

05.23.02 ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Моделирование разжижения грунтов основания при сейсмическом воздействии с использованием модели UBC3D-PLM

УДК 624.131.552.2

Тер-Мартirosян А.З.

Д-р техн. наук, профессор кафедры «Механика грунтов и геотехника», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва); e-mail: gic-mgsu@mail.ru

Осман А.

Аспирант кафедры «Механика грунтов и геотехника», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва); e-mail: othman.ahmd@yandex.ru

Статья получена: 01.10.2019. Рассмотрена: 04.11.2019. Одобрена: 10.11.2019. Опубликовано онлайн: 26.11.2019. ©РИОР

Аннотация. Разжижение — это явление, при котором жесткость и прочность грунта снижаются в результате сейсмического или других динамических воздействий. Разжижение является причиной огромного ущерба в результате многочисленных землетрясений по всему миру. Моделирование поведения грунтов является основным этапом процесса прогнозирования разжижения грунтов. В настоящее время представлено большое количество моделей грунтов. Тем не менее только некоторые из них могут моделировать данный процесс. Одной из таких моделей может быть использована модель *UBC3D-PLM*. В данной работе рассмотрены возможности этой модели в рамках моделирования сейсмического воздействия на грунтовое основание здания при различной его этажности

на программном комплексе *PLAXIS*. Используются реальные данные о землетрясении 1990 г. в Апланд рядом с городом Лас-Вегас. Результаты моделирования показали разницу в поведении грунтового массива под воздействием землетрясения по сравнению с упругим поведением, а также необходимость использования модели *UBC3D-PLM* для оценки сейсмического воздействия.

Ключевые слова: разжижение, динамическое воздействие, *UBC3D-PLM*, поровое давление, землетрясение, сейсмическое воздействие.

Введение

Землетрясения — это колебания участка земной коры, вызванные прохождением сейсмических волн, возникающих в результате кратко-

SIMULATION OF SOIL LIQUEFACTION DUE TO EARTHQUAKE LOADING USING THE UBC3D-PLM MODEL

Armen Ter-Martirosyan

Doctor of Technical Sciences, Professor of Soil Mechanics and Geotechnics Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow; e-mail: gic-mgsu@mail.ru

A. Othman

Postgraduate Student, Soil Mechanics and Geotechnics Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow; e-mail: othman.ahmd@yandex.ru

Manuscript received: 01.10.2019. **Revised:** 04.11.2019. **Accepted:** 10.11.2019. **Published online:** 26.11.2019. ©РИОР

Abstract. Liquefaction is a phenomenon in which the stiffness and strength of a soil are reduced as a result of seismic effect or other dynamic effects. Liquefaction was the basic reason of the

big damages caused by many earthquakes around the world. The basic step in the processes of predicting the soil liquefaction is the modeling of soil behavior. At the present time, numerous soil models are presented. Nevertheless, only some of them can simulate this process. Model UBC3D-PLM is one of these models which can be used. In this paper, the possibilities of this model are considered by modeling on the PLAXIS software package the seismic impact on a building with its different heights. The actual data of Upland earthquake 1990 near Los Angeles city was used. Results of this simulation showed us the difference in the behavior of the soil mass under the impact of an earthquake compared with the elastic behavior, as well as showed us the necessary to use the UBC3D-PLM model to estimate the seismic impact.

Keywords: liquefaction, dynamic impact, UBC3D-PLM, pore pressure, earthquake, seismic impact.

временного выделения большого количества энергии. Характерной особенностью воздействия землетрясений является их кратковременность, большая величина амплитуды смещения в момент воздействия и сравнительно малые амплитуды последующих колебаний. Волны, вызванные воздействием землетрясений, распространяясь по частицам грунта и находящейся в порах жидкости, могут привести к нарушению структуры массива грунта, а сравнительно длительный процесс к перекомпоновке частиц грунта под действием его собственного веса и внешней нагрузки. Характерной особенностью водонасыщенного несвязного и слабосвязанного грунта является его возможность разжижаться. Несвязный водонасыщенный грунт временно переходит в состояние тяжелой вязкой жидкости, что может привести к потере устойчивости зданий и сооружений в основании которых он находится. При это очевидно, что сооружения большой массы дают большие осадки и крены, а сравнительно легкие (заглубленные подземные части зданий, резервуары и т.д.) дают подъем [5]. В разжиженном состоянии частицы грунта отделены и практически не имеют контактов. Уплотнение происходит вследствие взаимного смещения частиц (вниз) и поровой жидкости (вверх). Критерием оценки потенциального разжижения может служить критическое ускорение, возникающее в грунте при внешних воздействиях [3].

Количественная оценка устойчивости грунтовых массивов при землетрясении, вибрационных и других видах динамических воздействий связано с механическими свойствами грунтов. Для описания механических свойств грунтов при динамических воздействиях применяются различные модели. Они характеризуются совокупностью уравнений, определяющих поведение среды.

В рассматриваемом процессе всякой модели соответствует некоторая схематизация свойств реальных сред, полученных из лабораторных и полевых испытаний [1; 10]. Критерием применимости моделей является проверка соответствия результатов расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) оснований с наблюдаемыми деформациями. Основное различие между используемыми моделями грун-

тов заключается в характере принимаемых гипотез относительно вида физических уравнений, т.е. законов деформирования и условий предельного состояния грунтов при динамических воздействиях.

Модель UBC3D-PLM

Модель *UBC3D-PLM* основана на оригинальной модели *UBCSAND* и представляет собой упругопластическую модель, которая позволяет моделировать поведение разжижения песчаных и глинистых грунтов под воздействием сейсмической нагрузки [13; 14].

Оценка потенциала разжижения грунтового массива может быть выполнена путем проведения анализа динамического воздействия. Для проведения такого анализа возможно применение следующего алгоритма [12]:

- определение геотехнической модели грунтового массива — распределение инженерно-геологических элементов в плане и по глубине, уровней грунтовых вод, граничных условий и механических свойств грунтов для описания его поведения при статическом и динамическом нагружении;
- определение сейсмического воздействия в соответствии с конкретным участком и вероятностей данного воздействия, как указано в ряде действующих нормативных документов [1; 10; 11];
- выполнение расчетов с использованием численной модели и дальнейшего анализа результатов.

Упругое поведение

Модель *UBC3D-PLM* включает нелинейный изотропный закон упругого поведения, который определяется упругим модулем объемной деформации K и модулем упругого сдвига G , которые показаны в следующих уравнениях

$$K = K_B^{*e} p_{ref} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^{me}, \quad (1)$$

$$G = K_G^{*e} p_{ref} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^{ne}, \quad (2)$$

где K_B^{*e} и K_G^{*e} являются входными параметрами модели *UBC3D-PLM* и представляют собой модуль объемной и сдвиговой деформации соответственно; p_{ref} — опорное давление; m_e и n_e — параметры, определяющие изменение жесткости.

Абсолютно упругое поведение (G_{max}) определяется моделью во время процесса разгрузки. Пластическое поведение материала моделируется при достижении напряжений поверхности текучести вплоть до снижения напряжений ниже поверхности, где он снова работает упруго.

Пластическое поведение

Пластические деформации образуются при первичном и вторичном нагружении и догружении. Они определяются первичной и вторичной поверхностью текучести. Первичное нагружение реализуется, когда величина напряжений превышает природное напряженное состояние для нормально уплотненных грунтов и наибольшее значение напряжений для переуплотненных.

После этого материала работает в рамках первичной поверхности текучести на основе изотропного упрочнения. По мере увеличения напряжений, поверхность текучести трансформируется, расширяя область упругого поведения материала. При разгрузке материал снова начинает работать упруго. Во время повторного нагружения в случае, когда напряжения не превышают предыдущие значения — пластические деформации материала меньше по сравнению с первичной нагрузкой. Такое поведение обуславливается правилом кинематического упрочнения для вторичной поверхности текучести, которая активируется при вторичной нагрузке. Обе поверхности определяются функцией Мора-Кулона, следующим образом:

$$f_m = \frac{1}{2}(\sigma_{max} - \sigma_{min}) - \left(\frac{1}{2}(\sigma_{max} + \sigma_{min}) + c \cot \varnothing_p \right) \sin \varnothing_{mob}, \quad (3)$$

где σ_{max} и σ_{min} — максимальные и минимальные главные напряжения; \varnothing_p и \varnothing_{mob} — пиковые и мобилизованные углы трения соответственно; c — сцепление.

Функция пластического поведения основана на *Drucker Prager* и формулируется как:

$$g_m = q - \frac{6 \sin \varnothing_{mob}}{3 - \sin \varnothing_{mob}} (p + c \cot \varnothing_p), \quad (4)$$

где q — девиаторное напряжение; \varnothing_{mob} — мобилизованный угол дилатации.

Мобилизованный угол дилатации определяется функцией от мобилизованного угла трения \varnothing_{mob} и угла трения при постоянном объеме \varnothing_{cv} следующим образом:

$$\sin \varnothing_{mob} = \sin \varnothing_{mob} - \sin \varnothing_{cv}. \quad (5)$$

Правило упрочнения имеет вид:

$$d \sin \varnothing_{mob} = 3K_G^p \left(\frac{p}{P_A} \right)^{np} \frac{P_A}{\sigma_{max} + \sigma_{min}} \times \left(1 - \frac{\sin \varnothing_{mob}}{\sin \varnothing_p} R_f \right)^2 d\lambda, \quad (6)$$

где K_G^p — модуль сдвига; np — показатель модуля пластического сдвига; R_f — коэффициент потери прочности; $d\lambda$ — приращение пластических сдвиговых деформаций.

При первичном нагружении K_G^p равна $K_{G_0}^p$, что является входным параметром. Однако при вторичном нагружении он заменяется обновленным модулем сдвига:

$$k_{G_i}^p = k_{G_0}^p \left(4 + \frac{n_{rev}}{2} \right) k_{dens} f_{acdens}; \quad (7)$$

$$K_{G_i}^p = K_{G_0}^p \left(4 + \frac{n_{rev}}{2} \right) k_{dens} f_{acdens}, \quad (8)$$

где n_{rev} — определяет изменение напряжений от нагружения и разгрузки; k_{dens} — коэффициент от 0,5 до 1,0, корректирующий правило уплотнения; f_{acdens} — коэффициент уплотнения, определенный по кривой.

Как правило, при проектировании в сейсмоопасных районах, когда определение потенциала разжижения является целью расчета, методами определения параметров модели *UBC3D-PLM* являются лабораторные испытания на динамическом трехосном приборе или динамическом приборе простого сдвига. Однако

во многих случаях доступны только данные из статических трехосных (CD ТхС) или полевых испытаний (SPT).

Моделирование сейсмических воздействий

В рамках выполняемого исследования была составлена модель многоэтажного жилого дома (3-9-15 этажей) в программном комплексе PLAXIS. Высота этажа — 3 м. Уровень подземных вод находится на уровне поверхности земли (рис. 1). Параметры грунтов основания приведены в табл. 1.

Таблица 1

Входные параметры, используемые в расчетах

Table 1

Input parameters for the calculation

| | Model Parameter | UBC3D-PLM | Linear elastic |
|------------------|---------------------------------------|--------------------|----------------|
| Основной | γ_{unsat} [kn/m ³] | 19,7 | 19,7 |
| | γ_{sat} [kn/m ³] | 21,80 | 21,8 |
| | e_{init} | 0,74 | 0,74 |
| | E [kPa] | 98 000 | 98 000 |
| | ν | n/a | 0,3 |
| | G [kPa] | n/a | 28 000 |
| | C_{ref} [kPa] | 0,0 | 0,0 |
| | φ [°] | 22 | 22 |
| | ψ [°] | 19 | 19 |
| | k_x, k_y [m/s] | 0,5e-6 | 0,5e-6 |
| | Конститутивная модель | φ_{cv} [°] | 20 |
| φ_p [°] | | 22 | |
| K_G^e | | 854,6 | |
| K_G^p | | 250 | |
| K_B^e | | 598,2 | |
| me | | 0,5 | |
| ne | | 0,5 | |
| np | | 0,5 | |
| R_f | | 0,811 | |
| P_A [kPa] | | 100 | |
| σ_t [kPa] | | 0,0 | |
| f_{achard} | | 0,20 | |
| $(N1)_{60}$ | | 7,650 | |
| f_{acpost} | | 0,02 | |

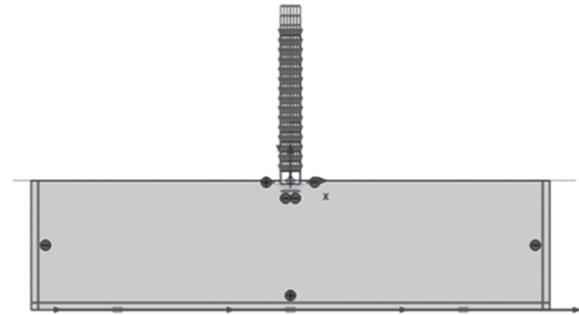


Рис. 1. Расчетная схема модели

Fig. 1. Design scheme of the model

Запись ускорений землетрясения при магнитуде 5,40 (в открытой шкале Рихтера) и пиковым значением 239,87 cm/sec² показана на рис. 2.

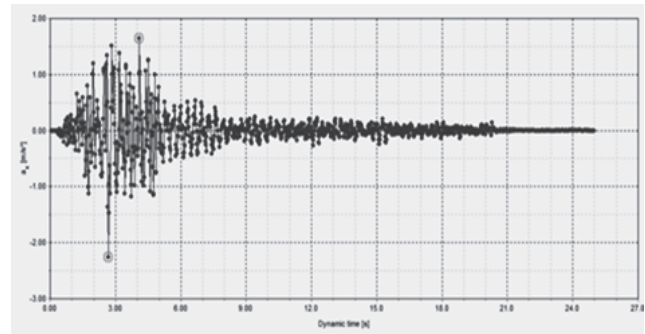


Рис. 2. Динамическая нагрузка: запись ускорений землетрясения

Fig. 2. Dynamic load: recording of earthquake accelerations

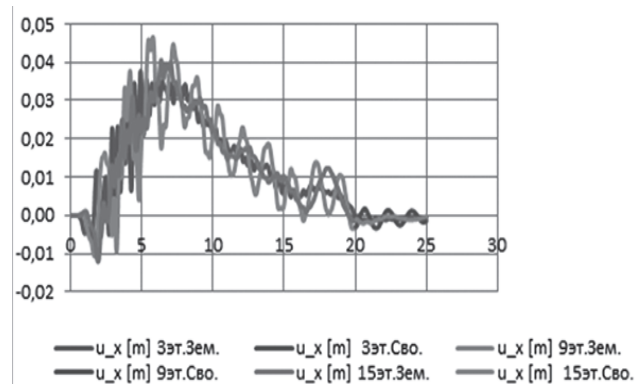


Рис. 3. Зависимость горизонтального перемещения в верхней точке здания от времени сейсмического воздействия: а) модель Linear elastic; б) модель UBC3D-PLM

Fig. 3. Dependence the horizontal movement at the top of the building with the dynamic time of seismic impact: а) Linear Elastic model; б) UBC3D-PLM model

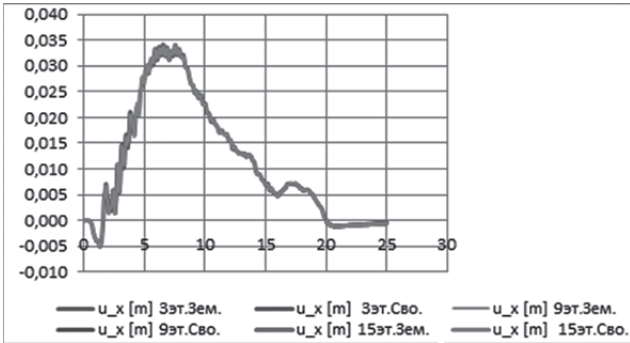


Рис. 4. Зависимость горизонтального перемещения в нижней точке здания от времени сейсмического воздействия: а) модель *Linear elastic*; б) модель *UBC3D-PLM*

Fig. 4. Dependence the horizontal movement at the bottom of the building with the dynamic time of seismic impact: а) *Linear Elastic model*; б) *UBC3D-PLM model*

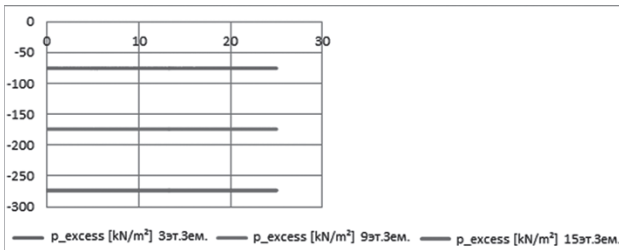


Рис. 5. Зависимость порового давления в нижней точке здания от времени сейсмического воздействия: а) модель *Linear elastic*; б) модель *UBC3D-PLM*

Fig. 5. Dependence the excess pore pressure at the bottom of the building with the dynamic time of seismic impact: а) *Linear Elastic model*; б) *UBC3D-PLM model*

В рамках представленных результатов показано, что горизонтальные перемещения в верхней точке здания не превышают 5 см (рис. 3, а), а в нижней не превышают 3,5 см (рис. 4, а) в линейно-упругой модели. При этом результаты расчетов на основе модели *UBC3D-PLM* показали, что происходит обрушение здания (рис. 3, б, 4, б).

Результаты анализа расчетов по модели *UBC3D-PLM* показали (рис. 5, б), что грунт полностью теряет несущую способность в результате высокого порового давления, т.е. происходит разжижение, вызванное сейсмической нагрузкой через несколько секунд после ее начала, что, в свою очередь, приводит к обрушению здания, что не зафиксировано при расчетах по модели *Elastic linear* (рис. 5, а).

Заключение

При воздействии динамической или циклической нагрузкой модель *UBC3D-PLM* позволяет учесть пластические деформации при мобилизации прочности материала (сдвиговое упрочнение). Демпфирование Рэлея может быть учтено для моделирования характеристик демпфирования грунта.

Модель *UBC3D-PLM* разработана для прогноза динамического поведения несвязных грунтов, в особенности моделировании избыточного порового давления при недренированном поведении и разжижении.

UBC3D-PLM является достаточно простой в использовании моделью, так как большинство параметров грунта может быть получено в рамках полевых испытаний (*SPT*).

Результаты моделирования показали разницу в поведении под воздействием землетрясения в модели *UBC3D-PLM* по сравнению с упругим поведением в модели *Linear elastic*. Кроме того, результаты расчетов избыточного порового давления по модели *Linear elastic* в случае полностью водонасыщенных грунтов не корректны в связи с чем рекомендуется использование модели *UBC3D-PLM* для оценки сейсмического воздействия.

Литература

- ГОСТ Р. 56353-2015. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов [Текст]. — М.: Росстандарт, 2015. — 5 с.
- Джаро М.Н. Взаимодействие двухслойного основания и фундаментов при статических и динамических нагрузках [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / М.Н. Джаро. — М.: Изд-во Моск. гос. строит. ун-та, 2013.
- Иванов П.Л. Разжижение песчаных грунтов [Текст] / П.Л. Иванов. — М.: Гос. энерг. изд-во, 1962.
- Красников Н.Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения [Текст] / Н.Д. Красников. — Л.: Стройиздат, 1970. — С. 240.
- Тер-Мартirosян А.З. Взаимодействие фундаментов с основанием при циклических и вибрационных воздействиях с учётом реологических свойств грунтов [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.З. Тер-Мартirosян. — М.: Московский государственный строительный университет, 2010.

6. Тер-Мартirosян З.Г. Ползучесть и виброползучесть песчаных грунтов [Текст] / З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, Е.С. Соболев // Инженерные изыскания. — 2014. — № 5-6. — С. 24–28.
7. Тер-Мартirosян З.Г. Экспериментально-теоретические основы определения механических свойств песчаных грунтов при динамических воздействиях [Текст] / З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, Е.С. Соболев. — М.: Изд-во НИУ МГСУ, 2015.
8. Ухов С.Б. Механика грунтов, основания и фундаменты [Текст] / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский, З.Г. Тер-Мартirosян, С.Н. Чернышев. — М.: Высшая школа, 2007.
9. Цытович Н.А. Механика грунтов [Текст] / Н.А. Цытович. — М.: Гос. изд-во лит-ры по строительству, архитектуре и строит. материалам, 1963.
10. ASTM D4767-11., 2011. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
11. EN 1998-1S., 2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance — Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].
12. Laera A., Brinkgreve R.B.J. 2015. Site response analysis and liquefaction evaluation. Available in the Plaxis Knowledge Base website.
13. Petalas A., Galavi V. 2013. Plaxis Liquefaction Model UB-C3DPLM. PLAXIS Report.
14. Tsegaye A. 2010. Plaxis liquefaction model. external report. PLAXIS knowledge base.

References

1. GOST R. 2015. 56353-2015. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya dinamicheskikh svoystv dispersnykh gruntov [GOST R. 2015.56353-2015. Soils. Laboratory methods for determining the dynamic properties of dispersed soils]. Moscow: Rosstandart Publ., 5.
2. Dzharo M.N. Vzaimodejstvie dvuslojnogo osnovaniya i fundamentov pri staticheskikh i dinamicheskikh nagruzkah. Dokt. Diss [Interaction of a two-layer foundation and foundations under static and dynamic loads. Doct. Diss]. *Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet* [Moscow State University of Civil Engineering]. 2013.
3. Ivanov P.L. Razzhizhenie peschanykh gruntov. Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo [Liquefaction of sandy soils. State Energy Publishing House]. 1962.
4. Krasnikov N.D. Dinamicheskie svoystva gruntov i metody ih opredeleniya [Dynamic properties of soils and methods for their determination]. L.: Strojizdat Publ., 1970. P. 240.
5. Ter-Martirosyan A.Z. 2010. Vzaimodejstvie fundamentov s osnovaniem pri ciklicheskih i vibracionnykh vozdeystviyah s uchytom reologicheskikh svoystv gruntov. Dokt. Diss. [Interaction of foundations with the base under cyclic and vibrational effects taking into account the rheological properties of soils. Doct. Diss.]. *Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet* [Moscow State University of Civil Engineering].
6. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Sobolev E.S., 2014. Polzuchest' i vibropolzuchest' peschanykh gruntov. *Inzhenernye izyskaniya* [Creep and vibration creep of sandy soils. Engineering Survey]. 2014, I. 5–6, pp. 24–28.
7. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Sobolev E.S. *Eksperimental'no-teoreticheskie osnovy opredeleniya mekhanicheskikh svoystv peschanykh gruntov pri dinamicheskikh vozdeystviyah* [Experimental and theoretical foundations for determining the mechanical properties of sandy soils under dynamic impacts]. Moscow, NIU MGSU Publ., 2015.
8. Uhov S.B., Semenov V.V., Znamenskij V.V., Ter-Martirosyan Z.G., Chernyshev S.N. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenti* [Soil mechanics, foundations and foundations]. Vysshaya Shkola Publ., 2007.
9. Cytovich N.A. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Gos. izd-vo lit-ry po stroitel'stvu, arhitekture i stroit. materialam [Gos. publishing house for construction, architecture and construction. materials]. 1963.
10. ASTM D4767-11. 2011. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
11. EN 1998-1S. 2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance — Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].
12. Laera A., Brinkgreve R. B. J., 2015. Site response analysis and liquefaction evaluation. Available in the Plaxis Knowledge Base website.
13. Petalas A., Galavi V. 2013. Plaxis Liquefaction Model UB-C3DPLM. PLAXIS Report.
14. Tsegaye A. 2010. Plaxis liquefaction model. external report. PLAXIS knowledge base.