



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 11, № 3, 2020

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.09

УДК 624.152.634.3

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТ ВИБРОПОГРУЖЕНИЯ ШПУНТОВЫХ СВАЙ НА ЗДАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ ЗАСТРОЙКИ В УСЛОВИЯХ СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ

Р.А. Мангушев¹, А.В. Гурский², В.М. Полунин¹

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

²ООО «ПКТИ Фундамент-тест», Санкт-Петербург, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 05 июня 2020
Принята: 28 августа 2020
Опубликована: 30 сентября 2020

Ключевые слова:

вибропогружение свай, полевые измерения, шпунтовые сваи, модель прогнозирования, вибрации грунта.

АННОТАЦИЯ

В слабых, структурно-неустойчивых грунтах применение технологии высокочастотного вибропогружения шпунтовых свай в ряде случаев заведомо опасно, а вопрос оценки границ применимости данной технологии в тех или иных условиях является актуальным. Оценка динамического воздействия на грунт основания можно производить по уровню колебаний. Нормативные документы предъявляют требования к уровню колебаний окружающего массива грунта и зданий сооружений, однако оценивать влияние технологии высокочастотного вибропогружения шпунтовых свай только по величинам виброускорения и виброскорости не вполне корректно. Объектом исследования являются величины деформаций фундаментов, усиленных буринъекционными сваями. На опытной площадке строительства были проведены исследования зависимости уровня колебаний фундаментов, усиленных буринъекционными сваями длиной 18 м, от высокочастотного вибропогружения трубошпунта диаметром 1200 мм, длиной 18 м. Отметка острия свай усиления совпадала с проектной отметкой низа шпунта. В процессе погружения шпунтовых свай производился постоянный геодезический контроль за деформациями примыкающих зданий. Цель исследования – разработка модели по прогнозу деформаций оснований и фундаментов от процесса вибропогружения свай. Основные результаты следующие: приведенный в статье пример показывает, что при усилении фундаментов величины деформаций основания (осадки) остаются в пределах допустимых значений, несмотря на значительные превышения допустимого уровня колебаний фундаментов здания. Предложенная методика численного прогноза деформаций оснований от вибропогружения шпунтовых свай дает удовлетворительную сходимость с результатами натурных наблюдений и позволяет оценить качественно и количественно осадки зданий окружающей застройки от вибропогружения/извлечений шпунтовых свай на предварительных этапах строительства.

© ПНИПУ

© Мангушев Рашид Александрович – доктор технических наук, профессор, OrcidID: 0000-0003-1077-0562; e-mail: ramangushev@yandex.ru.

Гурский Александр Витальевич – кандидат технических наук, заместитель директора, e-mail: avgurskiy@mail.ru.

Полунин Вячеслав Михайлович – аспирант, OrcidID: 0000-0001-7863-9654; e-mail: n1ce2u@yandex.ru.

Rashid A. Mangushev – Doctor of Technical Sciences, Professor, OrcidID: 0000-0003-1077-0562; e-mail: ramangushev@yandex.ru.

Alexander V. Gurskiy – Ph.D. in Technical Sciences, Deputy Director, OrcidID: e-mail: avgurskiy@mail.ru.

Viacheslav M. Polunin – Postgraduate Student, OrcidID: 0000-0001-7863-9654; e-mail: n1ce2u@yandex.ru.

ESTIMATION OF DYNAMIC EFFECTS FROM VIBRATION DIPPING OF SHEET PILES ON ENVIRONMENTAL BUILDINGS IN CONDITIONS OF WEAK WATER-SATURATED SOILS

R.A. Mangushev¹, A.V. Gurskiy², V.M. Polunin¹

¹Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russian Federation

²PKTI Fundament-Test LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 05 June 2020

Accepted: 28 August 2020

Published: 30 September 2020

Keywords:

pile vibration driving, field measurements, sheet piles, predictions model, soil vibration.

ABSTRACT

In weak, structurally unstable soils, the use of the technology of high-frequency vibration immersion of sheet piles, in some cases, is obviously dangerous, and the issue of assessing the limits of applicability of this technology in certain conditions is relevant. The assessment of the dynamic impact on the soil foundation can be made by the level of vibrations. Regulatory documents impose requirements on the level of vibrations of the surrounding soil mass and buildings, however, it is not entirely correct to assess the influence of the technology of high-frequency vibration driving of sheet piles only by the values of vibration acceleration and vibration velocity. The object of the study is the values of deformations of foundations reinforced with piles. At the experimental construction site, we were carried out for the level of vibrations of foundations reinforced with piles 18 m length, from high-frequency vibration immersion of a pipe sheet pile with a diameter of 1200 mm and a length of 18 m. In the process of driving the sheet piles, we were making constant geodesic control over the deformations of adjoining buildings was carried out. The main results are: the example given in the article shows that when the foundations are strengthened, the deformations of the foundation (settlement) remain within the permissible values, despite the significant excess of the permissible level of vibrations of the building foundations. The proposed methodology for the numerical prediction of base deformations from vibration immersion of sheet piles gives satisfactory convergence with the results of field observations and makes it possible to assess qualitatively and quantitatively the settlements of buildings in the surrounding development from vibration immersion / extraction of sheet piles at the preliminary stages of construction.

© PNRPU

Введение

Применение технологии погружения шпунтовых свай с высоким уровнем динамического воздействия в условиях сложившейся застройки зачастую приводит к значительным дополнительным осадкам окружающих зданий и развитию деформаций в их несущих конструкциях [1]. Особенно это проявляется в сложных инженерно-геологических условиях и, в частности, когда основанием для фундаментов зданий и сооружений служат водонасыщенные пылеватые пески, склонные к разжижению при динамическом воздействии. В условиях г. Санкт-Петербурга подстилающими слоями являются сильносжимаемые водонасыщенные пылевато-глинистые грунты, которые обладают тиксотропным разупрочнением при воздействии внешних факторов.

Технология высокочастотного погружения шпунтовых свай является экономически обоснованным вариантом по сравнению с такими методами устройства ограждения глубоких котлованов, как: статическое вдавливание, метод «стена в грунте», наборные крепления и пр. Вместе с тем данная технология обладает значительным риском в определенных инженерно-геологических условиях, поскольку под несущим слоем основания фундаментов большинства зданий в центральной части города залегает большая толща слабых водонасыщенных грунтов, склонных к тиксотропному разупрочнению и разжижению. Это, в свою очередь, является причиной значительных дополнительных осадков существующих сооружений при новом строительстве вблизи них. Величина дополнительных технологи-

ческих деформаций в условиях большой толщи слабых водонасыщенных грунтов может достигать существенных величин, даже при применении щадящих технологий [2–4].

В связи с этим при производстве работ по погружению шпунта необходим (и, как правило, проводится) постоянный геотехнический мониторинг, включающий геодезический контроль осадок и деформаций сооружений, измерение уровня вибраций несущих конструкций, изменения уровня УГВ и т.д. Так, нормативные документы (ТСН 50-302–2004, ВСН 490-87, ГОСТ Р 52892–2007) предъявляют достаточно жесткие требования к уровню колебаний конструкций зданий: при повышении допустимого уровня колебаний (выше $0,15 \text{ м/с}^2$, согласно ТСН 50-302–2004) требуется остановка работ, корректировка технологий проведения работ или переход на принципиально другой метод погружения свай, что зачастую приводит к финансовым потерям.

В Санкт-Петербурге в результате мониторинга проведения работ нулевого цикла неоднократно отмечалось, что при погружении шпунтовых свай величина виброускорения превышает предельно допустимые значения. Это связано с нарушением технологического режима производства работ, заклиниванием замков между сваями, прохождением сваями плотных грунтов, «уводом» шпунтовых свай при погружении следующей [5].

Однако уровень динамического воздействия является лишь косвенным показателем влияния на окружающий массив грунта и здания, попадающих в зону влияния. Очевидно, главным критерием опасности для зданий исторической застройки следует выбирать неравномерные деформации, превышающие предельно допустимые, которые приводят к аварийным ситуациям.

В данной работе рассмотрен случай, когда существенные превышения уровня колебаний конструкции фундаментов зданий не привели к развитию сверхнормативных значений деформаций. Целью исследования стала разработка модели прогноза деформаций от высокочастотного погружения шпунтовых свай.

Методика, объект исследований. Постановка и описание задач

При устройстве ограждения котлована сложной формы размером $131 \times 61 \text{ м}$ и глубиной порядка 5 м выполнялось вибропогружение круглого трубошпунта и полутрубы диаметром 1200 мм , абсолютная длина шпунтовых свай варьировалась от 14 до 18 м . Погружение шпунтовых свай выполнялось с помощью вибропогружателя PVE 40VM (рис. 1).



Марка вибропогружателя	PVE 40VM
Число оборотов, об/мин	0–2000
Рабочая частота, Гц	33
Статический момент массы дебалансов, Н·м	400
Максимальная вынуждающая сила, кН	1800
Масса, т	7,8

Рис. 1. Используемый вибропогружатель PVE40VM

Fig. 1. Hammer PVE40VM

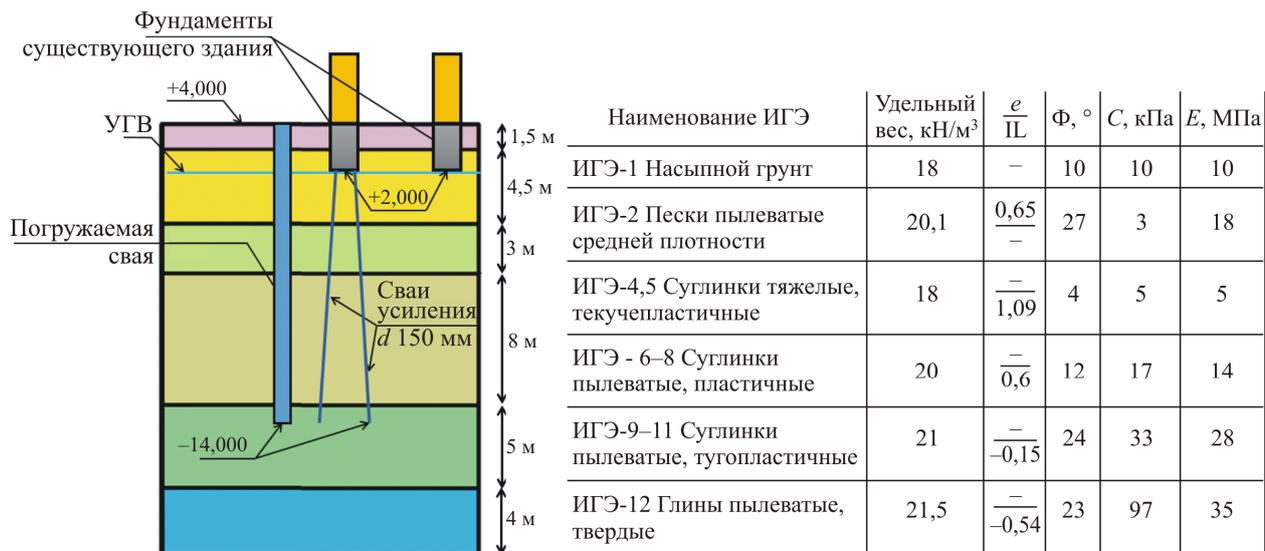


Рис. 3. Схематическое расположение свай усиления и трубошпунта на разрезе
 Fig. 3. Schematic location of reinforcement piles and sheet piles in the section

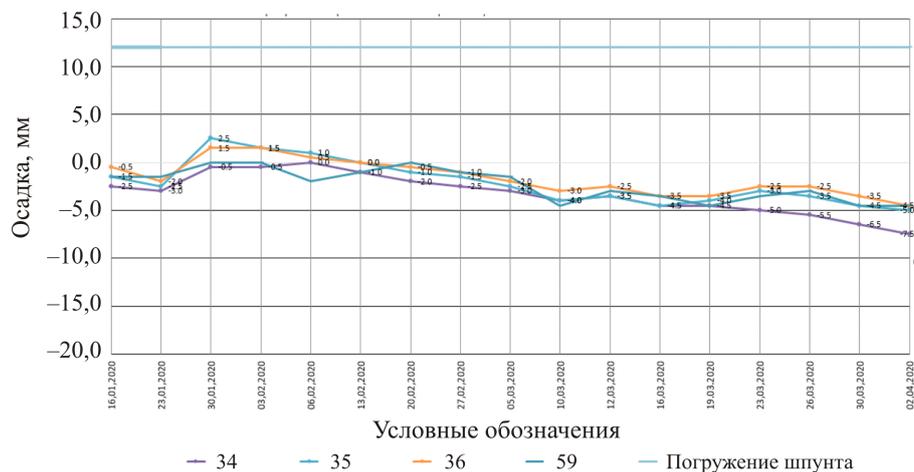


Рис. 4. График развития деформаций примыкающего здания при погружении свай
 Fig. 4. The deformation graph of the adjacent building during sheet piles driving

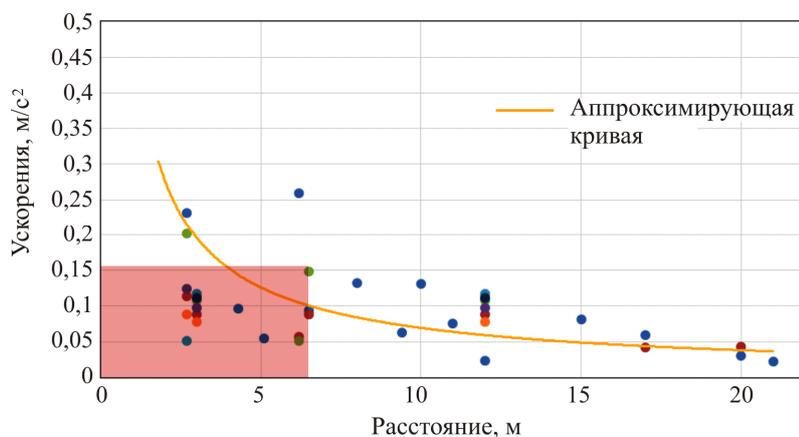


Рис. 5. Полученные величины среднеквадратичных значений виброускорений на разных расстояниях от источника колебаний при погружении шпунтовых свай на опытной площадке
 Fig. 5. Obtained values of the root-mean-square values of vibration accelerations at different distances from the source of vibrations when driving sheet piles on the test site

Как следует из приведенного графика, фактический уровень динамического воздействия превышал допустимый (по ТСН 50-302–2004) более чем в 2 раза в радиусе 6,5 м от погружаемых свай. Тем не менее деформации оснований зданий остались в допустимых значениях и не превысили 7 мм.

В связи с этим нами рассматривалась задача оценки деформаций основания фундаментов соседних зданий при вибропогружении вблизи него шпунтовых свай с использованием метода численного моделирования и сопоставления результатов расчетов с натурными наблюдениями.

Вопрос прогноза деформаций оснований зданий и сооружений в процессе вибропогружения свай является актуальным и до настоящего времени не до конца решенным.

При динамическом воздействии на грунтовый массив происходит изменение его структуры, особенно в условиях большой толщи слабых водонасыщенных грунтов. При вибрационных нагрузках нарушаются структурные связи, как в водонасыщенных песчаных грунтах рыхлой и средней плотности сложения, так и в глинистых тиксотропных (рис. 6–8).

Для оценки изменения структуры грунта и разработки методики учета влияния вибропогружения шпунтовых свай на грунтовое основание требуется разработка физической модели поведения грунта околоосвайного пространства в процессе вибрирования свай.

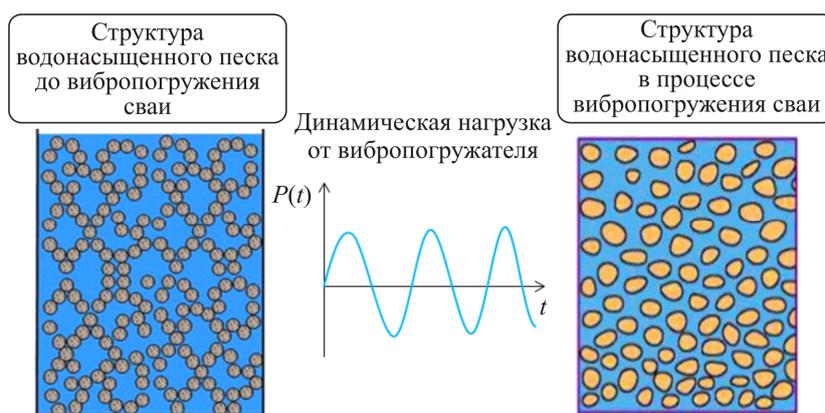


Рис. 6. Физический процесс разжижения песчаных грунтов [6]
Fig. 6. Physical process of liquefaction for water saturated sandy soils [6]

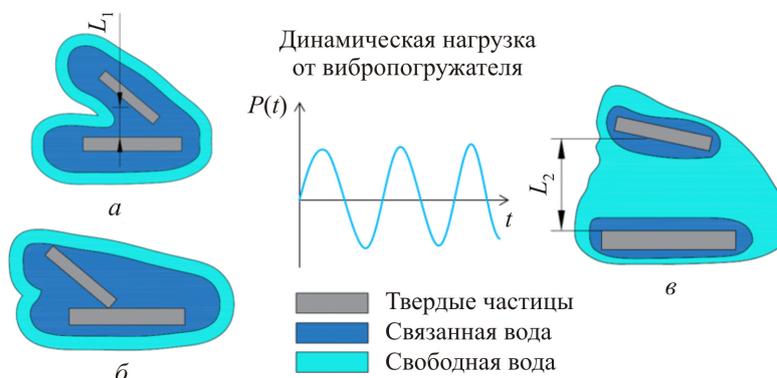


Рис. 7. Физический процесс разупрочнения тиксотропных глинистых грунтов при динамической нагрузке
Fig. 7. Physical process of softening of thixotropic clayey soils under dynamic loading

Первые отечественные работы, посвященные изучению процесса вибрирования элементов в грунте, были проведены Д.Д. Барканом, Г.И. Покровским, В.Н. Голубковым и др. [6]. Было выявлено, что вибрирование намного эффективнее, чем стандартная забивка готовых элементов в грунтовой массив, за счет значительного снижения сил трения по боковой поверхности элементов. В продолжение этих исследований были получены первые характерные зависимости снижения прочностных характеристик грунта в зависимости от амплитуды колебаний.

Масштабное исследование поведения песчаных грунтов под динамическими нагрузками проведено В.А. Ершовым и Е.Д. Ковалевским [7, 8]. Лабораторные испытания прочности песков различных состояний привели к построению зависимости прочности образца на сдвиг от величины ускорения колебаний. Результаты представлены на рис. 8.

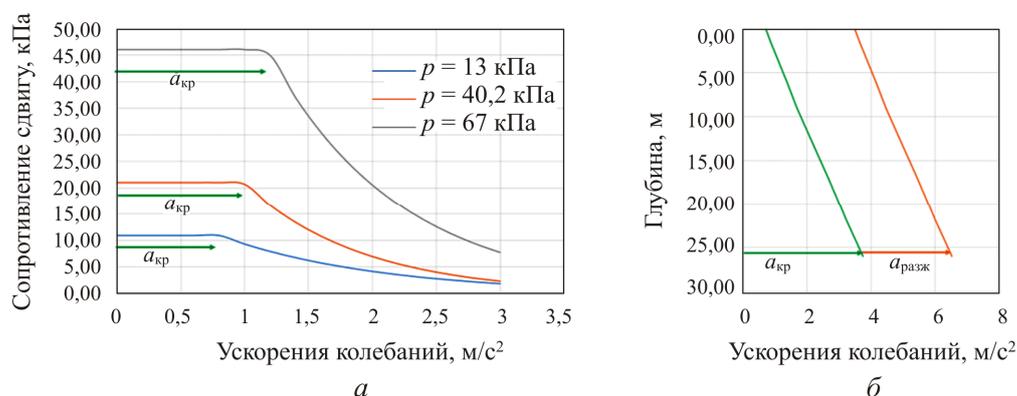


Рис. 8. График зависимости сопротивления грунта сдвигу от величины ускорения колебаний (*a*).

Увеличение критического ускорения разжижения с глубиной (*b*)

Fig. 8. Graph of the dependence of the soil resistance to shear on the magnitude of the vibration acceleration (*a*). Increase in the critical acceleration of liquefaction with depth (*b*)

Данные исследования демонстрируют, что для водонасыщенных песчаных грунтов имеет место полное нарушение структуры грунта при величине колебаний образца более 3 м/с^2 . Зона, где происходит снижение прочностных свойств грунта, находится в диапазоне $0,8\text{--}3,5 \text{ м/с}^2$, зона «разжижения». Согласно исследованию автора [7] грунт, имеющий уровень колебаний до $0,8 \text{ м/с}^2$, не изменяет своей структуры. Данную величину ускорений автор называет «критическими». Также в проведенных экспериментах отмечено, что величина критического ускорения не имеет постоянного характера и зависит от величины нормального давления. Установлено, что она увеличивается с глубиной по линейному закону (рис. 8, *b*). Актуальные зарубежные исследования также подтверждают данные зависимости [9].

Полевые эксперименты по исследованию поведения околоствайного пространства при вибропогружении шпунтовых свай в условиях слабых грунтов проводились [10–16]. Были получены траектории колебаний частиц грунта околоствайного пространства, показывающие его поведение под внешней динамической нагрузкой.

Было установлено значительное снижение прочностных свойств водонасыщенных песков в околоствайном пространстве после погружения/извлечения шпунтовой сваи [12, 13]. Похожее исследование проводилось кафедрой геотехники СПбГАСУ [17]. Было выполнено статическое зондирование в условиях большой толщи водонасыщенных пылевато-

глинистых грунтов, которое также показывает снижение физико-механических характеристик грунтов.

Результатами экспериментальных исследований [14, 18] по изменению НДС системы «источник вибрации – шпунтовая свая – грунт» явилась расчетная схема, где грунт околосвайного пространства представлен в виде двух зон: зона проскальзывания, на расстоянии 0,1 м от стенок шпунтовой сваи [7]. Модуль сдвига в этой зоне имеет низкую величину, что больше соответствует поведению жидкости. Далее, с увеличением расстояния от сваи, по гиперболическому закону начинает увеличиваться сдвиговой модуль до своего предельного значения, которое получено при лабораторных испытаниях на статическую нагрузку.

На основе вышеперечисленных предпосылок процесс изменения напряженно-деформируемого состояния грунтового массива можно представить двумя зонами:

1) околосвайное пространство, где величины ускорений близки к величине ускорения свободного падения, очевидно, там происходит полное разжижение песчаных грунтов и тексотропное разупрочнение глинистых;

2) зона с удалением от источника колебаний на расстоянии более 0,1 м, где величины ускорений существенно снижаются и происходит изменение структуры грунта, что приводит к снижению его прочностных свойств.

Таким образом, комплексно расчетную модель для прогноза деформаций можно представить в виде, показанном на рис. 9.

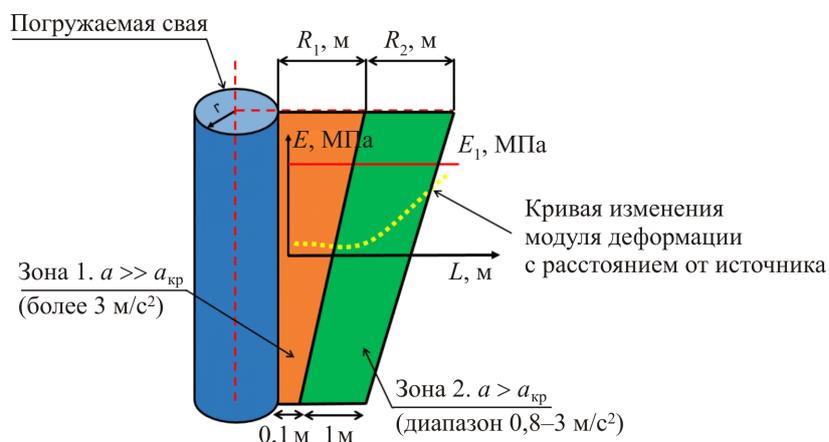


Рис. 9. Расчетная схема для прогноза деформаций окружающего массива грунта при вибропогружении шпунтовых свай

Fig. 9. Design scheme for predicting deformations of the surrounding soil mass when vibrating sheet piles

Зона 1 характеризуется грунтом, который имеет свойства, близкие к тяжелой вязкой жидкости, и где происходит потеря его несущей способности. В зоне 2 прогнозируется падение прочностных и деформационных свойств грунта от их первоначальных. Снижение параметров усредненно принимается в пределах 30 %.

Для прогноза деформаций, вызванных вибропогружением шпунтовых свай, была построена модель для динамического (рис. 10) и последующего статического расчета в программном комплексе Plaxis. Размеры зон 1 и 2 являются результатом решения динамической задачи о распространении колебаний в массиве грунта.

Расчетные предпосылки: размеры конечных элементов подбирались согласно условию, что длина элемента не должна превышать длину волны; по нижней и боковым границам стоят вязкие границы, с целью избежать отражения волн и их наложения друг на друга, дневная поверхность свободная. Используемая модель грунта – упрочняющийся грунт (Hardening Soil) [19]. Тип дренирования: недренированный А (Undrained A). Динамическая нагрузка приводится к синусоидальному типу. Амплитуда равна максимальной вынуждающей силе, частота соответствует частоте работы вибропогружателя и задается постоянной величиной.

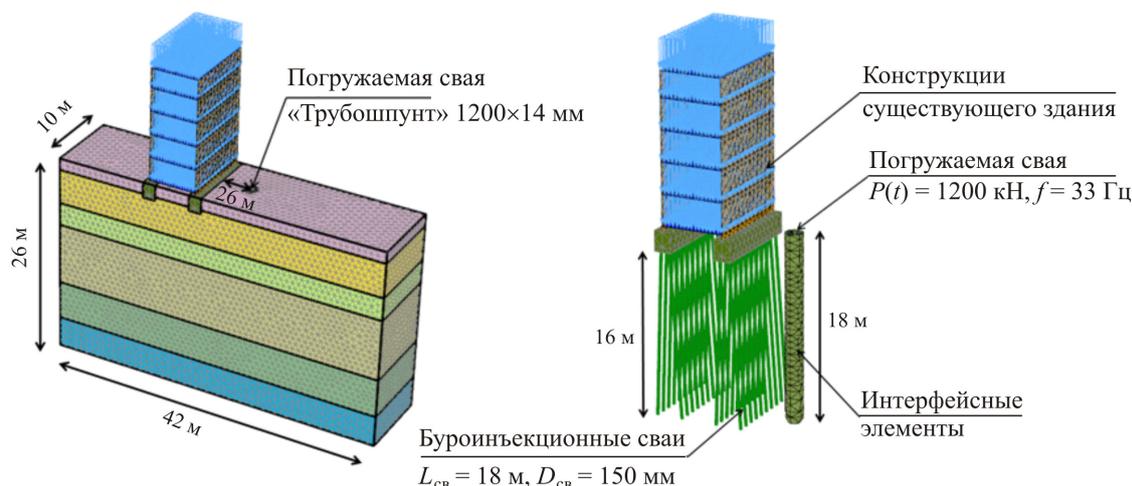


Рис. 10. Конечно-элементная модель для динамических расчетов в Plaxis 3D
Fig. 10. Finite elements model for dynamic calculations in Plaxis 3D

Расчетные фазы: 1) начальная (формирование природных напряжений); 2) моделирование загрузки основания существующим зданием; 3) вибропогружение первых трех метров сваи; 4) погружение шести метров сваи; 5) погружение девяти метров сваи; 6) погружение двенадцати метров сваи; 7) погружение пятнадцати метров сваи; 8) погружение восемнадцати метров сваи.

Основные полученные результаты исследований

В результате выполненных численных исследований получено распределение ускорений в околосвайном пространстве, которое представлено на рис. 11. Результаты расчета показаны в виде акселерограмм, приведенных на рис. 12.

По полученным расчетным акселерограммам определялись зоны 1, 2 для их учета в статическом расчете. Границы этих участков приведены на рис. 13. Зона 1 полной потери несущей способности основания находится на расстоянии 0,38 м от стенки трубошпунта. Зона 2 частичной потери несущей способности – на расстоянии 1,5 м.

Исходя из полученных данных на основе натуральных наблюдений и динамического расчета анализируется статическая деформационная задача с учетом изменения свойств грунта. Были рассмотрены два принципиальных варианта, с учетом усиления существующих фундаментов буроинъекционными сваями и без них. Расчетная схема приведена на рис. 14.

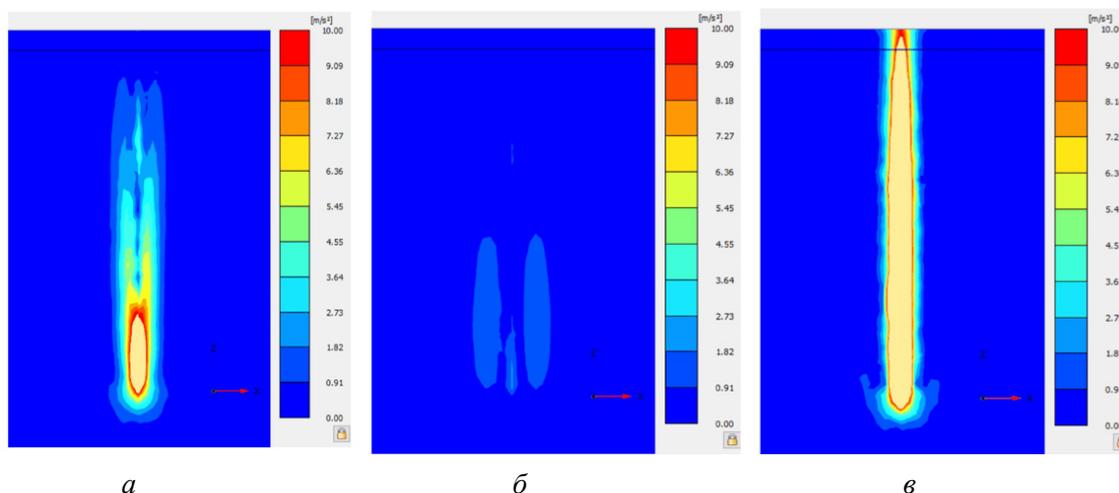


Рис. 11. Изополя ускорений грунта в разный момент времени при вибропогружении сваи: *a* – погружение сваи; *б* – смена знака внешней вынуждающей силы; *в* – выдергивающая нагрузка
 Fig. 11. Isofields of soil accelerations at different times during vibration driving of a pile: *a* – driving of a pile; *b* – a change in the sign of the external driving force; *c* – pulling load

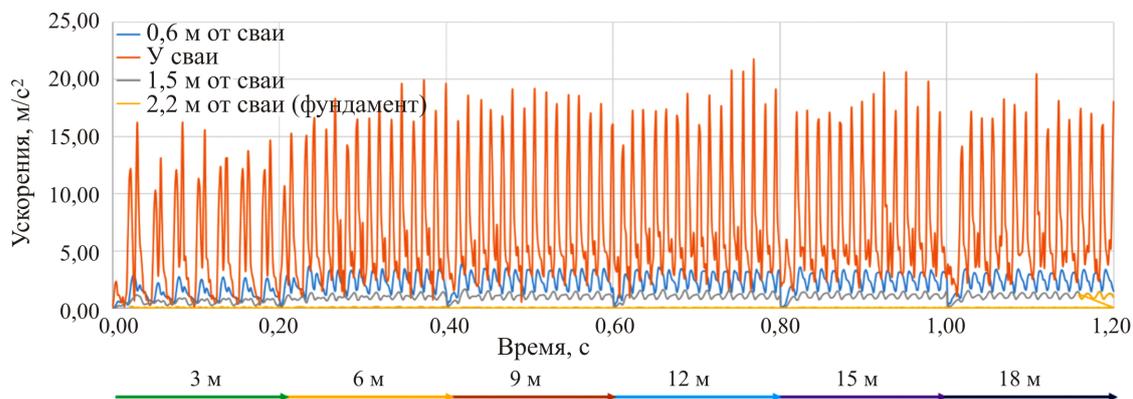


Рис. 12. Расчетные акселерограммы при численном моделировании.
 Под осью времени расположены рассматриваемые участки при погружении сваи
 Fig. 12. Resulted accelerograms in numerical modeling. The areas under consideration are located under the axis of time when the pile is driven

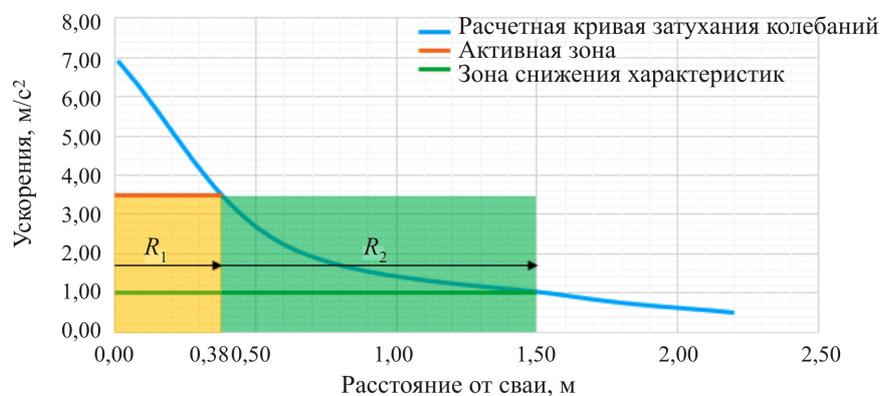


Рис. 13. Активная зона влияния от вибропогружения шпунтовых свай в массиве грунта
 Fig. 13. Active zone of influence from vibration immersion of sheet piles in the soil mass

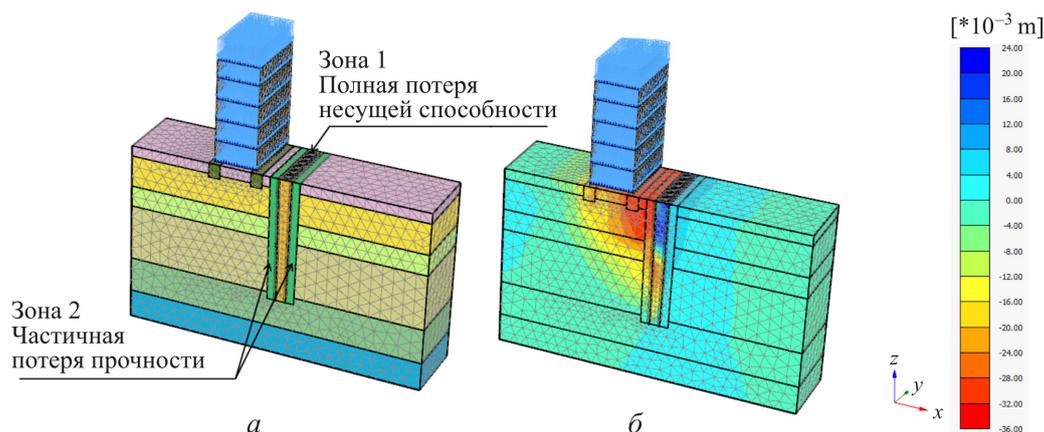


Рис. 14. Расчетная модель – а; изополя деформаций без учета свай усиления – б
 Fig. 14. Design model – a; isofields of deformations without taking into account reinforcement piles – b

Характеристики грунта для зоны 1 и 2, принятые в расчетной модели, сведены в таблицу.

Расчетная величина максимальной осадки фундамента, без учета усиления, составила 31 мм, что превышает предельно допустимые значения, предъявляемые к сооружению по СП 22.13330.2016. Также по изополям деформаций видно, что величина неравномерности осадок составляет 0,004, что больше предельно допустимой по СП 22.13330.2016. Данные расчеты подтверждают правильность проектного решения по усилению фундаментов, наиболее близко расположенных к погружаемым шпунтовым сваями.

Принятые характеристики

Accepted characteristics

	Параметр	Величина
Зона 1	Удельный вес, кН/м ³	18
	Тип дренирования	Undrained B
	s_u , кПа	5
	E_{50} , МПа	0.1
	E_{oed} , МПа	0.1
	E_{ur} , МПа	0.3
	ν_{ur}	0.49
Зона 2	Удельный вес, кН/м ³	18
	Тип дренирования	Drained
	c , кПа	4
	E_{50} , МПа	4
	E_{oed} , МПа	4
	E_{ur} , МПа	15
	ν_{ur}	0.3
	ϕ , град	4

Далее выполнялись расчеты фактической ситуации, с учетом свай усиления, и сопоставление результатов натурных наблюдений с результатами расчета по предложенной модели. Были просчитаны задачи, где изменялось расстояние от здания до погружаемой сваи: 2; 2,7; 3,2; 5 м. Сопоставление результатов численного расчета и данных геодезического мониторинга, приведенное на рис. 15, позволило сделать вывод, что предложенная методика прогноза деформаций дает удовлетворительную сходимость как с уровнем динамиче-

ского воздействия (величины виброускорений), так и по результатам осадок сооружения от вибропогружения свай.

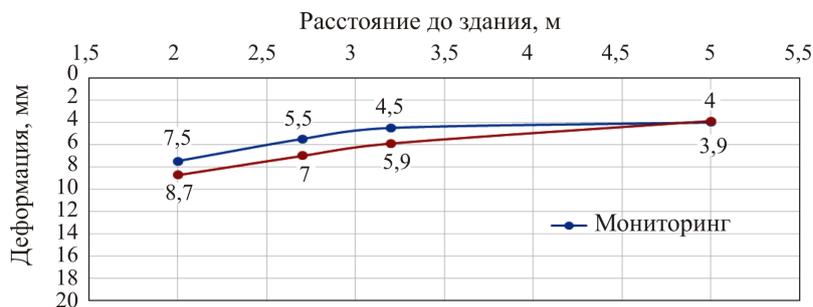


Рис. 15. Сопоставление результатов численного моделирования и результатов геодезического мониторинга за деформациями здания

Fig. 15. Comparison results of numerical modeling and the results of geodesic monitoring of building deformations

Обсуждение

В слабых, структурно-неустойчивых грунтах применение технологии высокочастотного вибропогружения шпунтовых свай в ряде случаев заведомо опасно, а вопрос оценки границ применимости данной технологии в тех или иных условиях является актуальным.

Нормативные документы предъявляют требования к уровню колебаний окружающего массива грунта и зданий сооружений, однако оценивать влияния технологии высокочастотного вибропогружения шпунтовых свай только по величинам виброускорения и виброскорости не вполне корректно. Приведенный в статье пример показывает, что при усилении фундаментов величины деформаций основания (осадки) остаются в пределах допустимых значений, несмотря на значительные превышения допустимого уровня колебаний фундаментов здания.

Предложенная методика численного прогноза деформаций оснований от вибропогружения шпунтовых свай дает удовлетворительную сходимость с результатами натуральных наблюдений и позволяет оценить качественно и количественно осадки зданий окружающей застройки от вибропогружения/извлечений шпунтовых свай на предварительных этапах строительства.

Библиографический список

1. Мангушев Р.А., Никифорова Н.С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства / под ред.чл.-корр. РААСН, д-ра техн. наук, проф. Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2017. – С. 77–87.
2. Гурский А.В., Учет влияния вдавливания шпунта на дополнительную осадку соседних зданий: дис. ... канд. наук. – СПб., 2016. – 133 с.
3. Сапин Д.А., Технологические осадки фундаментов зданий при устройстве траншейной «стены в грунте»: дис. ... канд. наук. – СПб., 2016. – 177 с.
4. Мангушев Р.А. Гурский А.В., Сапин Д.А. Учет технологических осадок существующих сооружений при строительстве около них новых зданий с развитым подземным про-

странством // Инженерно-геологические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений; сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф., 1–3 февраля 2017 г. – СПб., 2017. – С. 9–22.

5. Вознесенский Е.А. Землетрясения и динамика грунтов // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 2. – С. 101–108.

6. Баркан Д.Д. Виброметод в строительстве. – М.: Госстройиздат, 1959. –11 с.

7. Ершов В.А. Динамические свойства песчаных грунтов и их учет в оценке устойчивости земляных сооружений: дис. ... д-ра техн. наук. – Л., 1970. – 180 с.

8. Ковалевский Е.Д. Результаты наблюдений за колебаниями песчаного грунта и осадками зданий при забивке шпунта // Механика грунтов, основания и фундаменты: сб. науч. конф. ЛИСИ. – Л., 1967. – С. 34–38.

9. Denies N., Holeyman A. Shear strength degradation of vibrated dry sand // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2017. – Vol. 95. – P. 106–117. DOI: 10.1007/s10706-017-0285-x

10. Holeyman A., Vanden Berghe J.F., De Cock S. Toe resistance during pile vibratory penetration // Geotechnical engineering for transportation infrastructure. Proceedings of the 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Amsterdam. – 1999. – Vol. 2. – P. 769–776.

11. Whenham V., Holeyman A. Load transfers during vibratory driving // Geotechnical and Geological Engineering. – 2012. – Vol. 30, iss. 5. – P. 1119–1135. DOI: 10.1007/s10706-012-9527-0

12. Deckner F., Viking K., Hintze S. Wave patterns in the ground: case studies related to vibratory sheet pile driving // Geotechnical and Geological Engineering. – 2017. – Vol. 35, iss. 6. – P. 2863–2878. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.01.039

13. Instrumentation system for ground vibration analysis during sheet pile driving / F. Deckner, K. Viking, C. Guillemet, S. Hintze // Geotechnical Testing Journal. – 2015. – Vol. 38, iss. 6. – P. 893–905. DOI: 10.1520/GTJ20140275

14. Deckner F., Viking K., Hintze S. Aspects of ground vibrations due to pile and sheet pile driving // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2015. – Vol. 20, iss. 19. – P. 11161–11176.

15. Meijers P., Tol A.F. The Raamsdonksveer sheet pile test, measured surface settlements during vibratory sheet piling // Proc. 14th Eur. Conf. Soil Mech. and Geotech. Eng. Madrid. – 2007. – P. 603–609.

16. Korff M., Meijers P., Wiersma A., Kloosterman F. Mapping liquefaction based on CPT data for induced seismicity in Groningen // Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions. Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. – 2015. – P. 3418–3425.

17. Василюк Л.В. Вибропогружение шпунта вблизи существующих зданий в грунтовых условиях Санкт-Петербурга // Инженерно-геотехнические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. по геотехнике; СПбГАСУ. – СПб., 2017. – С. 307–315.

18. Dongqi J., Yulong H., Yunmin C., Lateral dynamic pile-pile interaction induced by far-field earthquake // Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration. – 2004. – Vol. 24, iss. 4. – P. 170–176.

19. Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, 3D Foundation. Scientific Manual // R.B.J. Brinkgerve [et al.]. – Balkema, 2006. – P. 53–56.

References

1. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Tekhnologicheskiye osadki zdaniy i sooruzheniy v zone vliyaniya podzemnogo stroitel'stva [Technological precipitation of buildings and structures in the zone of influence of underground construction]. Moscow, ASV, 2017, pp. 77–87.
2. Gurskiy A.V. Uchet vliyaniya vdavlivaniya shpunta na dopolnitel'nyuyu osadku sosednikh zdaniy. [Consideration of the effect of indentation of the sheet pile on the additional draft of neighboring buildings]. Ph.D. thesis. Saint Petersburg, 2016, 133 p.
3. Sapin D.A. Tekhnologicheskiye osadki fundamentov zdaniy pri ustroystve transheyroy «steny v grunte». [Technological settlements of building foundations during the construction of a trench "slurry wall"]. Ph.D. thesis. Saint Petersburg, 2016, 177 p.
4. Mangushev R.A., Gurskiy A.V., Sapin D.A. Uchet tekhnologicheskikh osadok sushchestvuyushchikh sooruzheniy pri stroitel'stve okolo nikh novykh zdaniy s razvitym podzemnym prostanstvom. [Accounting for the technological settlements of existing structures during the construction of new buildings with developed underground space]. *Engineering and geological surveys, design and construction of foundations, foundations and underground structures. Coll. tr. All-Russian scientific.-tech. conf.* February 1–3, Saint-Petersburg, 2017. pp. 9–22.
5. Voznesenskiy Ye.A. Zemletryaseniya i dinamika gruntov [Earthquakes and soil dynamics]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*, 1998, no. 2, pp. 101–108.
6. Barkan D.D. Vibrometod v stroitel'stve [Vibration method in construction] Moscow, Gosstroyizdat, 1959, pp. 1–11.
7. Yershov V.A. Dinamicheskiye svoystva peschanykh gruntov i ikh uchet v otsenke ustoychivosti zemlyanykh sooruzheniy. [Dynamic properties of sandy soils and their consideration in assessing the stability of earth structures]. Doctor's degree dissertation, Leningrad, 1970, p. 180.
8. Kovalevskiy Ye.D. Rezul'taty nablyudeniy za kolebaniyami peschanogo grunta i osadkami zdaniy pri zabivke shpunta. [Results of observations of vibrations of sandy soil and precipitation of buildings during sheet piling]. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty. Nauchn. Konf.*, Leningrad, 1967, pp. 34–38.
9. Denies N., Holeyman, A. Shear strength degradation of vibrated dry sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, Vol. 95, pp. 106–117. DOI: 10.1007/s10706-017-0285-x
10. Holeyman A., Vanden Berghe J.F., De Cock S. Toe resistance during pile vibratory penetration. Geotechnical engineering for transportation infrastructure. *Proceedings of the 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, Amsterdam, 1999, vol. 2, pp. 769–776.
11. Whenham V., Holeyman A. Load Transfers During Vibratory Driving. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2012, vol. 30, pp. 1119–1135. DOI: 10.1007/s10706-012-9527-0
12. Deckner F., Viking K., Hintze S. Wave patterns in the ground: Case studies related to vibratory sheet pile driving. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2017, vol. 35, pp. 2863–2878. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.01.039
13. Deckner F., Viking K., Guillemet C., Hintze S. Instrumentation system for ground vibration analysis during sheet pile driving. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, vol. 38, pp. 893–905. DOI: 10.1520/GTJ20140275
14. Deckner F., Viking K., Hintze S. Aspects of ground vibrations due to pile and sheet pile driving. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, vol. 20, pp. 11161–11176.
15. Meijers P., Tol A.F. The Raamsdonksveer sheet pile test, measured surface settlements during vibratory sheet piling. *Proc. 14th Eur. Conf. Soil Mech. and Geotech. Eng.*, Madrid, 2007, pp. 603–609.

16. Korff M., Meijers P., Wiersma A., Kloosterman F. Mapping liquefaction based on CPT data for induced seismicity in Groningen. *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions. Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, 2015, pp. 3418–3425.

17. Vasilyuk L.V. Vibropogruzheniye shpunta vblizi sushchestvuyushchikh zdaniy v gruntovykh usloviyakh Sankt-Peterburga. [Vibration immersion of sheet piling near existing buildings in soil conditions of St. Petersburg]. *Inzhenerno-geotekhnicheskiye izyskaniya, proyektirovaniye i stroitel'stvo osnovaniy, fundamentov i podzemnykh sooruzheniy: sb. tr. Vseros. nauch.-tekhn. konf. po geotekhnike*, Saint Petersburg, 2017, pp. 307–315.

18. Dongqi J., Yulong H., Yunmin C. Lateral dynamic pile-pile interaction induced by far-field earthquake. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2004, vol. 24, pp. 170–176.

19. Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, 3D Foundation. Scientific Manual. Balkema, 2006, pp. 53–56.