

УДК 624.131

Мирсаяпов И.Т. – доктор технических наук, профессор

E-mail: mirsayapov@kgasu.ru

Королева И.В. – кандидат технических наук, старший преподаватель

E-mail: koroleva@kgasu.ru

Мирсаяпова И.И. – студент

E-mail: ilgina@list.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Динамическая устойчивость водонасыщенных грунтовых массивов намытых территорий при сейсмических воздействиях

Аннотация

На территории города Казани прогнозируются землетрясения с интенсивностью до 7,0 баллов по шкале MSK 64 с ускорением $143 \text{ см}^2/\text{сек}$. Площадка строительства сложена водонасыщенными песками на глубину до 12 м. На основании результатов лабораторных динамических исследований грунтов при сценарных землетрясениях проведена оценка виброразжижаемости водонасыщенных песчаных грунтов основания. Анализ результатов экспериментальных исследований позволил сделать вывод, что при прогнозных землетрясениях грунты рассмотренной площадки являются динамически устойчивыми.

Ключевые слова: водонасыщенный грунт, виброразжижение, трехосное сжатие, динамическая устойчивость, землетрясение.

Строительство Куйбышевского водохранилища привело к поднятию уровня грунтовых вод и подтоплению ряда территорий города Казани, в том числе правобережья реки Казанка.

В 80-х годах прошлого столетия территория правого берега реки Казанка была намыта песчаными грунтами, мощность которых составляет от 3 до 12 метров, в результате чего погребенными оказались слои слабых водонасыщенных заторфованных грунтов. Эти техногенные грунты стали основанием фундаментов самого молодого и крупного района города – Ново-Савиновского. В этом районе размещены объекты Универсиады, высотные здания, зрелищные сооружения с большим скоплением людей. К этим зданиям предъявляются повышенные требования по безопасности.

Поднятие уровня грунтовых вод и наличие тектонических разломов спровоцировали увеличение уровня сейсмической активности территории Республики Татарстан. Согласно карте сейсмического районирования ОСР-97 на территории города Казань возможны землетрясения с интенсивностью 7 баллов на средних грунтах, и как результат, требуется применение антисейсмического усиления при проектировании и возведении сооружений, а также оценка динамических свойств грунтов оснований при изысканиях.

Указанная территория сложена водонасыщенными песками, мощность слоя которых достигает 12 метров (рис. 1). Данные грунты могут быть чувствительными к сейсмическим воздействиям, проявляя разжижаемость или тиксотропные свойства. Наличие таких грунтов может также обусловить необходимость повышения сейсмической бальности отдельных площадок размещения сооружений по результатам сейсмического микрорайонирования.

В связи с этим были проведены работы по сейсмическому микрорайонированию площадки строительства [3]. По результатам которых установлено, что на территориях, расположенных на правом берегу реки Казанка сейсмическая активность площадки оценивается как 7,0 баллов по шкале MSK 64 с ускорением $143 \text{ см}^2/\text{сек}$ (рис. 2, 3).

Для исследования динамической устойчивости слоя водонасыщенных песков с позиции оценки возможности их разжижения при сейсмических воздействиях, соответствующих проектной сейсмической активности площадки, выполнены лабораторные исследования.

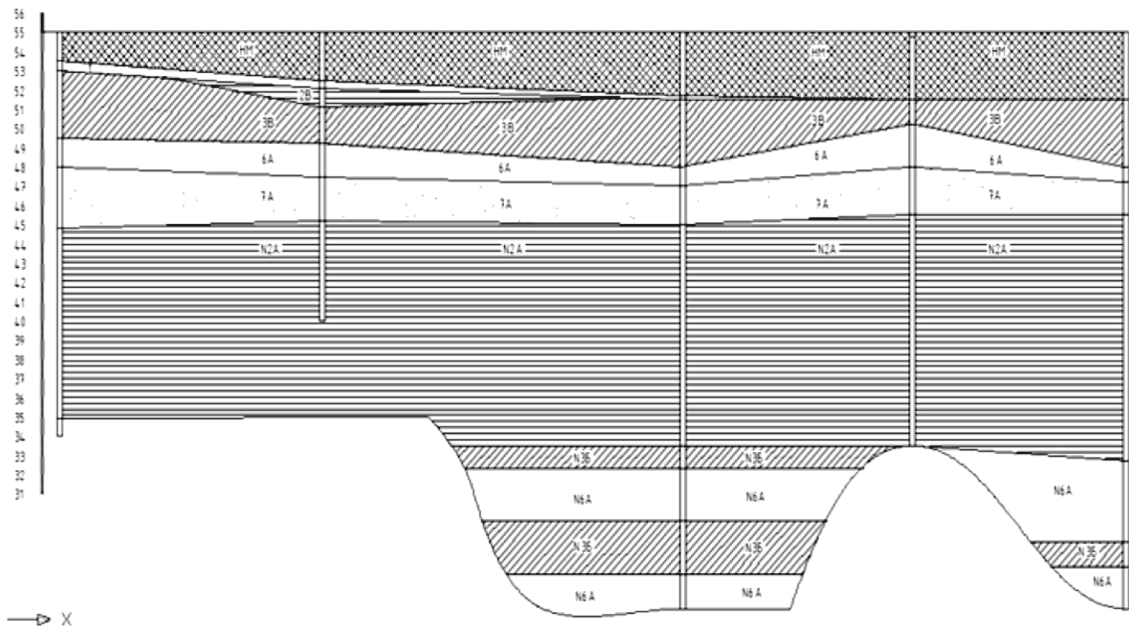


Рис. 1. Геологический разрез площадки строительства

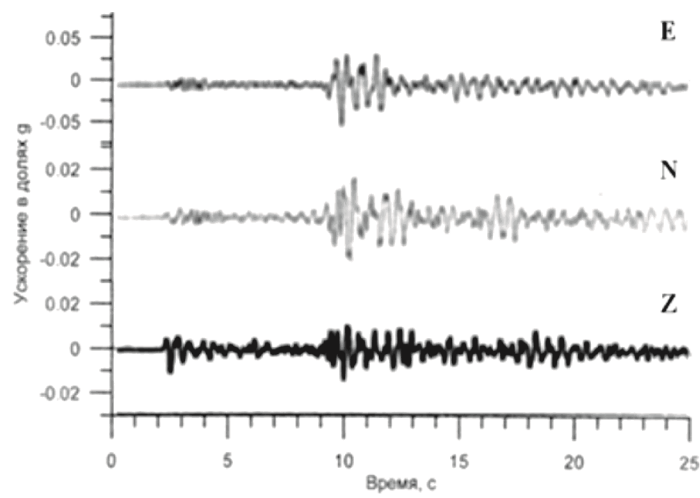


Рис. 2. Расчетные акселерограммы землетрясения (M=5,0, R=55 км)

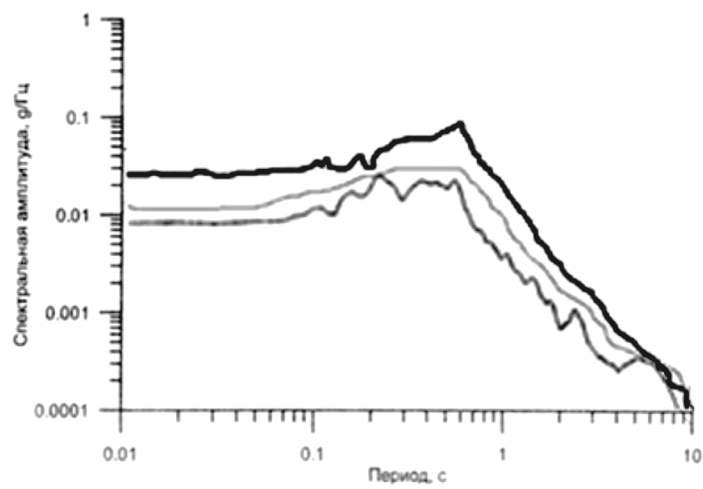


Рис. 3. Спектры реакции землетрясения

Для моделирования поведения грунта при сейсмическом воздействии, перед проведением лабораторных исследований грунтов при циклическом нагружении проводится моделирование сценарного сейсмического воздействия. Применяется общепринятая методика определения величины сейсмической нагрузки, разработанная Г.Б. Сидом и И. Идрисом [2, 5]. В соответствии с этой методикой сейсмическая нагрузка характеризуется величиной приведенных эквивалентных циклических напряжений сдвига (CSR) при землетрясении заданной повторяемости:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v}, \quad (1)$$

где τ_{av} – среднее значение напряжений сдвига при параметрах циклического нагружения, эквивалентному сценарному сейсмическому воздействию;

σ'_v – значение вертикальных напряжений.

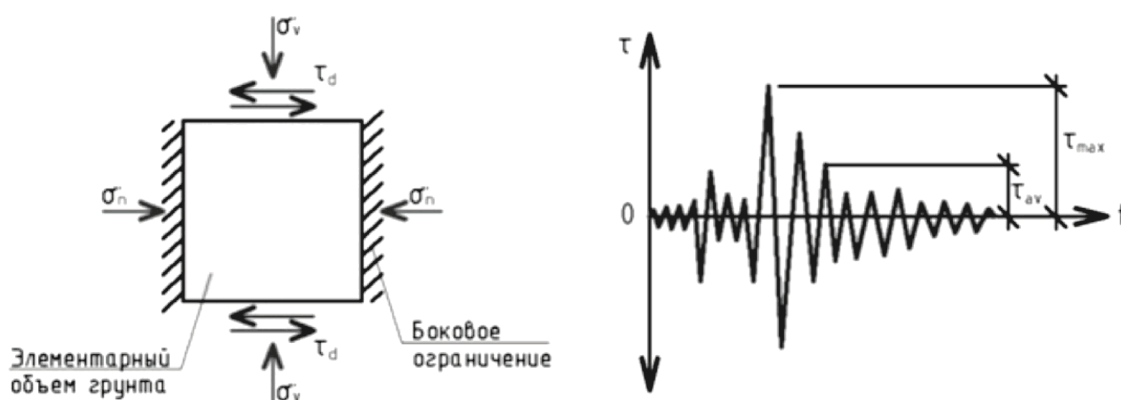


Рис. 4. а) Напряженное состояние в элементарном объеме грунта в условиях сейсмических воздействий;

б) Фактический характер распространения напряжений сдвига при сейсмических воздействиях

Динамическое нагружение грунта во время землетрясений при прохождении сейсмических волн через массив грунта вызывает касательные напряжения, которые являются непериодическими и разнонаправленными при рассмотрении в горизонтальной плоскости (рис. 4). В практических расчетах нерегулярные касательные напряжения приводятся к эквивалентному в силовом отношении регулярному синусоидальному или косинусоидальному закону.

Касательные напряжения, возникающие при прохождении сейсмических волн в грунте, являются непериодическими и разнонаправленными при рассмотрении в горизонтальной плоскости. При выполнении количественной оценки характеристик разжижения слоев водонасыщенных песков при случайном нерегулярном характере сейсмических воздействий, вводятся поправочные коэффициенты для корректировки циклической прочности, полученной при регулярном нагружении, учитывающие особенности реального сейсмического нагружения (C_2 и C_5) [2, 5].

Исходя из этого, для оценки возможности разжижения грунта в водонасыщенном состоянии в практических расчетах принимаются средние значения регулярных сдвиговых напряжений, вызванных землетрясением на глубине h , определяемые из выражения:

$$\tau_{av} = (0.65 \cdot \eta / g) a_{max} \cdot r_d. \quad (2)$$

Величина a_{max} принимается согласно акселерограмме землетрясения по пиковым горизонтальным ускорениям для горизонтальных составляющих колебаний [3].

Пиковые вертикальные ускорения для землетрясения на рассматриваемой площадке значительно меньше величин горизонтальных составляющих, поэтому не учитываются при оценке разжижаемости грунтов [3].

При моделировании сейсмического воздействия в лабораторных условиях количество циклов нагружения (N) задается согласно методике, изложенной в [1, 2, 4, 5]. Оно зависит от магнитуды и длительности землетрясения. Расчет по вышеописанному алгоритму позволяет определить максимальную величину ожидаемых напряжений сдвига при землетрясении (τ_{av}). При проведении динамических испытаний в приборе трехосного сжатия указанная величина принимается равной 50 % от осевой динамической нагрузки.

Исследования поведения песчаных грунтов в водонасыщенном состоянии проведены в лаборатории кафедры Оснований, фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии по недренированной схеме на стабилометре, модернизированном для проведения испытаний в условиях трехосного циклического сжатия по методике, позволяющей наложение на статическое напряженное состояние, соответствующее начальному природному состоянию, образцов грунтов динамических напряжений. При этом продолжительность, частота и амплитуда динамического воздействия эквивалентны параметрам расчетного сценарного землетрясения. Во время проведения испытаний контролировались напряжения, поровое давления, вертикальные и радиальные деформации.

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил выявить основные закономерности развития деформаций при эквивалентном циклическом нагружении и установить характер усталостного разрушения водонасыщенного грунта.

На рис. 5. наглядно показано увеличение вертикальных деформаций в условиях циклического нагружения при постоянных значениях максимальной вертикальной нагрузки σ_{1max} .

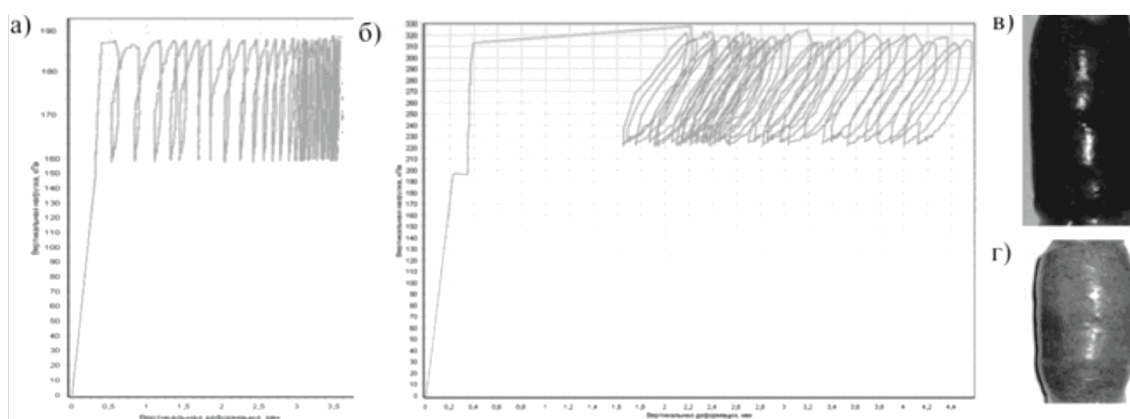


Рис. 5. а) График развития вертикальных деформаций сжатия от увеличения напряжений после 30 циклов при режиме циклического нагружения, эквивалентному расчетному сценарному землетрясению с интенсивностью 7,0 баллов; б) График развития вертикальных деформаций сжатия от увеличения напряжений при разрушении при режиме циклического нагружения, эквивалентному расчетному сценарному землетрясению с интенсивностью более 7,0 баллов; в и г) Форма разрушения образца после испытания

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что при циклическом нагружении в приборе трехосного сжатия образцов песчаного грунта в водонасыщенном состоянии при параметрах, равносильных сейсмическому воздействию с интенсивностью 7,0 баллов, интенсивность развития деформаций на разных стадиях эксперимента различна. На первых этапах нагружения в результате доуплотнения грунта развитие деформаций происходит интенсивно, на последующем интервале деформации образца стабилизируются.

Называть критерий виброразжижения в виде некоторого числового параметра не представляется возможным. В связи с выше изложенным предлагается использовать инженерный метод оценки виброразжижаемости.

Закономерности развития осевых вертикальных деформаций цилиндрического образца грунта стандартных размеров при испытаниях в приборе трехосного сжатия при циклическом трехосном нагружении в недренированных условиях служат для

определения механизма виброразжижения песчаного грунта в водонасыщенном состоянии при сейсмическом воздействии.

На основании анализа результатов экспериментальных исследований грунта при трехосном циклическом нагружении [1, 2, 4, 5], выбраны следующие критерии виброразжижения водонасыщенного грунта:

- возникновение 5 % вертикальной деформации при циклическом нагружении в условиях трехосного сжатия образцов песчаного грунта в водонасыщенном состоянии служит критерием для определения начала циклического разуплотнения или виброразжижения;
- критерием разжижения является коэффициент порового давления β : если $\beta \leq 0,6$, то сопротивление разжижению обеспечено;
- если в процессе циклического нагружения отмечается увеличение ширины петли гистерезиса, то этот момент условно принимается за начало процесса разжижения, в противном случае при $\Delta \varepsilon_{30} < \Delta \varepsilon_{29}$ сопротивление виброразжижению обеспечено.

Испытания на циклическое нагружение при параметрах, эквивалентных землетрясению с интенсивностью 7,0 баллов, величина продольных деформаций сжатия не превышает 3,5 мм (4,6 %) (рис. 5а), коэффициент отношения порового давления к вертикальному давлению 0,3, приращение деформаций в тридцатом цикле не превышало приращений деформаций в двадцать девятом цикле нагружения. В процессе испытаний не установлены внешние признаки достижения предельного сопротивления (образование бочки и наклонной плоскости сдвига).

Обработка результатов проведенных экспериментальных исследований при режимах нагружения с параметрами, соответствующими землетрясению с интенсивностью более 7,0 баллов (рис. 5б) и их анализ позволяют сделать вывод о том, что интенсивность развития деформаций образцов песчаного грунта существенно зависит от величин динамических напряжений σ_d . На первых этапах нагружения в результате доуплотнения грунта наблюдается интенсивный рост деформаций, при последующем нагружении фиксируется их замедление и стабилизация. Следует отметить, что при достижении грунтом предела сопротивления виброразжижению наблюдается увеличение прироста деформаций за цикл нагружения, следовательно, начинаются процессы разуплотнения грунта, уменьшения модуля общих деформаций, снижения угла внутреннего трения.

По результатам испытаний второй серии образцов установлено, что виброразжижение водонасыщенных песков начинается при значениях динамических напряжений, превышающих от 3,0 до 5,7 раза значения динамических напряжений, соответствующих расчетным сценарным землетрясениям с интенсивностью 7,0 баллов.

По результатам экспериментальных исследований получены аналитические уравнения, описывающие процессы изменения деформаций, прочности, модуля общих деформаций и угла внутреннего трения при трехосных циклических нагружениях, эквивалентных сейсмическому воздействию в силовом отношении:

$$f_i(\sigma_1, \sigma_d, \sigma_m, N) = \lg(N) \cdot a_i - N^{b_i^{k_i}} + m_i, \quad (3)$$

где $f_i(\sigma_1, \sigma_d, \sigma_m, N)$ – объемные и линейные деформации, прочность образца грунта, модуль общих деформаций, угол внутреннего трения грунта;

N – количество циклов нагружения;

a_i, b_i, k_i, m_i – параметры полученные экспериментальными исследованиями.

Заключение.

Проведенные лабораторные исследования динамической устойчивости виброразжижению водонасыщенных песчаных грунтов оснований показывают, что при прогнозных землетрясениях с интенсивностью 7,0 баллов по шкале МСК 64 грунты рассмотренной площадки являются динамически устойчивыми.

Список библиографических ссылок

1. Вознесенский Е.А. Поведение грунтов при динамических нагрузках. – М.: Издательство МГУ, 1997. – 286 с.
2. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях. – СПб.: Издательство Геореоконструкция, 2006. – 379 с.

3. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Футбольный стадион на 45000 зрителей, ул. Чистопольская. Лабораторные динамические исследования грунтов при сценарных землетрясениях площадки строительства объекта. Отчет о научно-исследовательской работе. – Казань, 2010. – 69 с.
4. Ставницер Л.Р. Сейсмостойкость оснований и фундаментов. – М.: Издательство АСВ, 2010. – 448 с.
5. Seed H.B. Soli liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. // Journal of ASCE, 1996. 105, T2. – P. 201-255.

Mirsayapov I.T. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: mirsayapov@kgasu.ru

Koroleva I.V. – candidate of technical sciences, senior lecturer

E-mail: koroleva@kgasu.ru

Mirsayapova I.I. – student

E-mail: ilgina@list.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Dynamic stability of water-saturated soil masses inwashed areas under seismic actions

Resume

The foundation soil exposed to different loads. Real dynamic effects on soil foundation during an earthquake are random. For practical calculations of stress-strain state of soil seismic load leads to an equivalent impact on the cyclic loading. To study the dynamic stability of a layer of water-saturated sands from the perspective of evaluation possibilities of their thinning seismic loads corresponding to the design of seismic activity areas, performed laboratory tests.

The authors conducted laboratory studies of water-saturated sandy soils under cyclic triaxial loading a specially developed technique. Tests were conducted on samples of artificially prepared soil. Experimental studies have shown patterns of development at an equivalent strain cyclic loading and the nature of fatigue failure of the samples. The results showed that during the application of cyclic loading strains develop at different rates in all stages of the test. It should be noted that the most intensive development of volumetric strain occurred in the early stages of cyclic loading. The magnification depends on the strain rate and magnitude of the applied load. According to the results of a series of experiments established characteristic pattern of destruction of the samples. The authors have formulated the criteria for soil liquefaction. Analysis of the results of experimental studies concluded that when forecasting earthquakes with an intensity of 7,0 points on the MSK 64 soils of the site are considered dynamically stable.

Keywords: saturated soil, vibration liquefaction, triaxial compression, dynamic stability, earthquake.

Reference list

1. Voznesensky E.A. The behavior of soils under dynamic loads. – М.: Publishers MSU, 1997. – 286 p.
2. Ishihara K. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. Publishers GRF, Saint-Petersburg, 2006. – 379 p.
3. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. The football stadium for 45,000 spectators, Chistopolskaya str. Laboratory of dynamical studies of soils under simulated earthquakes construction site. Report on research work. – Kazan, 2010. – 69 p.
4. Stavnitzner L.R. Seismic resistance of bases and foundations. – М.: Publishers ASV, 2010. – 448 p.
5. Seed H.B. Soli liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. // Journal of ASCE, 1996, 105, T. 2. – P. 201-255.