2)		

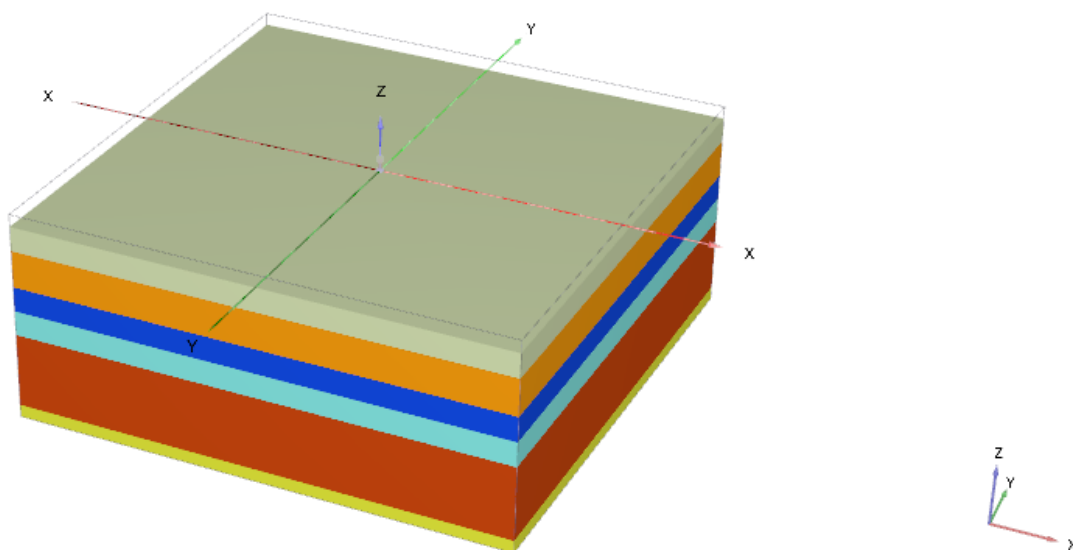


Рис. 1. Общий вид грунтовой модели
 Fig. 1. General view of the soil model

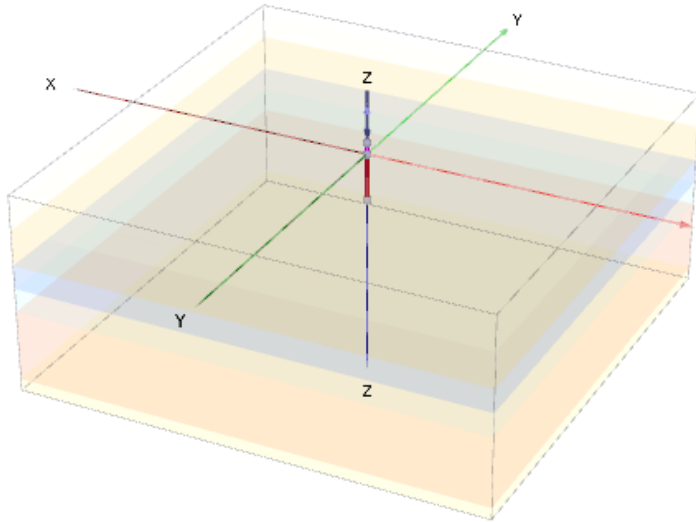


Рис. 2. Эксперимент №1 - одиночная свая
Fig. 2. Experiment No. 1 - single pile

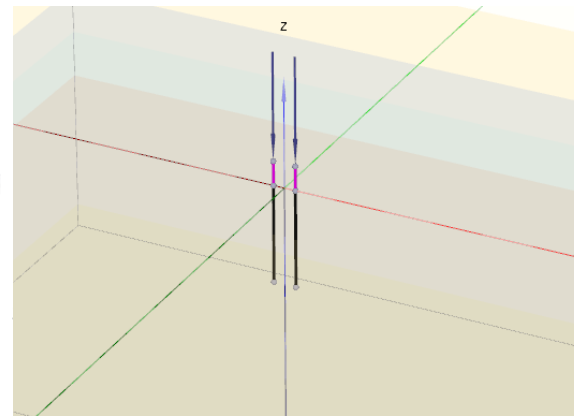


Рис. 3. Эксперимент №2 - группа свай 1*2
Fig. 3. Experiment No. 2 - pile group 1*2

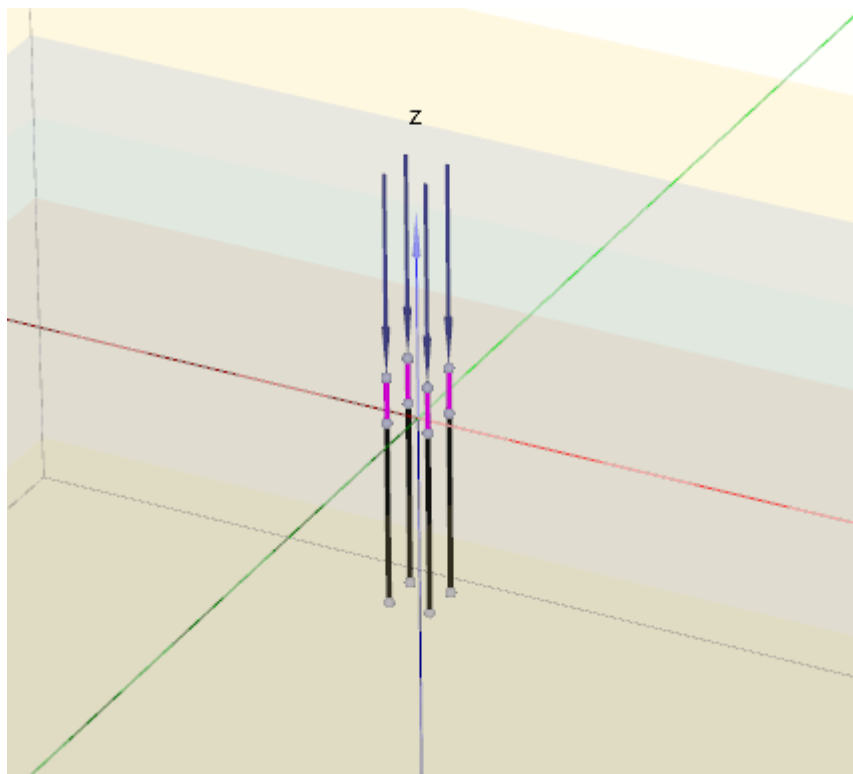


Рис. 4. Эксперимент №3 - группа свай 2*2
Fig. 4. Experiment No. 3 - pile group 2*2

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На графиках (рис.5-7) зависимости осадки (мм) грунтоцементного элемента от внешней нагрузки (кН) представлены результаты настоящего численного исследования и полевого испытания [17-18] по одиночной, группе свай 1*2, группе свай 2*2 соответственно.

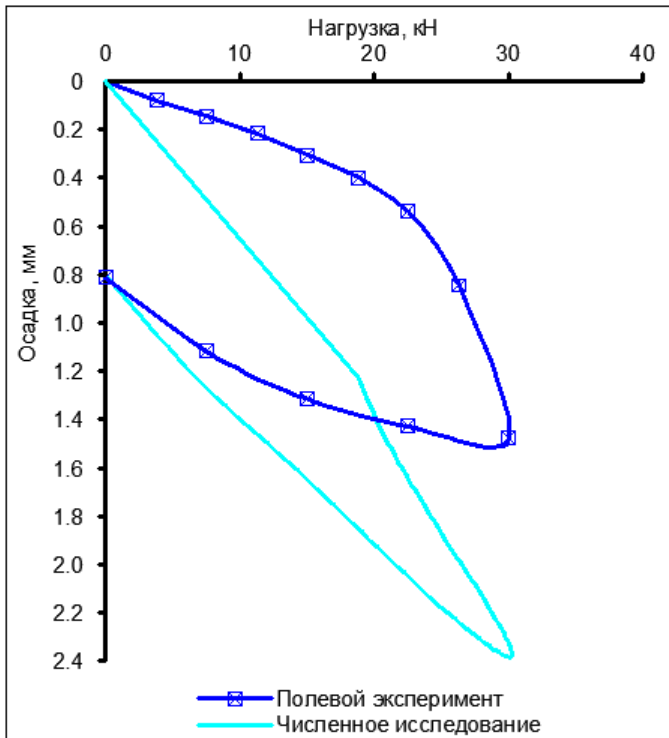


Рис. 5. Сравнение численного и полевого исследования.
Одиночная свая
Fig. 5. Comparison of numerical and field research.
Single pile

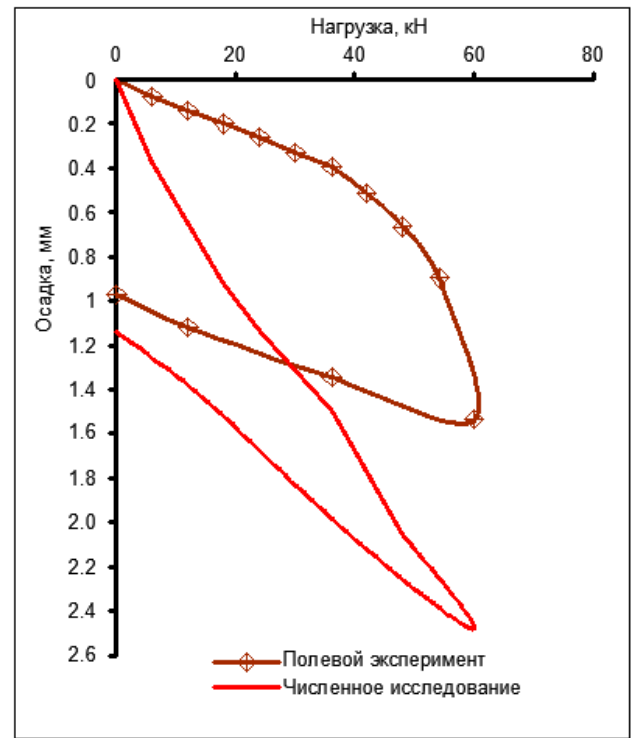


Рис. 6. Сравнение численного и полевого исследования. Группа свай 1*2
Fig. 6. Comparison of numerical and field research. Pile group 1*2

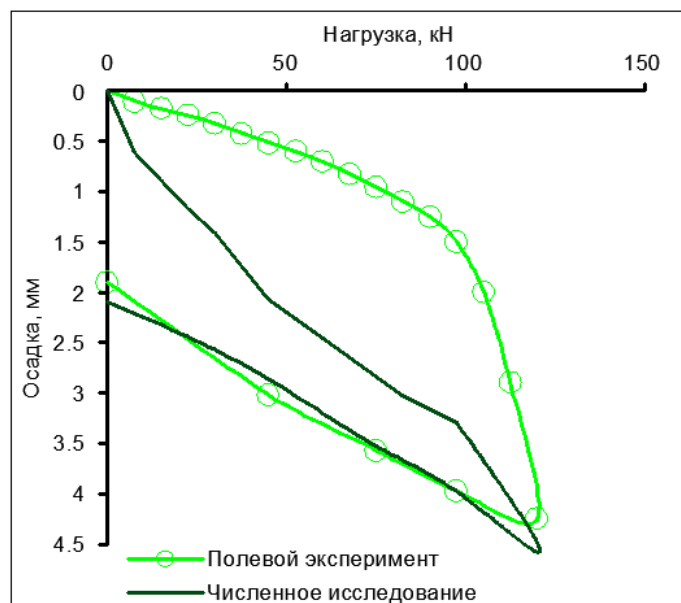


Рис. 7. Сравнение численного и полевого исследования. Группа свай 2*2
Fig. 7. Comparison of numerical and field research. Pile group 2*2

Из графика (рис.5) видно, что в отличие от полевого эксперимента при численном исследовании отсутствует ярко-выраженная пластичная зона. Наблюдается заметное превышение полевых значений осадки в особенности при малых нагрузках, однако после снятия нагрузки остаточные деформации практически идентичны.

На графике (рис.6) наблюдаются то же поведение грунтового массива, что и в случае с одиночной свайей, но проявляется большее отклонение остаточных деформаций. При сравнении графиков (рис.5) и (рис.6) можно отметить, что при изменении конструкции происходит рост максимальной осадки на 4% как в полевом, так и в численном исследовании.

На графике (рис.3) наблюдается зона пластических деформаций после роста нагрузки свыше 97,5 кН, как в случае численного исследования, так и полевого эксперимента. Тенденция по завышению осадок в упругой зоне аналогична двум предыдущим графикам. Расхождение по остаточным деформациям не превышает 10%.

Завышение нагрузки 97,5 кН более чем на 25% приведет к занижению прогнозируемой численным исследованием осадки.

Следует отметить, что кроме представленного упрощенного способа моделирования в ПВК Plaxis 3D грунтоцементных элементов, который в частности используется при моделировании грунтовых анкеров, существуют еще два способа:

1. Задание объемными элементами с выбором модели поведения «Linear Elastic».

Особенностью модели является задание типа поведения (Non-Porous) и коэффициента Пуассона ν (для грунтоцементных элементов варьируется от 0,15 до 0,22). Результаты по осадке при использовании данной модели коррелируют только с теоретическими выкладками [18].

2. Задание объемными элементами с выбором модели поведения «Hardening soil model».

Особенностью модели является задание угла внутреннего φ колонны, сцепления и секущего модуля деформации E_{50} . Авторы отмечают невозможность адекватного использования данной модели в рамках, представленных в полевом исследовании исходных данных (отсутствуют данные трехосных испытаний).

Для возможности количественной оценки результатов численного исследования при сравнении их с полевым испытанием, ввиду недостаточности исходных данных для расчета в ПВК Plaxis 3D, возможны следующие операции:

1. Калибровка модели путем подбора оптимального сочетания эффективных углов внутреннего трения (в настоящем исследовании показатель принят по объекту аналогу) и сцепления (показатель принят по эмпирической зависимости) подстилающих слоев грунта.

2. Верификация данных полевых компрессионных испытаний в виртуальной лаборатории «Soil test», в виду достаточно низких прочностных показателей, наблюдаемых в первом подстилающем слое.

3. Расчет модели в другом геотехническом расчетном комплексе, более адаптированном под представленные в (табл. 1-6) исходные данные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей статьи было проведено сравнение результатов полевых испытаний и численного исследования в ПВК Plaxis 3D следующих конструктивных схем:

1. Одиночная свая. Расхождение между полевым экспериментом и моделированием по осадке при максимальной нагрузке – 38%, по остаточным деформациям – 1,12%.

2. Свайное поле 1*2. Расхождение между полевым экспериментом и моделированием по осадке при максимальной нагрузке – 60,82%, по остаточным деформациям – 14,83%.

3. Свайное поле 2*2. Расхождение между полевым экспериментом и моделированием по осадке при максимальной нагрузке – 7,81%, по остаточным деформациям – 9,39%.

Упрощенный метод моделирования грунтоцементных элементов значительно завышает осадки при максимальной нагрузке (до 61 %), и зоне остаточных деформаций (до 15%). Однако предварительная качественная оценка осадки, особенно для куста свай 2*2 (наиболее близкий к инженерной практике случай), вполне возможна, несмотря на неполноту исходных данных так как не происходит негативного занижения значений осадки.

Возможна дальнейшая итерационная калибровка модели до наблюдения приемлемых количественных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ребиндер П. А., Серб-Сербина Н.Н. Придание грунтам водонепроницаемости и механической прочности. Л.: Академия наук СССР, 1942. 267 с.
2. Безрук В.М. Теоретические основы укрепления грунтов цементами. М.: Автостройиздат, 1956. 241 с.
3. Безрук В. М., Князюк К. А. Устройство цементогрунтовых оснований и покрытий. М.: Дориздат, 1951. 220 с.
4. Yahiro, T., Yoshida, H. Induction grouting method utilizing high-speed water jet // Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow. 1973. Pp. 402-404.
5. Мангушев Р.А., Осокин А.И., Сотников С.Н. Геотехника Санкт-Петербурга. Опыт строительства на слабых грунтах. М.: Изд-во АСВ, 2018. 386 с.
6. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов. М.: Стройиздат, 2010. 216 с.
7. Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. М.: Стройиздат, 1988. 287 с.
8. Karahan, G.N., Sivrikaya, O. Designing singular jet grouting column for sandy soils // Environ: Earth. Sci. 2018. Pp. 6280-6299. DOI:10.1007/s12665-018-7650-9
9. Makovetskiy O.A. Application of “Jet Grouting” for Installation of Substructures of Estates // Procedia Engineering. 2016. Volume 150. Pages 2228-2231. DOI:10.1016/j.proeng.2016.07.269
10. Garmanov G.V., Sokolov V.A., Strakhov D.A., Sinyakov L.N. Effectiveness of jet grouting method for soil base strengthening. Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. 5(56). Pp. 56-63. DOI: 10.18720/CUBS.56.5
11. Bell K.R., Clemente J.L.M., Gularte F.B. Superjet grouting reduces foundation settlement for La Rosita power plant in Mexicalli, Mexico// In: Third international conference on grouting and ground treatment. New Orleans, United State. 10–12 February 2003. Pp. 354–364. DOI:10.1061/40663(2003)112

12. Bzówka J. Analysis of bearing capacity and settlement of jet-grouting columns // Architecture Civil Engineering Environment. 2012. Vol. 5. No. 2. Pp. 41–54.

13. Wang Z.-F., Peng X.-B., Liu Y., Cheng W.-C., Wang Y.-Q., Wu C.-J. Evaluation of Ground Displacements Caused by Installing Jet Grouted Columns Using Machine Learning Methods // Advances in Civil Engineering. 2020. DOI: /10.1155/2020/8857293

14. Racansky V., Schweiger H.F., Thurner R. FE-Analysis of the behaviour of buttressed jet grouted retaining walls // In: Proc. 12th Int. Conf. computer methods and advances in geomechanics. India. 2008. Pp. 3984–3992.

15. Alkaya D., Yesil B. Design of high-modulus columns (jet grouting) by using tabulation program // In: Academic Informatics '11-XIII. Academic informatics conference, Inonu University. 2–4 February 2011. Pp. 749–755 (in Turkish)

16. Juzwa A., Bzowka J. Numerical simulations of settlement of jet grouting columns // Trans VŠB Tech Univ Ostrava Civ Eng Ser 16(1). 2016. Pp. 1-6. DOI:10.1515/tvsb-2016-0001

17. Al-Kinani A.M., Ahmed M.D. Field study of the effect of jet grouting parameters on strength based on tensile and unconfined compressive strength // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. DOI:10.1088/1757-899X/737/1/012083

18. Al-Kinani A.M., Ahmed M.D. Comparison of Single and Group Jet Grouting Columns Capacity Based on Field Load Test and Theoretical Methods. Civil Engineering Journal 5, no. 6 (June 23, 2019): 1353–1366. DOI:10.28991/cej-2019-03091337

19. Brinkgreve R B., Broere W. PLAXIS 3D foundation manual version 2 (Delft University of Technology and PLAXIS). 2008. Pp.123-144.

20. Fang Y.-S., Liao J.-J., Sze S.-C. An empirical strength criterion for jet grouted soilcrete // Engineering Geology. 1994. 37(3-4). Pp. 285–293. DOI:10.1016/0013-7952(94)90062-0

ОБ АВТОРАХ

Сергей Сергеевич Зимин – доцент, к.т.н. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: zimin_serгей@mail.ru

Максим Васильевич Мартынов – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: inextremo1996@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Sergey S. Zimin - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: zimin_serгей@mail.ru

Maksim V. Martynov – student of the magistracy. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: inextremo1996@gmail.com