

УДК 550.34. 06.013.3

DOI: 10.23671/VNC.2014.2.55433

АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ИНЖЕНЕРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

© 2014 Х.О. Чотчаев, с.н.с.

Центр геофизических исследований ВНЦ РАН и PCO-A, Россия, 362002,
г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi_ras@mail.ru

При этом используется целый ряд современных принципов и подходов. Здесь, в частности, активно развивается вероятностный подход, приближающий оценку сейсмической ситуации к реальной. В то же время почти каждое разрушительное землетрясение высвечивает ряд все новых проблем или в очередной раз демонстрирует ограниченность наших знаний. В статье приводится анализ некоторых концепций сейсмических воздействий на инженерные сооружения. Любая территория в сейсмически опасном регионе подлежит специальному изучению на предмет дифференциации зон с различной сейсмической опасностью.

Ключевые слова: инженерные сооружения, сейсмический сигнал, глубина фронта.

Любая территория в сейсмически опасном регионе подлежит специальному изучению на предмет дифференциации зон с различной сейсмической опасностью [Заалишвили и др., 2011]. При этом используется целый ряд современных принципов и подходов. Здесь, в частности, активно развивается вероятностный подход, приближающий оценку сейсмической ситуации к реальной [Заалишвили, Рогожин, 2010]. В то же время почти каждое разрушительное землетрясение высвечивает ряд все новых проблем или в очередной раз демонстрирует ограниченность наших знаний [Керимов, Гайсумов, 2009; 2010; 2012]. При этом меньшее внимание, за редким исключением, уделяется собственно сейсмическому воздействию [Заалишвили, 2009]. Здесь имеются проблемы, путь решения которых не всегда единодушно признается учеными и специалистами. Это, в условиях насыщенности той или иной территории источниками с потенциалом сильных воздействий, обуславливает неопределенность и повышенную сейсмическую опасность.

Считается, что при воздействии упругих сейсмических колебаний землетрясений на конструкции строительных сооружений доминирующая роль отводится параметру ускорения грунта, возникающему в меньшей степени в режиме сжатия-растяжения и в большей – в сдвиговом режиме. Численные значения ускорения с разрушительными последствиями, вычисленные по записям акселерограмм, либо пересчитанные дифференцированием велосигграмм или сейсмограмм, сейсмологи оценивают в десятые доли величины ускорения силы тяжести, реже в 1,2-1,6 g. Концепция сейсмологов основывается на признании превалирующей роли сейсмического воздействия низкочастотных колебаний, несущих основную часть упругой энергии землетрясений и содержащих в спектральном составе сейсмического импульса землетрясения, в том числе, и колебания, совпадающие по частоте с собственными частотами многих конструкций сооружения, приводящие часто к резонансному эффекту [Заалишвили и др., 2009а, б; 2010].

Наряду с этим существует ряд гипотез, отрицающих обоснованность официально действующих научных положений и норм, используемых при проектировании сейсмостойких инженерных сооружений в сейсмоопасных районах.

Вкратце охарактеризуем некоторые из этих гипотез.

По мнению группы авторов [Смирнов и др., 2013], принятые по СНиП нормативные ускорения не способны вызывать характерные срезы строительных конструкций, провоцирующие впоследствии масштабные разрушения зданий. Для этого величины ускорения, по мнению авторов, должны достигать порядка $1000g$ и более, которые, якобы, в действительности и имеют место в строительных конструкциях при землетрясениях 7-8 баллов [Смирнов и др., 2013] и являются основной причиной их разрушений. Авторы исключают возможность разрушительного воздействия низкочастотных колебаний землетрясений на строительные сооружения или резонансного эффекта и декларируют импульсно-волновую природу воздействия, при этом недостаточно правильно представляя себе физику упругой волны и основы ее распространения по законам геометрической сейсмологии.

Причину «ошибочного направления развития» сейсмостойкого строительства и «заблуждения сейсмологов» авторы формулируют следующим образом: «Таким образом, было решено (**сейсмологами**), что главным и единственным сейсмическим движением грунта являются только его низкочастотные гармонические колебания. При этом про сейсмические волны было решено либо забыть, либо считать, что эти волны проявляются под зданиями только в виде этих самых колебаний».

Отрицая доминант низкочастотных колебаний и связанный с ними негативный эффект резонансных явлений в конструкциях, авторы упрекают сейсмологов в том, что они создали колебательную модель распространения упругих волн и спектральный метод расчета, которые лежат в основе официальной научной концепции в существующих нормативных документах [СНиП II-7-81..., 1982]. Обвиняют сейсмологов и в инженерных просчетах проектирования в сейсмических зонах 7-8-ми балльной интенсивности за несоответствие разрушительных последствий расчетным запасам сейсмостойкости конструкций, как известно, являющееся прерогативой специалистов по сопротивлению материалов и строительной механики.

Следует отметить, что в интервале времени развития события «землетрясение – антропогенная среда» участие сейсмологии заканчивается грунтами основания, действительную или расчетную реакцию которых по различным параметрам кинематики и динамики упругой волны происшедшего или ожидаемого землетрясения сейсмолог обязан изучить и охарактеризовать для дальнейшего использования сведений специалистами по сооружениям и конструкциям. Реакция инженерных сооружений на сейсмическое воздействие грунтов их оснований зависит от физико-механических характеристик строительных материалов, архитектурно-конструкторских особенностей сооружения, к которым сейсмология не имеет никакого отношения. В этой связи попытка специалистов по строительной механике обвинить сейсмологию вообще и сейсмологов в частности в установлении диктата на сейсмостойкое строительство выглядит не совсем корректно.

Другие противники официальной теории механизма воздействия сейсмической волны на инженерные сооружения отрицают доминирующую роль ускорения и акцентируют внимание на смещении, утверждая, что именно смещение является причиной разрушительного эффекта землетрясений, казалось бы, относительно уме-

ренной интенсивности (7-8 баллов) [Курзанов, 1995]. Они полагают, что низкочастотные сейсмические колебания, с большой амплитудой перемещений грунтов III категории, вызывают в сооружениях разрушительные бегущие поперечные волны, крутизна которых тем больше, чем больше амплитуда сейсмических перемещений грунта и чем меньше (в определенных пределах) частота его колебаний. (На самом деле крутизну можно усилить и за счет увеличения частоты колебаний).

При этом они справедливо считают, что во время сильных землетрясений ускорение грунтов I категории больше ускорения грунтов III категории, хотя разрушительное воздействие имеет обратную зависимость.

Дело в том, что интервал времени, в течение которого упругая деформация материальной точки, находящейся в процессе гармонического колебания, достигает наибольшей амплитуды, равен четверти периода колебаний. Тогда величина пикового ускорения будет равна:

$$\ddot{A}=16Af^2, \quad (1)$$

где A – амплитуда, f – частота колебаний. Поскольку отклик плотных пород на сейсмическое воздействие характеризуется, как известно, спектром высокочастотных колебаний, именно их ускорение определяет динамику плотной среды. Однако следует учесть, что проявление больших ускорений в грунтах I категории – явление кратковременное из-за больших значений акустической жесткости среды и скорости распространения упругой волны. Максимальное смещение материальной точки относительно положения равновесия происходит быстро, а за счет того, что жесткость среды превосходит момент упругой силы импульса на фронте волны, переносимой волной энергии недостаточно для развития больших смещений и преодоления стадии упругой или упругопластической деформации. Исключение может иметь место в непосредственной близости от очага импульса.

При взаимодействии грунтов III категории с коротковолновыми колебаниями, вязкие составляющие среды проявляют себя как упругие, и остаточные явления заметно не проявляются, в то время как распространение длинноволновых колебаний в несовершеннo-упругой среде сопровождается вязкими деформациями и понижением скорости волн.

Инакомыслие в оценке природы сейсмических волн, в кинематике и динамике их воздействия на инженерные сооружения вызвано, прежде всего, стремлением найти причины часто наблюдаемого несоответствия последствий воздействия землетрясений 7-8 балльной интенсивности на инженерные сооружения, построенные с запасом прочности, соответствующим расчетной сейсмической интенсивности грунтов.

Высокий уровень разрушений и специфика повреждений, часто несоответствующие интенсивностям произошедших землетрясений, могут быть следствием, к примеру, несовершенства принятой методики использования расчетных и синтетических акселерограмм, часто используемых взамен инструментально записанных оригиналов, недостаточного учета параметров и свойств фактического геологического разреза, из-за низкого качества геологического и сейсмического микрорайонирования, а также несовершенства измерительной аппаратуры, как следствие развития направления использования инерциальных измерительных систем. Ниже мы рассмотрим состоятельность этой концепции в комплексе с энергетическими воздействиями упругих волн землетрясений на основе сейсмологических толкований.

Рассмотрим физическую модель среды, способствующую возникновению смещения и его производных, используемых в анализируемых концепциях в качестве определяющих параметров реакции волноводов на воздействия упругих волн землетрясений.

Теоретические основы сейсмологии разработаны из предположения распространения упругой волны вдоль сейсмических лучей по законам геометрической оптики, определяющие те же особенности изменения упругой волны при распространении в сплошных средах, которые характерны для световых волн в оптике.

Исходя из этого, выделим некоторые особенности распространения упругой волны, имеющие отношение к рассматриваемым концепциям.

- Фронт упругой волны не может иметь разрыва (случай обратного предусматривает существование абсолютно жестких волноводов либо сред с бесконечными скоростями упругих волн). При этом смещение и его производные могут иметь разрыв. Поверхность, на которой смещение терпит сильный разрыв, характеризуется разрушением среды (зона взрывного очага, разрывы земной поверхности, глубинные тектонические разрывы и трещиноватости, складкообразование и сейсмические оползни, разрушения конструкций и т. д.) [Саваренский, Кирнос, 1956].

- Каждая падающая волна расщепляется на две отраженные волны, одна из которых продольная, другая поперечная (обменная), и две проходящие волны, также, одна из которых продольная, другая поперечная (обменная). Проходящие волны при определенных соотношениях скоростей соседних слоев, достигая критического угла падения с границей раздела, образуют во втором слое преломленные волны.

Согласно этим особенностям, геометрическая сейсмика не допускает преломление волны второй средой, если скорость упругой волны в первой среде больше, чем во второй.

- Скорость распространения упругой волны любого типа в изотропной однородной среде одинакова независимо от направления распространения.

- Сейсмические лучи землетрясений с приближением к поверхности Земли подвергаются рефракции за счет градиента геостатического давления с глубиной. Чем больше градиент, тем больше угол выхода сейсмического луча на дневную поверхность. Сейсмический луч, наиболее вероятной, проходящей волны в строительных грунтах (зона малых скоростей), как правило, выходит на границу раздела под углом близким к 90° .

- Ускорение может скачком возрастать при переходе волны в иную литологическую среду, тектоническую зону, геоморфологическую структуру с характерным гидрогеологическим режимом, либо плавно изменяться в средах, где наблюдается рефракция волны.

- При распространении групповой волны в гетерогенных средах наблюдается изменение фазовой скорости упругих волн в зависимости от их длины. Если низкочастотные колебания распространяются быстрее высокочастотных, то в тыловой зоне образуются новые волны, которые затухают к фронту, максимумы отдельных монохроматических волн групповой волны опережают максимум групповой волны, что означает уменьшение ее фазовой скорости (случай нормальной или геометрической дисперсии, и она характерна для объемных волн). В упруго-вязко-пластических средах, когда высокочастотные колебания опережают низкочастотные, фазовая скорость групповой волны увеличивается, так как в начале групповой волны образуются новые волны, а на конце они исчезают. В этом случае максимум группо-

вой волны перемещается быстрее, чем максимумы отдельных монохроматических волн (случай аномальной дисперсии для поверхностных волн).

Аномальная дисперсия возникает потому, что при взаимодействии с коротковолновыми колебаниями вязкие деформации среды проявляются не полностью. За кратковременный цикл колебаний, присущий коротким волнам, вязкие составляющие среды проявляют себя как упругие.

Распространение длинноволновых колебаний в несовершеннo-упругой среде сопровождается вязкими деформациями, т. е. пониженной упругостью среды, а соответственно и понижением скорости волн.

Импульс, как результат взаимодействия момента силы импульса и сейсмических свойств среды, состоит из множества монохроматических волн, характеризующихся гармоническими колебаниями различной частоты. Ширина частотного спектра колебаний определяет глубину фронта импульсной волны, представляющую собой растянутый график аperiodических колебаний сложной формы, регистрируемый на сейсмограмме в виде вступления цуга колебаний различной продолжительности, определяемой процессом протекания импульса в конкретной геологической среде. Дальнейшее изменение спектрального состава импульса всецело зависит от акустической жесткости среды, в которой распространяется волна. Эта зависимость лежит в основе корреляционного метода преломленных волн, использующий сравнительный анализ сейсмических характеристик упругих волн, записанных на больших удалениях друг от друга. К сожалению, многие идентифицируют понятия МПВ и КМПВ, несмотря на то, что первое характеризует особенности распространения волны на границе двух контрастных сред, а второе – прослеживает постоянство сейсмологических и сейсмических характеристик внутри одного слоя.

Упругая деформация геологической среды представляет собой кратковременное смещение элементов среды в виде сдвига или сжатия-растяжения, в зависимости от действия нормальной (ортогональной) или касательной (тангенциальной) составляющих вектора возмущающего импульса.

В отличие от полей электрических и электромагнитных, магнитных и гравитационных, где напряженность и потенциал поля можно наблюдать в любой точке полупространства и сколь угодно долго, упругая энергия точечного импульсного источника не может находиться в статическом состоянии. Она проявляется в динамике, концентрируясь только во временном интервале глубины фронта, включая и зону релаксации со стороны тыла, которая характеризуется, как правило, дефицитом энергии за счёт её уплотнения на фронте.

Упругая взаимосвязь между распространяющимся от очага импульсом и упруго-деформационными свойствами среды наступает в момент, когда давление на грунт на фронте не превышает предел упругой деформации среды, что означает установления динамического условия распространения сейсмического сигнала, которое можно записать в следующем виде:

$$- \tau_n = 2\pi f A V \rho, \quad (2)$$

где τ_n – напряжение деформации среды, V – скорость передачи энергии в направлении вектора силы, $2\pi f A$ – круговая скорость, A – амплитуда смещения, f – частота колебания.

Поскольку существует предел упругой деформации среды, после чего начинают проявляться явления пластических изменений или необратимых разрушений, физическая сущность равенства (2) заключается в том, что скорость переноса энергии

волны соответствует той максимальной амплитуде смещения, при которой среда продолжает сохранять упруго-деформационные свойства. Говоря иначе, скорость переноса энергии не позволяет этой энергии в любой точке фронта превысить амплитуду смещения предела упругой деформации. Если это условие не соблюдается, то энергии упругой волны на фронте приводит к нелинейным изменениям среды в виде тектонических нарушений, сейсмических оползней, зон трещиноватостей, разрывов участков дневной поверхности.

Сейсмический сигнал представляет собой результат реакции среды на динамические особенности процесса протекания импульса. Поскольку условия взаимодействия этих двух физических событий постоянно меняются, параметры сейсмического сигнала с расширением фронта волны будут меняться.

Физическую сущность сейсмического сигнала составляет импульс силы или, что одно и то же, количество движения, имеющие вектор направленности от очага импульса к периферии. Оба эти физические понятия характеризуют мгновенное значение кинетической энергии, концентрированной в замкнутом расширяющемся слое пространства, толщиной равной глубине фронта.

Под глубиной фронта подразумевается промежуток времени, разделяющий тыл сигнала, когда область среды, испытавшая упругое воздействие, уже восстановила положение первоначального равновесия, от переда фронта, где среда ещё не испытала упругого воздействия. Чем меньше глубина фронта, тем отчётливее вступление фронта на сейсмограмме и тем короче импульс, что очень существенно при регистрации в ближней зоне.

Сейсмический сигнал обладает в каждый момент времени определённой амплитудой, частотным спектром и длительностью. Эти параметры характеризуют динамические и кинематические характеристики сигнала, фазу вступления фронта, его глубину и спектральный состав, на основании которых определяются физико-механические характеристики горных пород и их литологический состав.

Любой рассматриваемый параметр источника возбуждения – импульс силы, количество движения или энергия упругой составляющей – расходуется на упругое смещение материальных точек, охваченных глубиной фронта упругой волны. Амплитуда смещения каждой точки будет зависеть от ее расположения на профиле глубины фронта и спектрального состава волны, характеризуя при этом амплитуду отдельной монохроматической волны. Каждая материальная точка, смещаясь относительно своего положения равновесия, начинает с запаздыванием воздействовать на соседнюю точку, смещая ее относительно ее же положения равновесия. Последовательное вовлечение материальных точек в процесс смещения представляет собой упругую (сейсмическую) волну, а смещение материальных точек относительно положения равновесия есть колебания. В случае отдельной монохроматической волны или импульса в целом эти смещения представляют собой соответственно затухающие гармонические или аperiodические колебания. Любая сейсмическая волна является порождением упругого отклонения частиц среды относительно положения равновесия. Смещение материальных точек на фронте ведет к вовлечению в процесс деформации соседних точек с некоторым запаздыванием по фазе, и этот процесс продолжается до тех пор, пока амплитуда смещения «А» в правой части формулы (2) теоретически не будет равна нулю, а практически – величине равной разрешающей способности регистрирующего канала.

Если тело не может быть деформировано, то есть телу нельзя передать никакой другой энергии, кроме кинетической энергии поступательного или вращательного движения, в нем не может возникнуть и распространяться сейсмическая волна.

В связи с этим, спорно утверждение авторов [Смирнов и др., 2013], что сейсмологи, оперируя колебаниями, не учитывают сейсмические волны.

Основные положения альтернативного взгляда на воздействие землетрясений, приведенные авторами в декларативной форме, можно обобщить в следующих определениях.

- Отрицание резонансной модели разрушения инженерных сооружений.
- Второстепенная роль низкочастотных колебаний в энергопереносе и их полное затухание в пределах эпицентрального расстояния порядка 10 км.
- Утверждение импульсной модели воздействия за счет вторичных сдвиговых волн, вызывающих ударные волны.
- Отрицание какой бы то не было разрушительной роли сейсмических волн, не вызывающих в грунтах ускорения в 1000 и более единиц силы тяжести.

Обоснованность каждого из этих определений рассмотрим в отдельности.

В общем случае дифференциальное уравнение прямолинейного движения материальной точки, представленное через силовые составляющие, имеет вид:

$$md^2X/dt^2 + 2nmdX/dt + cX = H \sin(pt + \beta). \quad (3)$$

Слагаемые $[md^2X/dt^2]$, $[2nmdX/dt]$ и $[cX]$ характеризуют силы противодействия смещению (инерциальная сила), внутреннего сопротивления и упругой деформации, сумма которых уравнивает возмущающую силу $H \sin(pt + \beta)$.

Через параметр смещения его можно записать в следующем виде:

$$d^2X/dt^2 + 2ndX/dt + kX = h \sin(pt + \beta), \quad (4)$$

где $2n = \mu / m$, $k^2 = c / m$, $h = H / m$, p и k – круговые частоты колебаний вынужденных и свободных, μ и c – коэффициенты, соответственно, внутреннего трения и упругости среды

Решением уравнения (3), если $n=0$, является:

$$X = a \sin(kt + \alpha) + b \sin(pt + \beta), \quad b = \frac{h}{k^2 - p^2} \quad \text{при } k \neq p, \quad (5)$$

где $[a \sin(kt + \alpha)]$ – является амплитудой свободных колебаний среды, $[b \sin(pt + \beta)]$ – амплитудой вынужденных колебаний под воздействием импульса.

При $k=p$ возникает резонанс и решение примет вид:

$$X = a \sin(kt + \alpha) - \frac{ht}{k} \cos(pt + \beta),$$

которое приводит к резонансу за счет неограниченного роста величины второго слагаемого.

Так как импульс в своем спектре с большой вероятностью может иметь монохроматическую волну с частотой собственных колебаний здания, отрицать резонанс нет никаких оснований.

Ослабление упругой волны в реальных геологических средах происходит, в основном, за счет расхождения величины энергии в расширяющемся пространстве слоя волнового фронта и диссипативных потерь в среде, вызванных неидеальной упругостью геологической среды.

Известно также, что частота колебаний уменьшается при увеличении глубины залегания отражающего горизонта. В силу этого в конце сейсмограммы видимые периоды колебаний отраженных волн заметно больше, чем в ее начале. Это связано с тем, что для используемых на практике частот <100 Гц поглощение обратно пропорционально длине волны. Более сильное поглощение высокочастотных компонентов приводит к тому, что колебания с увеличением времени прихода волн на сейсмограммах все более смещаются в сторону низких частот [Чотчаев, 2013].

Собственно поглощение энергии выражается в зависимости от расстояния показательным законом: $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_0 e^{-2\alpha x}$, а изменение амплитуды также показательной зависимостью вида: $A_x = A_0 e^{-\alpha x}$, где α – коэффициент поглощения среды, x – положение фронта волны в направлении сейсмического луча относительно очага импульса.

Если рассматривать A_0 и A_x как амплитуды двух соседних однофазных колебаний, отстоящих друг от друга на расстоянии одной длины волны, то из выражения

$$\alpha x = \ln \frac{A_0}{A_x} \quad \text{вытекает, что } x = \lambda = \frac{V}{f}, \quad \text{далее, используя логарифмический декремент затухания } \delta = \ln \frac{A_0}{A_x} \text{ [Полак, 1954], находим } \delta = \alpha x = \frac{\alpha V}{f}, \quad \text{откуда } \alpha = \frac{\delta f x}{V} \text{ или } A_x = A_0 e^{-\delta x f / v} \quad (6).$$

Используя временной параметр распространения волны, выражение (6) запишется в виде:

$$A_x = A_0 e^{-\delta f t} \quad (7)$$

Так как логарифмический декремент δ для отдельно взятой системы не меняется, затухание упругой волны определяется экспоненциальной зависимостью от частоты и времени пробега.

Напомним, что декремент затухания есть величина уменьшения амплитуды за время пробега волны расстояния в одну длину волны, а логарифмический декремент затухания характеризует такое расстояние пробега, при котором амплитуда волны изменяется в e -раз.

Используем формулу (7) для определения предельного расстояния от эпицентра землетрясения, при котором возможна регистрация смещений квазиимпульсных сигналов с частотами колебаний 200, 100, 50 и 2 Гц, превышающих по амплитуде микросейсмический фон в 3-4 раза (8-9 мкм), если смещение в эпицентре достигало, к примеру, 4,5 м. Условие требует, чтобы выражение $e^{-\delta f t}$ в формуле $A_x = A_0 e^{-\delta f t}$ было равно $5,625 \cdot 10^{-5}$, а произведение $\delta f t = 13,24$. Принимая среднее статистическое значение логарифмического декремента равным 0,012, находим время, удовлетворяющее условию для принятых частот: 200 Гц – 5,51 с; 100 Гц – 11,03 с; 50 Гц – 22,06 с; 2 Гц – 551 с, или при скорости продольных волн порядка 5000 м/с условленное смещение можно будет регистрировать на следующих расстояниях от эпицентра соответственно: 28; 55; 110 и 2758 км.

Однако авторы, произвольно моделируя кинематические и динамические особенности взаимодействия упругой волны в выражено неупругой грунтовой среде, ограничивают возможность распространения любого импульса далее 10 км.

Основная идея альтернативной «волновой модели» авторов [Смирнов и др., 2013] заключается в образовании поперечных волн на границе раздела коренных пород и четвертичных отложений, генерируемых первичными высокоскоростными продольными волнами, распространяющимися в подстилающих коренных породах, что само по себе не является открытием. Открытием является следующая

мысль авторов: «Скорость движения волн в нижних слоях на порядок выше, чем в верхних. В результате они сдвигают свои слои относительно верхних слоев и этим вызывают перекося и сдвиг всей поверхностной толщи грунта глубиной H порядка 100-150 м. Этот сдвиг формируется при пробегании снизу вверх вторичных волн сдвига». И далее: «При этом в сдвигаемой толще накапливается огромная потенциальная энергия. Периодически распрямляясь, толща скачком переводит ее в кинетическую энергию и наносит мягкие боковые удары по фундаментам зданий. Именно эти удары срезают колонны и стены зданий при землетрясениях».

Но, если рассматриваются продольные волны в подстилающем слое, которые образуют волны сдвига в верхней толще, то каким образом они (продольные волны) в нижнем слое могут вызвать сдвиги, которые и являются причиной «накопления огромной потенциальной энергии в верхней толще»? В изложенном виде трактовка может подразумевать не динамическое распространение упругой волны, а колебания автономного осциллятора [Гликман, 2003].

На границе двух сред значения скорости и давления должны непрерывно переходить из одной среды в другую, т. е. ни скорость, ни давление в любой момент времени не должны испытывать скачка. Возникновение скачка скорости означало бы также и появление скачка смещения, т. е. разрыва сплошности на границе сред, что противоречит неразрывности фронта. Наличие постоянно сохраняющегося скачка давления также физически невозможно, так как давление в двух бесконечно близких слоях двух сред должно мгновенно выравниваться. Скачок давления мог бы существовать, если бы на границе был расположен слой источников звука, а скачок скоростей – если бы на границе был слой диполей.

Поскольку предполагать наличие на границе подобных источников нет никаких оснований, можно считать, что давление и скорость частиц меняются при переходе границы непрерывно. Таким образом, на границе будем иметь: $\xi_n + \xi^0 = \xi_{np}$ и $\rho_n + \rho^0 = \rho_{np}$, где ξ_n , ξ^0 , ξ_{np} – скорости смещения материальных частиц соответственно в падающей, отраженной и проходящей волнах, а ρ_n , ρ^0 , ρ_{np} – давления, создаваемые этими волнами.

Между давлением и скоростью частиц существует известное соотношение $p = \pm \rho c \xi$, причем знак плюс соответствует прямой волне, а знак минус – обратной. В падающей волне давление $p_n = \rho_1 c_1 \xi_n$, а в отраженной волне $p_o = -\rho_1 c_1 \xi^0$, для второй среды $p_2 = \rho_2 c_2 \xi_2$. В этих выражениях c_1 , c_2 , ρ_1 , ρ_2 скорости упругих волн в нижней и верхней средах и плотности этих сред. Подставляя эти выражения в граничное условие для скоростей и давлений, получим два уравнения:

$$\xi_n + \xi^0 = \xi_{np} \text{ и } \rho_1 c_1 (\xi_n - \xi^0) = \rho_2 c_2 \xi_{np}, \quad (8)$$

которые описывают условие равновесия на границе коренных пород и четвертичных образований.

Из этих уравнений можно определить отношения для скоростей:

$$r_\xi = \xi^0 / \xi_n = (R_1 - R_2) / (R_1 + R_2) \text{ и } t_\xi = \xi_{np} / \xi_n = 2R_1 / (R_1 + R_2), \quad (9)$$

где R_1 и R_2 – являются волновыми сопротивлениями, соответственно, среды, откуда падает и среды, где проходит волна.

Отношения для давлений имеют следующий вид:

$$r_p = p_o / p_n = - (R_1 - R_2) / (R_1 + R_2) \text{ и } t_p = p_2 / p_1 = 2R_1 / (R_1 + R_2). \quad (10)$$

В выражениях (9) и (10) правые части характеризуют коэффициенты отражения и прохождения.

Если $R_2 > R_1$, т. е. если вторая среда акустически более «жесткая», чем первая, то числитель первого соотношения (9) будет отрицательным. Это значит, что скорость частиц при отражении претерпевает изменение фазы на π радиан, т. е. отраженная волна имеет обратную фазу по сравнению с падающей волной. Скорость же частиц в проходящей волне изменяется синфазно с изменениями в падающей волне, независимо от того, будет ли R_2 больше или меньше R_1 . В то время, как скорость частиц при отражении от более жесткой среды меняет фазу на обратную, фаза давления остается неизменной. На границе возникает эффект торможения, т. е. движения частиц испытывают замедление, а давление объемной массы нижнего слоя на подошву перекрывающей толщи увеличивается.

Если $R_2 < R_1$, т. е. вторая среда акустически более «мягкая», то фаза скорости частиц при отражении остается без изменения, в то время как давление меняет свою фазу на π радиан.

В этом случае частицы среды, наоборот, увеличивают скорость смещения, а давление меняет вектор в противоположную сторону от границы раздела. Получается эффект ускорения.

Так как рассматривается случай $R_2 < R_1$, то имеет место уменьшение суммарного давления падающей и отраженной волн на границу раздела. Для случая, когда волновое сопротивление коренных пород составляет порядка ($2300 \text{ кг/м}^3 * 3000 \text{ м/с}$), а волновое сопротивление четвертичных образований ($1800 \text{ кг/м}^3 * 600 \text{ м/с}$), из выражения: $r_p = p_o/p_n = - (R_1 - R_2)/(R_1 + R_2)$ найдем, что $p_o/p_n = -0,73$, т. е. на создание активного давления на вышележащую толщу расходуется лишь 27% энергии падающей волны. Остальная часть возвращается обратно в виде отражения.

Таким образом, уравнение равновесия на границе двух сплошных сред запишется в виде:

$$0,27\rho_1 c_1 \xi_n = \rho_2 c_2 \xi_{np}, \quad (11)$$

вместо предложенного авторами: $\rho_v c_v \xi_v = 2\rho_n c_n \xi_n$, где индексы «в» и «н» означают верхний и нижний слои.

Проходящая волна, достигнув границы раздела между четвертичными образованиями и дневной поверхностью (условие $R_2 < R_1$), практически полностью отражается. В отраженной волне возникает давление в противофазе падающей, но скорость смещения частиц при этом остается в одной фазе со скоростью проходящей волны, что ведет к увеличению скорости смещения частиц среды.

При рассматриваемом соотношении волновых сопротивлений, большая скорость смещения частиц в грунтах фундамента может играть основную разрушительную роль, но совершенно очевидно, что следует дополнительно исследовать взаимодействие упругой волны с большой скоростью смещения непосредственно с сооружениями и опорными конструкциями, моделируя их как ограниченные по массе среды.

Относительно возможности возникновения ускорений в 1000 g и более и их роли в разрушительной деятельности сейсмических волн следует сказать следующее.

Подавляющее большинство оседлого проживания человечества приходится на площади, покрытые четвертичными и современными продуктами разрушения горных пород, представляющие собой рыхлую неоднородную по литологическому и гранулометрическому составу толщу. Пространственная доступность площадей,

возможность их обработки относительно малыми затратами, плодородие – послужили определяющими факторами освоения территорий грунтов как благоприятных для жизнедеятельности человечества.

Грунты, как гетерогенные среды, впрочем, как и литологические разности горных пород, представляют собой волноводы или «колебательные контуры», в которых роль индуктивности и емкости, среди прочих физико-механических параметров, играют скорость и плотность среды, формирующие характерный для каждого типа грунта отклик на воздействие упругой волны. Отклик включает уровень и тип смещения среды, его скорость и ускорение, частоту и форму колебаний, глубину фронта и т. д., составляющие кинематические и динамические особенности распространения упругой волны.

С точки зрения сейсмических последствий, показателем волновода служит его способность упруго деформироваться в течение всего времени распространения в нем упругой волны. В этом случае соблюдается динамическое условие распространения упругой волны, при котором наступает баланс двух сил – упругой деформации среды и момента силы импульса на фронте волны.

В плотных высокоскоростных породах это условие соблюдается в большинстве случаев, за исключением очаговой зоны импульса, где преобладают диссипативные силы и угроза сейсмического разрушения инженерных сооружений и конструкций, стоящих на таких породах, возможна при возникновении резонансного эффекта. Однако, если учесть, что плотные грунты (1 категория) генерируют относительно высокочастотный спектр колебаний, который не содержит (не должен содержать) частоты собственных колебаний надземных сооружений, резонанс маловероятен.

Грунты, в отличие от коренных пород, обладают меньшими напряжениями упругой деформации, которая наступает раньше прихода максимума фронта волны. При дальнейшем увеличении напряжения на грунт подходом максимума фронта происходит остаточная деформация и разрушение в виде разжижения, оползня, неупругого перемещения и т. д.

Остаточные деформации являются следствием поглощения энергии волны, т. е. следствием ее аккумуляции в грунте, связанной с физико-механическими и сейсмическими параметрами.

Так как агломерации формируются, как правило, не на территориях геологических обнажений, а в пределах развития четвертичных и современных образований, приведенные особенности формирования спектрального состава колебаний и распространения волны в средах противоречат утверждению о преобладающем воздействии на здания высокочастотных волн.

Для выше рассмотренных частот и расчетных расстояний от эпицентра, используя выражение (1), получим наибольшее значение ускорения равное $5,12 \text{ м/с}^2$ или $0,52 \text{ g}$, а для достижения ускорения 1000 g необходимо, чтобы амплитуда смещения на расчетном расстоянии для частоты 200 Гц была не менее $15,3 \text{ мм}$, что для этих частот на расстоянии 28 км представляется недопустимо большой величиной смещения.

Несмотря на приведенные замечания, следует отметить актуальность переосмысления современных основ разработки сейсмоприемников электромагнитного типа, к существенным недостаткам которых следует отнести ограниченность диапазона измеряемых частот, инертность подвижной системы, влияния внешних электрических и магнитных факторов.

Литература

1. Гликман А.Г. «Сейсморазведка – это очень просто». Журнал «Жизнь и безопасность» Санкт-Петербург, 2003
2. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А. Сейсмическое воздействие на площади застройки комплекса «Кавказского музыкального культурного центра» в г. Владикавказе // Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе. Владикавказ: ЦГИ ВНЦ РАН и РСО-А, 2009а. С. 118-123.
3. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А. Сейсмическое воздействие на исследуемой территории с учетом ожидаемых параметров землетрясения // Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе. Владикавказ: ЦГИ ВНЦ РАН и РСО-А, 2009б. С. 124-130.
4. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Бурдзиева О.Г. Определение сейсмического воздействия на основе конкретной инженерно-сейсмической ситуации района // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. № 1. – М.: 2010. С. 35-39.
5. Заалишвили В.Б., Рогожин Е.А. Оценка сейсмической опасности территории на основе современных методов детального сейсмического районирования и сейсмического микрорайонирования. // В сборнике: Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. Труды института геологии Дагестанского научного центра Российской Академии Наук. 2010. С. 251-262.
6. Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В., Габараев А.Ф. Оценка сейсмической опасности территории и построение вероятностных карт. // Геология и геофизика Юга России. 2011. № 1. С. 48-58.
7. Керимов И.А., Гайсумов М.Я. Курчалоевское землетрясение 11 октября 2008 г. // Вестник Академии наук Чеченской Республики, 2009. № 2 (11). С.48-53.
8. Керимов И.А., Гайсумов М.Я. Сильные землетрясения на территории Чеченской Республики // Вестник Академии наук Чеченской Республики, 2010. № 1 (12). С.57-62.
9. Керимов И.А., Гайсумов М.Я., Ахматханов Р.С. Техногенная сейсмичность на месторождениях нефти и газа // Геология и геофизика Юга России, 2012. № 1. С.22-45.
10. Курзанов А.М. Промышленное и гражданское строительство, 1995, № 11.
11. Полак Л.С. Ослабление и поглощение отраженных волн в осадочных породах. Отчет тематической партии по изучению физических свойств пород. Казахская геофизическая контора, 1954 г.
12. Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. Государственное издательство технико-теоретической литературы. – М.: 1956. 543 с.
13. Смирнов С.Б., Ордобаев Б.С., Айдаралиев Б.Р. Сейсмические разрушения – альтернативный взгляд. Часть 2. Бишкек, 2013, с. 143.
14. СНиП II-7-81 «Строительство в сейсмических районах». 1982
15. Чотчаев Х.О. Комплексирование методов сейсморазведки (МПВ) и геолокационного зондирования для выделения геотектонических и геотехнических особенностей разреза Рокского тоннеля, Владикавказ. Труды ЦГИ ВНЦ РАН. 2013

DOI: 10.23671/VNC.2014.2.55433

ANALYSIS OF THE CONCEPTS OF SEISMIC ACTIONS ON THE CIVIL CONSTRUCTIONS

© 2014 H.O. Chotchaev

Center of Geophysical Investigations of VSC RAS and RNO-A, 93a, Markova st.,
Vladikavkaz, 362002, Russia, e-mail: cgi_ras@mail.ru

In this case a whole series of contemporary principles and approaches is used. Here, in particular, actively is developed the probabilistic approach, which brings the estimation of seismic situation closer to real. At the same time almost each destructive earthquake luminesces a number of new problems or demonstrates again and again the limitedness of our knowledge. In the article the analysis of some concepts of seismic actions on the civil constructions is given. Any territory in the seismically dangerous region is a subject to special study to the object of the differentiation of zones with different seismic danger.

The keywords: civil constructions, seismic signal, the depth of front.