

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ И ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ

М. ЧЕЛЕБИ – д-р техн. наук, главный специалист по мониторингу Геологической службы США (Менло Парк, Калифорния).

Описаны два интегрированных исследовательских комплекса, состоящих из комбинированных систем измерительного оборудования, установленного на конструкциях зданий и в условиях свободного поля, и используемых для изучения взаимодействия грунтов основания и сооружения (SSI) в условиях сейсмической активности. Один из комплексов финансирует Современная национальная сейсмическая система (ANSS), являющаяся новым проектом Управления геологической службы Соединенных Штатов. В рамках этого проекта планируется разместить 6000 трехканальных или эквивалентных акселерометров в сейсмически опасных районах городской застройки трех американских штатов. Согласно соответствующей директиве, должно отдаваться предпочтение размещению приборов в местах, имеющих отношение к SSI. Описываемые комплексы являются примером развития исследовательских систем на конструкциях зданий и сооружений для облегчения проведения исследований в области SSI. Приводятся данные, полученные с помощью этих комплексов.

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень знаний и аналитические подходы требуют, чтобы взаимодействие сооружений и грунтов оснований (SSI) было по возможности представлено математическими моделями, учитывающими влияние грунтового основания. Необходимо определять положительные и отрицательные эффекты при учете взаимодействия сооружений и оснований. Отрицательные моменты, проявившиеся во время землетрясения 1985 г. в городе Мичоакан (Michoacan) в Мексике, рассмотрены в работе [21]. Показано, что в зоне озерных отложений, характерных для Мехико Сити, основные периоды зданий средней высоты (5–15 этажей) продлились благодаря эффектам SSI. Эти здания стали уязвимыми из-за того, что их более длинные периоды приблизились к хорошо известным двухсекундным резонансным периодам в зоне озерных отложений. Поэтому совершенно необходимо развитие теории влияния эффектов SSI на поведение здания при динамических нагрузках и ее проверка в полевых

условиях. Начиная с 1978 г. на семинарах и технических встречах неоднократно высказывались рекомендации по оснащению зданий специальной аппаратурой для изучения SSI [11, 12, 16, 18]. Кроме того, в последние годы при содействии Американского совета по влиянию ветров и сейсмике и японской программы по развитию природных ресурсов были организованы три семинара по теме «Взаимодействие грунтов основания и сооружения» [5, 6, а также Okawa, Iiba and Celebi, 2001], на которых рассматривались следующие вопросы:

современные методы определения взаимодействия грунта основания и сооружения, применяемые при проектировании/анализе процессов в США и Японии;

последние исследования в этой области;

накопленные экспериментальные данные, включая предварительные результаты незавершенных экспериментов;

сотрудничество в развитии темы взаимодействия грунтов и оснований.

В 1992 г. была организована конференция для принятия рекомендаций по опытному

подтверждению эффектов взаимодействия грунта основания и сооружения для улучшения существующих и развития новых методов анализа и проектирования [4].

На другой недавно проведенной конференции развитие темы взаимодействия грунтов оснований и сооружений было названо среди наиважнейших целей в области развития технологий инструментального измерения значительных подвижек и перемещений фундаментов и надстройки [7]. По инициативе Национального научного фонда по созданию сети инженерного моделирования землетрясений было проведено несколько крупномасштабных испытаний и устроено несколько полигонов, которые могут быть использованы для исследования SSI [22]. Новая программа «Современная национальная сейсмическая система» (ANSS), осуществляемая под руководством Управления геологической разведки США, открывает широкие возможности для проведения современных исследований в области SSI, результатом которых может стать переоценка методов, применяемых на реальных конструкциях. В рамках этой программы предложено развернуть 3000 трехканальных измерительных устройств для мониторинга городской застройки в сейсмоопасных районах США.

Таким образом, в настоящий момент созданы условия для более широкого применения сейсмической измерительной аппаратуры на реальных зданиях и сооружениях для проведения исследований в области SSI. Во время землетрясений различной силы регистрация реакции конструкций с последующей ее оценкой на таких площадках представляет интерес для научного и инженерного сообщества. Полученные данные могут использоваться для изучения реакции конструкций на землетрясения, оценки работы аппаратуры и выдачи заключений, полезных при проектировании (при новом строительстве, модернизации или усилении аналогичных конструкций). Знакомство с прототипами таких исследовательских комплексов будет способствовать развитию дальнейших исследований в области SSI.

1. ДВА КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ SSI

1.1. Комплекс 1. Здание Атвуд (Анкоридж, штат Аляска)

Здание Атвуд в центральной части города Анкоридж высотой в 20 этажей представляет собой каркасную, устойчивую к воздействию моментов стальную конструкцию с одним уровнем подвала, площадью 130×130 футов (39,6×39,6 м) в плане и высотой 264 фута (80,5 м). Фундаменты здания не имеют свай и состоят из железобетонной плиты под ядром здания толщиной 5 футов (1,52 м) и железобетонного пояса по периметру толщиной 4 фута 6 дюймов (1,37 м), перевязанного с балками.

Для стратификации центральной части Анкориджа характерна толща отложений, известная как формация Бухты контрабандистов (Bootlegger Cove Formation), толщиной приблизительно 100...150 футов (30,5...45,7 м), в зоне распространения которой произошли многочисленные и значительные по масштабам случаи потери грунтом несущей способности и связанных с этим аварийных ситуаций во время Великого землетрясения на Аляске 1964 г. Таким образом, установка сейсмических измерительных приборов и мониторинг здания Атвуд важны не только для оценки поведения грунтов основания и конструкций здания, но и для изучения вопросов, связанных с общей реакцией такого типа зданий на сейсмические воздействия. Это важно, поскольку здание построено на слабых грунтах, характерных для центральной части Анкориджа.

Измерительное оборудование, установленное на здании, состояло из двух объединенных компонентов для регистрации реакции здания на сотрясение для оценки: -конструктивного решения и -фундамента, не имеющего свай, и связанного с ним исследовательского комплекса по работе в условиях свободного поля и в скважинах, находящегося в непосредственной близости от него. Общая трехмерная схема здания, а также соседнего исследовательского комплекса приведены на рис. 1.

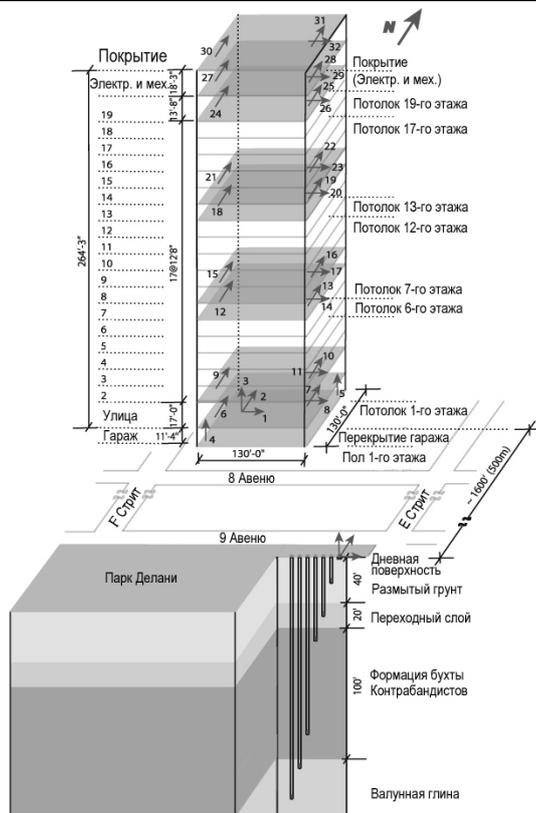


Рис. 1. Общая трехмерная схема здания Атвуд (показаны общие размеры и месторасположение акселерометров, размещенных внутри конструкции и в условиях свободного поля с трехосными скважинными акселерометрами)

Измерительное оборудование, установленное на конструкциях здания, предназначалось для регистрации бокового раскачивания, кручения, смещения (между двумя произвольно выбранными соседними этажами) или средних величин смещения между любыми двумя этажами, а также для измерения вибрационных параметров раскачивания, обусловленного взаимодействием здания с грунтом основания, когда вибрационные характеристики изменяются вследствие такого взаимодействия). Исследовательский комплекс состоял из поверхностной и глубинной аппаратуры, размещенной на разных глубинах для регистрации реакции различных слоев грунта на волновое воздействие, а также для определения влияния той или иной стратификации на измерение параметров перемещений в результате землетрясения по мере того, как вибрационные воздействия распространяются, отра-

жаются и генерируют колебания в конструкциях.

С помощью интегрированных исследовательских комплексов, расположенных в скважинах, на поверхности грунта и конструкциях здания, можно регистрировать распространение колебательных перемещений от отметок ниже дневной поверхности до крыши здания. На рис. 2 показаны ускорения и смещения, зарегистрированные и рассчитанные при помощи двойной интеграции исследовательским комплексом, расположенным на конструкциях здания¹, в течение 15 декабря 2003 г. ($M_s = 3,7$) во время землетрясения в Пойнт Макензи на Аляске. Здание находилось на расстоянии 18,8 км от эпицентра землетрясения. Максимальные пиковые ускорения, зарегистрированные на конструкциях здания, не превышают 0,02 g.

На этих достаточно низких уровнях вибрации эффекты SSI в явном виде не наблюдаются. На рис. 3 показаны амплитуды спектров двух параллельных перемещений в направлении с севера на юг, их разности, а также перемещения в направлении с востока на запад на уровне крыши, где ясно видны соответствующие частоты на конструкциях здания. Из рис. 4 видно, что два типа перемещений в уровне подвала когерентны для нескольких уровней частот, одну из которых, возможно, следует отнести на счет раскачивания. В настоящее время проводятся дальнейшие исследования в этом направлении.

1.2. Исследовательский комплекс 2. Здание Пасифик Парк Плаза (Pacific Park Plaza, Эмервилль, Калифорния)

Пасифик Парк Плаза – 30-этажное высотой 312 футов (95,1 м), гибкое, железобетонное, устойчивое к моменту каркасное здание. Три монолитных конструкции крыльев здания расположены вокруг центрального каркаса на одинаковом расстоянии под углами 120°. Поперечные стены в центральном ядре и крыльях доходят только до уровня 2-го этажа, а оси колонн тянутся от уровня фундаментов до крыши. Фундаменты состоят из железобетонной плиты толщиной 5 футов (1,8 м) на висячих сваях, забитых под осями колонн.

¹ Во время землетрясения поверхностные и скважинные комплексы не были задействованы.

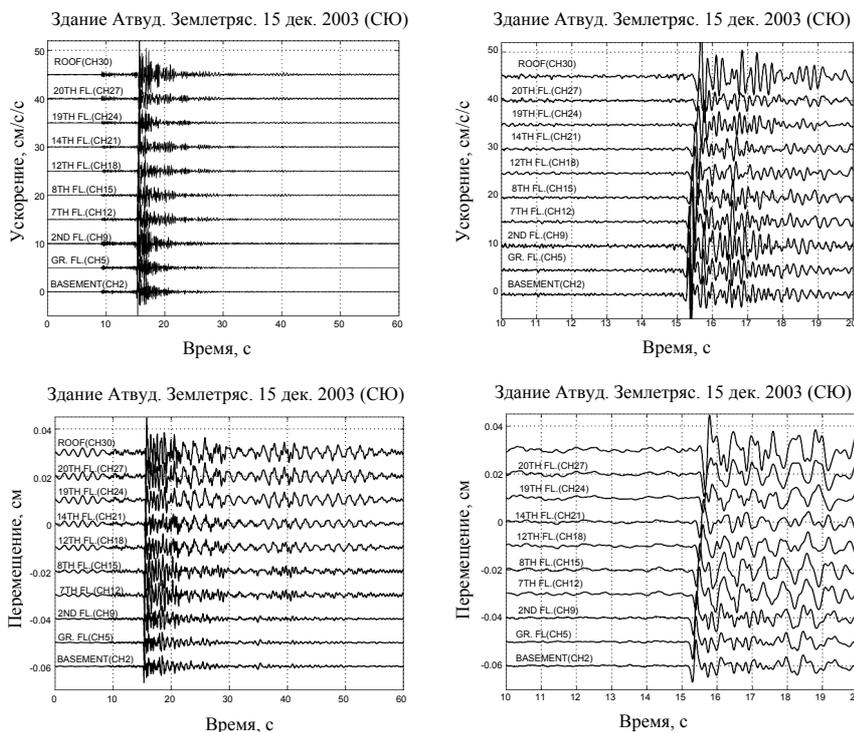


Рис. 2. Реакция в течение 60 с на сейсмическое воздействие, зарегистрированная с помощью ориентированных с севера на юг акселерометров в западном крыле здания Атвуд (вверху и в левом нижнем углу). Ускорения и перемещения, показывающие распространение волн от подвала до крыши (вверху и правом нижнем углу) в течение 10 с

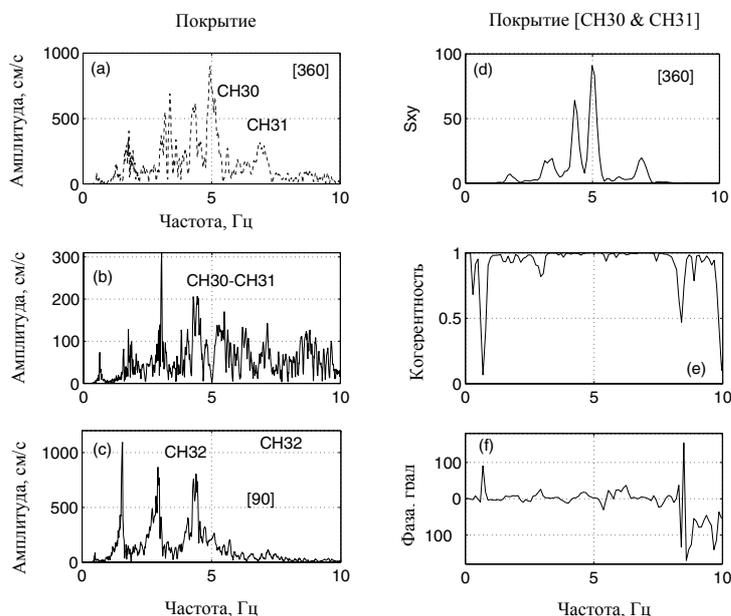


Рис. 3. Спектры амплитуд ускорения, зарегистрированных в уровне крыши на двух параллельных трансляционных акселерометрах (каналы 30 и 31) в направлении с севера на юг (а), разность по каналам 30 и 31 (б), трансляционный акселерометр (канал 32) в направлении с востока на запад (в) и графики (г-е) поперечного спектра, когерентности и фазовых углов по двум параллельным перемещениям (каналы 30 и 31)

Согласно сравнительно недавним данным профилирования геологического разреза по скоростям распространения поперечных волн в грунте [8], на площадке последовательно залегают техногенные грунты, мягкие пылеватые глины (так называемый заливный ил эпохи голоцена) и недифференцированные перемежающиеся отложения глин, суглинков, песка и гальки (от жестких до очень жестких).

Поверхность отложений ила эпохи голоцена, ясно различимого на профиле скоростей распространения поперечных волн (рис. 5, а), находится на уровне 16 футов (5 м) от поверх-

ности и имеет мощность приблизительно 10 футов (3 м). Прочные отложения, характеризующиеся скоростью распространения поперечных волн (V_s) примерно 820 футов/с (250 м/с), залегают от подошвы ила эпохи голоцена до глубины около 80 футов (24 м). Очень прочные отложения эпохи плейстоцена со скоростью V_s примерно до 1300 футов/с (400 м/с) простираются до глубины приблизительно 155 футов (48 м). Функция распространения колебаний на площадке, рассчитанная методом распространения поперечных волн Хаскелла [9] с использованием профилей,

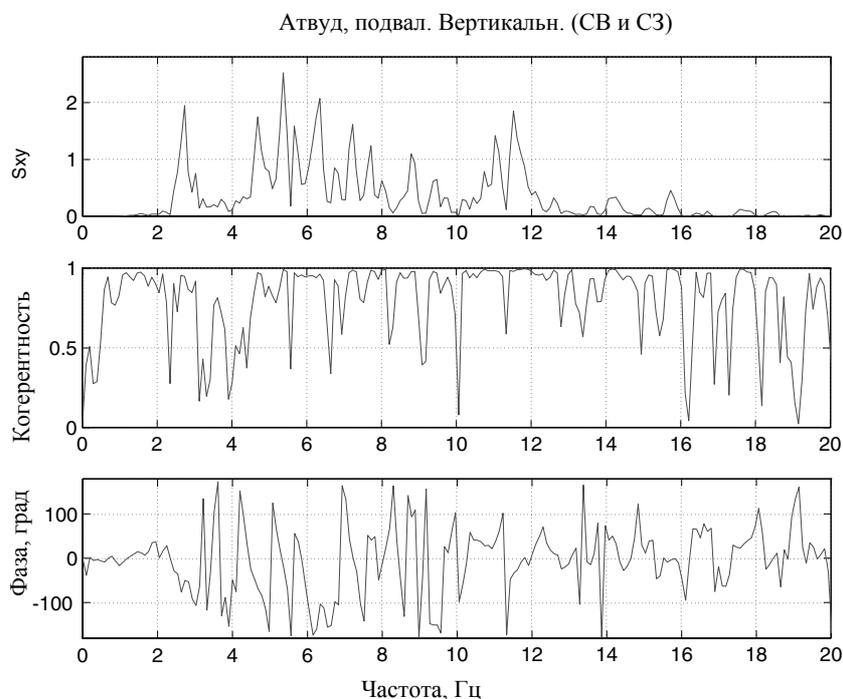


Рис. 4. Поперечный спектр, когерентность и фазовые углы по двум вертикальным перемещениям на уровне подвала

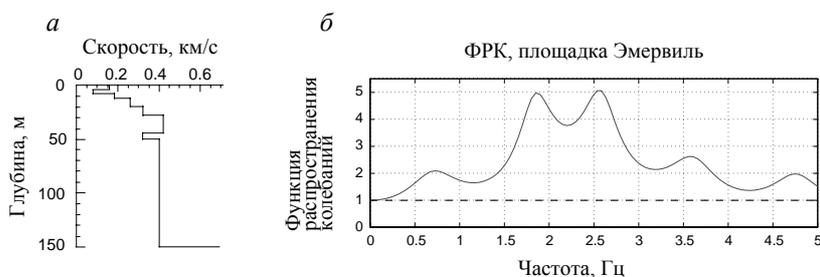


Рис. 5. Профили скоростей распространения поперечных волн (а) и расчетная функция распространения колебаний на площадке (б)

приведенных на рис. 5, а, показана на рис. 5, б и определяет частоту этой площадки приблизительно в 0,7 Гц.

Трехмерная схема здания Пасифик Парк Плаза вместе с установленными на нем комплексами измерительной аппаратуры показана на рис. 6. Схема расположения аппаратуры разработана для регистрации поступательных перемещений крыльев здания относительно его каркаса, вертикальных перемещений фундаментных плит в уровне 1-го этажа, перемещений на поверхности и в массиве грунта на глубине 200 футов (61 м) в условиях свободного поля.

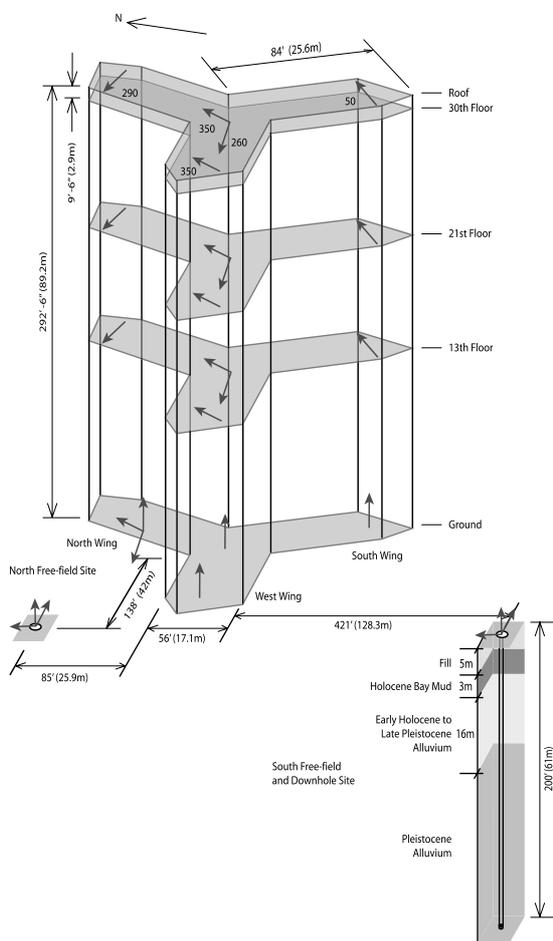


Рис. 6. Трехмерная схема исследовательского комплекса, установленного на здании вместе с измерительной аппаратурой на поверхности и в массиве грунта (глубинный акселерограф был установлен после землетрясения в Лома Приета в 1989 г.)

Реакции здания и поверхности грунта в условиях свободного поля были зарегистрированы во время землетрясения 17 октября 1989 г. в Лома Приета. Эти данные использовались для обширных исследований. Следует отметить усиление амплитуд смещений (рис. 7) в месте расположения здания по сравнению со смещениями на площадке Уэрба Буэна Айлэнд (Yerba Buena Island – YBI) (обе площадки находятся на расстоянии примерно 100 км от эпицентра землетрясения в Лома Приета).

На рис. 8 показаны поперечные спектры ортогональных горизонтальных ускорений в центре здания, крыше и в уровне 1-го этажа на южной площадке со свободным полем (ЮСП) и их наложенные нормализованные спектры.

Из данных по землетрясению явно идентифицируется частота волны первого порядка, равная 0,38 Гц, а также частота 0,7 Гц [2, 3, 19].

Расширенные пакеты данных по этому зданию включают также результаты внешних и вынужденных вибрационных испытаний, приведенные в [1, 17, 20]. Динамические характеристики здания рассчитывались с использованием различных данных (см. таблицу).

Динамические характеристики
Пасифик Парк Плаза

	Частота, Гц	Демпфирование, %
1990 Внешние испытания [1]		
С севера на юг	0,48	0,6
С востока на запад	0,48	3,4
1989 (LPE) Интенсивные колебания [1]		
С севера на юг	0,38	11,6
С востока на запад	0,38	15,5
1985 Принудительные вибрационные испытания [20]		
С севера на юг	0,590	1,7
С востока на запад	0,595	1,8
Кручение	0,565	1,5
1985 Внешние вибрационные испытания [20]		
С севера на юг	0,586	2,6
С востока на запад	0,586	2,6
Кручение	0,586	3,8
Анализ методом нормальных волн (неподвижные R и гибкие F фундаменты) [20]		
С севера на юг	R	0,596
	F	0,595
С востока на запад	R	0,596
	F	0,595
Кручение	R	0,565
	F	0,562

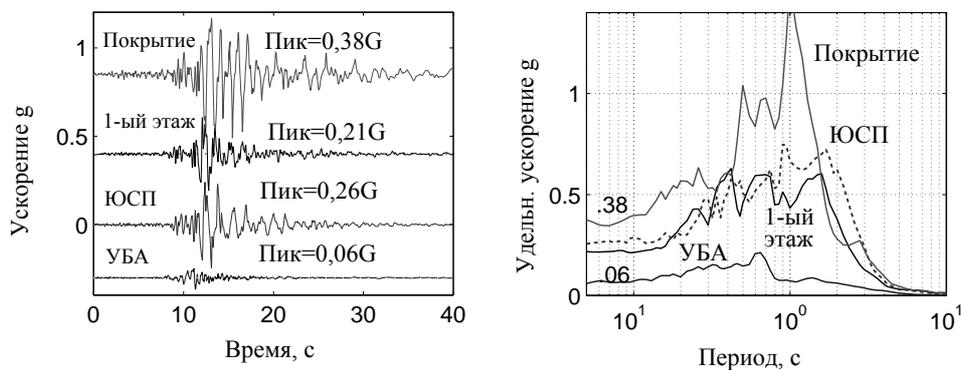


Рис. 7. Увеличение амплитуд (с востока на запад) колебаний и соответствующие спектры реакции на вибровоздействие (5% демпфирования) на южной площадке со свободным полем (ЮСП), на уровне 1-го этажа и крыши исследовательского комплекса Пасифик Парк Плаза (ППП) по сравнению с перемещениями на площадке Уэрба Буэна Айлэнд (УБА)

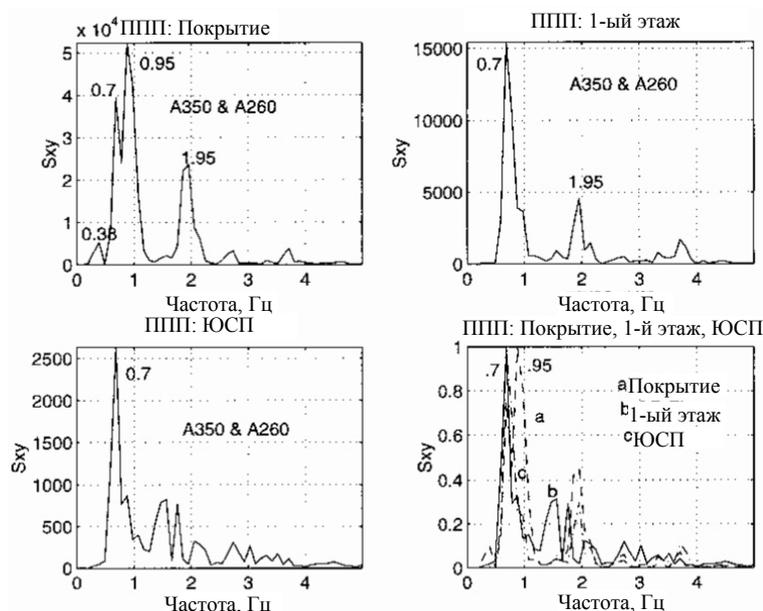


Рис. 8. Поперечные спектры перемещений крыши, 1-го этажа и южного свободного поля (ЮСП) и их объединенный нормализованный график (в правом нижнем углу)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из таблицы видно, что значения собственной частоты по результатам сильных колебаний заметно отличаются от значений, полученных для колебаний низкой амплитудой. Эти различия связаны с эффектами ВГС, проявляющимися во время воздействия на здание сильных колебаний [2, 13–15].

Мы привели описание двух интегрированных исследовательских комплексов измерительного оборудования, установленного на элементы зданий, а также в условиях свободного поля и используемых для изучения взаимодействия грунтов основания и сооружения (SSI). В рамках многочисленных научных совещаний были приняты рекомендации по размещению указанных приборов на пло-

щадках и сооружениях для упрощения исследований в области SSI. И хотя данные, полученные в результате испытаний на этих комплексах, ограничены, результаты по низким амплитудам представляются достаточно перспективными.

Список литературы

1. *Celebi, M., Phan, L. T., and Marshall, R. D.*, 1993, Dynamic characteristics of five tall buildings during strong and low-amplitude motions, *Journal of the Structural Design of Tall Buildings* (John Wiley & Sons), v. 2, 1–15, 1993.
2. *Celebi, M.*, 1998, Performance of Building structures – A Summary, in *The Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989 – Building Structures* (M. Celebi, editor), USGS Prof. Paper 1552-C, p. C5–c76.
3. *Celebi, M., and Safak, E.*, (1992). Recorded Seismic Response of Pacific Park Plaza (Part I–Data and Preliminary Analysis). *ASCE (Journal of Structural Engineering)*, June 1992.
4. *Celebi, M., Lysmer, J., and Luco, E.*, (compilers), 1992, Recommendations for a Soil-Structure Interaction Experiment (Report based on a workshop held at San Francisco, CA on February 7, 1992), USGS, OFR: 92–295, April 1992.
5. *Celebi, M., and Okawa, I.* (eds.), 1999, UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction - Proceedings of Workshop held on September 1999 at Menlo Park, CA., U.S. Geological Survey OFR 99–142.
6. *Celebi, M., Todorovska, M., Okawa, I. and Iiba, M.* (eds.), 2004, Third UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction – Proceedings of Workshop held on March, 2004 at Menlo Park, CA., U.S. Geological Survey (CD-ROM).
7. *COSMOS*, 2001, Proceedings, Invited Workshop on strong-motion Instrumentation of Buildings, Emeryville, Ca. November 2001, Cosmos Publication No: CP-2001/04.
8. *Gibbs, J. F., Fumal, T. E., and Powers, T. J.*, 1994, Seismic velocities and geologic logs from borehole measurements at seven strong motion stations that recorded the 1989 Loma Prieta, California, earthquake: U.S. Geological Survey Open-File Report 94–222, 104 p.
9. *Haskell, N. A.*, 1953, The dispersion of surface waves on multilayered media: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 43, no. 1, p. 17–34.
10. *Haskell, N. A.*, 1960, Crustal reflection of plane SH waves, *Journal of Geophysical Research*, v. 65, No. 12, p. 4147–4150.
11. *Iwan, W. D.*, ed., 1978, Proceedings of the International Workshop on Strong Motion Instrument Arrays, May 1978, Honolulu, Hawaii.
12. *Iwan, W. D.*, ed., 1981, Proceedings of the U.S. National Workshop on Strong-Motion Earthquake Instrumentation, April 1981, Santa Barbara, California.
13. *Kagawa, T., Aktan, H., Celebi, M.*, 1993, Evaluation of soil and structure model using measured building response during the Loma Prieta earthquake: Report of the Dept. Of Civil Engineering, Wayne State University, Detroit, Michigan, 169 p.
14. *Kagawa, T., and Al-Khatib, M. A.*, 1993, Earthquake response of a 30-story building during the Loma Prieta earthquake, in *Third Int'l Conf. On Case Histories of Geotechnical Engineering*, Univ. Of Missouri-Rolla, p. 547–553.
15. *Kambhatla, A., Aktan, H. M., Kagawa, T. and Celebi, M.*, 1992, Verification of simple soil-pile foundation-structure models, in *Structures Congress '92*, ASCE, NY, p. 721–724.
16. *Lee, K. L., W. F. Marcuson, K. H. Stokoe, and F. Y. Yokel*, editors, 1978, Research needs and priorities for geotechnical earthquake engineering applications, Workshop at the University of Texas, Austin, June 1978.
17. *Marshall, R. D., Phan, L. T., and Celebi, M.*, 1992, Measurement of Structural Response Characteristics of Full-Scale Buildings: Comparison of Results from Strong-Motion and Ambient Vibration Records. NISTIR 4884 (National Institute of Standards and Technology), Gaithersburg, MD.
18. *Page, R., Boore, D. M., Bucknam, R. C., and Thatcher, W. R.*, 1992, Goals, Options, and Priorities for the USGS Earthquake Hazards Reduction Program: 1991–1995, USGS Circular 1079, February 1992.
19. *Safak, E., and Celebi, M.* (1992). Recorded Seismic Response of Pacific Park Plaza (Part II–System Identification). *ASCE (Journal of Structural Engineering)*, June 1992.

20. *Stephen, R. M., Wilson, E. L., and Stander, N.*, 1985, Dynamic properties of a thirty-story condominium tower building, (EERC Report 85-03), EERC, Univ. Of Calif., Berkeley, Ca., April 1985.

21. *Tarquis, F., and Roesset, J.*, 1988, Structural response and design response spectra for the

1985 Mexico City earthquake: University of Texas, Austin, Texas, Report No. GD89-1, 208p.

22. *Youd, T. L., Steidl, J. H., and Nigbor, R. L.*, (this volume), Ground Motion, Pore Water Pressure and SFSI Monitoring at NEES Permanently Instrumented Field Sites.