

Моделирование реакции грунта при сейсмическом микрорайонировании строительных участков

© Ю. В. Семенова, 2005

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 6 ноября 2015 г.

Представлено членом редколлегии А. В. Кензерой

Захист від руйнівних землетрусів вимагає надійних даних про поведінку ґрунту при землетрусах. У статті розглянуто підходи до визначення резонансних властивостей верхньої частини розрізу геологічного середовища під будівельним майданчиком для сейсмостійкого проектування. Аналізується розвиток наукових поглядів на лінійні і нелінійні моделі геологічного середовища. Розглянуто теоретичні передумови лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи при землетрусах. Проаналізовано переваги та недоліки цих методів і сформульовано критерії їх застосовності. Представлено і проаналізовано результати лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання реакції реальної ґрунтової товщі під реальним будівельним майданчиком у м. Києві на землетруси різних рівнів.

Ключові слова: сейсмічне микрорайонування, амплітудно-частотна характеристика ґрунтів, резонансні властивості ґрунтів, сейсмостійке будівництво, методи моделювання реакції середовища на сейсмічні впливи.

Введение. Для проектирования сейсмостойкого строительства в рамках сейсмического микрорайонирования (СМР) важно знать спектральный состав колебаний грунтов площадки при сильных землетрясениях. Однако относительная редкость возникновения последних и современное состояние сети сейсмических станций, регистрирующих движения грунта, значительно усложняют эту задачу. Записать максимальные сейсмические события из наиболее опасных для площадки сейсмоактивных и предположительно активных сейсмических зон за время, отведенное для инженерно-геологических и сейсмических изысканий, как правило, не удастся. Поэтому целью настоящей статьи является анализ существующих расчетных методов моделирования реакции грунтов на конкретных строительных площадках на количественные характеристики их сейсмической опасности. На его основании осуществляется выбор методов, которые соответствуют требованиям, необходимым для оценки сейсмической опасности строительных участков в сейсмических зонах страны.

В задачах сейсмического микрорайонирования применяются различные расчетные методы, позволяющие приблизительно оценить возможные резонансные периоды грунта и учесть их при синтезировании расчетных акселерограмм [Сейсмическое..., 1984]. Расчетные методы как наиболее оперативные и менее

трудоемкие широко используются для оценки сейсмоопасности строительных площадок. К настоящему времени накоплен значительный опыт о том, что балльность не определяет однозначно сейсмическую опасность от землетрясений расчетной интенсивности. Для проектирования сейсмостойких сооружений необходимы также данные о преобладающих частотах при сильных землетрясениях, длительности колебаний, форме спектров колебаний и других параметрах сейсмической опасности строительной площадки [Джурик и др., 2012].

Широкое распространение в работах по СМР получил эмпирический метод получения частотных характеристик ґрунтовой товщі под строительными площадками с помощью регистрации землетрясений, специальных взрывов и микросейсм. Частотные особенности колебаний ґрунтов этим методом оценивают по спектральному отношению одноименных горизонтальных и вертикальных составляющих сигнала, зарегистрированных на площадке и на эталонном ґрунте. В последнее время также часто используется метод Накамура, в котором для получения частотных характеристик среды используется отношение амплитудных спектров горизонтальных составляющих колебаний к спектрам вертикальных [Nakamura, 2000].

В формировании микросейсм, как правило, участвуют многочисленные искусственные ис-

точники, вклад которых плохо поддается учету. Некорректность в решение задачи вносят минимумы спектральной плотности колебаний на эталонном грунте. Это определяет актуальность и востребованность расчетных методов, позволяющих моделировать особенности воздействия локальных грунтовых условий на строительных площадках. Совокупное применение эмпирических и расчетных методов значительно повышает обоснованность прогнозов сейсмической опасности, выраженных в единицах сейсмической интенсивности либо в форме расчетных акселерограмм.

В настоящее время моделирование реакции грунта при сейсмических воздействиях является одним из наиболее важных и в то же время проблемных вопросов инженерной сейсмологии.

Примеры разрушительных землетрясений (Спитак (1988); ЛомаПриета (1989); Нортридж (1994); Кобе (1995); Нефтегорск (1995); Тайвань (1999); Гуджарат (2001)) последних десятилетий показывают, что повреждения зданий и сооружений на разных грунтовых условиях существенно различаются. Часто разрушаются крепкие и, на первый взгляд, «сейсмостойкие» сооружения, в то время как менее крепкие малоэтажные здания остаются неповрежденными. Подобное явление наблюдалось при землетрясении 19 сентября 1985 г. с $M=8,0$ на побережье Мексики. На расстоянии 400 км от эпицентра в нижней части Мехико-Сити преобладали разрушения зданий 5—15 этажей, расположенных на рыхлых озерных отложениях, усиливающих определенные частоты колебаний в спектре землетрясения. В то же время на расстоянии нескольких километров в зданиях, расположенных на вулканических (метаморфических) породах, землетрясение ощущалось мало или вообще не вызвало повреждений. Инструментально установлено, что критические частоты колебаний спектра движения на скальных грунтах составляли лишь 10 % от измеренных на грунтах в районе сильных повреждений. Сильные разрушения в Мехико-Сити от удаленных землетрясений случались и ранее, что нашло отражение в строительных нормах. Однако при землетрясении 1985 г. усиление амплитуды колебаний было больше ожидаемого [Lermo et al., 1988; Singh et al., 1988]. Следовательно, необходимы более надежные и адекватные модели поведения грунта при сильных и длительных сейсмических воздействиях.

Понятие «грунт» объединяет различные

генетические виды горных пород (магматические, осадочные, метаморфические), залегающие в поверхностном слое земной коры и используемые в инженерной практике как основание для возведения сооружений [Павленко, 2009].

Грунт как природная многокомпонентная система является специфической средой для распространения сейсмических волн. Он изменяет не только динамические характеристики этих волн (вплоть до полного поглощения или преобразования типа волны), но и свои свойства, причем эти процессы неотделимы друг от друга. Грунты способны также изменять частотный состав сейсмических волн благодаря своим фильтрующим свойствам [Вознесенский, 1999]. Эти эффекты обусловлены резонансными явлениями, поглощением из-за неидеальной упругости среды, рассеянием волн на различных неоднородностях, отражением и переизлучением волн на границах слоев.

Выяснением природы поглощения сейсмических волн впервые начали заниматься Б. Б. Голицын [Голицын, 1912] и Х. Джеффрис [Jeffreys, 1917]. В настоящее время существует множество литературных источников, в которых рассматривается природа поглощения сейсмических волн в грунтовых средах и предлагаются различные концепции, трактующие механизм их поглощения. Классические теории поглощения волновой энергии базируются на представлениях о реальной среде как о сплошном твердом теле, в котором наряду с чистой упругостью (описываемой законом Гука, при котором упругие напряжения связаны с деформациями линейным законом) предполагается некоторый механизм диссипации сейсмической энергии, связанный с вязкостью, внутренним трением (классическое поглощение) и упругим последствием (релаксационное поглощение). Математический аппарат этих теорий повторяет ход решения задачи теории упругости, а физические связи между теорией упругости, а физические связи между приложенными напряжениями и деформациями задаются уравнениями состояния среды.

Механизм поглощения упруговязких сред, в которых к упругим напряжениям добавляются дополнительные напряжения, обусловленные вязкостью и внутренним трением, описывается уравнениями состояния тела Кельвина—Фойгта, для случая релаксации напряжений и проявления остаточных деформаций в теле — уравнениями Максвелла. Модели, основанные на классической теории вязкоупругости, с приемлемой степенью точности можно ис-

пользовать при сравнительно низком (порядка 10^{-3} — 10^{-4}) уровне циклической сдвиговой деформации. В такой модели напряженно-деформированное состояние среды подчиняется линейному закону Гука с учетом энерго-рассеивающих свойств.

Фильтрация сейсмических волн за счет поглощения обусловлена зависимостью коэффициента поглощения амплитуды колебаний от частоты, причем в зависимости от выбора идеализированной модели распространения волн в геологической среде этот показатель может быть пропорционален либо квадрату, либо первой степени частоты колебаний [Красников, 1970]. Для упруговязкой среды (соответствующей гипотезе Фойгта) амплитудный коэффициент поглощения D продольных, поперечных и поверхностных волн пропорционален квадрату частоты ($D \sim \omega^2$), а для среды с упругими последствиями — первой степени частоты колебаний ($D \sim \omega$). Следует отметить, что большинство экспериментальных данных, несмотря на значительный разброс, указывает все же на линейную зависимость (с точностью до множителя) коэффициента поглощения сейсмических волн от частоты в широком диапазоне — от 10 Гц до 10 МГц [Берзон и др., 1962]. А поскольку высокочастотные компоненты волн затухают сильнее, то при удалении от источника колебаний их спектры становятся более низкочастотными, что вызывает изменение формы волны. Таким образом, поглощение волн в грунтах действует на спектральный состав сейсмических волн аналогично фильтру низкой частоты, подавляя высокочастотную часть спектра. Изменение спектров с расстоянием за счет поглощения выражено тем сильнее, чем больше поглощение и чем шире исходный спектр.

Часто в качестве характеристики поглощающих свойств грунтов вместо коэффициента поглощения используют безразмерный декремент поглощения $\Delta = \alpha \lambda$, где λ — длина волны. Этот показатель удобен тем, что для значительного диапазона частот слабо зависит от частоты колебаний или совсем от нее не зависит. Значение декремента поглощения для разных пород и типов волн варьирует от 0,01—0,02 до 0,9—0,95 [Берзон и др., 1962; Красников, 1970]. Эти вариации связаны со свойствами самих пород, их составом и строением, а также с напряженным состоянием грунта. При прочих равных условиях наблюдается закономерное снижение коэффициента и декремента поглощения с увеличением глубины залегания

породы. На поглощение сейсмических волн существенно влияет также выветрелость и трещиноватость пород.

В дисперсных грунтах существенное значение имеет также влажность грунтов. Это обусловлено разным относительным вкладом процессов, вызывающих поглощение энергии волны. Так, в сухих дисперсных грунтах (главным образом песках) поглощение небольшое, обусловлено «сухим» кулоновским трением [Stoll, 1985]. В водонасыщенных грунтах действует поглощение за счет вязких потерь в поровой жидкости. При этом возможны два различных эффекта. Поглощение при общем движении поровой влаги относительно скелета грунта проявляется в сильном изменении затухания в узком диапазоне частот. Такой механизм возможен только в песчаных грунтах с высокой проницаемостью, а в более дисперсных отложениях — только при очень высоких частотах.

При наличии в грунте неоднородностей, размер которых в несколько десятков или даже сотни раз меньше длины волны, волна претерпевает рассеяние. Амплитуда образующихся рассеянных волн прямо пропорциональна квадрату частоты волны [Берзон и др., 1962]. Следовательно, спектр волны, встретивший ряд таких неоднородностей, из-за рассеяния высокочастотных компонент становится более низкочастотным.

Рассмотренные эффекты могут обуславливать существование в верхней части разреза под исследуемым строительным участком так называемой «зоны малых скоростей», сложной рыхлыми и сильно выветрелыми породами, для которых характерна резкая изменчивость скоростей упругих волн. В частности, скорость распространения продольных волн в зависимости от влажности, пористости и других факторов может варьировать от 80—100 до 1500—1700 м/с, увеличиваясь с глубиной [Красников, 1970].

Тонкие слои действуют на спектральный состав сейсмических волн аналогично частотным фильтрам разных типов [Вознесенский, 1999]: полосового, режекторного, высоких или низких частот — в зависимости от типа волны и строения самых тонких слоев. Под тонким (для определенного типа волны) понимается слой, мощность которого не превышает двух длин волны. В среде, содержащей несколько тонких слоев, благодаря совместному действию поглощения и тонкой слоистости спектры отраженных и проходящих волн могут значительно от-

личаться от спектра падающей волны. Тонкий слой может, например, пропускать колебания в волне данного типа только из полосы частот, близкой к его собственной, вызывая резонансное усиление колебаний на поверхности массива. Результатом такого усиления колебаний стали значительные разрушения в некоторых районах Сан-Франциско при Калифорнийском землетрясении Лома Приета 17 октября 1987 г. Отмечено 6—10-кратное увеличение амплитуд колебаний на поверхности молодых глинистых грунтов по сравнению со скальным основанием для периодов около 1 с и 2—3-кратное для периодов 0,2—0,3 с [Boatwright et al., 1992].

Наличие в грунтах различных границ и неоднородностей может обуславливать также зависимость скорости распространения волны от ее частоты — дисперсию скорости. Этот эффект приводит к искажению формы бегущей волны, так как ее более высокочастотные компоненты (распространяющиеся, в соответствии с принципом суперпозиции, независимо) отстают от низкочастотных (нормальная дисперсия) или, наоборот, опережают их (аномальная дисперсия). При этом форма волны с узким спектром изменяется, но форма огибающей остается без изменений и перемещается с групповой скоростью. При распространении широкополосного колебания форма огибающей изменяется.

Кроме волновых, существуют и иные способы изучения энергопоглощающих свойств грунтов [Вознесенский, 2014]. Для их оценки используют, например, параметр, называемый коэффициентом потерь η [Ишихара, 2006], коэффициентом удельного поглощения или фактором механических потерь [Кондратьев, 1986]. Необратимые потери энергии волн в реальных средах приводят к тому, что развитие деформаций отстает по времени от напряжения (сдвинуто по фазе) и кривая зависимости между напряжением и деформацией, измеренными в одной точке среды, образует петлю гистерезиса. Коэффициент потерь рассчитывают по петле гистерезиса циклической кривой «напряжение—деформация» по экспериментальным данным: по отношению касательных напряжений при нулевой деформации к касательным напряжениям при максимальной деформации или по отношению потери энергии за один цикл к ее максимальной сохраненной величине. Коэффициент потерь определяют еще как тангенс угла сдвига фаз между напряжениями и деформациями.

При моделировании сейсмической реак-

ции грунта в качестве энергопоглощающего параметра часто используют коэффициент поглощения (демпфирования) D , который для вязкоупругой модели принимается равным половине коэффициента потерь:

$$D = \frac{\eta}{2} = \frac{\Delta W}{4\pi W_{\max}}$$

где ΔW — изменение энергии W_{\max} за один цикл.

Результаты многочисленных лабораторных экспериментов на грунтах позволяют утверждать, что поглощающие свойства практически не зависят от частоты в диапазоне обычных сейсмических нагрузок [Ишихара, 2006].

Наиболее точный метод оценки фильтрующих свойств грунтов основан на определении их амплитудно-частотной характеристики, которая в свою очередь является комплексной функцией частоты. Амплитудно-частотная характеристика грунтов определяет изменения спектральных мощностей колебаний грунта с учетом их затухания. Иногда вместо термина «амплитудно-частотная характеристика» в литературе используют понятие «коэффициента спектрального усиления» [Бат, 1980]. А. А. Гусев предлагает пользоваться близкими по смыслу терминами «приращение логарифма спектра реакции» или «приращение спектра Фурье» [Гусев, 2002].

Долгое время считалось, что на рыхлых грунтах уровень амплитуды примерно вдвое выше [Аптикаев, 2001]. Это следовало из наблюдаемого повышения сейсмической интенсивности на рыхлых грунтах. Необходимо отметить, что в существующих строительных нормах СНиП II-7-81 [Строительство..., 1987] и ДБН В.1.1:12-2014 [Строительство..., 2014] макросейсмическую балльность ошибочно связывают только с уровнем амплитуды колебаний. В действительности связь между амплитудой смещений, скоростей и ускорений колебаний является статистически обусловленной (см. приложение к ДСТУ «Шкала сейсмічної інтенсивності») [Національний..., 2010]. Увеличение амплитуды колебаний, пропорциональное корню квадратному из акустической жесткости грунтов (произведение скорости волны на плотность среды), было подтверждено экспериментально при регистрации слабых колебаний. Во многих отечественных публикациях по микрорайонированию принято считать, что на грунтах 1-й категории по сравнению с грунтами 2-й категории происходит уменьшение сейсмической

интенсивности на один балл. На грунтах 3-й категории, наоборот, усиление сейсмической интенсивности на один балл. При этом предполагаются изменения в уровне амплитуд по сложному вероятностному соотношению. Следует учитывать также, что приращение сейсмической интенсивности связано не только с изменениями амплитуды колебаний, но и с их длительностью.

В работе [Booge et al., 1980] амплитуда скоростей на рыхлых грунтах в среднем в 1,7 раза выше, чем на скальных. По данным работы [Инженерные..., 1988]

$$\Delta I = 3,3 \lg \frac{A_1}{A_2},$$

что примерно соответствует приращению интенсивности в 0,76 балла.

В более поздних работах [Joyner et al., 1981] эта оценка снижена (изменение амплитуды в 1,5 раза приводит к изменению интенсивности на 0,6 балла). Встречаются работы, в которых не отмечается повышения уровня колебаний на рыхлых грунтах. Например, в работе [Trifunac, 1976] утверждается, что по крайней мере для ускорений не наблюдается повышения уровня колебаний на рыхлых грунтах (скорее, наоборот).

В работе [Mc Guire, Vamhard, 1979] показано, что при одинаковой интенсивности более высокий уровень наблюдается на скальных грунтах, в среднем в 2,25 раза.

В работах [Campbell, 1981, 1982] приводится оценка разницы между амплитудами на грунтах различного типа. Показано, что влиянию рыхлого слоя мощностью $h < 5$ м, залегающего на скальных породах, можно не придавать значения. Пренебрежение слоем аллювия $5 < h < 10$ м приводит к тому, что уровень амплитуд на скальном грунте на 26 % выше, чем на рыхлых при 90 %-ном уровне значимости. В более поздней работе [Campbell, 1997] приводится оценка разницы между амплитудами на грунтах 1-й и 2-й категорий (разница небольшая, имеющая тенденцию увеличиваться с расстоянием).

Близкие результаты были получены итальянскими исследователями [Chiaruttini et al., 1979, 1981]. Авторы считают, что различий в ускорениях для скальных и нескальных грунтов нет. Заметное увеличение амплитуд наблюдается только для тонкого слоя аллювия, лежащего на скальном основании. Из материалов, приведенных в работе [Fukushima, Tanaka,

1990], следует, что для рыхлых грунтов, по отношению к средним, наблюдается увеличение амплитуды на 42 %, а для скальных грунтов — уменьшение на 37 %. Другими словами, различия в сейсмическом эффекте на рыхлых и скальных грунтах достигают 0,9 балла [Инженерные..., 1988].

В работе [Spudich et al., 1997] разница в амплитудах на рыхлых и скальных грунтах составила всего 19 %. Наибольшая разница по результатам спектрального анализа наблюдается в диапазоне периодов 0,6—1,0 Гц — 64 %. В работе [Atkinson, Booge, 1997] отмечается усиление колебаний на грунтах 2-й категории мощностью более 60 м, залегающих на коренных породах. По отношению к грунтам 1-й категории в диапазоне частот 0,5—2,0 Гц происходит усиление примерно в 1,9 раз, в диапазоне 5,0—10,0 Гц — примерно в 1,5 раза. На частоте 20 Гц усиление амплитуд не происходит (осредненные оценки).

Анализ проявления большинства разрушительных землетрясений показывает, что, как правило, чем «мягче» грунт, тем он опасней в сейсмическом отношении [Заалишвили, 2009].

В работе [Duke et al., 1972] по записям землетрясения в Сан Фернандо в 1971 г. обнаружено, что на эпицентральных расстояниях менее 50 км наблюдаются более высокие амплитуды колебаний на скальных грунтах, а на расстояниях свыше 50 км — на рыхлых грунтах. Физическая причина этого явления не анализировалась.

Следовательно, в ряде случаев увеличение сейсмической интенсивности на рыхлых грунтах может сопровождаться не повышением, а понижением уровня колебаний. Объяснение описанных выше эффектов изменения балльности площадки за счет влияния местных условий становится понятной в результате теоретического моделирования частотных характеристик для моделей грунта.

В результате исследований [Павленко, 2009] установлены физические механизмы преобразования сейсмических колебаний в мягких приповерхностных грунтах:

– переход сейсмических волн в приповерхностные слои с существенно меньшими значениями скоростей и плотностей, в соответствии с законом сохранения плотности потока энергии, приводит к тому, что амплитуды волн резко возрастают;

– резонансные явления, захват сейсмических волн верхней частью разреза вследствие контраста импедансов приповерхностных

осадочных и подстилающих скальных пород, также приводящие к возрастанию амплитуд колебаний;

– отмечается и противоположная тенденция: уменьшение амплитуд колебаний из-за нелинейной связи напряжение—деформация в грунтах (однако в водонасыщенных грунтах нелинейность зависимости напряжение—деформация такова, что может приводить и к увеличению амплитуд колебаний при больших деформациях).

Действие трех перечисленных механизмов обычно приводит к тому, что в грунтах наблюдается усиление слабых сигналов и ослабление сигналов большей интенсивности, что неоднократно отмечалось сейсмологами (см. например [Yoshida, Iai, 1998]).

Все эти механизмы взаимосвязаны и обычно учитываются при моделировании колебаний на поверхности грунтовых толщ, за исключением механизмов нелинейности отклика грунта, учет которых обычно специально оговаривается. Проявления первых двух механизмов зависят от соотношения длины волны и толщины слоя. При толщине слоя малой, по сравнению с длиной волны, амплитуда колебаний в слое определяется только его сейсмической жесткостью, при увеличении толщины слоя проявляются его резонансные свойства, и дополнительное нарастание амплитуды при продолжительных колебаниях может быть 3—4-кратным.

Механизмы линейных преобразований сейсмических волн в приповерхностной грунтовой толще, которые приводят к усилению колебаний и резонансным явлениям, изучены достаточно хорошо. В отличие от нелинейных механизмов они в полной мере учитываются в практике сейсмического микрорайонирования. Поскольку сейсмическое микрорайонирование обычно проводится для территорий, которые могут подвергаться воздействию сильных землетрясений, адекватный учет нелинейного отклика грунта необходим [Павленко, 2009].

Нелинейность реакции грунта вызывают как изменения спектрального состава сейсмических колебаний, иногда очень существенные, так и усиление сейсмических колебаний. При достаточно высокой интенсивности колебаний начинают действовать нелинейные механизмы поглощения, которые приводят к ослаблению колебаний на высоких частотах, но не ослабляют при этом низкочастотные колебания. Резонансные частоты грунтов оказываются

зависящими от интенсивности воздействия и при сильных воздействиях могут заметно снизиться относительно значений, определяемых по записям сейсмического шума или слабых землетрясений [Павленко, 2009].

Методы моделирования реакции грунта на сейсмические воздействия позволяют рассчитывать спектральные характеристики и акселерограммы на свободной поверхности или во внутренних точках слоистой среды при падении на ее подошву под произвольным углом из нижнего полупространства продольной или поперечной волны. Можно использовать линейный (линейное моделирование) или нелинейный подход (эквивалентное линейное и нелинейное моделирование). При заданных параметрах каждого слоя связь смещений и напряжений может быть выражена системой линейных уравнений в матричном виде. Прохождение волной твердого упругого слоя описывается матрицей 4-го порядка. Если в системе слоистой толщи входит слой со свойствами жидкой среды, ранг матрицы понижается до двух. Прохождение волной n слоев описывается с помощью произведения n матриц, каждая из которых соответствует определенному слою. Впервые идея описания процесса прохождения сейсмической волной системы слоев с помощью матричного метода была реализована в работах [Thompson, 1950; Haskell, 1951]. Матричный метод Томпсона—Хаскелла был внедрен в вычислительной программе [Ратникова, Левшин, 1967; Ратникова, 1984] для линейного моделирования реакции грунтовой среды на сейсмические воздействия. Однако явлению распространения колебаний часто свойственна нелинейность. В этом случае при моделировании реакции на сейсмические воздействия следует учитывать гистерезисную зависимость между напряжением и деформацией. Основные параметры грунта, определяющие форму гистерезисных зависимостей, — коэффициент поглощения, модуль сдвига, максимальный модуль сдвига и закон уменьшения модуля сдвига при нагружении грунта.

Принято считать, что при малых деформациях система подчиняется закону Гука. При интенсивных сейсмических воздействиях в грунтах возникают явления, которые не могут быть описаны линейной теорией упругости. Нелинейность зависимости между напряжениями и деформациями в грунтах при достаточно высоких напряжениях приводит к тому, что при увеличении интенсивности землетрясения нарушается пропорциональность между

напряжениями и деформациями и наступает явление насыщения, когда напряжения растут медленнее, чем при меньших значениях деформаций. Значение напряжений, при которых исчезает пропорциональность зависимости между напряжениями и деформациями, является порогом упругости. Порог упругости для разных грунтов может существенно различаться [Алешин, 2010]. Он определяется в первую очередь поглощающими свойствами грунтов [Вознесенский, 2014]. Порог упругости более высокий для связных грунтов с высокой пластичностью, для водонасыщенных несвязных грунтов характерна гистерезисная зависимость «напряжение—деформация». В связи с вышеизложенным при моделировании реакции грунта на сейсмические воздействия в последнее время значительное внимание уделяется нелинейным подходам.

Эквивалентное линейное моделирование — один из способов, позволяющих учитывать нелинейные свойства грунтов, разработан [Idriss, Seed, 1968; Schnabel et al., 1972]. Широко применяется при сейсмическом микрорайонировании во многих странах. Метод постоянно усовершенствуется путем использования частотно-зависимых параметров грунта. Однако в работе [Suetomi, Yoshida, 1996] уточняется, что частотно-зависимым является только модуль сдвига, но не поглощение.

При эквивалентном линейном моделировании грунт рассматривается как линейный вязкоупругий материал, а его нелинейные свой-

ства учитываются путем введения зависимости модуля сдвига и коэффициента поглощения от величины деформации сдвига. Такие зависимости подбираются отдельно для каждого слоя грунта, слагающего разрез под строительным участком, в зависимости от литологического состава и глубины залегания слоев. Важно разработать правильный подход к выбору этих зависимостей для каждого слоя грунтовой толщи.

Еще в 1970-х годах в результате лабораторных испытаний были найдены зависимости модуля сдвига и коэффициента поглощения от величины сдвиговой деформации. Результаты изложены, например, в работах [Seed, Idriss, 1970; Hardin, Drnevich, 1972].

Характер зависимостей модуля сдвига и коэффициента затухания от величины деформации зависит от состава грунта, водонасыщенности, структурных связей между частицами, глубины залегания и др.

Например, пластичность грунта влияет как на уменьшение модуля сдвига, так и на величину поглощения. Коэффициент поглощения в грунтах с высокой пластичностью ниже, чем в непластичных грунтах при одинаковых амплитудах деформаций (рис. 1). Для грунтов с индексом пластичности $PI=0$ зависимость поглощения от амплитуды деформации приблизительно совпадает с аналогичной зависимостью для крупнозернистых грунтов. Для гравелистых грунтов процессы поглощения аналогичны процессам в песчаных грунтах [Seed, Idriss, 1982].

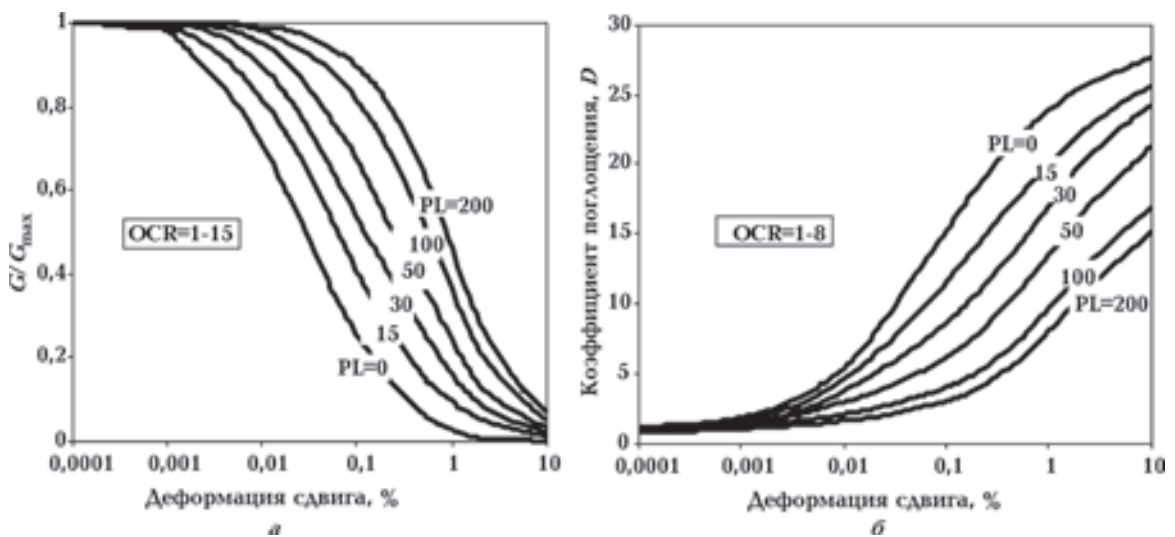


Рис. 1. Зависимость модуля сдвига (а) и коэффициента поглощения (б) от амплитуды сдвиговых деформаций в песке с различной пластичностью (из работы [Vucetic, Dobry, 1991]).

Эмпирическое соотношение, связывающее коэффициент поглощения в грунте с его модулем сдвига и пластичностью [Ishibashi, Zang, 1993], имеет следующий вид:

$$D = 0,333 \frac{1 + \exp(-0,0145 PL^{1,3})}{2} \times \left[0,586 \left(\frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 1,547 \frac{G}{G_{\max}} + 1 \right],$$

где D — коэффициент поглощения, PL — пластичность, G — модуль сдвига.

Влияние других факторов на характер зависимостей модуля сдвига и коэффициента поглощения от величины деформации сдвига показано в работе [Kramer, 1996]. Обзоры работ, в которых используются зависимости модуля сдвига и коэффициента поглощения от величины сдвиговой деформации, даны в работах [Richart, 1978; Ishihara, 1982; Woods, 1991 и др.].

Моделирование реакции грунта на сейсмическое воздействие представляет собой классическую задачу инженерной сейсмологии о распространении сейсмических колебаний в волне, падающей снизу из упругого полупространства, в толще вышележащих осадочных слоев. Реакция грунта должна рассчитываться с учетом описанных выше линейных и нелинейных механизмов преобразования сейсмических волн в грунтах. Вычисления проводятся в частотной области итеративно. Вначале выбираются приблизительные средние значения модуля сдвига и коэффициента поглощения в грунтовых слоях в соответствии с заданными значениями деформаций. По зависимостям модуля сдвига и коэффициента поглощения от деформации определяются эффективные модули сдвига и коэффициенты поглощения грунта. По ним снова рассчитываются деформации и напряжения. Если рассчитанные деформации существенно отличаются от заданных, цикл вычислений повторяется.

Ограничением эквивалентного линейного моделирования является принятое предположение, что деформация становится равной нулю при прекращении нагрузки и, потому что линейно-упругий материал не имеет пределов упругости и пластичности. Разрывов и разрушений в нем не возникает [Kramer, 1996].

При моделировании интенсивных землетрясений следует использовать *нелинейное моделирование*.

В 1970—1980-е годы было трудно найти

подтверждение нелинейности реакции грунта в записях сильных землетрясений, но в последние десятилетия база данных существенно увеличилась, и сейсмологи уже могут по характерным волновым формам на акселерограммах идентифицировать нелинейность в реакции грунта [Archuleta, 1998].

Нелинейную реакцию грунтовой толщи на сейсмические воздействия можно вычислить с помощью программы NERA (Nonlinear Earthquake site Response Analyses) [Bardet, Tobita, 2001]. Программа основана на модели среды, предложенной в работах [Iwan, 1967; Mroz, 1967], часто называемой IM моделью. Модель предполагает использование нелинейных кривых напряжение—деформация, используя ряд n механических элементов, имеющих различные жесткость K_j и сопротивление скольжения R_j , причем $R_1 < R_2 < \dots < R_n$. Изначально остаточные напряжения равны нулю. При монотонно возрастающей нагрузке элемент j деформируется, пока напряжение сдвига τ достигает сопротивления скольжения R_j . После этого элемент j сохраняет положительное остаточное напряжение, равное R_j .

Напряжения и деформации связаны соотношением

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = H,$$

где тангенциальный модуль сдвига

$$H = \begin{cases} H_1 = k_1, & 0 \leq \tau < R_1, \\ H_2 = (k_1^{-1} + k_2^{-1})^{-1}, & R_1 \leq \tau < R_2, \\ \dots \\ H_{n-1} = (k_1^{-1} + k_2^{-1} + \dots + k_{n-1}^{-1})^{-1}, & R_{n-2} \leq \tau < R_{n-1}, \\ H_n = (k_1^{-1} + k_2^{-1} + \dots + k_{n-1}^{-1} + k_n^{-1})^{-1}, & R_{n-1} \leq \tau < R_n, \\ 0, & \tau = R_n. \end{cases}$$

Уравнение, описывающее динамику грунтовой среды, решают, используя метод центральных разностей.

Тангенциальный модуль сдвига H связан с модулем сдвига

$$H_i = \frac{G_{i+1}\gamma_{i+1} - G_i\gamma_i}{\gamma_{i+1} - \gamma_i}, \quad i=2, \dots, n-1, \quad H_n = 0,$$

и может быть вычислен при заданной зависимости $G(\gamma)$.

Предполагая, что напряжение сдвига τ изначально равно нулю,

$$R_i = G_i\gamma_i, \quad i=1, \dots, n.$$

Частотная характеристика геологической среды на строительной площадке по ул. Глубочицкая в Киеве. Для построения частотной характеристики грунтовой толщи под строи-

тельной площадкой многоэтажного жилого дома по ул. Глубочицкая использовались входные данные в виде горизонтально-слоистой модели, представленной в таблице.

Модель среды под площадкой проектируемого строительства многоэтажного жилого дома по ул. Глубочицкая в г. Киев

Литологический состав	Интервал глубин H , м	Скорость сейсмических волн		Декременты поглощения сейсмических волн		Плотность пород, $г/см^3$
		Продольной, м/с	Поперечной, м/с	Продольной	Поперечной	
Насыпные грунты	0—2,5	290	170	1,6	1,4	1,6
Супесь	2,5—12	570	190	1,55	1,32	1,7
Песок пылеватый и мелкий в основании прослойка супеси	12—24	880	230	1,33	1,24	1,89
Переслаивание супесей, суглинков и песков	24—42	1330	270	1,2	0,9	1,89
Суглинок (наглинок) и глина мергельная	42—67	1500	320	0,6	0,7	1,87
Пески (в кровле супеси и суглинки)	67—98	1600	340	0,5	0,6	1,9
Глина песчанистая	98—112,5	2100	520	0,45	0,6	1,93
Мергель	112,5—130	2300	640	0,3	0,4	2,0
Глина, алевролит	130—242	2600	920	0,3	0,4	1,98
Песок, песчаник с/з и к/з, галечник, гравий	242—310	2800	1300	0,15	0,2	1,94
Гранит, диорит	310 — ∞	5200	2800	0,09	0,1	2,6

Примечание: уровень грунтовых вод — 28—29 м.

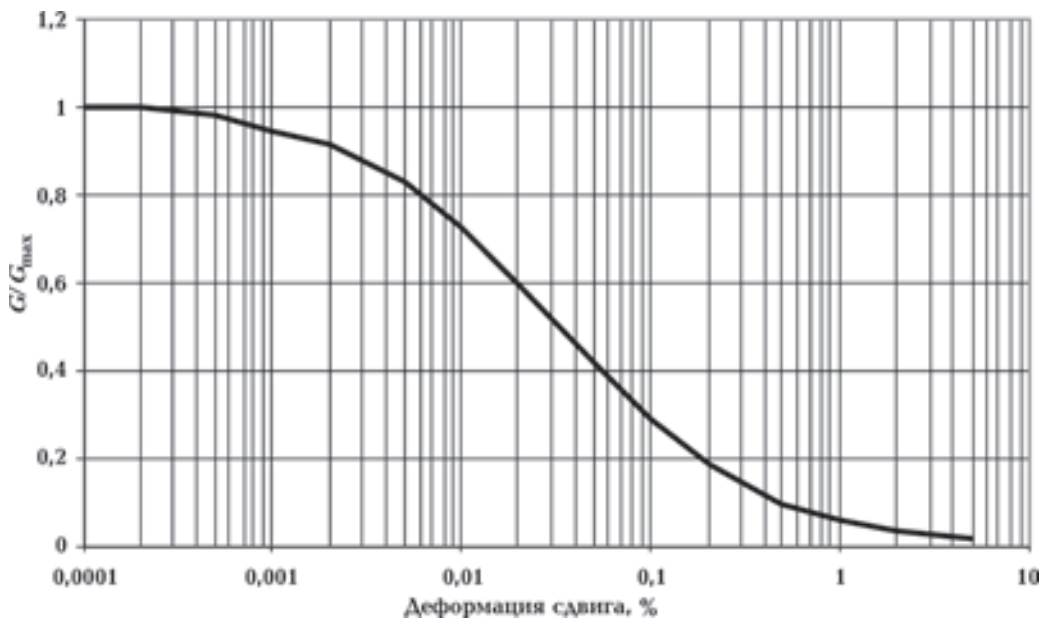


Рис. 2. Зависимость модуля сдвига от амплитуды деформации сдвига для слоя, сложенного песком пылеватым и мелким в основании с прослойкой супеси под площадкой строительства многоэтажного жилого дома по ул. Глубочицкая в г. Киев.

Для каждого слоя модели грунта были подобраны зависимости модуля сдвига и коэффициента поглощения от амплитуды деформации сдвига. На рис. 2 и 3 приведены примеры зависимостей для третьего слоя, сложенного в основании пылеватым и мелким песком с прослойкой супеси.

На рис. 4 представлена амплитудно-частотная характеристика грунтовой толщи под строительной площадкой.

Видно, что амплитудно-частотная характеристика при линейном моделировании (среда считается идеально упругой) отличается от полученной с помощью эквивалентного линей-

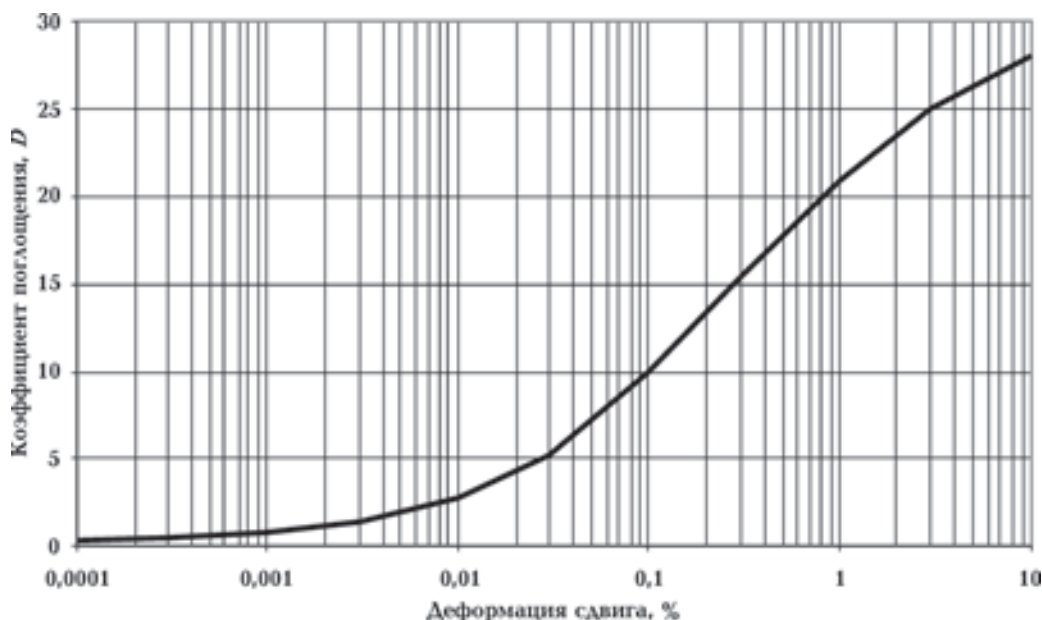


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения от амплитуды деформации сдвига для слоя, сложенного песком пылеватым и мелким в основании с прослойкой супеси под площадкой строительства многоэтажного жилого дома по ул. Глубочицкая в г. Киеве.

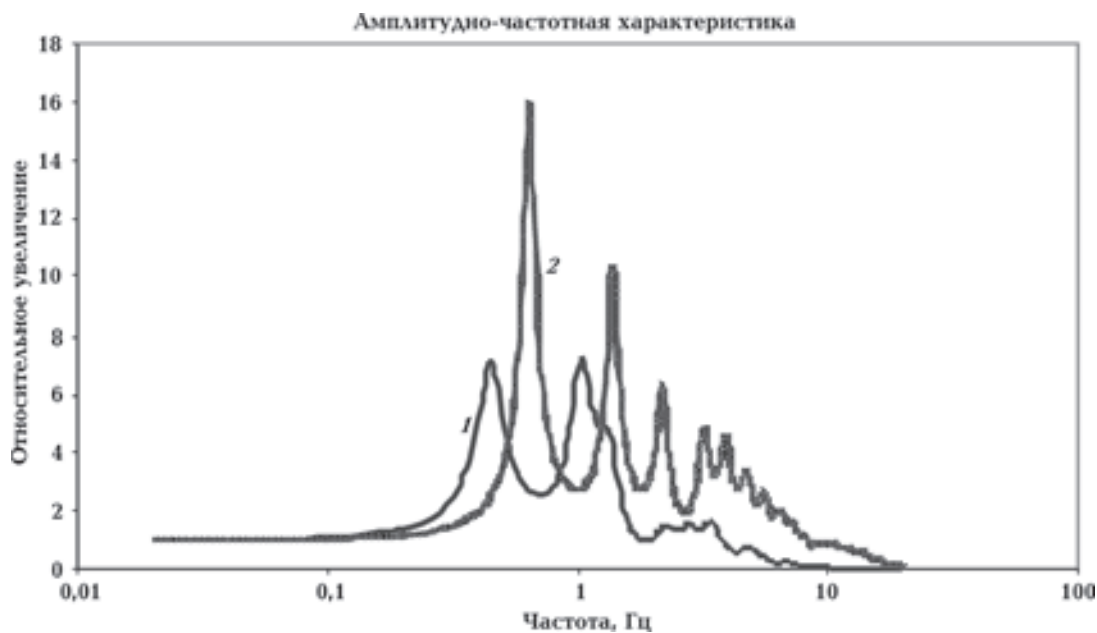


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика грунтовой толщи под площадкой строительства многоэтажного жилого дома по ул. Глубочицкая в г. Киев, полученная эквивалентным линейным моделированием (1); линейным моделированием (2), с использованием программного комплекса ProShake [Schnabel et al., 1972; ProShake..., 1998].

ного моделирования (в котором учитываются нелинейные свойства грунтов, предполагая, что коэффициент поглощения и модуль сдвига зависят от уровня деформации). Учитывая нелинейные свойства грунтов, наблюдаются амплитудная трансформация и смещения абсолютных максимумов в сторону низких частот, обусловленные, по-видимому, влиянием поглощения. Такое явление можно объяснить следующим механизмом. Нелинейность трансформирует (другими словами, «перекачивает») энергию из частот, соответствующих частотному максимуму, в высокочастотную область, где она интенсивно поглощается. На низкие частоты поглощение действует относительно слабо, и они без заметных энергетических потерь распространяются в грунтовой толще. Аналогичные эффекты были получены и другими исследователями [Сакс и др., 2003; Але-

шин, 2010 и др.].

Построенные амплитудно-частотные характеристики грунтовой толщи под площадкой строительства использовались для построения расчетных акселерограмм, моделирующих сейсмические воздействия из опасных для площадки сейсмоактивных зон. На рис. 5 приведена вертикальная компонента расчетной акселерограммы, моделирующей землетрясения с максимальным пиковым ускорением $0,07g$, и полученная с применением частотных характеристик среды под площадкой, построенных линейным, эквивалентным линейным и нелинейным методами. На рис. 6 — расчетная акселерограмма, построенная аналогичным способом и моделирующая землетрясение с максимальным пиковым ускорением $0,43g$.

Сравнив результаты линейного, эквивалентного линейного и нелинейного моделиро-

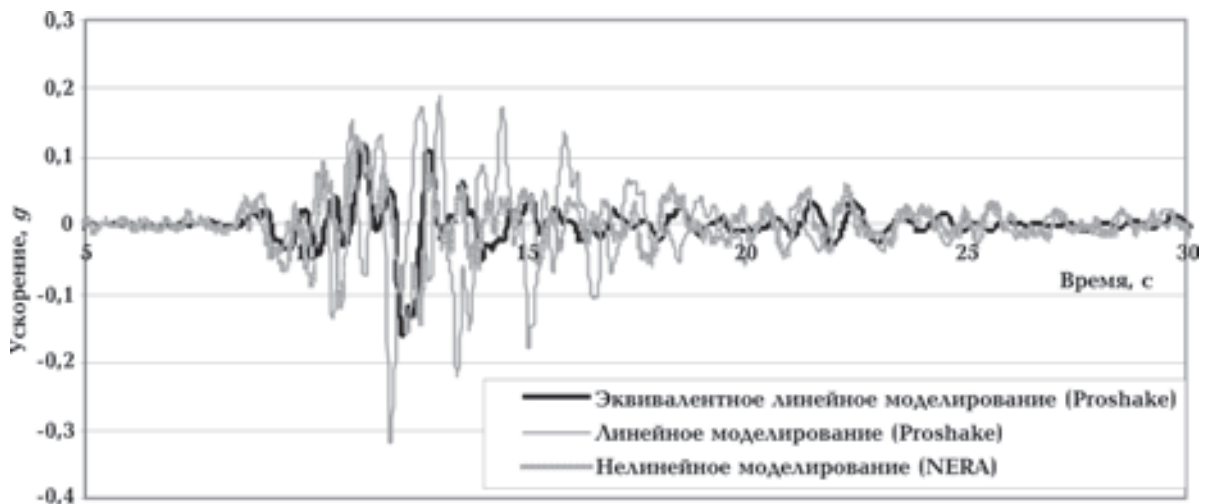


Рис. 5. Вертикальная компонента расчетной акселерограммы, моделирующей воздействие землетрясения с $a_{\max}=0,07g$.

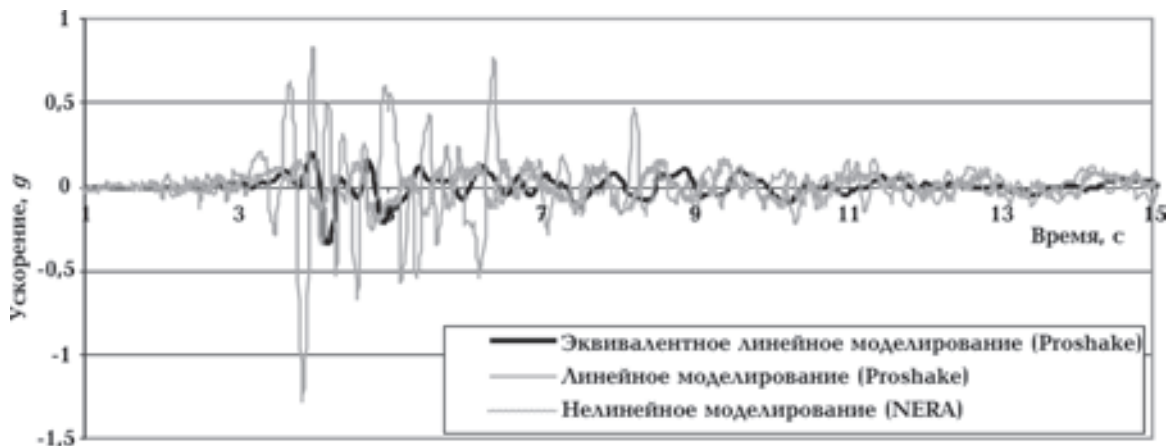


Рис. 6. Вертикальная компонента расчетной акселерограммы, моделирующей воздействие землетрясения с $a_{\max}=0,43g$.

вания расчетных акселерограмм (см. рис. 5, 6), можно сделать выводы, что чем больше интенсивность землетрясения, тем больше различие вследствие проявления нелинейности реагирования грунтов. При моделировании воздействия землетрясения с $a_{\max}=0,07g$ результаты эквивалентного линейного и нелинейного моделирования похожи между собой. При моделировании воздействия землетрясения с $a_{\max}=0,43g$ результаты эквивалентного линейного и нелинейного моделирования несколько различаются. При моделировании воздействия интенсивных землетрясений целесообразно использовать нелинейное моделирование, в то время как при слабых сейсмических событиях — эквивалентное линейное моделирование, с учетом того, что оно требует меньшего количества входных данных и более устойчиво к наличию ошибок их задания.

Изменения в спектральном составе и проявления в смещении резонансных частот в сторону низких частот при нелинейном моделировании выражены тем сильнее, чем больше поглощение в среде и чем шире спектр возбуждения. Такие же выводы можно найти в работах [Павленко, 2009; Вознесенский, 2014].

Выводы. Вопрос о нелинейной связи напряжений и деформаций в грунтах при значительных сейсмических воздействиях вызывает большой как научный, так и практический интерес. Научный — поскольку нелинейные процессы занимают в последние годы едва ли не центральное положение в сфере рассматриваемых сейсмологией проблем. Практический — поскольку стало совершенно понятно, что при сильных сейсмических движениях поведение рыхлого грунта существенно нелинейно и без тщательного учета нелинейных явлений в инженерной сейсмологии не обойтись.

Моделирование реакции грунта с использованием различных компьютерных программ с линейным, нелинейным и эквивалентным линейным подходом анализируются в работах [Saada, Bianchini, 1987; Ishihara et al., 1992; Midorikawa, 1993; Kramer, 1996; Anilanandan, Scott, 1996; Yoshida, Iai, 1998 и др.]. Авторы приходят к заключению, что нет программы, которая бы работала хорошо во всех ситуациях. В случаях проявлений сильной нелинейности иногда сохраняется расхождение между зарегистри-

рованными и рассчитанными акселерограммами вследствие того, что поведение грунтов при сильных землетрясениях остается малоизученным и не всегда хорошо описывается существующими моделями. Однако при очень интенсивных сейсмических воздействиях наиболее приемлемые результаты можно получить нелинейным моделированием.

При сейсмическом микрорайонировании в слабосейсмических районах, таких как Украина, допустимо использовать как нелинейное, так и эквивалентное линейное моделирование реакции грунтов на сейсмические воздействия, потому что при относительно небольших деформациях результаты этих методов дают сравнимые результаты.

Линейное моделирование недопустимо применять при моделировании реакции среды на сейсмические воздействия во всем диапазоне деформаций (исключение, если грунты под строительной площадкой сложены скальными породами), так как в условиях многометровой осадочной тонкослоистой толщи сложно представить распространение сейсмических колебаний без учета поглощающих свойств грунтов. Линейный метод моделирования целесообразнее применять для решения задач, связанных с деформированием неводонасыщенных грунтов при небольших нагрузках.

В работе [Yoshida, Iai, 1998] отмечено, что и эквивалентное линейное, и нелинейное моделирование могут успешно использоваться для расчета одномерной реакции грунта на сейсмические воздействия в условиях вертикально неоднородных тонкослоистых моделей грунтовой толщи под строительной площадкой. Такие условия, как правило, выбирают под строительство особо ответственных объектов.

При использовании и интерпретации результатов расчетов по каждому методу необходимо учитывать особенности лежащих в его основе предположений, допущений и ограничений. Ни один из рассмотренных методов моделирования не является математически строгим. Точность расчетов ограничивается разнообразием инженерно-геологических условий, приближенным знанием свойств грунта и разбросом экспериментальных результатов, на основе которых оцениваются входные параметры.

Список литературы

Алешин А. С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. Москва: ООО «Светоч Плюс», 2010. 293 с.

Антикаев Ф. Ф. Сильные движения грунта при землетрясениях (сейсмические воздействия): Автореф. дис.... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2001, 47 с.

- Бат М. Спектральный анализ в геофизике. Москва: Недра, 1980. 356 с.
- Берзон И. С., Епинаньева А. М., Парийская Г. Н., Стародубовская С. П. Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. Москва: Изд-во АН СССР, 1962. 507 с.
- Вознесенский Е. А. Динамическая неустойчивость грунтов. Москва: Эдиториал УРСС, 1999. 263 с.
- Вознесенский Е. А., Кушнарера Е. С., Фуникова В. В. Природа и закономерности затухания волн напряжений в грунтах. Москва: Флинта, 2014. 104 с.
- Голицын Б. Б. О дисперсии и затухании сейсмических поверхностных волн. *Изв. Императорской АН. Сер. 6.* 1912. Т. 6. Вып. 2. С. 219—236.
- Гусев А. А. О сейсмологической основе норм сейсмостойкого строительства в России. *Физика Земли.* 2002. № 12. С. 56—70.
- Джурик В. И., Серебренников С. П., Брыжак Е. В., Дреннов А. Ф., Ескин А. Ю. Методика формирования исходного сейсмического сигнала с целью районирования сейсмической опасности городских агломераций (на примере г. Иркутска). *Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле.* 2012. Т. 5. № 2. С. 96—110.
- Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. Москва: Наука, 2009. 350 с.
- Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. РСН 65-87. Москва: Госстрой РСФСР, 1988. 14 с.
- Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях. Санкт-Петербург: НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. 383 с.
- Кондратьев О. К. Сейсмические волны в поглощающих средах. Москва: Недра, 1986. 176 с.
- Красников Н. Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения. Ленинград: Стройиздат, 1970. 239 с.
- Національний стандарт ДСТУ-Б-В.1.1-28:2010 «Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Шкала сейсмічної інтенсивності». Київ: Держбуд України, 2010. 78 с.
- Павленко О. В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. Москва: Научный мир, 2009. 260 с.
- Ратникова Л. И. Расчет колебаний на свободной поверхности и во внутренних точках горизонтально-слоистого поглощающего грунта. В кн.: *Сейсмическое микрорайонирование.* Москва: Наука, 1984. С. 116—121.
- Ратникова Л. И., Левшин А. Л. Расчет спектральных характеристик тонкослоистых сред. *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1967. № 3. С. 41—53.
- Сакс М. В., Синюхина С. В., Алешин А. С. Оценка влияния неупругости грунта на характеристики колебаний при землетрясении. *Физика Земли.* 2003. № 8. С. 41—47.
- Сейсмическое микрорайонирование. Отв. ред. О. В. Павлов, В. А. Рогожина. Москва: Наука, 1984, 236 с.
- Строительство в сейсмических районах Украины: ДБН В.1.1-12:2014. Киев: Минрегионстрой Украины, 2014. 84 с.
- Строительство в сейсмических районах: СНиП II-7-81. Москва: Госстрой РСФСР, 1987. 46 с.
- Anilnandan K., Scott R. F. (eds.), 1996. Proc. Int. Conf. on the Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil liquefaction Problems, Davis, California.
- Archuleta R. J., 1998. Direct observations of nonlinearity in accelerograms. In: *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion.* Balkema, Rotterdam, P. 787—792.
- Atkinson G. M., Boore D. M., 1997. Some Comparisons Between Recent Ground-Motion Relations. *Seismol. Res. Lett.* 68(1), 24—40.
- Bardet J. P., Tobita T., 2001. NERA: A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered Soil Deposits. Los Angeles: Univ. of Southern California. 44 p.
- Boatwright J., Seekins L. C., Fumal Th. E., Lui H. P., Mueller C. S., 1992. Loma Prieta, California earthquake of October 17, 1989, strong ground motion and ground failure, Marina District: ground-motion amplification. In: *Loma Prieta, California earthquake of October 17, 1989: Marina District.* US Government Printing Office. Washington, D.C. P. F35—F49.
- Boore D. M., Joyner W. B., Oliver A. A. III, Page R. A., 1980. Peak acceleration, velocity and displacement from strong-motion records. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 70, 305—321.
- Campbell K. W., 1997. Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra. *Seismol. Res. Lett.* 68(1), 154—179.

- Campbell K. W., 1981. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bull. Seismol. Soc. Amer* 71(6), 2039—2070.
- Campbell K. W., 1982. Near-source scaling characteristics of peak horizontal acceleration for moderate-to-large earthquake. *Proc. of Workshop, XVI. The dynamic characteristics of faulting inferred from recordings of strong ground motion. Rpt. 82-591. USGS, Vol. 1, P. 455—476.*
- Chiaruttini C., Siro L., 1981. The correlation of peak ground horizontal acceleration with magnitude, distance, and seismic intensity for Friuli and Ancona, Italy, and the Alpidic beh. *Bull. Seismol. Soc. Amer* 71(6), P. 1993—2009.
- Chiaruttini C., Crosilla F., Siro L., 1979. Some maximized acceleration analysis of the 1976 Friuli earthquakes. *Boll. Geof. Teor. Appl.* 21, 38—52.
- Duke C. M., Johnsen K. E., Larson L. E., Engman D. C., 1972. Effects of site classification and distance on instrumental indices in the San Fernando earthquake. Rpt. UCLA-ENG-7247. Los Angeles, 50 p.
- Fukushima Y., Tanaka T., 1990. A New Attenuation Relation for peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 80(4), 757—783.
- Hardin B. O., Drnevich V. P., 1972. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE.* 98(7), 667—692.
- Haskell N. A., 1951. Asymptotic Approximation for the Normal Modes in Sound Channel Wave Propagation. *J. Appl. Phys.* 22, 157—168.
- Idriss I. M., Seed H. B., 1968. Seismic response of horizontal soil layers. *J. Soil Mech. Found. Div.* 94, 1003—1031.
- Ishibashi I., Zhang X. J., 1993. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils Found.* 33(1), 182—191.
- Ishihara K., 1982. Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis. *Proc. Int. Symp. On Numerical Models in Geomechanics, Zurich*, P. 237—259.
- Ishihara K., Kokusho T., Silver M. L., 1992. Recent developments in evaluating liquefaction characteristics of local soils. *Proc. 12th Int. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro 1989. General state-of-the-art report, A. A. Balkema. Rotterdam, Brookfield, Vol. 4, P. 2719—2734.*
- Iwan W. D., 1967. On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems. *J. Appl. Mech.* 34, 612—617.
- Jeffreys H., 1917. The viscosity of the Earth. *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* 77(5), 449—456.
- Joyner W. B., Boore D. M., Porcella R. L., 1981. Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records. *Earthquakes Notes* 52(1), 80—81.
- Kramer S. L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. N. J., Prentice Hall, Upper Saddle River, 672 p.
- Lermo J., Rodriguez M., Singh S. K., 1988. The Mexico earthquake of September 19, 1985 — Natural periods of sites in the valley of Mexico from microtremor measurements and strong motion data. *Earthquake Spectra* 4(4), 805—814.
- Mc Guire R. K., Bamhard T. P., 1979. The usefulness of ground motion duration in predicting the severity of seismic shaking: Preprint. 17 p.
- Midorikawa S., 1993. Nonlinearity of site amplification during strong ground shaking. *J. Seism. Soc. Japan* 46, 207—216.
- Mroz Z., 1967. On the description of anisotropic work hardening. *J. Mech. Phys. Solids* 15, 163—175.
- Nakamura Y., 2000. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *Proc. 12th World Conf. on Earthquake Engineering, New Zealand, Paper 2656.* 8 p.
- ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. User's Manual, EduPro Civil Systems, Washington, USA, 1998.
- Richart Jr. F. E., 1978. Dynamic stress-strain relationships for soils, S-O-A paper, Proc. 9 ICSMFE, Tokyo, 3: 605—612.
- Saada A., Bianchini G. S. (eds.), 1987. Proc. Int. Workshop on Constitutive Equation for Granular Non-cohesive soils. Case Western Reserve University, Cleveland.
- Schnabel P. B., Lysmer J., Seed H. B., 1972. SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EERC 72-12. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 102 p.
- Seed H. B., Idriss I. M., 1982. Ground motion and soil liquefaction during earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute.
- Seed H. B., Idriss I. M., 1970. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Report no. EERC70-10, EERC, Univ. of California, Berkeley.
- Singh S. K., Mena E., Castro R., 1988. Some aspects of source characteristics of the 19 September Michoacan earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 78(2), 451—477.

- Spudich P., Fletcher J. B., Hellweg M., Boatwright J., Sullivan C., Joyner W. B., Hanks T. C., Boore D. M., McGarr A., Baker L. M., Lindh A. G., 1997. SEA96 — A New Predictive Relation for Earthquake Ground Motions in Extensional Tectonic Regimes. *Seismol. Res. Lett.* 68(1), 190—198.
- Stoll R. D., 1985. Marine sediment acoustics. *J. Acoust. Soc. Amer.* 77(5), 1789—1799.
- Suetomi I., Yoshida N., 1996. Effect of frequency characteristics on earthquake motion to the nonlinear response of ground. *Proc. 51 Annual. Conf. of JSCE (I-B)*, P. 352—353.
- Thompson W. T., 1950. Transmission of elastic waves through a stratified solid material. *J. Appl. Phys.* 21(2), 89—93.
- Trifunac M. D., 1976. Preliminary analysis of the peaks strong earthquake ground motion-dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 66(1), 189—219.
- Vucetic M., Dobry R., 1991. Effect of soil plasticity on cyclic response. *J. Geotech. Eng.* 117, 89—107.
- Woods R. D., 1991. Field and laboratory determination of soil properties at low and high strains. *SOA paper, Proc. 2 Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical. Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Luis*, 1727—1741.
- Yoshida N., Iai S., 1998. Nonlinear site response and its evaluation and prediction. *Proc. 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion*, P. 71—90.

Modeling of soil reaction for seismic microzoning of building sites

© Yu. V. Semenova, 2015

Protection against destructive earthquakes requires the reliable data on the behavior of soil during earthquakes. The methods of determination of resonance properties of the upper part of the geological environment section for the building site for the needs of earthquake engineering are discussed in this paper. The development of scientific views on the linear and nonlinear models of the geological environment are analyzes. The theoretical background of linear equivalent, linear and nonlinear modeling of soil response to seismic effects of earthquakes is considered. The advantages and disadvantages of these methods and the criteria for their applicability are analyzes. Also we presented and analyzed the results of a linear, equivalent linear and nonlinear modeling of the reaction of real ground layer under the actual construction site in Kiev on different levels of earthquakes.

Key words: seismic micro zoning, frequency response of soils, the resonance properties of the soil, earthquake engineering, modeling of the reaction medium on seismic effects.

References

- Aleshin A. S., 2010. Seismic micro zoning especially important objects. Moscow: Svetoch Plus, 293 p. (in Russian).
- Aptikaev F. F., 2001. Strong ground motion during earthquakes (seismic effects): Abstract of the thesis of the Dr. of phys. and math. sci. Moscow, 47 p. (in Russian).
- Bat M., 1980. Spectral analysis in geophysics. Moscow: Nedra, 356 p. (in Russian).
- Berzon I. S., Epananova A. M., Pariyskaya G. N., Starodubovskaya S. P., 1962. The dynamic characteristics of seismic waves in real soil grounds. Moscow: Publ. House of the USSR AS, 507 p. (in Russian).
- Voznesenskiy E. A. Dynamic instability of soils. Moscow: Editorial URSS, 1999. 263 p. (in Russian).
- Voznesenskiy E. A. Kushnareva E. S., Funikova V. V., 2014. Nature and the laws of stress wave attenuation in soils. Moscow: Flinta, 104 p. (in Russian).
- Golitsyn B. B., 1912. On the dispersion and attenuation of seismic surface waves. *Izvestiya Imperatorskoy AN. Ser. 6*. 6(is. 2), 219—236 (in Russian).
- Gusev A. A., 2002. On the basis of seismological earthquake-resistant building standards in Russia. *Fizika Zemli* (12), 56—70 (in Russian).
- Dzhurik V. I., Serebrennikov S. P., Bryzhak E. V., Drenov A. F., Eskin A. Yu., 2012. Methodology of the original seismic signal forming for purposes of the seismic hazard zoning of urban agglomerations (on an example of Irkutsk). *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle.* 5(2), 96—110 (in Russian).
- Zalishvili V. B., 2009. Seismic micro zonation of urban territories, settlements and large building sites. Moscow: Nauka, 350 p. (in Russian).

- Engineering surveys for building. Seismic micro zoning. Technical performance requirements. RSN 65-87, 1988. Moscow: Building Ministry of RSFSR, 14 p. (in Russian).*
- Ishihara K., 2006. The behavior of soils during earthquakes. SPb: Sci. Production Association «Georekonstruktsiya-Fundamentproect», 383 p. (in Russian).*
- Kondratiev O. K., 1986. Seismic wave in absorbing media. Moscow: Nedra, 176 p. (in Russian).*
- Krasnikov N. D., 1970. Dynamic properties of soils and methods of their determination. Leningrad: Stroyizdat, 239 p. (in Russian).*
- National standard of Ukraine BSC-B-V.1.1-28:2010 «Protection from dangerous geological processes, operational harmful effects of fire. The scale of seismic intensity», 2010. Kiev: Building Ministry of Ukraine, 78 p. (in Ukrainian).*
- Pavlenko O. V., 2009. Seismic waves in the ground layers: a non-linear behavior of soil during strong earthquakes in recent years. Moscow: Nauchnyy Mir, 260 p. (in Russian).*
- Ratnikova L. I., 1984. Calculation of the vibrations on the free surface and in the interior of a horizontally layered absorbing soil. In: *Seismic micro zoning*. Moscow: Nauka, P. 116—121 (in Russian).*
- Ratnikova L. I. Levshin A. L., 1967. The calculation of the spectral characteristics of thin-layered media. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli* (3), 41—53 (in Russian).*
- Saks M. V., Sinyuhina S. V., Aleshin A. S., 2003. Assessment of the impact of the inelasticity of soil on fluctuations characteristics during the earthquake. *Fizika Zemli* (8), 41—47 (in Russian).*
- Seismic micro zoning, 1984. Eds. O. V. Pavlov, V. A. Rogozhina. Moscow: Nauka, 236 p. (in Russian).*
- Building in seismic regions of Ukraine: DBN V.1.1-12:2014, 2014. Kiev: Building Ministry of Ukraine, 84 p. (in Russian).*
- Building in seismic regions: BN&R II-7-81, 1987. Moscow: Building Ministry of RSFSR, 46 p. (in Russian).*
- Anilanandan K., Scott R. F. (eds.), 1996. Proc. Int. Conf. on the Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil liquefaction Problems, Davis, California.*
- Archuleta R. J., 1998. Direct observations of nonlinearity in accelerograms. In: *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Balkema, Rotterdam, P. 787—792.*
- Atkinson G. M., Boore D. M., 1997. Some Comparisons Between Recent Ground-Motion Relations. *Seismol. Res. Lett.* 68(1), 24—40.*
- Bardet J. P., Tobita T., 2001. NERA: A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered Soil Deposits. Los Angeles: Univ. of Southern California. 44 p.*
- Boatwright J., Seekins L. C., Fumal Th. E., Lui H. P., Mueller C. S., 1992. Loma Prieta, California earthquake of October 17, 1989, strong ground motion and ground failure, Marina District: ground-motion amplification. In: *Loma Prieta, California earthquake of October 17, 1989: Marina District*. US Government Printing Office. Washington, D.C. P. F35—F49.*
- Boore D. M., Joyner W. B., Oliver A. A. III, Page R. A., 1980. Peak acceleration, velocity and displacement from strong-motion records. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 70, 305—321.*
- Campbell K. W., 1997. Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra. *Seismol. Res. Lett.* 68(1), 154—179.*
- Campbell K. W., 1981. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 71(6), 2039—2070.*
- Campbell K. W., 1982. Near-source scaling characteristics of peak horizontal acceleration for moderate-to-large earthquake. *Proc. of Workshop, XVI. The dynamic characteristics of faulting inferred from recordings of strong ground motion. Rpt. 82-591. USGS, Vol. 1, P. 455—476.**
- Chiaruttini C., Siro L., 1981. The correlation of peak ground horizontal acceleration with magnitude, distance, and seismic intensity for Friuli and Ancona, Italy, and the Alpide beh. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 71(6), P. 1993—2009.*
- Chiaruttini C., Crosilla F., Siro L., 1979. Some maximized acceleration analysis of the 1976 Friuli earthquakes. *Boll. Geof. Teor. Appl.* 21, 38—52.*
- Duke C. M., Johnsen K. E., Larson L. E., Engman D. C., 1972. Effects of site classification and distance on instrumental indices in the San Fernando earthquake. Rpt. UCLA-ENG-7247. Los Angeles, 50 p.*
- Fukushima Y., Tanaka T., 1990. A New Attenuation Relation for peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 80(4), 757—783.*
- Hardin B. O., Drnevich V. P., 1972. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE.* 98(7), 667—692.*
- Haskell N. A., 1951. Asymptotic Approximation for the*

- Normal Modes in Sound Channel Wave Propagation. *J. Appl. Phys.* 22, 157—168.
- Idriss I. M., Seed H. B., 1968. Seismic response of horizontal soil layers. *J. Soil Mech. Found. Div.* 94, 1003—1031.
- Ishibashi I., Zhang X. J., 1993. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils Found.* 33(1), 182—191.
- Ishihara K., 1982. Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis. *Proc. Int. Symp. On Numerical Models in Geomechanics, Zurich*, P. 237—259.
- Ishihara K., Kokusho T., Silver M. L., 1992. Recent developments in evaluating liquefaction characteristics of local soils. *Proc. 12th Int. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro 1989. General state-of-the-art report, A. A. Balkema. Rotterdam, Brookfield*, Vol. 4, P. 2719—2734.
- Iwan W. D., 1967. On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems. *J. Appl. Mech.* 34, 612—617.
- Jeffreys H., 1917. The viscosity of the Earth. *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* 77(5), 449—456.
- Joyner W. B., Boore D. M., Porcella R. L., 1981. Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records. *Earthquakes Notes* 52(1), 80—81.
- Kramer S. L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. N. J., Prentice Hall, Upper Saddle River, 672 p.
- Lermo J., Rodriguez M., Singh S. K., 1988. The Mexico earthquake of September 19, 1985 — Natural periods of sites in the valley of Mexico from microtremor measurements and strong motion data. *Earthquake Spectra* 49(4), 805—814.
- Mc Guire R. K., Bamhard T. P., 1979. The usefulness of ground motion duration in predicting the severity of seismic shaking: Preprint. 17 p.
- Midorikawa S., 1993. Nonlinearity of site amplification during strong ground shaking. *J. Seism. Soc. Japan* 46, 207—216.
- Mroz Z., 1967. On the description of anisotropic work hardening. *J. Mech. Phys. Solids* 15, 163—175.
- Nakamura Y., 2000. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *Proc. 12th World Conf. on Earthquake Engineering, New Zealand, Paper 2656*. 8 p.
- ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. User's Manual, EduPro Civil Systems, Washington, USA, 1998.
- Richart Jr. F. E., 1978. Dynamic stress-strain relationships for soils, S-O-A paper, Proc. 9 ICSMFE, Tokyo, 3: 605—612.
- Saada A., Bianchini G. S. (eds.), 1987. Proc. Int. Workshop on Constitutive Equation for Granular Non-cohesive soils. Case Western Reserve University, Cleveland.
- Schnabel P. B., Lysmer J., Seed H. B., 1972. SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EERC 72-12. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 102 p.
- Seed H. B., Idriss I. M., 1982. Ground motion and soil liquefaction during earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute.
- Seed H. B., Idriss I. M., 1970. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Report no. EERC70-10, EERC, Univ. of California, Berkeley.
- Singh S. K., Mena E., Castro R., 1988. Some aspects of source characteristics of the 19 September Michoacan earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 78(2), 451—477.
- Spudich P., Fletcher J. B., Hellweg M., Boatwright J., Sullivan C., Joyner W. B., Hanks T. C., Boore D. M., McGarr A., Baker L. M., Lindh A. G., 1997. SEA96 — A New Predictive Relation for Earthquake Ground Motions in Extensional Tectonic Regimes. *Seismol. Res. Lett.* 68(1), 190—198.
- Stoll R. D., 1985. Marine sediment acoustics. *J. Acoust. Soc. Amer.* 77(5), 1789—1799.
- Suetomi I., Yoshida N., 1996. Effect of frequency characteristics on earthquake motion to the nonlinear response of ground. *Proc. 51 Annual. Conf. of JSCE (I-B)*, P. 352—353.
- Thompson W. T., 1950. Transmission of elastic waves through a stratified solid material. *J. Appl. Phys.* 21(2), 89—93.
- Trifunac M. D., 1976. Preliminary analysis of the peaks strong earthquake ground motion-dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 66(1), 189—219.
- Vucetic M., Dobry R., 1991. Effect of soil plasticity on cyclic response. *J. Geotech. Eng.* 117, 89—107.
- Woods R. D., 1991. Field and laboratory determination of soil properties at low and high strains. *SOA paper, Proc. 2 Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical. Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Luis*, 1727—1741.
- Yoshida N., Iai S., 1998. Nonlinear site response and its evaluation and prediction. *Proc. 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion*, P. 71—90.