

Известия вузов. Строительство. 2022. № 11. С. 28–37.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (11): 28–37.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 624.15:624.(3).2.001.24

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-767-11-28-37

## **ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА НА РАЗЖИЖАЕМОМ ОСНОВАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ**

**Завен Григорьевич Тер-Мартirosян, Армен Завенович Тер-Мартirosян,  
Ле Дык Ань, Виталий Валентинович Сидоров**

Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),  
Москва, Россия

**Аннотация.** Свайные фундаменты в настоящее время широко применяются для нового строительства, в том числе строительства в сейсмических районах. Однако землетрясение может сопровождаться таким процессом, как разжижение, которое снижает несущую способность свай и вызывает дополнительную осадку фундаментов. Проектирование свайного фундамента в этих случаях проводится по нормативным документам, но в них недостаточно учитывается влияние разжижения на работу свайного фундамента. С помощью компьютерных программ возможно моделировать взаимодействие грунтового массива с сооружением и фундаментом для выбора оптимальных параметров фундамента, а также оценивать его предварительное вертикальное перемещение. В последнее время разработана модель грунта PM4Silt, отображающая появление точек разжижения в грунтовом основании. В статье рассматривается анализ работы свайного фундамента на этапе проектирования при геологических условиях города Хошимин, с применением моделей Hardening Soil Small и PM4Silt. Результаты показывают конкретные различия в расчете при использовании этих моделей, а также влияние различных факторов на работу фундамента при землетрясении. Полученные выводы могут быть интересны для расчетчиков, проектировщиков и конструкторов, занимающихся проектированием свайных фундаментов на потенциально разжижаемых грунтах.

**Ключевые слова:** свайные фундаменты, моделирование фундаментов, разжижение грунтов, численный метод, современные модели грунтов, PLAXIS, PM4Silt модель

**Для цитирования:** Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Ле Дык Ань, Сидоров В.В. Особенности моделирования свайного фундамента на разжижаемом основании с использованием современных моделей // Известия вузов. Строительство. 2022. № 11. С. 28–37. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-767-11-28-37.

Original article

## CHARACTERISTICS OF MODELING A PILE FOUNDATION ON A LIQUEFIABLE BASE USING RECENT MODELS

Zaven G. Ter-Martirosyan, Armen Z. Ter-Martirosyan, Le Duc Anh,  
Vitaliy V. Sidorov

Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia

**Abstract.** Pile foundations are currently widely used for new construction, including construction in seismic areas. However, an earthquake can be accompanied by a process such as liquefaction, which can reduce the bearing capacity of piles and cause additional settlement of foundations. The design of a pile foundation in these cases can be carried out according to regulatory documents, but they do not sufficiently take into account the effect of liquefaction on the work of the pile foundation. With computer programs, it is possible to simulate the interaction of a soil massif with the structure and the foundation in order to select the optimal foundation parameters, as well as to evaluate its preliminary vertical movement. Recently, a PM4Silt soil model has been developed that can represent the occurrence of liquefaction points in the soil base. This paper considers the analysis of the work of the pile foundation at the design stage under the geological conditions of Ho Chi Minh City, using the Hardening Soil Small and PM4Silt models. The results show specific differences in the calculation results when using these models, as well as the influence of various factors on the work of the foundation during an earthquake. The obtained conclusions on the work may be of interest to calculators and designers involved in the design of pile foundations on potentially liquefying soils.

**Keywords:** pile foundations, foundation modeling, soil liquefaction, numerical method, recent soil models, PLAXIS, PM4Silt model

**For citation:** Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Le Duc Anh, Sidorov V.V. Characteristics of modeling a pile foundation on a liquefiable base using recent models. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; (11): 28–37. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-767-11-28-37.

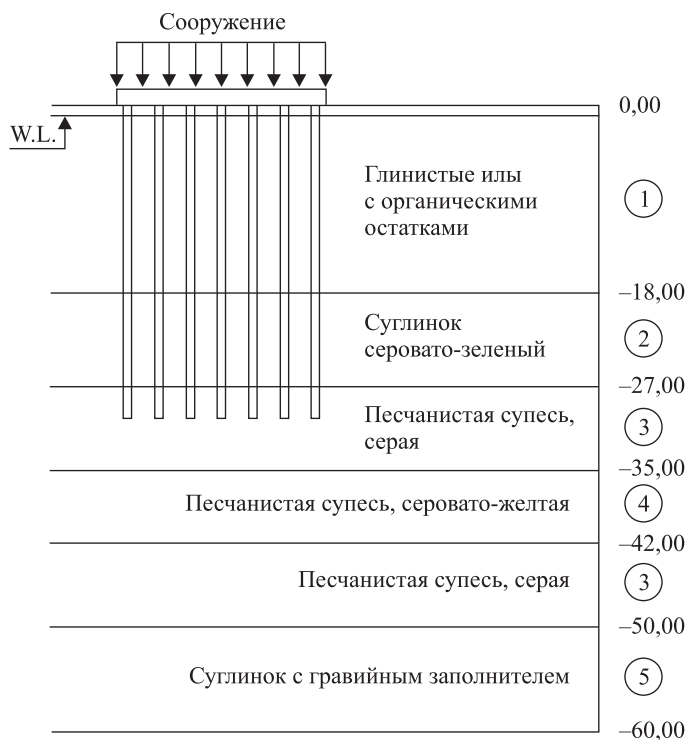
**1. Введение.** Проблемы проектирования фундамента при новом строительстве в сейсмических районах еще весьма актуальны, поскольку требуется корректное понимание взаимной работы между фундаментом и основанием для обеспечения устойчивости и эксплуатационной надежности.

Свайный фундамент, как известно, один из распространенных вариантов фундаментов зданий и сооружений, используемых в сейсмических районах. Результаты исследований работы свай с грунтом основания в этих условиях приведены в [1–3], где показано поведение свай под воздействием сейсмических нагрузок. Свайные фундаменты в сейсмических районах могут быть запроектированы согласно нормативным документам, таким как СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты», СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». Но там не в полной мере учтено влияние вторичных процессов, проходящих после самого землетрясения в грунтовых условиях водонасыщенных песчаных и глинистых отложений. Одно из таких явлений – разжижение окружающего сваи грунта. Вследствие разжижения прочность грунта резко снижается и он ведет себя как вязкая жидкость. Проявление разжижения и методы оценки возможности проявления процесса описаны в [4–7]. Практически установлено, что разжижение представляет

главную причину разрушений зданий и сооружений, происходящих после землетрясения, поэтому оценка его влияния на работу фундаментов и основания важная и даже часто необходимая геотехническая задача при проектировании оснований в сейсмических районах. При этом нужно предварительно определить мощность разжижаемого слоя грунта и дополнительную ожидаемую величину вертикального перемещения фундамента. Исследования по влиянию разжижения грунтов на работу свайного фундамента приведены в [8–12].

В настоящее время у проектировщиков возникают трудности при выборе параметров свай и ростверка. Особой популярностью в области геотехнического проектирования пользуется численный метод. Разработано множество компьютерных программ, каждая имеет ряд своих преимуществ и соответствует различным требованиям. Программный комплекс PLAXIS не является исключением. Он помогает решить большинство геотехнических задач, в том числе о предварительном выборе параметров свайного фундамента и анализе осадки фундамента в сложных условиях, не имеющих достаточных указаний для проведения ручных расчетов. Учитывая возможности разжижения грунта в расчете, была разработана новая конститутивная модель грунта PM4Silt, способствующая моделированию водонасыщенных низкопластичных илов и глин при монотонных и циклических нагрузках. Подробно такая модель рассмотрена в [13–15].

В данной работе поставлена геотехническая задача, в которой анализируется состояние свайного фундамента под сейсмическими воздействиями с использованием модели PM4Silt в геологических условиях г. Хошимин.



*Рис. 1. Типовая геометрическая модель*

*Fig. 1. Typical geometric model*

Метод исследования – метод конечных элементов, реализуемый в программе PLAXIS 2D.

**2. Материалы и методы.** В задаче рассматривается 10-этажное сооружение на свайном фундаменте размером 20×20 м при высоте этажа 3 м, моделирующееся элементами «Plate». Свайный фундамент представляет собой железобетонный плитный ростверк и буронабивные железобетонные сваи диаметром 0,8 м при переменном числе свай в кусте. Моделирование свай проводится с помощью элемента «Embedded beam row». По результатам буровых работ выделены пять инженерно-геологических элементов. Типовая расчетная модель показана на рис. 1.

Верхний слой илистых грунтов, имеющий большую мощность (18 м), воспроизводится двумя различными моделями грунтов: Hardening Soil Small, достаточно известной и применяемой на практике, и новой моделью PM4Silt. Характеристики для моделирования этого слоя грунта приведены в табл. 1.

Другие слои грунтового массива моделируются с помощью Hardening Soil Small (табл. 2).

Анализ работы свайного фундамента в данных условиях проводится поэтапно. Сначала разбирается тенденция изменения вертикального пере-

Таблица 1. Характеристики для моделирования ИГЭ 1 в PLAXIS 2D

Table 1. Characteristics for modeling IGE 1 in PLAXIS 2D

Hardening Soil Small		PM4Silt	
Тип поведения материала	Undrained A	Тип поведения материала	Undrained A
$\gamma_{sat}$ , кН/м <sup>3</sup>	15	$\gamma_{sat}$ , кН/м <sup>3</sup>	15
$\gamma_{unsat}$ , кН/м <sup>3</sup>	15,2	$\gamma_{unsat}$ , кН/м <sup>3</sup>	15,2
$E_{50}^{ref}$ , кН/м <sup>2</sup>	$1,5 \cdot 10^4$	$S_u$ , кН/м <sup>2</sup>	35
$E_{oed}^{ref}$ , кН/м <sup>2</sup>	$1,5 \cdot 10^4$	$G_0$	500
$E_{ur}^{ref}$ , кН/м <sup>2</sup>	$4,5 \cdot 10^4$	$h_{p0}$	50
$m$	0,5	$p_{atm}$ , кН/м <sup>2</sup>	101,3
$c'_{ref}$ , кН/м <sup>2</sup>	4	$n^G$	0,75
$\varphi'$ , град.	23	$h_0$	0,5
$\psi$ , град.	0	$e_0$	2,107
$\gamma_{0,7}$	0,013	$\lambda$	0,6
$G_0^{ref}$ , кН/м <sup>2</sup>	$57,7 \cdot 10^3$	$\phi_{cv}$	23
$v'_{ur}$	0,3	$n^{b,wet}$	0,8
		$n^{b,dry}$	0,5
		$n^d$	0,3
		$A_{do}$	0,8
		$\nu$	0,3
		<i>Post-shake</i>	0
		$F_{Su}$	1,0
		$GC_{consol}$	2,0

Таблица 2. Характеристики остальных ИГЭ для их моделирования в PLAXIS 2D

Table 2. Characteristics of other IGEs for their modeling in PLAXIS 2D

Тип поведения материала	Undrained A			
	ИГЭ 2	ИГЭ 3	ИГЭ 4	ИГЭ 5
$\gamma_{sat}$ , кН/м <sup>3</sup>	19,6	19,5	19,9	19,9
$\gamma_{unsat}$ , кН/м <sup>3</sup>	19,9	20,3	20,2	20,2
$E_{50}^{ref}$ , кН/м <sup>2</sup>	$2,8 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$5,4 \cdot 10^4$	$5,8 \cdot 10^4$
$E_{oed}^{ref}$ , кН/м <sup>2</sup>	$2,8 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$5,4 \cdot 10^4$	$5,8 \cdot 10^4$
$E_{ur}^{ref}$ , кН/м <sup>2</sup>	$8,4 \cdot 10^4$	$15 \cdot 10^4$	$16,2 \cdot 10^4$	$17,4 \cdot 10^4$
$m$	0,5	0,5	0,5	0,5
$c'_{ref}$ , кН/м <sup>2</sup>	30	16	15	12
$\phi'$ , град.	24	39	36	36
$\psi$ , град.	0	9	6	6
$\nu'_{ur}$	0,35	0,3	0,35	0,35

мещения фундамента при переменном значении толщины плиты ростверка в двух случаях: применение модели Hardening Soil Small и PM4Silt. Затем выбирается оптимальная длина свай. В последнем случае обсуждается влияние разных факторов на работу свайного фундамента, таких как количество свай в кусте и способ моделирования сейсмических воздействий.

**3. Результаты исследования.** Для определения предварительного влияния толщины плиты ростверка на вертикальное перемещение фундамента значение толщины плиты принимается от 1 до 3 м с интервалом 0,2 м. Это влияние анализируется при использовании модели Hardening Soil Small без учета и с учетом сейсмических воздействий, а также модели PM4Silt с учетом сейсмических воздействий. При этом допускается, что в кусте есть 7×7 свай длиной 30 м. Кривые зависимости вертикального перемещения фундамента от толщины фундаментной плиты представлены на рис. 2, а.

Согласно полученным результатам, в данном случае вертикальное перемещение фундамента увеличивается с возрастанием толщины плиты ростверка, что не соответствует выводам [16] при устройстве свайного фундамента на слабом грунте. Прибавление толщины плиты с 1 до 2 м ведет к повышению значения осадки основания, независимо от используемой модели грунта с учетом сейсмических воздействий. Наиболее сильно тенденция проявилась при использовании модели PM4Silt.

Для дальнейших этапов анализа, используя вышеуказанные результаты, также учитывается запас на продавливание плиты колонной и угловой сваей, поэтому выбирается толщина плиты ростверка, равная 2,2 м. Длины свай принимаются от 20 до 40 м с интервалом 2 м. Кривые зависимости вертикального перемещения фундамента от длины свай изображены на рис. 2, б.

Увеличение длины свай в данном случае помогает снизить вертикальное перемещение фундамента, что ожидаемо. В случае длины от 20 до 28 м

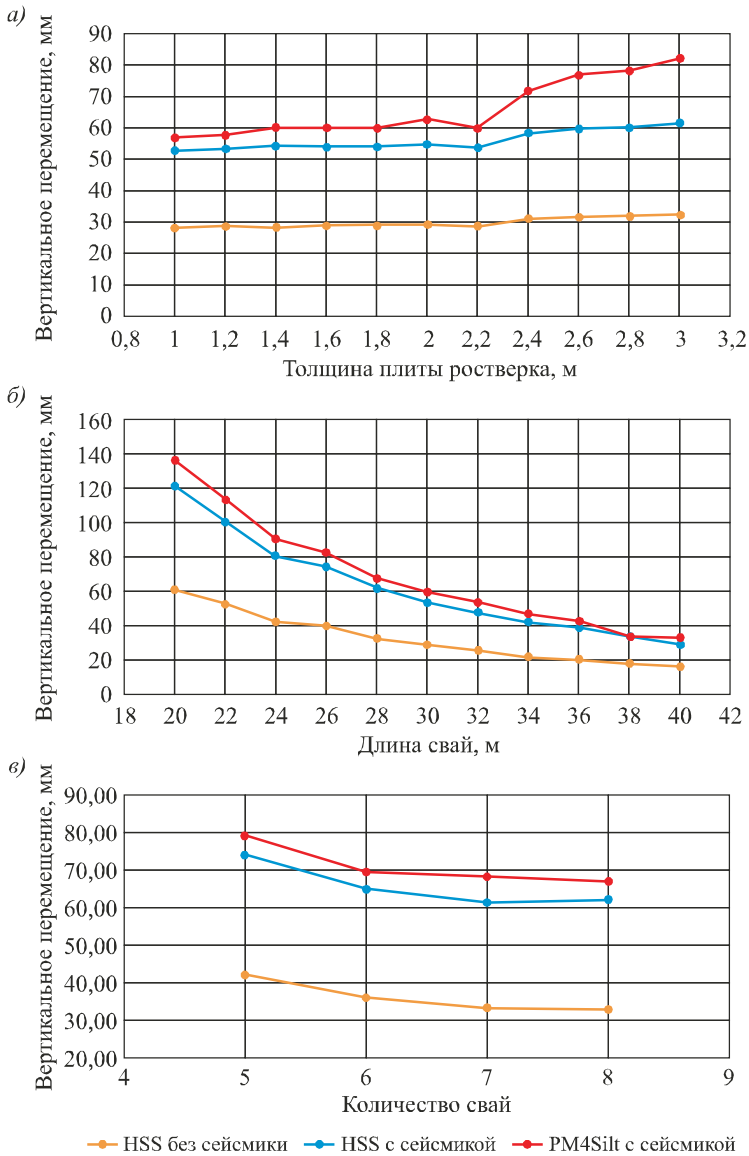


Рис. 2. Кривые зависимости вертикального перемещения фундамента от толщины плиты ростверка (а), от длины свай (б), от количества свай (в)

Fig. 2. Curves of dependence of the vertical movement of the foundation from the thickness of the plate (a), on the length of the piles (b), on the number of piles (c)

наблюдается резкое сокращение значения вертикального перемещения, а при длине свай от 28 до 40 м скорость влияния параметра снижается (рис. 3). Поэтому выбираем длину свай для дальнейшего анализа, равную 28 м. По полученным результатам нужно отметить, что при использовании модели Hardening Soil Small и длине свай 26 м вертикальное перемещение фундамента меньше 8 см, что допустимо для моделируемого здания согласно актуальной нормативной базе. Однако при той же длине свай, когда используется

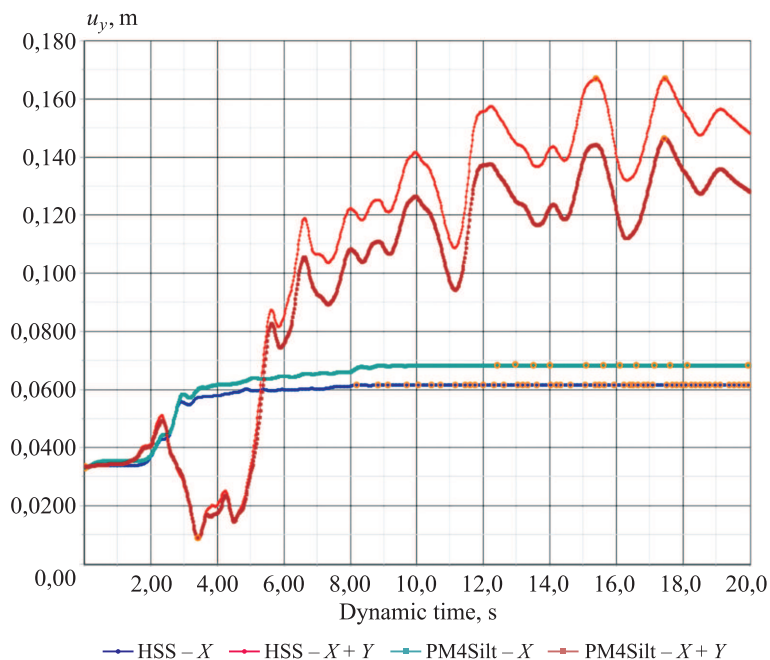


Рис. 3. Кривые зависимости «вертикальное перемещение – время землетрясения»

Fig. 3. Dependence curves "vertical displacement – earthquake time"

модель PM4Silt, расчетное значение осадки становится 8,3 см, что выше принятых предельно допустимых значений.

Для анализа влияния количества свай в кусте при устройстве на илистом основании рассматривается куст с 5×5, 6×6, 7×7 и 8×8 сваями (рис. 2, в).

Для оценки влияния способа моделирования сейсмических воздействий в PLAXIS 2D на работу свайного фундамента был выбран фундамент с плитой толщиной 2,2 м и расположенными под ней сваями по сетке 7×7 при

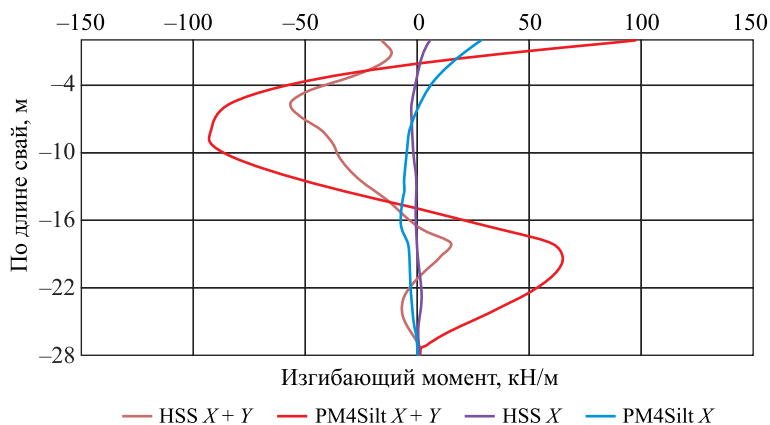


Рис. 4. Кривые изгибающего момента в центральной свае при рассматриваемых случаях расчета с учетом сейсмического воздействия

Fig. 4. Curves of the bending moment in the central pile in the considered cases of calculation, taking into account seismic effect

длине свай 28 м. Землетрясение моделируется приложением перемещения по нижней границе грунтового массива с подгрузкой акселерограммы по двум вариантам: по горизонтальному перемещению и по комбинации горизонтального и вертикального перемещений (рис. 3).

Кривые изгибающих моментов, реализующихся в центральной свае фундамента в рассматриваемых случаях, представлены на рис. 4.

**4. Выводы.** 1. Вертикальное перемещение фундамента на илистых грунтах в зависимости от толщины плиты ростверка не меняется по такому же принципу, который был показан в предшествующих сторонних исследованиях работы свайного фундамента на слабых грунтах. При сейсмических нагрузках с ростом толщины плиты вертикальные деформации основания растут.

2. Выбор модели грунта для моделирования грунтового массива имеет значительное влияние на предварительную оценку работы свайного фундамента и сооружения, особенно в случае строительства сооружения на потенциально разжижаемых грунтах.

3. Часто землетрясение моделируется в PLAXIS 2D приложением заданного перемещения по нижней границе грунтового массива с подгрузкой акселерограммы только по горизонтальному направлению (по оси  $X$ ). Однако этот способ может не отражать реальное влияние землетрясения на конструкции в случае водонасыщенных потенциально разжижаемых грунтов, что показано сравнительным расчетом.

#### Список источников

1. *Ставицкер Л.П.* Сейсмостойкость оснований и фундаментов. М.: Изд-во АСВ, 2010. 447 с.
2. *Madabhushi G., Knappett J., Haigh S.* Design of pile foundations in liquefiable soils. London: Imperial College Press, 2009.
3. *Agrahari M.K., Jain A., Puri N.* Performance of pile foundations during earthquake // Emerging Trends in Engineering Innovations & Technology Management. 2017.
4. *Вознесенский Е.А., Кушнарёва Е.С.* Сейсмическая разжижаемость грунтов: инженерная оценка и классифицирование // Инж. геология. 2012. № 2. С. 11–23.
5. *Вознесенский Е.А.* Динамические испытания грунтов. Состояние вопроса и стандартизация // Инж. изыскания. 2013. № 5. С. 20–26.
6. *Ter-Martirosyan A., Othman A.* Simulation of soil liquefaction due to earthquake loading // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 03025.
7. *Константинова Т.Г.* Влияние разжижения грунтов на макросейсмические последствия сильных землетрясений // Инж. изыскания. 2015. № 13. С. 28–33.
8. *Тер-Мартirosян А.З., Ле Дык Ань, Манукян А.В.* Влияние разжижения грунтов на расчетную несущую способность свай // Вестн. МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 5. С. 655–664.
9. *Ter-Martirosyan A., Le Duc Anh.* Calculation of the settlement of pile foundations taking into account the influence of soil liquefaction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. P. 052025.
10. *Saeedi M., Dehestani M., Shooshpasha I., Ghasemi G., Saeedi B.* Numerical analysis of pile-soil system under seismic liquefaction // Engineering Failure Analysis. 2018. Vol. 94. P. 96–108.
11. *Premalatha K., Muthulakshmi K., Bhuvanapriya D., Nikesh L., Vinitha M., Jakkamal D.M.* Analysis of pile foundations for liquefaction // International Journal for Research in Engineering Application & Management. 2019. Vol. 5. P. 368–374.



12. Sidorov V., Duc Anh Le, Sobolev E. Comparative calculation of piles taking into account seismic impacts (example in Ho Chi Minh City) // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 263. P. 02021.
13. Boulanger R.W., Ziotopoulou K. PM4Silt (Version 1): A Silt Plasticity Model for Earthquake Engineering Applications // Report UCD/CGM. 2018. No. 01.
14. Boulanger R.W., Wijewickreme D. Calibration of a constitutive model for the cyclic loading responses of Fraser River Delta Silt // *Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Rome, Italy, 2019. P. 121.
15. Boulanger R.W., Ziotopoulou K. A constitutive model for clays and plastic silts in plane-strain earthquake engineering applications // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019. Vol. 127. P. 105832.
16. Paravita Sri Wulandaria, Daniel Tjandra. Analysis of piled raft foundation on soft soil using PLAXIS 2D // *Procedia Engineering*. The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5). 2015. Vol. 125. P. 363–367.

### References

1. Stavnitser L.R. Earthquake resistance of foundations and foundations. Moscow: Publishing house of ASV, 2010. 448 p. (In Russ.).
2. Madabhushi G., Knappett J., Haigh S. Design of pile foundations in liquefiable soils. London: Imperial College Press, 2009.
3. Agrahari M.K., Jain A., Puri N. Performance of pile foundations during earthquake. *Emerging Trends in Engineering Innovations & Technology Management*. 2017.
4. Voznesenskiy E.A., Kushnareva E.S. Seismic soil liquefaction: engineering assessment and classification. *Inzhenernaya geologiya = Engineering geology*. 2012; (2): 11–23. (In Russ.).
5. Voznesenskiy E.A. Dynamic tests of soils. State of the question and stan ardization. *Inzhenernyye izyskaniya = Engineering surveys*. 2013; (5): 20–26. (In Russ.).
6. Ter-Martirosyan A., Othman A. Simulation of soil liquefaction due to earthquake loading. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97: 03025.
7. Konstantinova T.G. The role of soil liquefaction in macroseismic consequences of strong earthquakes. *Inzhenernyye izyskaniya = Engineering surveys*. 2015; (13): 28–33. (In Russ.).
8. Ter-Martirosyan A.Z., Le Duc Anh, Manukyan A.V. Influence of soil liquefaction on the design bearing capacity of the pile. *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU*. 2020; (15): 655–664. (In Russ.).
9. Ter-Martirosyan A., Le Duc Anh. Calculation of the settlement of pile foundations taking into account the influence of soil liquefaction. *IOP Conference Series: Materials Science Engineering*. 2020; 869: 052025.
10. Saeedi M., Dehestani M., Shooshpasha I., Ghasemi G., Saeedi B. Numerical analysis of pile-soil system under seismic liquefaction. *Engineering Failure Analysis*. 2018; 94: 96–108.
11. Premalatha K., Muthulakshmi K., Bhuvanapriya D., Nikesh L., Vinitha M., Jakkammal D.M. Analysis of pile foundations for liquefaction. *International Journal for Research in Engineering Application & Management*. 2019; 5: 368–374.
12. Sidorov V., Duc Anh Le, Sobolev E. Comparative calculation of piles taking into account seismic impacts (example in Ho Chi Minh City). *E3S Web of Conferences*. 2021; 263: 02021.
13. Boulanger R.W., Ziotopoulou K. PM4Silt (Version 1): A Silt Plasticity Model for Earthquake Engineering Applications. *Report UCD/CGM*. 2018; (01).

14. Boulanger R.W., Wijewickreme D. Calibration of a constitutive model for the cyclic loading responses of Fraser River Delta Silt. Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Rome, Italy, 2019. P. 121.
15. Boulanger R.W., Ziotopoulou K. A constitutive model for clays and plastic silts in plane-strain earthquake engineering applications. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019; 127: 105832.
16. Paravita Sri Wulandaria, Daniel Tjandra. Analysis of piled raft foundation on soft soil using PLAXIS 2D. *Procedia Engineering*. The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5). 2015; 125: 363–367.

#### **Информация об авторах**

**З.Г. Тер-Мартirosян** – доктор технических наук, профессор, mgroif@mail.ru

**А.З. Тер-Мартirosян** – доктор технических наук, gic-mgsu@mail.ru

**Ле Дык Ань** – аспирант, ducanh.st22@gmail.com

**В.В. Сидоров** – кандидат технических наук, доцент, vitsid@mail.ru

#### **Information about the authors**

**Z.G. Ter-Martirosyan** – DSc, Professor, mgroif@mail.ru

**A.Z. Ter-Martirosyan** – DSc, gic-mgsu@mail.ru

**Le Duc Anh** – Post-graduate Student, ducanh.st22@gmail.com

**V.V. Sidorov** – PhD, Ass. Professor, vitsid@mail.ru

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

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

Статья поступила в редакцию 20.09.2022

Одобрена после рецензирования 20.10.2022

Принята к публикации 27.10.2022

The article was submitted 20.09.2022

Approved after reviewing 20.10.2022

Accepted for publication 27.10.2022