

РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТНЫХ АКСЕЛЕРОГРАММ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В.И.СМИРНОВ, канд. техн. наук,

Г.Н.ВАХРИНА, инженер

(ЦНИИСК им.В.А.Кучеренко ОАО «НИЦ «Строительство», Москва)

В статье кратко изложены основные методы создания расчетных моделей сейсмического движения грунта для применения при проектировании зданий и сооружений. В инженерной сейсмологии получены новые результаты, имеющие принципиальное значение, с точки зрения формирования основных концепций сейсмостойкого строительства. Проанализирована взаимосвязь между количественными характеристиками сейсмического движения грунта и сейсмогеологической ситуацией площадки строительства. Предложен путь решения проблемы неполноты исходной сейсмологической информации в виде создания региональных моделей сейсмического воздействия с учетом конкретных грунтовых условий площадки строительства.



Ключевые слова: сейсмические воздействия, акселерограмма, расчетная модель, грунтовые условия, инженерная сейсмология

1. Введение

1. Сейсмическое воздействие при проведении расчетов на сейсмостойкость характеризует колебательное движение грунта при землетрясении, создающее кинематическое возбуждение колебаний исследуемого объекта.

Поведение сооружения во время землетрясения находится в сложной зависимости от интенсивности, спектрального состава, длительности и других параметров движения грунта [1, 3, 7, 8, 13, 19, 21].

В последние годы в инженерной сейсмологии получены новые результаты, имеющие принципиальное значение с точки зрения формирования основных концепций сейсмостойкого строительства. Большое значение этих результатов состоит в том, что более ясной сделалась взаимосвязь между количественными характеристиками параметров сейсмического движения грунта и сейсмогеологической ситуацией площадки строительства. Однако эта ясность не упростила задачу инженеров-строителей.

Выяснилась неоднозначность и многообразие типов сейсмических процессов, которые могут возникать на данной площадке и вызывать соответственно различные эффекты в сооружении. Например, девятибалльное землетрясение большой магнитуды, вызванное отдаленным очагом, и девятибалльное землетрясение малой магнитуды от близкого очага будут иметь различные спектральные характеристики, разную длительность и по-разному воздействовать на сооружение. Часто различаются спектральные характеристики землетрясений, возникающих из одного и того же источника и имеющих одинаковую магнитуду.

Инженер, проектирующий сооружение, предназначенное для строительства в сейсмически опасном районе, всегда решает задачу, состоящую в создании конструкции,

которая была бы максимально надёжной (сейсмостойкой) и требовала бы вместе с тем минимальных дополнительных затрат. То есть, отвечала бы одновременно двум условиям, в известной степени противоречивым [1, 4, 5, 7].

Сложность таких задач неизмеримо возрастает в ситуации, когда их приходится решать в условиях неполноты исходной сейсмологической информации, когда о воздействии известно только то, что оно является элементом некоторого приближённо заданного класса прогнозируемых сейсмических процессов, различающихся по интенсивности, спектральным характеристикам, длительности и другим параметрам движения грунта [1].

Одним из путей решения проблемы неполноты исходной сейсмологической информации является создание региональных моделей сейсмического воздействия. Такие модели полностью удовлетворяют современной концепции, согласно которой при проектировании необходимо учитывать не одно характерное воздействие, а класс (ансамбль) воздействий, отличающихся между собой спектральными и другими параметрами [1, 6, 9, 11, 12, 16].

При проектировании и использовании моделей, содержащих некие огибающие, объёмлющие спектры реакции, которые считаются верхними оценками всевозможных движений, эти факторы учитываются лишь отчасти. Такие модели воздействия становятся неприемлемыми при расчёте сооружений на сейсмостойкость с учётом их реального поведения при сильных землетрясениях (появление пластических деформаций, локальных разрушений, перестройки внутренней структуры и т.п.). Расчёт сооружений, расчётные схемы которых необходимо представлять в виде нелинейных и нестационарных динамических систем, следует выполнять с использованием инструментальных записей ускорений грунта при

землетрясениях или с применением искусственных акселерограмм.

В последние годы накоплено большое количество записей сильных землетрясений, полученных в различных районах мира. Однако использование в расчетах сейсмостойкости реальных записей одних районов не позволяет получить достаточно обоснованного прогноза динамического поведения сооружения в других районах. Учитывая малую вероятность повторения сильных землетрясений и относительно слабо развитую сеть инженерно-сейсмометрической службы страны, возникает необходимость разработки моделей сейсмического воздействия, которые отражали бы основные (характерные) параметры сейсмического движения в конкретных регионах.

Одним из существенных путей дальнейшего уточнения моделей сейсмического движения грунта и, как следствие, приближение оптимальной надёжности сооружения, является переход от универсальных (основанных на общемировых эмпирических данных) моделей воздействия к региональным (локальным) моделям, построенным с учётом конкретной сейсмологической информации отдельных регионов.

Преимущество модели сейсмического воздействия в виде расчётного ансамбля синтетических акселерограмм особенно значительно проявляется при использовании в расчётах нелинейных систем, нестационарных систем [1, 19, 23].

Любая строительная система проектируется таким образом, чтобы ее антисейсмическая несущая способность превышала расчетные сейсмические воздействия. Несущая способность — это комплексная функция прочности, жесткости и деформативности, определяемая исходя из объемно-планировочного решения и характеристик материалов фундаментов, сейсмоизоляционной системы и надземной части сооружения. В свою очередь, для конкретного сейсмоизолированного сооружения модель расчетного сейсмического движения грунта может быть задана в виде:

- формулы распределения статической поперечной силы в основании и горизонтальных сил по высоте сооружения [18, 19, 21, 26];
- набора расчетных спектров реакции землетрясений [10, 18, 19, 21, 26];
- подходящих для места строительства записей землетрясений во времени [10, 18, 19, 21, 26].

В соответствии с нормами [18, 19, 21, 26] модель расчетного движения грунта может быть принята в своей простейшей форме при помощи уравнений определения расчетной поперечной силы в основании (1) и формул распределения статических горизонтальных сил (2).

Сейсмическая горизонтальная сила в каждом горизонтальном направлении определяется с помощью следующего выражения

$$F_b = S_a(T_1) m \lambda, \quad (1)$$

где $S_a(T_1)$ — ордината расчетного спектра соответствующая периоду T_1 ;

T_1 — основной период собственных колебаний здания в горизонтальном направлении;

m — общая масса здания выше фундамента или выше уровня жесткого основания;

λ — поправочный коэффициент, который равен $\lambda = 0.85$, если $T_1 < 2T_c$ и здание более 2 этажей; иначе $\lambda = 1.0$.

Сейсмическая сила определяется из условия приложения горизонтальной силы F_i ко всем этажам в каждом горизонтальном направлении

$$F_i = F_b \cdot \frac{S_i \cdot m_i}{\sum S_j \cdot m_j}, \quad (2)$$

где F_i — горизонтальная сила, действующая на i этаж;

F_b — горизонтальная сила в основании сооружения (1);

S_i, S_j — перемещения масс m_i, m_j основной формы колебания;

m_i, m_j — массы этажей.

По существу, данные уравнения являются упрощенными интерпретациями расчетного спектра определенной формы и амплитуды с периодом колебаний, соответствующим консервативной оценке при собственном периоде колебаний изолированного сооружения.

Для более сложных расчетов параметры сейсмического движения грунта могут быть приняты либо, исходя из набора имеющихся расчетных спектров реакции землетрясений, представленного в нормах, либо из подобранных для места строительства расчетных спектров реакции по заданным правилам их определения, применения и интерпретации результатов [10, 18, 19, 21, 26] (рис.1).

Если согласно требованиям сейсмических норм рекомендуется для объекта использовать записи колебаний во времени, то необходимо подобрать или создать подходящий набор записей землетрясений и установить правила, определяющие, как данные записи будут применяться при проектировании и анализе результатов [10, 18, 19, 21, 26] (рис.2).

Если предположить, что правильно принятая модель расчетного движения грунта обеспечивает надлежащим образом предъявляемые требования к сейсмическому воздействию независимо от его вида, чрезмерный акцент на какой-либо одной модели по отношению к другим, без правильного осмысления интенсивности и допустимых пределов применения каждой из модели, может привести к результатам весьма сомнительным и нереалистичным.

2. Следующим важным моментом является оценка сейсмической опасности в заданном месте для строительства, поскольку требуется оценить возможные движения грунта при землетрясении в данном месте. По этой причине: а) место, для которого приемлемо зарегистрированное при землетрясении движение грунта, встречается крайне редко; б) даже для мест, где такие записи являются приемлемыми, нет гарантии того, что будущие движения грунта будут иметь такие же характеристики, как ранее наблюдаемые движения. Возможные движения грунта для какой-либо строительной площадки оцениваются, используя различные методики регрессивного анализа, на выбранном подмножестве имеющихся записей землетрясений, считающиеся подходящими для такой оценки. Результирующие математические формулы, предоставляющие оценки максимальных параметров реакции, такие как максимальное ускорение грунта или спектральные ординаты реакции для какого-либо места, будем называть прогнозируемыми или обобщающими зависимостями. Термин обобщение используется, поскольку эти эмпирические зависимости представляют из себя формулы для обобщения сейсмических волн, возникающих от заданного источника, на заданном расстоянии, вследствие заданной окружающей среды (т.е. свойств грунта в данном месте). К настоящему времени,

разработано большое количество обобщающих зависимостей [1-6, 9, 11-17, 20, 23 и др.].

3. Принятая сейсмическая опасность площадки может быть установлена при помощи детерминистского и/или вероятностного анализа сейсмической опасности, если определены источники сейсмической опасности вблизи исследуемой строительной площадки (например, активные или полуактивные разломы в радиусе 100 км от места строительства) и характеристики грунтов площадки. Принципы методов анализа сейсмической опасности и характер учитываемых неопределенностей приведем вместе с расчетной неопределенностью движения грунта.

2. Создание расчётных моделей сейсмического воздействия

Разработка расчётных моделей сейсмического движения грунта неразрывно связана с определёнными этапами теории сейсмостойкости. Создание любой модели сейсмического воздействия всегда сопровождалось как можно более полным удовлетворением следующих требований: отразить имеющиеся представления о самой природе землетрясений (механизм очага, характер и распространение сейсмических волн, воздействие на объекты и т.п.) и удовлетворить нужды строительного проектирования. То есть, отвечать имеющимся (на данном этапе развития) методам расчёта и проектирования сооружений.

История развития моделей сейсмического движения грунта достаточно подробно излагалась в многочисленных работах [1, 2, 5, 7, 13, 20, 23]. Кратко отметим лишь основные этапы в развитии моделирования сейсмических движений грунта для использования в инженерных расчётах.

Сейсмические движения грунта представляют собой волновой процесс. Теория возникновения и распространения сейсмических волн, связана, прежде всего, с развитием общей теории упругости. После открытия закона Гука (1660 г.), вывода общего уравнения равновесия Навье (1821 г.), экспериментов Френеля, показывающих, что свет состоит из поперечно поляризованных волн, исследований Коши о шести независимых компонентах напряжений и деформаций, Пуассон обнаружил два типа волн — продольные и поперечные, которые обозначают как *P* и *S* волны, и на основе принятой им частной модели установил, что скорость распространения *P* волн в $\sqrt{3}$ раз больше скорости *S* волн.

До этих исследований считалось, что в безграничной

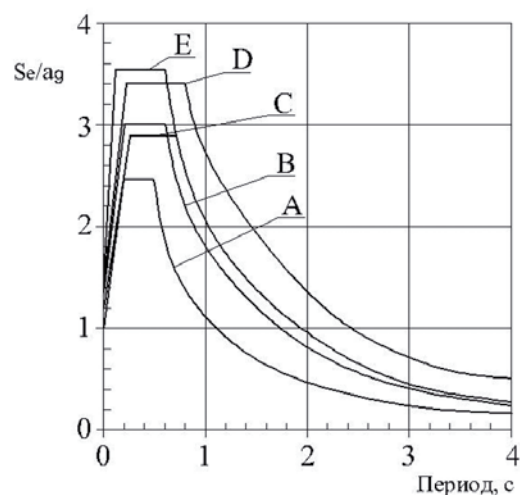
сплошной среде могут распространяться только продольные волны [2, 13].

Лэмбом в 1904 г. была рассчитана первая теоретическая сейсмограмма от точечного источника [27].

Моделью Лэмба называется впервые решенная этим ученым задача о распространении в упругом полупространстве произвольного воздействия, приложенного к свободной поверхности. Простейшая иллюстрация к решению задачи представлена на рис.3. На свободной поверхности *xOy* полупространства, заполненного средой с постоянными λ, μ, ρ , в точке *O* действует нормальная к поверхности сила $F_z(t)$ (λ и μ — коэффициенты Ламе, ρ — плотность среды). Ось *z* направлена внутрь среды. Требуется определить поле смещений внутри среды и на ее поверхности при начальных условиях вида: $\varphi_0(x, y, z) = 0, \varphi_0'(x, y, z) = 0$.

Это означает отсутствие в среде иных возмущений, кроме тех, которые вызваны заданным источником.

а)



б)

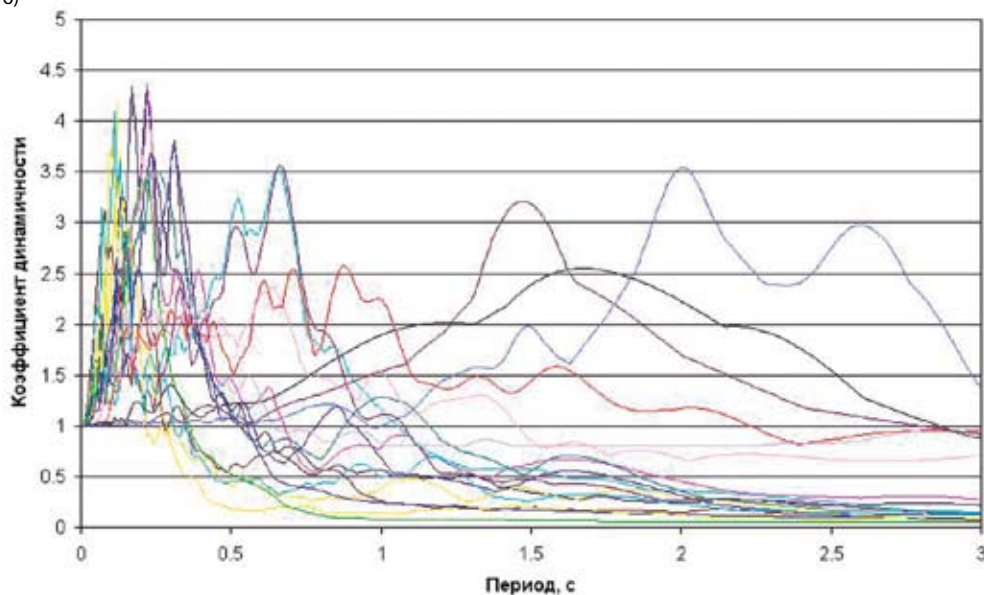


Рис.1. Расчётные спектры реакции сейсмических воздействий:
а) - рекомендуемый тип 1 упругого спектра отклика для грунта типа А-Е [18];
б) спектры отклика реальных акселерограмм.

Анализ решения приводит к следующим результатам. От точки O приложения силы распространяются волны четырех различных типов: P , S , R и PS , имеющие каждая свою определенную область существования, в случае, когда волновая картина обладает осевой симметрией (рис.3).

Волна P представляет собой продольную волну. Ее амплитуда существенно зависит от направления линии OM , где M — точка наблюдения. Наибольшие смещения наблюдаются вдоль вертикальной оси, наименьшие — вблизи свободной поверхности xOy . Амплитуда смещений убывает с расстоянием обратно пропорционально r ($r = OM$).

Волна S является волной вращения и имеет скорость v_s . Однако существует ряд направлений, в которых амплитуды волны вращения равны нулю.

Волна R — поверхностная волна Релея, распространяющаяся со скоростью v_R . По мере удаления от источника ее амплитуда на поверхности среды убывает обратно пропорционально \sqrt{t} , поэтому ее интенсивность по сравнению с интенсивностью других волн возрастает. В вертикальном направлении амплитуда колебаний волны R быстро убывает.

Волна PS , которая является конической волной, представляет собой волну вращения. Ее возникновение тесно связано с распространяющейся вдоль свободной границы волной P . Последняя создает вблизи границы деформации объема, приводящие к растяжению и сжатию отдельных элементарных объемов в направлении границы. Как и у других конических волн, амплитуды связанных с ней колебаний убывают быстрее, чем у сферических волн.

Вследствие потери части энергии на образование конической волны PS амплитуда волны P вблизи границы убывает с удалением от источника быстрее, чем внутри полупространства, где выполняется условие $1/r$. Вблизи границы (на расстоянии порядка длины волны) амплитуда прямой волны P убывает с расстоянием как $1/r^2$.

Проведенные Лэмбом исследования показали, что амплитуды волн Релея с расстоянием уменьшаются медленнее, так как они обладают свойством дисперсии, когда волны с разными частотами распространяются с разной скоростью.

Р. Джеффрис считал причину длительных колебаний на поверхности Земли в том, что они вызваны отражениями первоначального импульса внутри приповерхностных слоев. Другими словами, в основе этого явления лежит рассеяние волн на неоднородности среды на пути к поверхности Земли. В 1960 г. благодаря исследованиям Х. Беньюффа, М. Юинга, Ф. Пресса и других были получены качественные записи длиннопериодных сейсмических волн, которые показали, что для таких волн приповерхностные мелкомасштабные неоднородности не играют существенной роли и Земля ведет себя как однородное тело, т.е. к таким волнам применима простая модель Лэмба [2].

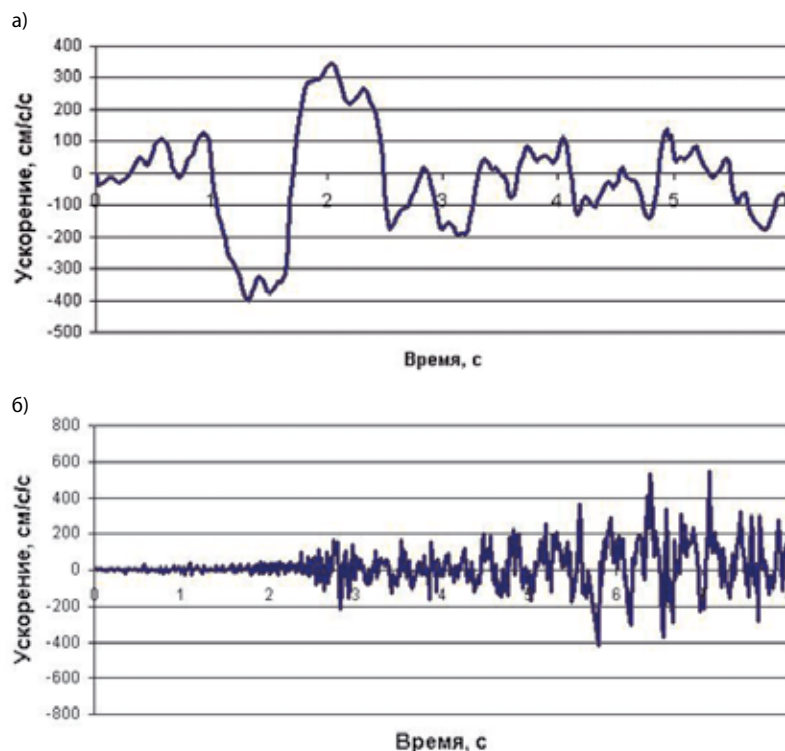


Рис.2. Записи ускорений колебаний грунта:
а) низкочастотное землетрясение;
б) высокочастотное землетрясение.

Первая международная сейсмологическая комиссия, в состав которой вошли российские ученые Г.К. Левицкий и О.А. Баклунд, была образована в 1839 г. в Берлине. В России с целью сбора и систематизации данных о землетрясениях И.В. Мушкетовым была создана Сейсмическая комиссия Русского географического общества. Впервые были составлены каталоги землетрясений для всего мира (Дж. Милн и Р. Малле) и для России (И.В. Мушкетов и А.П. Орлов).

Первые попытки создания теории для расчета на сейсмические воздействия были сделаны в начале прошлого века японскими учеными Омори и Сано [22]. Они предложили так называемую статическую теорию сейсмостойкости, которая основывалась на том, что конструкция рассчитыва-

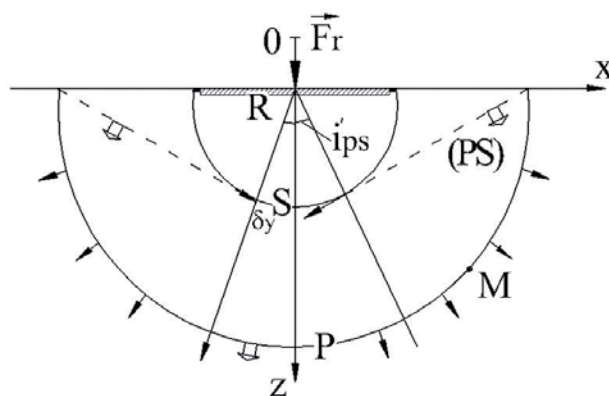


Рис.3. Поля смещений частиц от точечного источника, действующего на поверхности полупространства в случае приложения вертикальной силы

лась на действие инерционной сейсмической нагрузки, при этом система считалась абсолютно жесткой, а ее ускорения принимались равными ускорению основания. Это был статический расчет, поэтому теория Омори и Сано получила название статической теории сейсмостойкости.

Сейсмическая нагрузка определялась по формуле:

$$S = KQ, \quad (3)$$

$$K = a/g, \quad (4)$$

где a — максимальное ускорение сейсмических волн у поверхности; g — ускорение свободного падения; Q — масса здания.

В своих исследованиях Омори впервые сделал оценку ускорений основания при разрушительных землетрясениях. Эта оценка оказалась ошибочной, так ускорение при 9 балльном землетрясении Омори оценил в 0,1g, т.е. примерно в 4 раза меньше принятых в действующих нормах значений. Дальнейшие исследования показали, что статическая теория обладает рядом недостатков, а метод Омори лучше всего подходил для проектирования систем с жесткой конструктивной схемой.

Японский ученый Мононобе в 1923 г. впервые предложил динамическую теорию сейсмостойкости, в которой сооружение моделировалось консольным стержнем с точечным опиранием на основание, а к основанию сооружения прикладывалась гармоническое смещение, моделирующее сейсмическое воздействие [2, 5]. Такая модель позволяла учитывать упругие свойства сооружения. При этом Мононобе ввел коэффициент динамичности β в формулу для определения сейсмических нагрузок.

$$S = K \beta Q, \quad (5)$$

где β — коэффициент динамичности, определяемый выражением:

$$\beta = \frac{1}{1 - T^2/T_0^2}, \quad (6)$$

где $T(\omega)$ — период собственных колебаний системы; $T_0(\omega_0)$ — период собственных колебаний основания при землетрясении.

По теории Мононобе основание совершало гармонические колебания с периодом колебаний T_0 , при этом рассматривались только установившиеся вынужденные колебания системы и вообще не учитывались собственные. В случаях, когда период колебаний конструкции T приближался к периоду колебаний основания T_0 , значение коэффициента динамичности получалось много больше 1, а при резонансе $\beta \rightarrow \infty$. Это было связано и с принятой моделью сооружения, и с тем, что не учитывался эффект затухания при записи уравнений движения сооружения.

Большой вклад в развитие общей теории сейсмостойкости внес ученый, академик К. С. Завриев, который уточнил теорию Мононобе [5]. В 1927 г. он предложил перейти на динамический метод расчета сооружений. В своих работах он рассматривал колебание консольного стержня с точечным опиранием на основание, однако при этом корректно учел вынужденные и собственные колебания системы. К. С. Завриев предложил рассматривать сейсмические движения грунта как гармонический незатухающий процесс, начинающийся по закону косинуса, т.е. в начальный момент времени основание получает некоторое смещение, а скорость равна нулю. Сейсмическая сила вычислялась аналогично

Мононобе, но коэффициент динамичности β определялся по формуле:

$$\beta = \frac{(\cos \omega_0 t - \cos \omega t)}{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}}. \quad (7)$$

Впервые идея использования спектров реакции для представления сейсмических воздействий была изложена в 1926 г. в бюллетене Института исследования землетрясений Императорского Токийского Университета в статье К. А. Сюэжиро. Его анализатор сейсмических вибраций состоял из 13-ти маятников с различными собственными частотами, изменяющимися в диапазоне от 0,55 до 4,5 Гц. Во время землетрясений колебания маятников записывались на вращающиеся барабаны, фиксируя реакцию маятников на реальное сейсмическое воздействие. На каждой диаграмме выбиралась только одна точка — максимальное перемещение данного маятника и наносилась на график, в котором по горизонтальной оси откладывались в масштабе частоты колебаний маятников, а по вертикальной — максимальные значения перемещений маятников при данном сейсмическом воздействии. Этот прибор на несколько лет вперед предвосхитил развитие теории спектров ответов.

М. А. Био [14] предложил определять динамический эффект землетрясения экспериментальным путем на моделях. Суть этого метода состояла в том, что ряд маятников, обладающих различными частотными характеристиками и моделирующих реальные сооружения, устанавливался на подвижной платформе, которой сообщалось движение, отвечающее колебаниям почвы при землетрясении. Под действием перемещения платформы все маятники приходили в движение и их максимальные отклонения и ускорения могли быть измерены. Таким образом, каждое зарегистрированное землетрясение могло быть проанализировано экспериментально, и мог быть установлен максимальный эффект, который оно вызывает на упрощенной модели сооружения, в зависимости от частоты его собственных колебаний. Эта зависимость наглядно представляется графически в координатах «период собственных колебаний — максимальное ускорение модели (маятника)» и носит название «спектральной функции».

Основы математической теории спектров ответов были изложены Био [15]. Он использовал разложение колебания сдвиговой балки по собственным формам, которой он моделировал здание, для определения реакции здания на произвольные движения грунта. Кроме того, он предложил разделить проблемы на две части, анализируя отдельно упругие свойства здания и частотный спектр землетрясений, представляя сейсмическое воздействие интегралом Фурье. В результате появилась возможность определить вклад каждой собственной формы в терминах амплитудного спектра Фурье [14, 15].

И. Л. Корчинский в 1954 г. предложил рассматривать перемещения грунта при землетрясении в виде суммарного действия ряда затухающих гармонических процессов [7]:

$$y_0(t) = \sum A_0 e^{-\varepsilon_0 t} \sin \omega_i t, \quad (8)$$

где A_0 — начальная амплитуда соответствующего слагаемого; ε_0 — коэффициент, характеризующий затухание колебаний грунта; ω_i — частота колебаний соответствующего слагаемого.

Модель (8) следует считать одной из первых аппроксимаций сейсмических движений, учитывающих принцип множественности воздействий, характерный для большинства современных моделей колебаний грунта при землетрясениях.

По существу, идеализация (8) в определённой степени описывает как частотную, так и амплитудную нерегулярность сейсмических колебаний грунта.

И.Л. Корчинский в расчётах учитывал только одно слагаемое — синусоиду, круговая частота которой была наиболее близка к собственной частоте системы и, следовательно, вызывала наибольшую реакцию сооружения. Такая постановка задачи ставилась с целью построения спектральной модели воздействия (кривой коэффициента динамичности).

Инструментальные записи колебаний грунта и сооружений, сделанные во время землетрясений, показывают, что движение поверхности земли является типичным нестационарным процессом. Нерегулярность сейсмических колебаний грунта обуславливается самим механизмом генерирования сейсмических волн в очаге и прохождением последних через нерегулярные геологические образования. Описать такое движение любым детерминированным законом невозможно. Это определило в конце 40-х и в начале 50-х годов в отечественных и зарубежных работах переход от детерминированных моделей к трактовке сейсмического движения как случайного процесса.

Одна из первых попыток применить теорию вероятности к описанию сейсмического воздействия была сделана Г. Хаузнером в 1947 г. [20]. Предлагалось представлять движение грунта в виде серии случайных некоррелированных импульсов (отрезков «белого шума»).

Дальнейшее развитие идеи Хаузнера получили в работах Е. Розенблюэта [24]. Для системы с одной степенью свободы без затухания землетрясение представлялось в виде последовательности большого числа мгновенных скачков скорости со случайной амплитудой и со случайным расположением на оси времени. Причем число скачков скорости в единицу времени между соседними импульсами достаточно велико, так что математическое ожидание времени между соседними импульсами мало по сравнению с периодом собственных колебаний исследуемой системы.

Требование большого числа скачков скорости понимается в том смысле, что

$$E \left\{ \sum_{i=1}^n u_i^2 \right\} \gg \max_i E \{ u_i^2 \}, \quad (9)$$

где E — символ математического ожидания;

n — общее число импульсов;

u_i — величина i -го скачка скорости при колебании грунта.

Величина удельной интенсивности землетрясения W считается постоянной и определяется соотношением:

$$\lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{E \left\{ \sum_{i=t_1}^{t_2} u_i^2 \right\}}{t_2 - t_1} = W^2(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t_1 < 0 \\ 0 & \text{при } t_1 \geq S \\ 2x & \text{при } 0 \leq t_1 \leq S \end{cases}, \quad (10)$$

где S — продолжительность землетрясения;

x — константа.

Кроме того делается допущение

$$E(u_i) = 0 \dots i = 1, 2, \dots, n.$$

Тогда ускорение грунта x_g записывается в виде

$$x_g^n(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0 \\ \sum_{i=1}^n V_i \delta(t - t_i) & \text{при } 0 \leq t \leq S \\ 0 & \text{при } t > S \end{cases}, \quad (11)$$

где $\delta(t)$ — дельта — функция Дирака.

Данное предположение некоррелированности скачков скорости позволило получить законы распределения для различных характеристик конструкции, чего добиться при решении вероятностных задач не удавалось.

Но рассматриваемая теория встретила большое число затруднений, связанное с увеличением степеней свободы системы и учетом ряда дополнительных факторов, таких как учет затухания системы и изменение во времени интенсивности скачков скорости. Что привело к развитию других стохастических моделей сейсмического воздействия.

Одними из первых применили теорию случайных функций к расчету сооружений на сейсмостойкость И.И. Гольденблат и М.И. Эстрин. Идея состояла в представлении движения земли при землетрясении в виде стационарного случайного процесса, учитывающего статистическую связь между значениями скорости в различные моменты времени. Внешнее воздействие заменялось на «белый шум», имеющий бесконечную дисперсию, причем спектральная плотность внешнего возмущения представлялась «гладкой» без острых пиков, а эффективная полоса пропускания системы — узкой. Замена спектра внешнего воздействия на равномерный, не зависящий от частоты спектр «белого шума», сказывалась только в полосе пропускания системы, а так как она мала, соответственно и мала погрешность.

Задача о законе распределения для процесса, описывающего поведение конструкции, сводится к решению уравнения Фокера — Планка с соответствующими граничными условиями. Уравнение Фокера — Планка имеет вид:

$$\frac{\partial W(x)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} [K_1(x)W(x)] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} [K_2(x)W(x)], \quad (12)$$

где $W(x)$ — плотность вероятности;

$K_1(x)$ и $K_2(x)$ — некоторые заданные функции, называемые коэффициентами интенсивности, в общем случае зависящие от времени, но для стационарного процесса эти функции от времени не зависят.

Если ввести понятие потока вероятности

$$G(x) = K_1(x)W(x) - \frac{1}{2} [K_2(x)W(x)], \quad (13)$$

то уравнение Фокера — Планка можно записать в следующей форме

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial x} = 0, \quad (14)$$

и трактовать его как уравнение сохранения вероятности.

Решение уравнения (12) при граничных условиях

$$W(x_1, t) = W(x_2, t) = 0 \quad (t > t_0), \quad (15)$$

дает вероятность не выйти за пределы интервала (x_1, x_2) за время от t_0 до t .

Выбирая некоторое фиксированное значение x_0 внутри интервала (x_1, x_2) и вводя в рассмотрение среднее время $M(x_0)$ достижения границ $x = x_1$ или $x = x_2$, при условии что, в момент времени $t = t_0$ точка находилась в точке x_0 , уравнение будет иметь вид

$$-1 = K_1(x_0) \frac{\partial M(x_0)}{\partial x_0} + \frac{1}{2} K_2(x_0) \frac{\partial^2 M(x_0)}{\partial x_0^2}. \quad (16)$$

Решение этого уравнения, кроме того, должно удовлетворять граничным условиям

$$M(x_1) = M(x_2) = 0. \quad (17)$$

Дифференциальное уравнение, описывающее поведение конструкции имеет вид

$$\zeta \ddot{x} + 2\nu\zeta \dot{x} + \omega^2 \zeta = \xi_1(t), \quad (18)$$

где $\xi_1(t)$ — случайная стационарная функция; ν и ω — постоянные, характеризующие затухания и жесткость системы.

Данная система является узкополосной и процесс на выходе будет квазигармоническим, т.е. представимым в виде:

$$\zeta(t) = A(t) \cos \varphi(t), \quad (19)$$

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \omega t + \psi(t), \quad (20)$$

где $A(t)$ и $\psi(t)$ — случайные функции времени, медленно меняющиеся по сравнению с $\cos \omega t$.

Из уравнения (19) легко получить приближенное дифференциальное уравнение для огибающей

$$A' = -\nu A + C/A + F \eta_0(t), \quad (21)$$

где C и F — некоторые постоянные; $\eta_0(t)$ — стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием.

Данная теория является корреляционной и пользуется только двумя первыми моментами при описании случайных процессов.

Существенным недостатком этой теории является предположение стационарности, и вытекающая однородность во времени статистических характеристик грунта, чего в действительности не наблюдается.

Дальнейшее развитие получили теории, основанные на представлении движения земли при землетрясении с помощью нестационарного случайного процесса, имеющего вид произведения детерминированной функции времени на стационарную случайную величину.

Следующим шагом в современном представлении сейсмического воздействия является спектрально-временная модель, предложенная Я.М. Айзенбергом [1]. Данная модель сейсмических колебаний грунта, учитывает возможное разнообразие спектрального состава различных землетрясений и позволяет прогнозировать спектры вероятных, но незарегистрированных землетрясений.

Расчетная модель сейсмического движения грунта представляется в виде дискретного множества M_j нестационарных гауссовских мультипликативных процессов, каждый j -й элемент которого в заданной (известной из опыта) области $\varpi_{\min} \leq \varpi_j \leq \varpi_{\max}$ выражается следующим образом

$$\Phi(t, \varpi_j) = \begin{cases} A(t, \varpi_j) \sigma(\varpi_j) \varphi(t, \varpi_j) & \text{при } t > 0 \\ 0 & \text{при } t \leq 0 \end{cases}, \quad (22)$$

где $A(t, \varpi_j)$ — нормированная огибающая функция, задаваемая при фиксированных значениях ϖ_j в виде импульса Берлаге

$$A(t, \varpi_j) = A_j T e^{-\nu \omega_j t}; \quad |A|_{\max} = 1;$$

$\sigma(\varpi_j)$ — среднеквадратичное значение ускорения;

ϖ_j — несущая частота, приближенно равная доминантной частоте j -го процесса;

$\varphi(t, \varpi_j)$ — нормируемый (единичный) стационарный гауссовский процесс, характеризуемый косинус — экспоненциальной корреляционной функцией вида

$$K(\tau) = e^{-\alpha_j |\tau|} \cos \varpi_j \tau. \quad (23)$$

Особенностью модели является то, что в расчетах учитывается не одна характерная акселерограмма (или спектр реакции), а набор акселерограмм (или спектров реакции). Каждой акселерограмме из набора или спектру реакции соответствует определенная доминантная (несущая) частота. Доминантные частоты заполняют определенный диапазон, область, задаваемую на основании имеющихся эмпирических данных.

Такой способ описания расчетного воздействия учитывает неполноту исходной информации о доминантных частотах ожидаемых землетрясений. Эта неполнота информации определяется как отсутствием сейсмологических данных, так и физическим разнообразием движений.

Рассматриваемая модель воздействия учитывает четыре параметра. Причем три параметра являются некоторыми простыми функциями четвертого параметра (несущей частоты).

Модель Я.М. Айзенберга была построена на основании статистического анализа, имеющихся в распоряжении автора акселерограмм сильных землетрясений, зарегистрированных в мире. Однако накопление сейсмологической информации позволяет совершенствовать математическое описание сейсмического процесса в рамках модификации данной модели, что приводит к созданию в конкретных сейсмологических условиях более точных региональных моделей воздействия.

Дальнейшее развитие спектрально-временная модель получила в работах учеников Я.М. Айзенберга: В.И. Смирнова, К.Ю. Залилова, С.Н. Урановой и других [1, 11].

В настоящее время наибольшее распространение получили два направления расчета зданий на сейсмостойкость. В первом случае за расчетную модель принимается спектральный график, огибающий максимальные ординаты спектров динамических реакций линейных осцилляторов. Примером такой модели является спектральная кривая коэффициентов динамичности $\beta(T)$, принятая в действующем СП 14.13330.2011 «Строительство в сейсмических районах». Актуализированная редакция СНиП II-7-81* [10].

Второе направление основано на использовании в расчетах реальных записей ускорений грунта прошлых землетрясений или искусственных акселерограмм.

Разработаны и применяются различные методы генерации расчетных сейсмических воздействий, основанные на модели разлома грунта [9, 16].

При теоретическом моделировании применяют два подхода к расчетам.

Первый, детерминистский подход, требует задания в источнике пространственного и временного распределения подвижки, а также пространственного и временного распределения свойств среды (геометрия, физико-механические параметры). В этом случае применяется ряд методов расчета «функций Грина», которые позволяют оценить смещение грунта в точке наблюдения. При этом для расчетов высокочастотных колебаний в ближней зоне и в гетерогенной среде используются лучевые методы.

Однако рассмотрение моделей однородного распределения подвижки не дает хороших результатов при расчете высокочастотных колебаний, так как коротко-

волновые движения (высокочастотные колебания) определяются неоднородным распределением подвижки и локальными значениями очаговых параметров. Так как предсказать детальное пространственно — временное распределение подвижек в очагах будущих землетрясений практически невозможно, применяются стохастические очаговые модели.

Для расчетов короткопериодных движений грунта используются два вида стохастических моделей: барьерная модель А. Папагеоргиу и К. Аки и модель, обозначаемая ω^2 , Т. Хэнкса и Р. Мак-Гуайра.

В рамках барьерной модели очаг рассматривается в виде прямоугольной площадки, покрытой трещинами круговой формы одинакового диаметра, разделенными ненарушенным материалом. Трещины размещены независимо и случайно, излучение сейсмических волн таким источником описывается выражением Т. Сато и Т. Хиросава. Спектр Фурье результирующего движения имеет случайную фазу, что позволяет отнести барьерную модель к разновидностям стохастических моделей.

Барьерная модель описывается пятью основными параметрами: длиной и шириной очага, максимальной подвижкой, скоростью испарывания и барьерным интервалом. В этой модели значение высокочастотного края спектра F_m зависит от размеров источника и других его параметров.

В модели, обозначаемой ω^2 , значение F_m определяется эффектом затухания колебаний в приповерхностных отложениях. Ускорения колебаний моделируются «белым шумом» в частотном интервале $f_0 - f_m$, где f_0 - угловая частота спектра и форма спектра по Дж. Бруну. Модель характеризуется величинами момента M_0 , сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ и F_m .

Д. Бур развил обе расчетные модели и применил метод случайных колебаний, расширив диапазон магнитуд [16]. О.В. Павленко модифицировала программу Д. Бура [17] для учета протяженности сейсмических очагов и местных грунтовых условий и использовала ее для генерирования синтезированных акселерограмм.

Второй подход — полуэмпирический метод, предложенный Харцелом. В этом методе в качестве «функций Грина» используются записи слабых землетрясений, что позволяет избежать необходимости вычисления этих функций теоретическими методами. Полуэмпирический метод является наиболее практичным при определении параметров сейсмических воздействий на основе модели разлома, но для его применения необходимы записи хотя бы слабых землетрясений.

В работах А.М. Уздина показано, что при построении синтетических акселерограмм, как правило, не учитывались спектры смещений реальных воздействий [12]. Несоответствие спектров воздействий синтетических акселерограмм реальным наглядно показаны им на приведенных примерах. Так же отмечено, что в полной мере это относится и к синтетическим сейсмограммам, получаемым двойным интегрированием акселерограмм. А.М. Уздиным делается вывод, что, известные приемы построения синтетических акселерограмм не обеспечивают правильного описания смещений основания и что именно большие смещения основания на низких частотах могут привести к обрушению здания на сейсмоизолирующих фундаментах. Указанные

недостатки существенно ограничивают применение известных синтетических акселерограмм.

Довольно распространенным способом представления колебаний грунта является применение акселерограмм прошлых землетрясений. Такие акселерограммы используются при численном анализе сейсмической реакции нелинейных систем, когда применение спектров реакции в прямом виде не может быть использовано.

Выбор подходящих акселерограмм прошлых землетрясений для конкретного района строительства является трудной задачей. Если такие записи и имеются, то вряд ли последующие землетрясения в точности повторяют параметры предыдущих. Каждая запись сугубо индивидуальна как по своему частотному составу, так и амплитудному уровню и продолжительности.

Методика формирования набора акселерограмм, предназначенного для применения в прямых динамических расчетах зданий и сооружений предложена в работах И.Е. Ицкова [6]. В работах рассматривается способ формирования расчетного набора синтезированных акселерограмм. Этот набор предлагается формировать в виде группы синтезированных акселерограмм, согласующихся с заданными спектрами реакций (ускорений) и некоторыми другими характеристиками сейсмического процесса, в качестве которых рассматриваются длительность, частотный состав и форма огибающей.

Отсутствие статистически достаточного количества инструментальных записей землетрясений привело к развитию моделей сейсмического воздействия на основе искусственных (синтетических) акселерограмм, реализованных в виде случайных процессов.

Применение последних в моделировании сейсмических колебаний грунта является не только наилучшим статистическим представлением накопленной экспериментальной информации. Такая идеализация раздвигает рамки использования сейсмологической информации, позволяет прогнозировать количественные параметры ожидаемых землетрясений и учитывать региональный характер сейсмического воздействия.

Спектральный метод описания сейсмических воздействий хотя и является удобным, но с точки зрения выполнения практических расчетов он обладает существенным недостатком. Этот недостаток заключается в потере информации о развитии сейсмического процесса во времени. Для сильных землетрясений это немаловажный фактор, так как сооружения являются нелинейными системами и их физические характеристики могут заметно меняться в течение самого землетрясения в результате развития усталостных явлений или частичных повреждений несущих конструкций. Другим недостатком спектрального представления сейсмических воздействий, как отмечалось ранее, является возможность получения только верхних оценок сейсмической реакции для зданий.

Заключение.

Выбор подходящих акселерограмм прошлых землетрясений для конкретного района строительства является трудной задачей. Если такие записи и имеются, то вряд ли последующие землетрясения в точности повторяют параметры предыдущих. Каждая запись сугубо индивидуальна

на как по своему частотному составу, так и амплитудному уровню и продолжительности.

Отсутствие статистически достаточного количества инструментальных записей землетрясений привело к развитию моделей сейсмического воздействия на основе искусственных (синтетических) акселерограмм, реализованных в виде случайных процессов.

Применение последних в моделировании сейсмических колебаний грунта является не только наилучшим статистическим представлением накопленной экспериментальной информации. Такая идеализация раздвигает рамки использования сейсмологической информации, позволяет прогнозировать количественные параметры ожидаемых землетрясений и учитывать региональный характер сейсмического воздействия.

Литература.

1. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. — М.: Стройиздат. 1976. 229 с.
2. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т.1. — М.: Мир. 1980. 520с.
3. Антикаев Ф.Ф. Учёт длительности колебаний при инструментальной оценке сейсмической интенсивности. — В кн.: Сейсмическая шкала и методы её измерения. — М.: Наука. 1975. С.234-239.
4. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. — М.: 1982. 352 с.
5. Завриев К.С. Динамическая теория сейсмостойкости. — Тбилиси: 1936. 258с.
6. Ицков И.Е. Методика формирования набора акселерограмм, предназначенного для применения в прямых динамических расчетах зданий и сооружений. // Сейсмостойкое строительство. 1999. №5. С.9-13.
7. Корчинский И.Л. Сейсмостойкое строительство зданий. — М.: Высшая школа. 1971. 320 с.
8. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. — М.: Гос. изд. по стрит. и арх. 1962. 212с.
9. Раутиан Т.Г. Метод построения синтетических акселерограмм сильных землетрясений с учётом местных особенностей. — В кн.: Вопросы количественной оценки сейсмической опасности. — М.: Наука. 1975. С.105-110.
10. СП 14.13330.2011. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. - М.: 2011. 84 с.
11. Смирнов В.И., Залилов К.Ю. К вопросу использования реальных акселерограмм землетрясений в расчетах на сейсмостойкость. / Республиканская научно – техническая конференция молодых ученых и специалистов Тадж. ССР, посвященная XXVI съезду КПСС. Душанбе. 1982. С.47-48.
12. Уздин А.М., Дмитриевская Л.Н., Тумель И.А. К вопросу о концепции оценки интенсивности сейсмического воздействия. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2008. №3. С.57-59.
13. Хачиян Э.Е. Прикладная сейсмология. – Ер.: Гутунтун НАН РА. 2008. 491с.
14. Biot V.A Theory of elastic system vibration under transient impulse with application to earthquake-proof buildings. Proceeding of the National Academy of Science, U.S.A. 1933; 19(2). PP.262-268.
15. Biot V.A Theory of vibration of building during earthquakes. Zeitschrift fur Angewandte Matematic und Mechanik 1934; 14(4). PP.213-233/
16. Boore D.V. Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method. Birkhauser Verlag, Basel, Pure appl. geophys. 160 (2003). PP.635-676.
17. Boore D.V. SMSIM - Fortran Programs for Simulating Ground Motions from Earthquakes: Version 2.0 - A Revision of OFR 96-80-A. A modified version of OFR 00-509, describing the program as of August 08, 2002 (version 2.19) (2003). 56 p.
18. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Standard EN 1998-1 December 2004. 233 p.
19. Guidelines for Calculation Procedure and Technical Standard on Seismically Isolated Structures (written in Japanese), May 2001, Ministry of Vehicle, Infrastructure and Transport, Building Center of Japan.
20. Hausner G.W., Characteristics of strong motion earthquakes. Bull. Seism. Soc. Am. V. 37, N1, 1947, p. 291-312.
21. International Building Code 2006. First Printing: January 2006. 679 p.
22. Omori F. Seismic Experiments on the Fracturing and Overturning of Columns, Publ. Earthquake Invest. Comm. in foreign Languages, №4, Tokyo, 1910. 99 p.
23. Penzien J., Watabo M. Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motions. – Earthquake eng. Struct. dyn. 1975, 3, №4. PP.365-373.
24. Rosenblueth E. A Basis for Aseismic Design, Doctoral Dissertation, Univ. of ILL. 1951.
25. Suyehiro K. A seismic vibration analyser and the records obtained therewith. Bulletin of the Earthquake Research Institute-University of Tokyo 1926; 1. PP.59-64.
26. Technical Rule for Seismic Isolation. CECS 2001. Beijing, P. R. China, 2001. 32 p.
27. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка. 3-е изд., переработанное. – М.: Недра. 1980. 551 с.

Материалы хранятся по адресу:
109428, Москва, ул. 2-я Институтская, 6.
Тел.: (499) 174-70-21. E-mail: smirnov@raee.su.

