

УДК 550.347.097.33

ИЗМЕНЕНИЯ МОДУЛЕЙ СДВИГА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ГРУНТОВ В ЭПИЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЕ ВО ВРЕМЯ ОСНОВНОГО ТОЛЧКА И АФТЕРШОКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 1995 г. В КОБЕ (ЯПОНИЯ)

© 2004 г. О. В. Павленко

Представлено академиком В.И. Осиповым 22.03.2004 г.

Поступило 23.03.2004 г.

Акселерограммы основного толчка и первых афтершоков землетрясения 1995 г. в Кобе, зарегистрированные вертикальными сейсмическими группами Порт Айленд (ПА), СЖК и ТКС (расстояния до разломной плоскости – 2, 6 и 15 км), использованы для оценки изменений модулей сдвига в приповерхностных грунтах, вызванных сильными движениями. Значения модулей сдвига в разные моменты времени оценены на основе зависимостей напряжение–деформация, определенных для последовательных интервалов времени в продолжение основного толчка и афтершоков землетрясения. В верхних слоях грунта в ПА (0–13 м, искусственный грунт выше уровня грунтовых вод) модули сдвига снизились на ~80% от первоначальных значений в результате разжижения грунта; первые признаки восстановления модулей сдвига появились через 3–5 мин после прекращения сильных движений. На глубинах 13–18 м (искусственный грунт ниже уровня грунтовых вод) и 27–32.5 м (водонасыщенные пески) в ПА и в верхних слоях грунта в СЖК 0–11 м и ТКС 0–14 м (водонасыщенные аллювиальные грунты), уменьшение модулей сдвига составило ~80, ~50–60, ~60–70 и ~50% соответственно. Восстановление модулей сдвига началось сразу же после снижения интенсивности сейсмического воздействия и закончилось в течение нескольких минут. Таким образом, поведение приповерхностных слоев грунта в ПА, СЖК и ТКС было динамически нестабильным.

Исследования динамических свойств грунтов ведутся с 20–30-х годов прошлого века, а в 60–70-х годах начались широкомасштабные исследования динамических свойств грунтов [1–3 и др.], которые были инициированы двумя катастрофическими землетрясениями 1964 г.: в Ниигате и Анкоридже. Для расчета колебаний структур, построенных на грунтовых основаниях, исследовались динамичес-

кие (упругие, фильтрующие и поглощающие) характеристики грунтов, оценивалась их динамическая стабильность, изучались изменения упругих характеристик грунтов в условиях динамического нагружения: снижение модуля сдвига и жесткости и увеличение деформируемости грунта. К настоящему времени накоплены обширные данные о поведении связных и несвязных грунтов в условиях нагружений различной интенсивности и достигнут значительный прогресс в понимании поведения грунтов при сильных сейсмических воздействиях.

Среди современных методов испытаний грунтов лабораторные методы более разнообразны и многочисленны, чем полевые. Однако проблемой лабораторных испытаний остается создание адекватной динамической нагрузки на образец грунта с помощью лабораторной установки. Среди полевых методов геотехнические методы, направленные на оценивание жесткости грунта в условиях динамического нагружения (пенетрационные методы, динамическое прозвучивание и др.), считаются более перспективными, чем сейсмоакустические и вибрационные. Тем не менее остаются существенные расхождения между условиями динамического нагружения грунтов *in situ* и их лабораторными и полевыми аналогами. Грунты представляют собой сложные многокомпонентные системы, которые при сейсмических воздействиях могут не только изменять параметры распространяющихся в них сейсмических волн, но при этом могут также изменять свои свойства. Эти явления достаточно сложны и связаны с перемещениями грунтовых вод [4]. Следовательно, любые сведения о поведении грунтов при сейсмических воздействиях *in situ* представляются исключительно важными для понимания механизмов динамического отклика грунтов.

Вариации модуля сдвига *in situ* от точки к точке могут быть оценены методами стандартных отношений спектров (SSR) и отношений спектров горизонтальных компонент сейсмических колебаний к вертикальным (HVSr) [5]. Однако спект-

ры рассчитываются по достаточно большому участкам акселерограмм, и эти методы дают сглаженные характеристики и не позволяют определить изменения модулей сдвига в ходе землетрясения. Такая информация может быть получена по записям сильных землетрясений, сделанным вертикальными группами [6, 7].

Записи землетрясения 1995 г. в Кобе, сделанные вертикальными группами, определенно свидетельствуют о нелинейном поведении грунтов во многих пунктах регистрации [6–11]. В работе Сато и др. по записям вертикальных групп в пунктах ПА, СЖК, ТКС и КНК решена обратная задача определения скоростного разреза (S -волн) и коэффициентов поглощения с использованием алгоритма эквивалентного линейного анализа [8]. Значения V_s в продолжение основного толчка оказались меньше, чем значения V_s , полученные методами сейсмокаротажа, особенно в верхних разжиженных слоях в ПА. Записи основного толчка в ПА были разделены на две части, соответствующие началу и концу землетрясения. Найдено, что разжижение продолжало развиваться и во второй части записи. Анализ афтершока, зарегистрированного через 2 мин после основного толчка, показал, что V_s в слоях, лежащих ниже слоя искусственного грунта, вернулись к своим начальным значениям, но искусственный грунт еще оставался в разжиженном состоянии [8]. Поведение слоя аллювиальных глин, залегающих ниже слоя искусственного грунта в ПА, изучалось Казамой и др. [11]. По фильтрованным ($f \leq 1.2$ Гц) записям основного толчка акселерометрами на глубинах 16 и 32 м путем раздельного вычисления текущих значений сдвиговой деформации и сдвигового напряжения для слоя глин (16–32 м) были получены зависимости напряжение–деформация, характеризующие низкочастотные колебания в глинах в шести последовательных временных интервалах в продолжение ~ 10 с сильных движений.

Как показано в [6], записи сильных движений, сделанные вертикальными группами, позволяют восстановить зависимости напряжение–деформация *in situ* во всех грунтовых слоях от глубины установки наиболее заглубленного датчика до поверхности. Для определения зависимостей напряжение–деформация в слоях грунта рассчитывается распространение падающих вертикально снизу сейсмических волн (“входным” сигналом служат записи, зарегистрированные наиболее заглубленным акселерометром) в горизонтально-слоистой осадочной толще. На основе профильных данных делаются предположения о типах зависимостей напряжение–деформация в слоях грунта и генерируются семейства зависимостей напряжение–деформация выбранных типов, из числа которых методом перебора находят группы зависимостей, дающих наилучшее соответствие рассчитанных и зарегистрированных акселерограмм. При

этом для учета временных изменений в поведении грунта “входной” сигнал делится на малые временные интервалы (~ 1 – 2 с), и вычисления проводятся последовательно, интервал за интервалом.

Землетрясение 1995 г. в Кобе сопровождалось серией афтершоков, которые были зарегистрированы в первые минуты после основного толчка. В настоящей работе найдены зависимости напряжение–деформация, соответствующие колебаниям в слоях грунта в продолжение основного толчка и афтершоков в пунктах ПА, СЖК и ТКС. Профильные данные описаны в [6, 7]. Полученные зависимости использованы для оценки модулей сдвига на различных глубинах в продолжение сильных движений. Были рассчитаны G_{sec} , аппроксимирующие средние значения G_{tan} для всей зависимости напряжение–деформация [12]. Одна зависимость напряжение–деформация использовалась для описания поведения грунта в пределах групп слоев в данном интервале времени, однако рабочие участки зависимостей напряжение–деформация в различных слоях в пределах группы различны, и оценки G_{sec} варьируют в пределах группы от слоя к слою. Определялись средние значения G_{sec} , характеризующие значения модуля сдвига в пределах данной группы слоев в данном интервале времени.

На рис. 1 представлены зависимости модулей сдвига в слоях на глубинах 0–13 м, 13–18 м и 27–32.5 м в ПА (рис. 1а), 0–11 м в СЖК (рис. 1б) и 0–14 м в ТКС (рис. 1в) для двух горизонтальных компонент колебаний в продолжение основного толчка и афтершоков. Зависимости напряжение–деформация оценивались в продолжение 15 с сильных движений основного толчка землетрясения в 10 последовательных интервалах длительностью по 1.5 с (каждая точка на графиках соответствует одному интервалу); в случае афтершоков землетрясения находилась одна зависимость для каждого афтершока (точка соответствует одному афтершоку). В нижних частях рисунков показаны зарегистрированные и рассчитанные акселерограммы основного толчка землетрясения в соответствующих интервалах глубин. Хорошее согласие рассчитанных и зарегистрированных акселерограмм свидетельствует о значимости полученных оценок модулей сдвига. Возможные погрешности средних оценок могут быть связаны с ошибками определения зависимостей напряжение–деформация в слоях и с разбросом оценок модуля сдвига в пределах групп слоев. Погрешности первого рода, согласно нашим оценкам, могут достигать нескольких процентов, однако с учетом высокой детальности записей и согласия результатов, полученных для компонент EW и NS, можно заключить, что основные тенденции изменений модулей сдвига найдены верно. Доверительные интервалы вариаций модулей сдвига в пределах

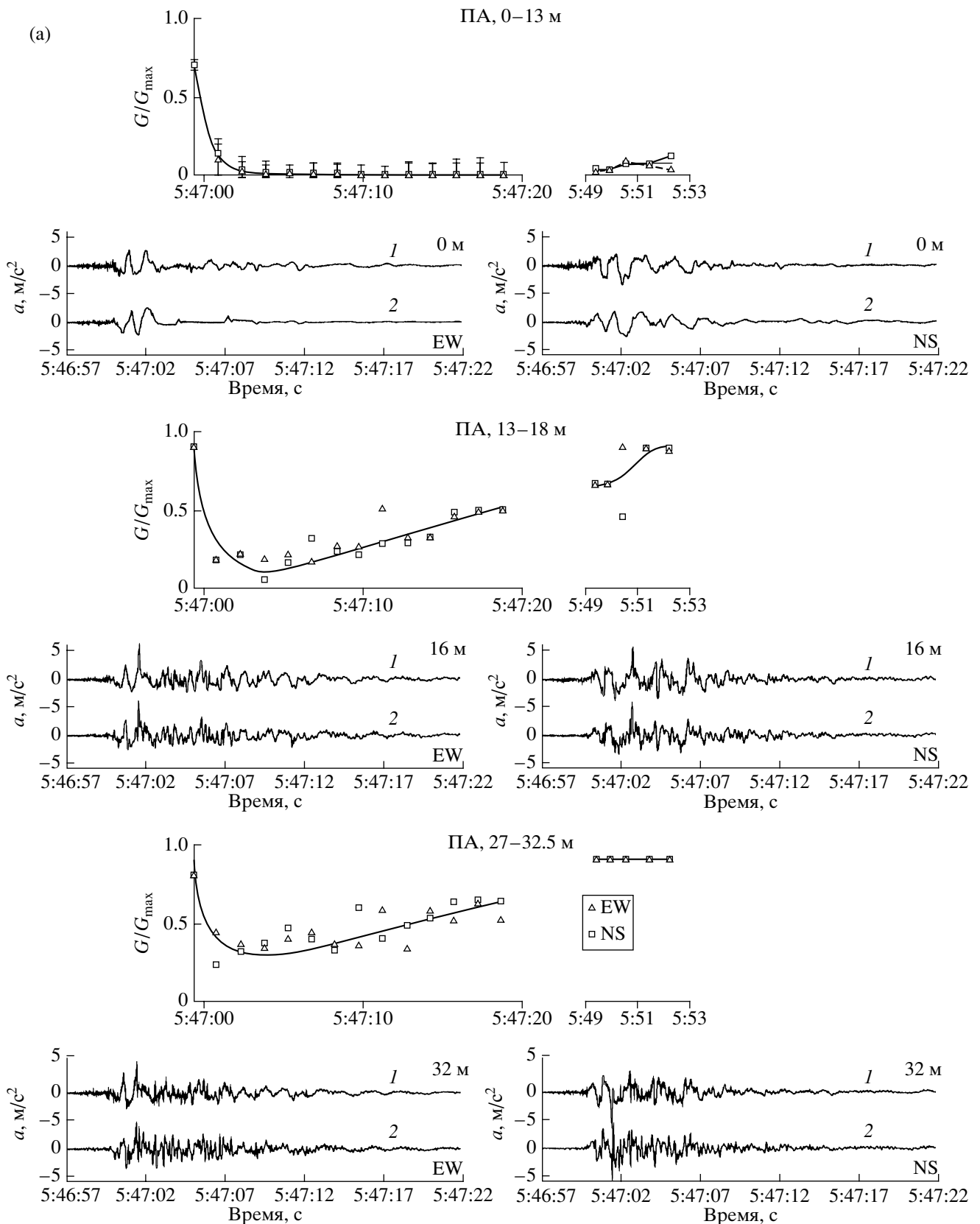


Рис. 1. Временные изменения модулей сдвига в приповерхностных грунтах в Порт Айленде (а) и в пунктах СЖК (б) и ТКС (в) во время землетрясения 1995 г. в Кобе и его афтершоков; 1 – регистрация, 2 – расчет.

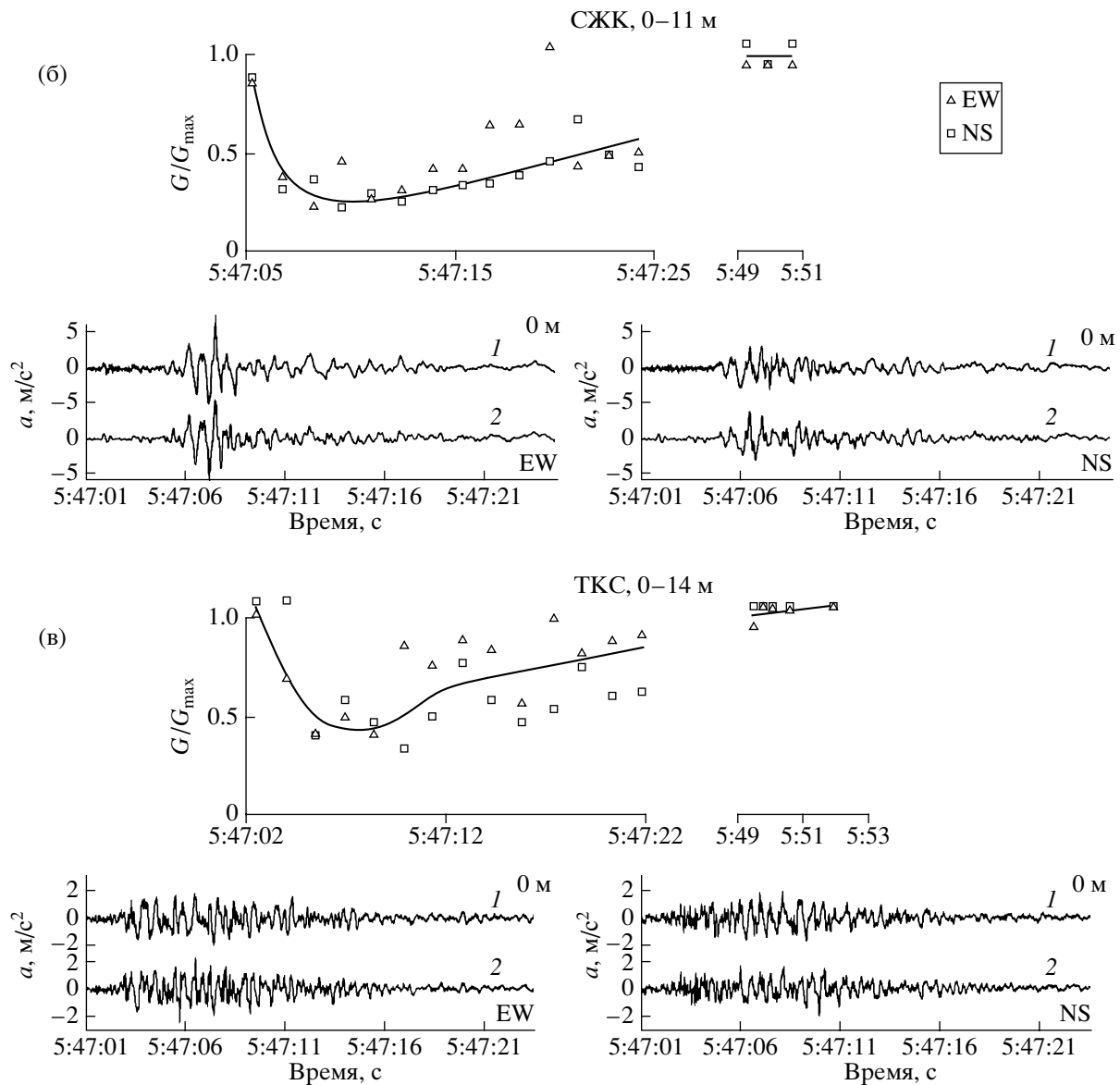


Рис. 1. Окончание.

групп слоев показаны только на рис. 1а; для других групп слоев они не показаны, поскольку малы.

Наиболее сильные горизонтальные ускорения во время основного толчка были зарегистрированы в ПА (~500 Гал на EW-компоненте и ~600 Гал на NS-компоненте на глубине 83 м); в верхних слоях в ПА наблюдалось разжижение грунта. Первые афтершоки были зарегистрированы сразу же после основного толчка, когда приповерхностные грунты еще оставались в разжиженном состоянии. Модуль сдвига в верхних 0–13 м постепенно уменьшается во время основного толчка (рис. 1а), что особенно заметно в первые 3–5 с сильных движений, когда он снижается на ~80–90% от начальных значений. Модуль сдвига достигает минимума в последующие 5–7 с и показывает тен-

денцию к возрастанию уже через несколько минут после окончания сильных движений. Разброс оценок модуля сдвига, определенных по афтершокам, показывает, что восстановление протекает неравномерно; это можно объяснить движением грунтовых вод. Верхний слой (0–18 м) представляет собой искусственный грунт “Масадо”, изготовленный из дробленого гранита. Он содержит гравий, ил и глины, в которых соотношение крупных и мелких частиц составляет 0–65 и 5–35% [9]. По мнению многих исследователей, присутствие в грунте даже небольшого количества мелких глинистых частиц (согласно Гуменскому, хотя бы 1.5–2%) придает грунту тиксотропные свойства [13, 14].

Грунты, подобные “Масадо”, обладают промежуточными свойствами между связными и несвязными грунтами, слабой и прерывистой коагуляционной решеткой. В таких грунтах постепенное медленное упрочнение после прекращения динамического воздействия включает два процесса: сжатие грунта и тиксотропное упрочнение коагуляционной решетки. Сжатие сопровождается оттоком воды и диссипацией порового давления, его скорость определяется фильтрующими свойствами грунта, а тиксотропное упрочнение завершается, как правило, в течение нескольких часов (максимум одного дня) и протекает в первые минуты неравномерно вследствие миграции воды [4]. Механизм восстановления, включающий эти два процесса, представляется в данном случае весьма вероятным, если принять во внимание состав грунта, неравномерность восстановления его жесткости в первые минуты (рис. 1а) и полное время восстановления, оцененное Агуирре (Aguirre) и Ирикурой (Irikura). Они показали, что эффекты последствия разжижения еще наблюдались через 3 ч, но уже отсутствовали через 24 ч после основного толчка [10].

Изменения модулей сдвига в слое 13–18 м в течение первых секунд сильных движений так же велики, как и в приповерхностном слое (рис. 1а). Состав грунта тот же, что и в вышележащем слое, различие лишь в его водонасыщенности (на уровне 13 м проходит граница грунтовых вод). Быстрое снижение модулей сдвига в этих слоях происходит с началом сильных движений и продолжается в течение 3–4 с до снижения интенсивности сейсмических колебаний (максимальное снижение модуля сдвига составляет ~80%), после чего в течение последующих минут происходит восстановление: постепенное уплотнение и тиксотропное упрочнение грунта.

В пунктах СЖК и ТКС ускорения на подошве осадочных слоев были не так велики, как в ПА (~300 Гал и ~100 Гал соответственно). С началом сильных движений в приповерхностных слоях (0–11 м) в СЖК наблюдается снижение модулей сдвига на ~60–70%; восстановление происходит в течение нескольких минут после окончания землетрясения (рис. 1б). Грунтовые условия в ПА и СЖК сходны, поэтому можно предположить, что восстановление модуля сдвига в СЖК также включает уплотнение, сопровождающееся оттоком влаги, и тиксотропное упрочнение слабой структурной коагуляционной решетки.

Тот факт, что восстановление практически во всех рассмотренных случаях начинается сразу же после снижения интенсивности сильных движений, свидетельствует о важной роли тиксотропного упрочнения в процессах восстановления. “Мгновенное” тиксотропное упрочнение начинается сразу же после прекращения динамического

воздействия, потому что количество свободных частиц, принимающих участие в реконструкции структурной решетки, в это время максимально. Наиболее быстрое упрочнение наблюдается в первые 3–10 мин, и присутствие воды ускоряет этот процесс, потому что повышает подвижность частиц и их способность переориентироваться и устанавливать наиболее энергетически выгодные связи [4].

Таким образом, приповерхностные 11–18 м слабосвязных грунтов в ПА и СЖК представляли собой динамически нестабильные системы. Чувствительность грунта к динамическому нагружению, очевидно, снижается с глубиной, и в поведении глубоко залегающих грунтовых слоев в ПА и СЖК изменений не обнаружено. Наибольшее снижение прочности обычно наблюдается при ускорениях порядка 0.5–0.7g [4]; близкие значения ускорений были зарегистрированы в ПА и СЖК. В ТКС наибольшее зарегистрированное ускорение составляет ~0.2g, и снижение прочности грунта в приповерхностных слоях не так велико: изменения модуля сдвига в слоях 0–14 м составили лишь ~50% от их начальных значений (рис. 1в).

Нужно отметить, что оценки модулей сдвига в ПА и СЖК получены в динамическом режиме, в присутствии реверберированных S-волн и бассейновых поверхностных волн [15]. Низкочастотные стоячие волны заметны на записях в ПА и СЖК на всех глубинах (амплитуды ~0.03–0.06 м/с², преобладающие частоты ~0.2 Гц). Привносимая ими нагрузка на грунт, очевидно, должна рассматриваться как динамическая, а не квазистатическая, поскольку условия недренированные (при такой частоте нагружения проницаемость грунта недостаточно велика для полной диссипации избыточного порового давления во время фазы нагружения в каждом цикле).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seed H.B., Lee K.L. // Proc. Amer. Soc. Civil Eng., J. Soil Mech. Found. Div. 1966. V. 92. P. 105–134.
2. Casagrande A. Proc. V Panamerican Conf. on Soil Mech. Found. Eng. Buenos Aires, 1975. P. 80–133.
3. Ishihara K., Tatsuoka F., Yasuda S. // Soils and Foundations. 1975. V. 15. № 1. P. 29–44.
4. Вознесенский Е.А. // Динамическая неустойчивость грунтов. М.: Эдиториал УРСС, 1999. 264 с.
5. Dimitriu P., Theodulidis N., Bard P.-Y. // Soil Dyn. Earthquake. Eng. 2000. V. 20. № 1/4. P. 155–165.
6. Pavlenko O.V., Irikura K. // Pure and Appl. Geophys. 2003. V. 160. P. 2365–2379.
7. Павленко О.В. // ДАН. 2003. Т. 389. № 2. С. 247–251.
8. Sato K., Kokusho T., Matsumoto M. et al. // Soils and Foundations. Spec. Issue on Geotechn. Aspects of the Jan. 17, 1995. Hyogoken Nanbu Earthquake. 1996. P. 41–52.

9. *Yasuda S., Ishihara K., Harada K., Shinkawa N.* // Soils and Foundations. Spec. Issue on Geotechn. Aspects of the Jan. 17, 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake. 1996. P. 99–107.
10. *Aguirre J., Irikura K.* // Bull Seism. Soc. Amer. 1997. V. 87. P. 1244–1258.
11. *Kazama M., Yamaguchi A., Yanagisawa E.* // Soils and Foundations, Spec. Issue on Geotechn. Aspects of the Jan. 17, 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake. 1998. P. 23–32.
12. *Kramer S.L.* Geotechnical Earthquake Engineering. Upper Saddle River (N.J.) Prentice Hall, 1996. P. 230–238.
13. *Akkerman E.* // Probl. Eng. Geol. 1958. V. 1. P. 73–92.
14. *Гуменский Б.М.* Основы физикохимии глинистых грунтов и их использование в строительстве, Л.; М.: Стройиздат, 1965. 255 с.
15. *Hatayama K., Matsunami K., Iwata T., Irikura K.* // J. Phys. Earth. 1995. V. 43. P. 131–155.