Экспериментальное исследование частотно-зависимого циклического поведения песчаных грунтов различного гранулометрического состава

Аланока Чамби Сесар Алфонсо
аспирант, кафедра геотехники, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, alanoca.cesar@yandex.ru

Представлены результаты экспериментального исследования циклического поведения песчаных грунтов различного гранулометрического состава при динамическом трехосном сжатии. Рассмотрены мелкий песок, песок средней крупности и крупный песок, испытанные при частотах циклического нагружения 1, 2 и 3 Гц. Испытания и обработка результатов выполнялись в соответствии с положениями ГОСТ Р 56353-2022 «Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов».

Графическое представление результатов принято по обязательному приложению Д указанного стандарта: анализировались изменение осевой деформации и относительного порового давления в зависимости от числа циклов, траектории эффективных напряжений q-p' и зависимость осевой деформации от логарифма времени нагружения. Экспериментальные данные показывают различный характер накопления порового давления, осевой деформации и изменения эффективного напряженного состояния при изменении частоты нагружения и гранулометрического состава.

При этом единой монотонной зависимости реакции грунта от частоты для всех исследованных фракций не установлено. Полученные зависимости характеризуют поведение песчаных грунтов при повторных динамических воздействиях и представляют интерес для последующей оценки поведения грунтового массива, в том числе при интерпретации и калибровке расчетных моделей для сейсмических воздействий.

Ключевые слова: динамическое трехосное сжатие, песчаный грунт, циклическое нагружение, частота, гранулометрический состав, поровое давление, осевая деформация, эффективные напряжения.

Введение

Песчаные грунты при повторных динамических воздействиях способны проявлять накопление деформаций, рост порового давления и изменение эффективного напряженного состояния. Эти процессы имеют существенное значение для задач динамики грунтов и оценки работы оснований сооружений при сейсмических и техногенных динамических воздействиях. Реакция песчаного грунта определяется совокупностью факторов, среди которых начальное напряженное состояние, плотность и степень водонасыщения грунта, гранулометрический состав, амплитуда и число циклов, а также частота динамического нагружения [1–5, 8].

Экспериментальные исследования показывают, что повторное динамическое воздействие на песчаные грунты может сопровождаться накоплением осевых деформаций, развитием избыточного порового давления, снижением эффективных напряжений и изменением деформационных характеристик грунта [1–5, 8]. В частности, при динамических трехосных испытаниях песков различного гранулометрического состава установлено существенное влияние частоты циклического нагружения на развитие деформаций и порового давления [1]. Для мелкого песка при частотах 1 и 2 Гц относительное поровое давление достигало порядка 70–80 %, тогда как при частоте 3 Гц оно оставалось ниже 30 %. При развитии частичного разжижения снижение модуля деформации исследованных песков составляло 65–78 %, а для песка средней крупности при проявлении виброползучести — около 52 % [1].

Исследования виброползучести и динамического поведения водонасыщенных грунтов также подтверждают возможность значительного накопления деформаций и изменения механических характеристик грунта при повторных динамических воздействиях [2–5]. Результаты циклических трехосных испытаний, представленные в современных зарубежных исследованиях, дополнительно показывают зависимость сопротивления циклическому нагружению от гранулометрического состава песчаных грунтов [8]. Таким образом, совместный учет гранулометрического состава и параметров циклического воздействия представляет существенный интерес при экспериментальной оценке динамического поведения песков.

Вопросы динамической реакции сооружений при сейсмических воздействиях рассматриваются также в современных исследованиях сейсмостойкости зданий [6, 7]. Показано, что параметры динамического воздействия и динамические характеристики конструктивной системы оказывают существенное влияние на ее реакцию.

Особое значение свойства грунтов основания приобретают при оценке сейсмической реакции высотных зданий. В работе [9] показано, что корректное назначение расчетных сейсмических нагрузок для высотных сооружений требует учета взаимодействия сооружения с основанием, а также дифференциации расчетных воздействий в зависимости от высоты сооружения и грунтовых условий. В связи с этим экспериментальное исследование динамического поведения грунтов основания является важной составляющей последующего анализа системы «основание – фундамент – высотное здание» при сейсмическом воздействии.

Вместе с тем сопоставление опубликованных результатов показывает, что характер циклической реакции песчаных грунтов не может быть однозначно определен только частотой воздействия. Он зависит от совокупности характеристик грунта, условий его насыщения, напряженного состояния и параметров циклического нагружения [1–5, 8]. В связи с этим актуальным является сравнительное экспериментальное исследование песков различного гранулометрического состава в едином диапазоне контролируемых частот с одновременной оценкой накопления порового давления, осевой деформации и изменения эффективного напряженного состояния.

Испытания в настоящей работе выполнены методом динамического трехосного сжатия в соответствии с ГОСТ Р 56353-2022 «Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов». Для консолидированно-недренированных испытаний предусмотрено измерение порового давления, а при испытаниях с контролем напряжений поровое давление и осевая деформация регистрируются как функции числа циклов. Графическое представление экспериментальных результатов выполнено в соответствии с обязательным приложением Д указанного стандарта.

Цель работы — экспериментально сопоставить циклическую реакцию песчаных грунтов трех гранулометрических групп при частотах 1, 2 и 3 Гц по изменению относительного порового давления, накоплению осевой деформации, характеру развития осевой деформации во времени и траекториям эффективных напряжений. Сейсмическое применение полученных результатов рассматривается как последующее направление их использования при интерпретации и калибровке расчетных моделей, а не как непосредственная имитация землетрясения гармоническим воздействием одной частоты.

Материалы и методика исследований

Программа испытаний

Исследованы песчаные грунты трех гранулометрических групп: мелкий песок, песок средней крупности и крупный песок. Для каждой гранулометрической группы проведены динамические трехосные испытания при частотах циклического нагружения 1, 2 и 3 Гц. Всего проанализировано девять серий испытаний. Указанным частотам соответствуют периоды нагружения 1,00; 0,50 и 0,33 с соответственно. Выбранные значения частоты рассматривались как контролируемые режимы циклического лабораторного нагружения.

Динамические трехосные испытания выполнялись в соответствии с ГОСТ Р 56353-2022 по консолидированно-недренированной схеме с измерением порового давления. В процессе циклического нагружения регистрировались осевая деформация и поровое давление, используемые для последующей оценки накопления деформаций и изменения эффективного напряженного состояния грунта.

Параметры обработки результатов

Приращение порового давления определялось относительно начала динамической стадии испытания. Для сравнительной оценки использовался относительный показатель порового давления *PPR* (r_u). В соответствии с методическим подходом, примененным в [1], данный показатель определяется выражением

$$PPR = \frac{u}{\sigma_m}, \qquad (1)$$

где u — поровое давление, кПа; σ_m — начальное среднее эффективное напряжение, кПа.

Осевая деформация ε_a определялась относительно начала динамического нагружения. Для анализа эффективного напряженного состояния использовались среднее эффективное напряжение p' и максимальное касательное напряжение q:

$$p' = \frac{\sigma_1' + 2\sigma_3'}{3}, \qquad (2)$$

$$q = \frac{(\sigma_1' - \sigma_3')}{2}, \qquad (3)$$

где p' — среднее эффективное напряжение, кПа; q — максимальное касательное напряжение, кПа; σ'_1 — максимальное главное эффективное напряжение, кПа; σ'_3 — минимальное главное эффективное напряжение, кПа.

Для оценки развития динамического разжижения использовались три взаимодополняющих критерия: достижение относительного порового давления *PPR*=1, достижение осевой деформации ε_a = 5% и прохождение траектории эффективных напряжений через начало координат (p' = 0; q = 0) [1]. Достижение хотя бы одного из указанных предельных состояний рассматривалось при интерпретации результатов как признак развития разжижения образца.

Результаты испытаний представлены в соответствии с принципами графического оформления обязательного приложения Д ГОСТ Р 56353-2022. Зависимости относительного порового давления *PPR* и осевой деформации ε_a от числа циклов N использовались для оценки накопления порового давления и осевой деформации в процессе циклического нагружения. Траектории эффективных напряжений q–p' использовались для анализа изменения эффективного напряженного состояния грунта. Зависимости осевой деформации ε_a от логарифма времени нагружения *ln(t)* применялись для дополнительной оценки характера развития деформаций во времени при различных частотах циклического воздействия.

Сводные параметры девяти серий динамических трехосных испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Сводные параметры девяти серий динамических трехосных испытаний

Грунт	*f*, Гц	*B*	*N*, циклы	ε_a, %	*PPRmax*	Примечание
Мелкий	1	0,958	900	0,572	0,918	завершено
Мелкий	2	1,000	900	0,201	0,882	завершено
Мелкий	3	1,000	901	0,021	0,060	завершено
Средней крупности	1	1,000	178	9,428	0,765	εa > 5 %
Средней крупности	2	1,000	900	1,081	0,927	завершено
Средней крупности	3	0,669	909	0,167	0,718	*B*<0,9
Крупный	1	1,000	83	8,935	0,055	εa > 5 %
Крупный	2	1,021	900	1,788	0,820	завершено
Крупный	3	0,212	901	0,016	0,005	*B*<0,9

Значения коэффициента Скемптона *B* приведены в табл. 1 в качестве показателя степени водонасыщения образцов. Результаты серий при *B*<0,9 интерпретировались с учетом недостаточной степени насыщения: различия в развитии порового давления в этих сериях не могут быть однозначно отнесены исключительно к влиянию частоты циклического нагружения.

Серии испытаний песка средней крупности и крупного песка при частоте 1 Гц завершились после 178 и 83 циклов соответственно. При этом конечная осевая деформация составила 9,428 и 8,935 %, то есть в обоих случаях было превышено принятое критическое значение ε_a = 5%. Поэтому меньшая продолжительность данных серий связана с достижением деформационного критерия разжижения, а их прямое количественное сопоставление с сериями продолжительностью около 900 циклов должно выполняться с учетом различного числа приложенных циклов.

Результаты

Поровое давление и число циклов (Д.1)

Для мелкого песка максимальное значение относительного порового давления *PPR* составило 0,918 при частоте 1 Гц, 0,882 при 2 Гц и 0,060 при 3 Гц. Таким образом, при 1 и 2 Гц наблюдалось значительное накопление порового давления с приближением к критическому значению *PPR*=1, тогда как при 3 Гц накопление порового давления было существенно меньше.

Для песка средней крупности максимальные значения *PPR* составили 0,765; 0,927 и 0,718 при частотах 1, 2 и 3 Гц соответственно. Максимальное значение получено при 2 Гц. При интерпретации серии 3 Гц необходимо учитывать значение коэффициента Скемптона *B*=0,669, указывающее на недостаточную степень водонасыщения образца.

Для крупного песка максимальные значения *PPR* составили 0,055; 0,820 и 0,005 при частотах 1, 2 и 3 Гц соответственно. Наиболее выраженное накопление порового давления наблюдалось при 2 Гц. Для серии 3 Гц значение *B*=0,212, поэтому низкое зарегистрированное значение *PPR* не может интерпретироваться исключительно как следствие влияния частоты нагружения.

Ни в одной из рассмотренных серий максимальное зарегистрированное значение *PPR* не достигло принятого критического значения *PPR*=1. Вместе с тем отсутствие достижения данного критерия само по себе не исключает развития разжижения, поскольку оценка выполнялась также по накопленной осевой деформации и траекториям эффективных напряжений.

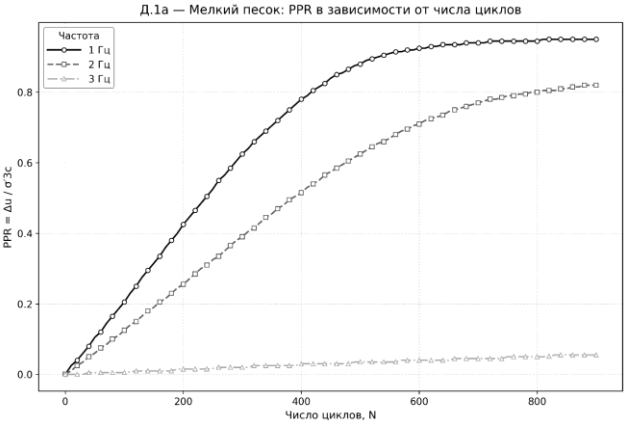


Рис. 1. Изменение относительного порового давления PPR в зависимости от числа циклов: мелкий песок

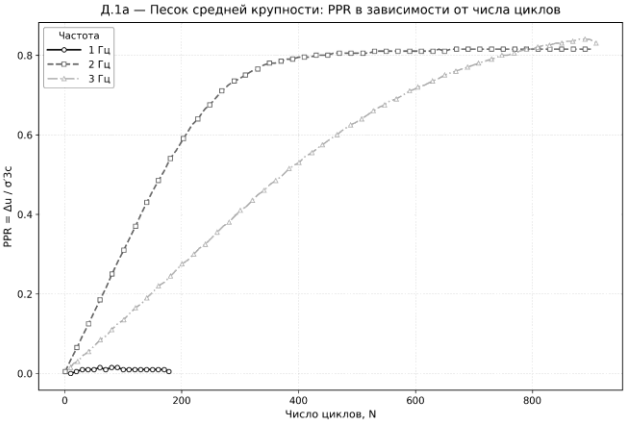


Рис. 2. Изменение относительного порового давления PPR в зависимости от числа циклов: песок средней крупности

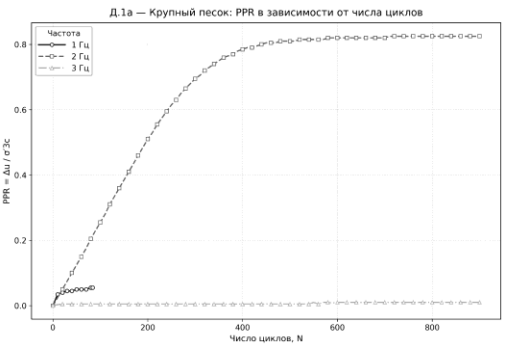


Рис. 3. Изменение относительного порового давления PPR в зависимости от числа циклов: крупный песок

Накопленная осевая деформация (Д.1)

Наиболее интенсивное накопление осевой деформации зарегистрировано для песка средней крупности и крупного песка при частоте 1 Гц. Для песка средней крупности осевая деформация достигла 9,428 % за 178 циклов, а для крупного песка — 8,935 % за 83 цикла. В обоих случаях было превышено принятое критическое значение ε_a = 5%, что свидетельствует о достижении деформационного критерия разжижения.

Для мелкого песка конечная осевая деформация составила 0,572 % при 1 Гц, 0,201 % при 2 Гц и 0,021 % при 3 Гц. Таким образом, во всех трех сериях значения оставались существенно ниже критерия ε_a = 5%.

При частоте 2 Гц конечная осевая деформация составила 1,081 % для песка средней крупности и 1,788 % для крупного песка. При 3 Гц соответствующие значения составили 0,167 и 0,016 %. Однако результаты серий при 3 Гц для песка средней крупности и крупного песка следует интерпретировать с учетом значений B = 0,669 и B = 0,212 соответственно.

Полученные результаты показывают, что в рассматриваемых сериях достижение деформационного критерия разжижения наблюдалось только для песка средней крупности и крупного песка при частоте 1 Гц.

Траектории эффективных напряжений (Д.2)

Изменение среднего эффективного напряжения p' по результатам обработки траекторий q-p' представлено в табл. 2. Снижение p' характеризует изменение эффективного напряженного состояния образца в процессе циклического нагружения. Полученные значения необходимо рассматривать совместно с данными о поровом давлении, осевой деформации, степени водонасыщения и продолжительности испытаний.

Для мелкого песка снижение p' составило 23,27 % при 1 Гц, 19,00 % при 2 Гц и только 0,66 % при 3 Гц. Таким образом, наиболее выраженное изменение эффективного напряженного состояния мелкого песка наблюдалось при частотах 1 и 2 Гц.

Для песка средней крупности снижение p' составило 3,45 % при 1 Гц, 76,89 % при 2 Гц и 78,03 % при 3 Гц. При этом серия 1 Гц анализировалась только до 150 циклов вследствие меньшей продолжительности испытания, а результат серии 3 Гц должен рассматриваться с учетом B=0,669.

Для крупного песка снижение p' составило 6,51 % при 1 Гц, 77,52 % при 2 Гц и 1,55 % при 3 Гц. Серия при 1 Гц анализировалась до 80 циклов, тогда как при интерпретации серии 3 Гц необходимо учитывать низкое значение B = 0,212.

Наибольшее снижение среднего эффективного напряжения среди серий с B ≥ 0,9 и продолжительностью около 900 циклов зарегистрировано для песка средней крупности при 2 Гц (76,89 %) и крупного песка при 2 Гц (77,52 %).

Таблица 2.
Изменение среднего эффективного напряжения p′ по результатам обработки траекторий q-p′

Грунт	f, Гц	Интервал N	p'нач, кПа	p'кон, кПа	$\Delta p'$, кПа	Снижение, %
Мелкий	1	1–890	98,70	75,73	22,97	23,27
Мелкий	2	1–890	98,27	79,50	18,77	19,00
Мелкий	3	1–890	98,99	98,34	0,65	0,66
Средней крупности	1	1–150	110,09	106,29	3,80	3,45
Средней крупности	2	1–890	109,15	25,22	83,93	76,89
Средней крупности	3	1–890	108,86	23,92	84,94	78,03
Крупный	1	1–80	106,48	99,55	6,93	6,51
Крупный	2	1–890	109,36	24,58	84,78	77,52
Крупный	3	1–890	108,10	106,43	1,68	1,55

Осевая деформация во временной области (Д.3)

Представление зависимости ε_a-$ln(t)$ дополняет анализ накопления осевой деформации по числу циклов, поскольку при одинаковом числе циклов физическая продолжительность динамического воздействия определяется частотой нагружения согласно соотношению $t=N/f$. Следовательно, одинаковому числу циклов при частотах 1, 2 и 3 Гц соответствует различная продолжительность воздействия.

Для песка средней крупности и крупного песка при 1 Гц зависимости ε_a- $ln(t)$ отражают интенсивное развитие осевой деформации и достижение значений более 5 %. Для остальных серий накопление осевой деформации было существенно меньше. Особенно малые конечные значения зарегистрированы при 3 Гц: 0,021 % для мелкого, 0,167 % для песка средней крупности и 0,016 % для крупного песка. При интерпретации двух последних значений необходимо учитывать недостаточную степень водонасыщения образцов.

Таким образом, представление ε_a-$ln(t)$ позволяет дополнительно охарактеризовать временной характер развития деформаций, однако не заменяет анализ по числу циклов и должно рассматриваться совместно с PPR, траекториями q-p' и параметрами насыщения образцов.

Анализ результатов

Экспериментальные результаты показывают, что изменение частоты циклического нагружения сопровождается существенными различиями в развитии порового давления, накоплении осевой деформации и изменении эффективного напряженного состояния исследованных песчаных грунтов. Характер этих изменений зависит также от гранулометрического состава и степени водонасыщения образцов, что необходимо учитывать при сопоставлении отдельных серий испытаний.

Для мелкого песка получена наиболее последовательная частотная зависимость. При увеличении частоты от 1 до 3 Гц максимальное значение PPR уменьшилось от 0,918 до 0,060, конечная осевая деформация — от 0,572 до 0,021 %, а степень снижения среднего эффективного напряжения p' — от 23,27 до 0,66 %. При этом коэффициент Скемптона во всех трех сериях составлял $B \geq 0{,}958$, а продолжительность испытаний была практически одинаковой — 900–901 цикл. Таким образом, для мелкого песка различия между частотными режимами проявились одновременно по поровому давлению, осевой деформации и изменению эффективного напряженного состояния.

Для песка средней крупности и крупного песка характер реакции отличался. При частоте 1 Гц конечная осевая деформация достигла соответственно 9,428 % за 178 циклов и 8,935 % за 83 цикла, превысив принятое критическое значение ε_a = 5 %. При частоте 2 Гц наиболее выраженным оказалось изменение эффективного напряженного состояния: снижение p' составило 76,89 % для песка средней крупности и 77,52 % для крупного песка, а максимальные значения PPR достигли соответственно 0,927 и 0,820.

Результаты серий при 3 Гц для песка средней крупности и крупного песка следует рассматривать с учетом степени водонасыщения образцов. Значения коэффициента Скемптона составили соответственно B = 0,669 и B = 0,212. Поэтому зарегистрированные в этих сериях изменения порового давления не могут быть однозначно отнесены только к влиянию частоты циклического нагружения.

Ни в одной из девяти серий максимальное зарегистрированное значение PPR не достигло 1. Вместе с тем для песка средней крупности и крупного песка при 1 Гц была превышена величина ε_a = 5 %, используемая в качестве деформационного критерия при оценке развития разжижения. Поэтому результаты настоящего исследования не рассматриваются как свидетельство полного разжижения всех исследованных образцов. Они характеризуют существенное изменение напряженно-деформированного состояния песчаных грунтов при циклическом динамическом воздействии, проявляющееся в накоплении порового давления, развитии осевой деформации и снижении эффективных напряжений.

Полученные результаты качественно согласуются с ранее опубликованными данными динамических трехосных испытаний песчаных грунтов [1]. В работе [1] для мелкого песка при частотах 1 и 2 Гц относительное поровое давление достигало порядка 70–80 %, тогда как при 3 Гц оставалось ниже 30 %. В настоящем исследовании установлена аналогичная качественная тенденция: максимальные значения PPR для мелкого песка составили 0,918 при 1 Гц, 0,882 при 2 Гц и 0,060 при 3 Гц. Таким образом, в обоих исследованиях для мелкого песка более высокие значения относительного порового давления наблюдались при 1–2 Гц по сравнению с 3 Гц. При этом данное сопоставление носит качественный характер, поскольку программы испытаний различались по продолжительности циклического нагружения.

В работе [1] также отмечено, что при динамическом воздействии поровое давление не обязательно достигает уровня, соответствующего полной передаче действующих напряжений на поровую воду; наблюдаемое состояние авторы связывают с частичным разжижением песчаного грунта. Полученные в настоящем исследовании результаты согласуются с необходимостью рассматривать изменение состояния песка комплексно. Совместный анализ PPR, осевой деформации ε_a и траекторий q–p' показывает, что существенное изменение механического состояния грунта может наблюдаться и при PPR < 1.

Количественный анализ траекторий q–p' дополняет оценку по поровому давлению и осевой деформации и позволяет непосредственно проследить изменение эффективного напряженного состояния в процессе циклического нагружения. Наиболее значительное снижение p′ зарегистрировано при 2 Гц для песка средней крупности и крупного песка, тогда как для мелкого песка наиболее выраженные изменения наблюдались при 1 и 2 Гц по сравнению с 3 Гц.

Таким образом, проведенные испытания выявили частотно-зависимые различия циклической реакции песков различного гранулометрического состава. Динамическое воздействие сопровождалось накоплением порового давления, развитием осевой деформации и снижением эффективных напряжений, однако интенсивность этих процессов различалась для исследованных грунтов и частот нагружения. Единой монотонной зависимости от частоты, общей для мелкого песка, песка средней крупности и крупного песка, по результатам выполненных испытаний не установлено.

Выводы

1. Выполнено сравнительное экспериментальное исследование девяти серий динамических трехосных испытаний мелкого песка, песка средней крупности и крупного песка при частотах циклического нагружения 1, 2 и 3 Гц. Анализ включал изменение относительного порового давления PPR, накопление осевой деформации ε_a, траектории эффективных напряжений q-p' и развитие осевой деформации во времени.

2. Для мелкого песка при сопоставимой продолжительности испытаний и $B \geq 0{,}958$ увеличение частоты от 1 до 3 Гц сопровождалось уменьшением максимального PPR от 0,918 до 0,060, конечной осевой деформации от 0,572

до 0,021 % и уменьшением степени снижения среднего эффективного напряжения p' с 23,27 до 0,66 %. Наиболее выраженные различия реакции мелкого песка наблюдались между сериями 1–2 Гц и серией 3 Гц.

3. Для песка средней крупности и крупного песка при 1 Гц конечная осевая деформация достигла соответственно 9,428 % за 178 циклов и 8,935 % за 83 цикла. В обеих сериях было превышено принятое критическое значение ε_a =5%, что свидетельствует о достижении деформационного критерия разжижения.

4. При частоте 2 Гц зарегистрировано существенное снижение среднего эффективного напряжения p': на 76,89 % для песка средней крупности и на 77,52 % для крупного песка. Максимальные значения *PPR* в этих сериях составили соответственно 0,927 и 0,820, что свидетельствует о значительном накоплении порового давления без достижения критерия *PPR*=1.

5. Ни в одной из девяти серий максимальное зарегистрированное значение *PPR* не достигло 1. Полученные результаты показывают, что оценка развития разжижения должна выполняться комплексно с учетом порового давления, осевой деформации и траекторий эффективных напряжений. В рассматриваемой экспериментальной матрице деформационный критерий ε_a =5% был достигнут для песка средней крупности и крупного песка при 1 Гц.

6. Для песка средней крупности и крупного песка при 3 Гц значения коэффициента Скемптона составили B = 0,669 и B = 0,212 соответственно. Поэтому результаты этих серий по поровому давлению не позволяют однозначно отделить влияние частоты от влияния степени водонасыщения образцов и должны интерпретироваться с соответствующим ограничением.

7. Полученная экспериментальная матрица выявила частотно-зависимые различия циклической реакции песков различного гранулометрического состава. Установлено, что характер накопления порового давления, осевой деформации и изменения эффективного напряженного состояния различается для исследованных гранулометрических групп, при этом единой монотонной зависимости от частоты, общей для всех трех типов песка, не выявлено.

Литература

1. ***Мангушев Р. А., Кондратьева Л. Н., Парамонов В. Н., Осокин А. И., Вагурина А. В., Мчедлидзе К. В.*** Параметры виброползучести песков при вибрационных воздействиях в условиях динамического трехосного сжатия // Инновации и инвестиции. — 2026. — № 3. — С. 51–56.
2. ***Мангушев Р. А., Дьяконов И. П., Полунин В. М., Горкина М. Р.*** Деформации виброползучести водонасыщенных грунтов в процессе высокочастотного динамического воздействия // Жилищное строительство. — 2022. — № 3. — С. 45–55. — DOI: 10.31659/0044-4472-2022-3-45-55.
3. ***Полунин В. М., Черемхина А. П.*** Изменение прочностных параметров дисперсных грунтов после высокочастотного вибрирования // Construction and Geotechnics. — 2021. — Т. 12, № 1. — С. 46–56. — DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.04.
4. ***Полунин В. М.*** Прогноз дополнительных деформаций зданий и сооружений в процессе высокочастотного вибрирования шпунтовых свай // Вестник гражданских инженеров. — 2022. — Т. 19, № 2 (91). — С. 74–82. — DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-74-82.
5. ***Тер-Мартиросян З. Г., Тер-Мартиросян А. З., Соболев Е. С.*** Ползучесть и виброползучесть песчаных грунтов // Инженерные изыскания. — 2014. — № 5–6. — С. 24–28.
6. ***Белаш Т. А., Свитлик И. В.*** К вопросу о повышении сейсмостойкости зданий подвесного типа в районах высокой сейсмической активности // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2023. — № 2. — С. 54–66. — DOI: 10.37153/2618-9283-2023-1-54-66.
7. ***Belash T., Svitlik I.*** Effectiveness of the Use of Suspended Structures in Seismic Areas // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. — 2022. — Vol. 403. — P. 1187–1195. — DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_132.
8. ***Cheng K., Zhang Y.*** A Cyclic Resistance Ratio Model of Sand-Fines Mixtures Based on Cyclic Triaxial Test // Geotechnical and Geological Engineering. — 2024. — Vol. 42, No. 2. — P. 1021–1033. — DOI: 10.1007/s10706-023-02602-6.
9. ***Жемчугов-Гитман Д. М., Мозжухина Л. В., Уздин А. М.*** К вопросу задания уровня расчетного воздействия и надежности высотного строительства // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2021. — № 1. — С. 43–56. — DOI: 10.37153/2618-9283-2021-1-43-56.

Experimental Investigation of the Frequency-Dependent Cyclic Behavior of Sands with Different Particle-Size Distributions

Alanoca Chambi Cesar Alfonso
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

This study presents an experimental investigation of the frequency-dependent cyclic behavior of sands with different particle-size distributions. Fine, medium, and coarse sands were tested under dynamic triaxial cyclic loading at frequencies of 1, 2, and 3 Hz. Testing and data processing followed GOST R 56353-2022, Soils: Laboratory Methods for Determining the Dynamic Properties of Dispersed Soils.

The graphical representation of the results follows mandatory Annex D of the standard, including axial strain and relative pore-pressure response versus number of loading cycles, effective stress paths in the q-p' plane, and axial strain versus the logarithm of loading time. The experimental records reveal distinct patterns of pore-pressure accumulation, axial-strain development, and effective-stress evolution as loading frequency and particle-size distribution vary.

No single monotonic frequency-response relationship was established for all investigated sand fractions. The obtained relationships characterize the response of sandy soils under repeated dynamic loading and provide experimental information for subsequent assessment of soil-mass behavior, including interpretation and calibration of numerical models used for seismic loading problems.

Keywords: dynamic triaxial compression, sand, cyclic loading, loading frequency, particle-size distribution, pore-water pressure, axial strain, effective stress.

References

1. ***Mangushev R.A., Kondratieva L.N., Paramonov V.N., Osokin A.I., Vagurina A.V., Mchedlidze K.V.*** Parameters of vibrocreep of sands under vibration effects in dynamic triaxial compression conditions. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and Investments]. 2026. No. 3. Pp. 51–56. (In Russian).
2. ***Mangushev R.A., Dyakonov I.P., Polunin V.M., Gorkina M.R.*** Vibrocreep deformations of water-saturated soils under high-frequency dynamic loading. *Zhilishchnoe stroitelstvo* [Housing Construction]. 2022. No. 3. Pp. 45–55. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-3-45-55. (In Russian).
3. ***Polunin V.M., Cheremkhina A.P.*** Changes in strength parameters of dispersed soils after high-frequency vibration. *Construction and Geotechnics*. 2021. Vol. 12, No. 1. Pp. 46–56. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.04. (In Russian).
4. ***Polunin V.M.*** Prediction of additional deformations of buildings and structures during high-frequency vibration of sheet piles. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2022. Vol. 19, No. 2 (91). Pp. 74–82. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-74-82. (In Russian).
5. ***Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Sobolev E.S.*** Creep and vibrocreep of sandy soils. *Inzhenernye izyskaniya* [Engineering Surveys]. 2014. No. 5–6. Pp. 24–28. (In Russian).
6. ***Belash T.A., Svitlik I.V.*** On the issue of increasing the seismic resistance of suspended buildings in areas of high seismic activity. *Seysmostoykoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [Earthquake-Resistant Construction. Safety of Structures]. 2023. No. 2. Pp. 54–66. DOI: 10.37153/2618-9283-2023-1-54-66. (In Russian).
7. ***Belash T., Svitlik I.*** Effectiveness of the Use of Suspended Structures in Seismic Areas. *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 403. Pp. 1187–1195. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_132.
8. ***Cheng K., Zhang Y.*** A Cyclic Resistance Ratio Model of Sand-Fines Mixtures Based on Cyclic Triaxial Test. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2024. Vol. 42, No. 2. Pp. 1021–1033. DOI: 10.1007/s10706-023-02602-6.
9. ***Zhemchugov-Gitman D. M., Mozzhukhina L. V., Uzdin A. M.*** On the Issue of Assigning the Design Action Level and Reliability of High-Rise Construction // *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. — 2021. — No. 1. — P. 43–56. — DOI: 10.37153/2618-9283-2021-1-43-56.