

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Д.Ю. САРКИСОВ

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

КУРС ЛЕКЦИЙ

Томск
Издательство ТГАСУ
2015

УДК 624.012.4:699.841(075.8)

ББК 38.53я7

Саркисов Д.Ю. Сейсмостойкость зданий и сооруже-
С20 ний [Текст]: учеб. пособие для студентов специальности
271101 «Строительство уникальных зданий и сооружений» /
автор-составитель Д.Ю. Саркисов. – Томск: Изд-во Том.
гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – 156 с.

ISBN 978-5-93057-670-2

Настоящее учебное пособие соответствует государственному образовательному стандарту дисциплины СЗ.Б.6 «Сейсмостойкость сооружений».

В пособии излагаются основы сейсмостойкого строительства, параметры сейсмических нагрузок, история развития методов расчета. Рассмотрен нормативный, а также численный подход к определению сейсмических нагрузок. Приведены основные сведения о сейсмозащите и сейсмоизоляции. Кроме того, рассмотрены актуальные вопросы усиления существующих зданий и сооружений, построенных без учета возможного воздействия сейсмических нагрузок.

Пособие предназначено для студентов специальности «Строительство уникальных зданий и сооружений» при подготовке к сдаче экзамена, а также в рамках выполнения дипломного проекта.

УДК 624.012.4:699.841(075.8)

ББК 38.53я7

Рецензенты:

О.Г. Кумпяк, д. т. н., профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций ТГАСУ;

В.В. Эм, к. т. н., доцент, директор ООО «Вогтехпроект».

ISBN 978-5-93057-670-2

© Томский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2015

© Саркисов Д.Ю., 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Лекция 1. Цели и задачи дисциплины. Основные положения.....	6
Лекция 2. Исторический обзор самых значимых землетрясений в истории.....	14
Лекция 3. Анализ разрушений и деформаций строительных конструкций при воздействии сейсмических нагрузок.....	27
Лекция 4. Нормативный документ, действующий на территории РФ, по проектированию зданий и сооружений при сейсмических нагрузках.....	35
Лекция 5. Концепция сейсмостойкого строительства.....	41
Лекция 6. Конструктивные требования к зданиям с железобетонными и стальными каркасами при проектировании в сейсмически опасных районах.....	48
Лекция 7. История развития теории сейсмостойкости.....	56
Лекция 8. Определение сейсмических нагрузок на здания и сооружения.....	60
Лекция 9. Выбор расчетных схем.....	83
Лекция 10. Расчет зданий и сооружений на сейсмические нагрузки по российским нормам.....	89
Лекция 11. Расчет зданий и сооружений на сейсмические нагрузки методом конечных элементов.....	95
Лекция 12. Влияние грунтовых условий на сейсмостойкость. Динамические свойства материалов.....	102
Лекция 13. Сейсмоизоляция. Специальные опоры.....	109
Лекция 14. Гасители колебаний.....	119
Лекция 15. Системы с повышенным демпфированием, энергопоглотители.....	128
Лекция 16. Упруго-фрикционные системы.....	135
Лекция 17. Адаптивные системы с включающимися и выключающимися связями.....	140

Лекция 18. Повышение сейсмостойкости зданий, построенных без учета требований норм по строительству в сейсмически опасных районах.....	145
Список использованных источников.....	153

Лекция 1

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- 1.1. Цели и задачи дисциплины*
- 1.2. Актуальность вопроса*
- 1.3. Причины возникновения землетрясений*
- 1.4. Основные параметры измерения силы землетрясений*
- 1.5. Виды сейсмических волн*

1.1. Цели и задачи дисциплины

Целями освоения дисциплины «Сейсмостойкость сооружений» является формирование знаний в области проектирования сейсмостойких зданий и сооружений, привитие умений и навыков для решения конкретных практических задач, возникающих перед инженерами.

Изучение данной дисциплины формирует знания в области расчета и конструирования сейсмостойких зданий и сооружений и дополняет их в части изучения современных подходов к расчетам и анализу напряженно деформированного состояния строительных конструкций и их узлов сопряжения при сейсмических воздействиях.

Задачами освоения дисциплины «Сейсмостойкость сооружений» является формирование системного инженерного мышления и мировоззрения в области проектирования сейсмостойких зданий и сооружений на основе знания современных методов расчета строительных конструкций и принципов их конструирования, а также технологии производства работ, применяемых устройств, направленных на повышение сейсмостойкости, современной техники и состава требований современной, действующей в нашей стране, нормативной документации.

1.2. Актуальность вопроса

Землетрясения – подземные толчки и колебания поверхности Земли, вызванные естественными причинами (главным образом, тектоническими процессами) или (иногда) искусственными процессами (взрывами, заполнением водохранилищ, обрушением подземных полостей горных выработок). Небольшие толчки могут вызываться также подъёмом лавы при вулканических извержениях.

Актуальность исследований обусловлена тем, что ежегодно на всей Земле происходит около миллиона землетрясений, но большинство из них так незначительны, что остаются незамеченными [20]. Действительно сильные землетрясения, способные вызвать обширные разрушения, случаются на планете примерно раз в две недели. Большая их часть приходится на дно океанов и поэтому не сопровождается катастрофическими последствиями.

Землетрясения наиболее известны по тем опустошениям, которые они способны произвести. Разрушения зданий и сооружений вызываются колебаниями почвы или гигантскими приливными волнами (цунами), возникающими при сейсмических смещениях на морском дне.

Международная сеть наблюдений за землетрясениями регистрирует даже самые незначительные из них [26, 24].

1.3. Причины возникновения землетрясений

Причинами возникновения землетрясений считаются тектонические процессы с влиянием гравитации (связанные с естественным или природным движением или деформацией земной коры или мантии), вулканические и другие, менее серьезные, связанные с обвалами, оползнями, заполнением водохранилищ, обрушением подземных полостей горных выработок, взрывами и другими изменениями, чаще всего спровоцированными дея-

тельностью человека, которые называются искусственными возбудителями.

Землетрясения – это завершающий этап движения пород Земли. Сила трения препятствует сдвигам земной коры, но когда напряжение достигает критического уровня, происходит резкое смещение с разрывом пород, энергия силы трения находит выход в движении, колебания от которых распространяются, подобно звуковым волнам, во все стороны. По мере удаления от эпицентра сила ударной волны уменьшается.

1.4. Основные параметры измерения силы землетрясений

Для измерения силы землетрясения используют шкалу магнитуд и шкалу интенсивности.

Величина полной энергии сейсмических волн, характеризующая мощность очага, получила название магнитуды землетрясения. Шкала магнитуд – характеристика землетрясения, которая имеет свои разновидности: локальная магнитуда (ML), магнитуда поверхностных волн (MS), магнитуда объемных волн (MB), моментная магнитуда (MW). Самой популярной шкалой является локальная шкала магнитуд Рихтера, который в 1935 г. предложил этот способ измерения силы землетрясений, что и дало название этой шкале. Шкала Рихтера имеет диапазон от 1 до 9, величина магнитуды измеряется специальным прибором – сейсмографом. Магнитуда (M) есть десятичный логарифм максимальной амплитуды (L) сейсмической волны (в тысячных долях миллиметра), записанной стандартным сейсмографом на расстоянии 100 км от эпицентра $M = \lg L$.

Зная магнитуду землетрясения, можно вычислить энергию E любого землетрясения по формуле $\log E = 11,5 M$. С увеличением магнитуды быстро растет выделяемая энергия. Одно землетрясение с $M = 7$ выделяет столько энергии, сколько 30 землетрясений с $M = 6$ и 300 землетрясений с $M = 5$ [1].

Шкала интенсивности – качественная характеристика землетрясения, указывающая на характер и масштаб этого явления по отношению к человеку, животным, природе, естественным и искусственным сооружениям в зоне поражения землетрясения. Интенсивность – мера субъективная, и она может быть различной в каждом конкретном случае.

Интенсивность землетрясения может определяться в баллах одной из принятых сейсмологических шкал интенсивности.

В разных странах принято по-разному измерять интенсивность землетрясения:

В России и некоторых других странах принята 12-балльная шкала Медведева – Шпонхойера – Карника (MSK-64). В Европе – 12-балльная Европейская макросейсмическая шкала. В США – 12-балльная модифицированная шкала Меркалли. В Японии – 7-балльная шкала Японского метеорологического агентства.

В зависимости от силы землетрясения, определяемой величиной сейсмического ускорения, вся территория Российской Федерации разделена на районы, для которых установлена возможная интенсивность сейсмических воздействий [22, 23, 25]. Интенсивность сейсмических воздействий в баллах (сейсмичность) для района строительства следует определять на основе комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации. Указанный комплект карт предусматривает осуществление антисейсмических мероприятий при строительстве и отражает десяти- (карта «А»), пяти- (карта «В») и однопроцентную (карта «С») вероятность возможности превышения в течение 50 лет указанных на картах значений сейсмической интенсивности.

Указанная на картах сейсмическая интенсивность относится к участкам со средним по сейсмическим свойствам грунтам (скальные грунты выветрелые; пески гравелистые; глинистые грунты определенной консистенции и пористости).

Комплект карт учитывает ответственность сооружений: карту «А» рекомендуется применять при массовом строитель-

стве; карты «В» и «С» – при строительстве объектов повышенной ответственности и особенно ответственных, а также уникальных объектов.

1.5. Виды сейсмических волн

Только три главных типа упругих волн создают те сейсмические колебания, которые ощущаются людьми и вызывают разрушения. Два типа из них распространяются внутри объема горных пород.

1. Более быстрые из этих объемных волн называются первичными (P), или продольными, волнами (рис. 1.1). Их движение имеет тот же характер, что и у звуковых волн, т. е. при своем распространении они попеременно давят на горные породы (сжимают их) или создают в них разрежение, растягивают их.

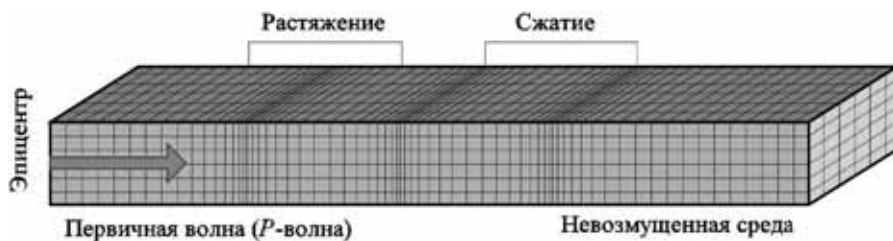


Рис. 1.1. Первичные волны (P -волны)

P -волны способны проходить и через твердые породы, и через жидкости. Следует отметить, что из-за сходства этих волн со звуковыми часть P -волн, выходя из глубин Земли к ее поверхности, может передаваться в атмосферу в виде звуковых волн, воспринимаемых животными и людьми, если частота их оказывается в интервале слышимости.

2. Более медленные волны, проходящие через горные породы, называются вторичными (S), или поперечными, волнами (рис. 1.2). При своем распространении они сдвигают частицы вещества в стороны, под прямым углом к направлению своего

пути. Простое наблюдение ясно показывает, что если какой-то объем жидкости сдвинуть в сторону или повернуть, то он не вернется затем на прежнее место. Из этого следует, что поперечные волны не могут проходить через те участки Земли, которые состоят из жидкости, например, через океаны.

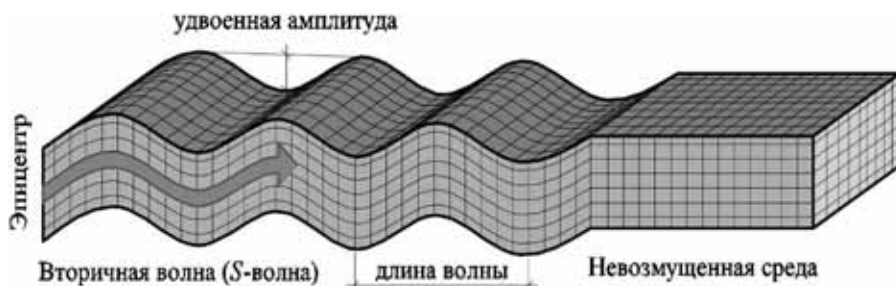


Рис. 1.2. Вторичные волны (S-волны)

Фактическая скорость продольных и поперечных сейсмических волн зависит от плотности и упругих свойств горных пород и грунтов, через которые эти волны проходят.

В большинстве случаев при землетрясениях продольные волны ощущаются первыми. Их действие похоже на удар воздушной волны, которая создает грохот и треск стекол в окнах. Спустя несколько секунд приходят поперечные волны, которые раскачивают все на своем пути вверх-вниз и из стороны в сторону и смещают поверхность грунта как по вертикали, так и по горизонтали. Именно эти колебания и приводят к наибольшему повреждению построек.

3. Сейсмические волны третьего типа называются поверхностными волнами, поскольку их распространение ограничено зоной, близкой к поверхности грунта. Такие волны подобны ряби, расходящейся по поверхности озера. Наибольшие колебания происходят на самой поверхности, а с глубиной амплитуда волн становится меньше и меньше. Поверхностные волны, создаваемые землетрясениями, делятся на два вида.

3.1. Первый называется волнами Лява (рис. 1.3). Эти волны, в сущности, то же самое, что поперечные волны без вертикальных смещений; они заставляют частицы грунта колебаться из стороны в сторону в горизонтальной плоскости, параллельной поверхности Земли, но под прямым углом к направлению своего распространения. Воздействие волн Лява состоит в горизонтальных колебаниях, которые передаются основаниям построек и, следовательно, могут вызвать разрушения.

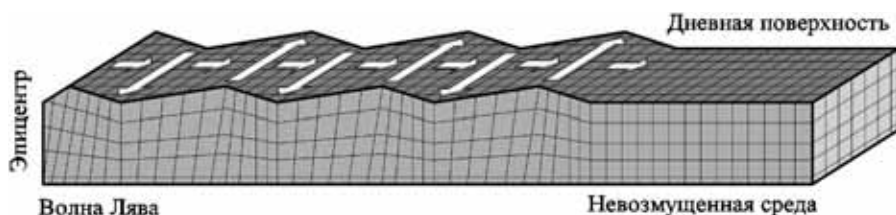


Рис. 1.3. Поверхностные волны. Волны Лява

3.2. Второй вид поверхностных волн известен под названием волн Рэлея (рис. 1.4). Как и в обычных морских волнах, частицы материала, захваченного волнами Рэлея, движутся по вертикали и по горизонтали в вертикальной плоскости, ориентированной по направлению распространения волн. При этом каждая частица породы при прохождении волны движется по эллипсу.

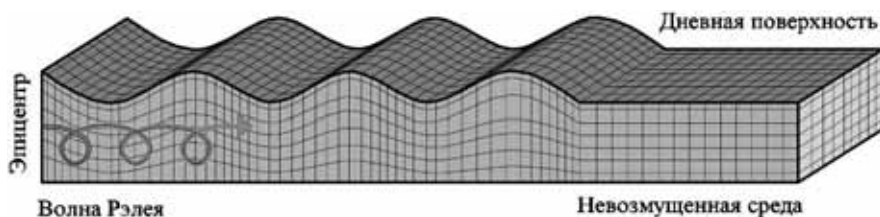


Рис. 1.4. Поверхностные волны. Волны Рэлея

Поверхностные волны распространяются медленнее, чем объемные, и из двух видов поверхностных волн обычно волны Лява приходят быстрее, чем волны Рэлея.

Когда P - и S -волны достигают поверхности грунта, большая часть их энергии отражается обратно в земную кору, так что на поверхность почти одновременно воздействуют волны, движущиеся и вверх, и вниз. Поэтому вблизи поверхности, как правило, происходит значительное усиление колебаний: иногда их амплитуда вдвое превышает амплитуду приходящих волн. Это приповерхностное увеличение амплитуды усиливает разрушения, производимые на поверхности Земли. В самом деле, при многих землетрясениях горнорабочие отмечали в подземных выработках колебания более слабые, чем ощущали люди на поверхности.

Вопросы и задания для самопроверки

- 1. Перечислите причины возникновения землетрясений.*
- 2. Чем отличается магнитуда от интенсивности?*
- 3. Какие сейсмические волны распространяются быстрее: P или S ?*
- 4. Какие сейсмические волны оказывают максимальное влияние на здания и сооружения?*

Лекция 2

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР САМЫХ ЗНАЧИМЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ИСТОРИИ

- 2.1. Данные о землетрясениях, произошедших до двадцатого века*
- 2.2. Землетрясения двадцатого века*
- 2.3. Землетрясения двадцать первого века*

2.1. Данные о землетрясениях, произошедших до двадцатого века

Землетрясение в Гяндже. Землетрясение в Гяндже – одно из крупнейших землетрясений в истории силой в 11 баллов, происшедшее 30 сентября 1139 г. близ города Гянджа. В результате катастрофы погибло 230 тыс. человек [22].

Великое китайское землетрясение произошло в провинции Шэньси 23 января 1556 г. Оно унесло жизни приблизительно 830 000 чел. – больше, чем любое другое землетрясение в истории человечества. Эпицентр Шэньсийского землетрясения находился в долине реки Вэй в провинции Шэньси, недалеко от городов Хуасянь, Вэйнань и Хуанинь. В Хуасяне были разрушены все постройки, погибло более половины населения. В эпицентре землетрясения открылись 20-метровые провалы и трещины. Разрушения затронули территории, расположенные в 500 км от эпицентра. Некоторые районы Шэньси вовсе обезлюдели, в других погибло около 60 % населения. Такое количество жертв было обусловлено тем, что большая часть населения провинции обитала в лёссовых пещерах, которые обрушились уже после первых толчков либо были затоплены селевыми потоками. В течение полугода после землетрясения несколько раз в месяц следовали афтершоки (повторные толчки).

Землетрясение на Ямайке произошло в городе Порт-Ройял 7 июня 1692 г. Большая часть города, известного как «сокровищница Вест-Индии» была затоплена морем. Около 2 тыс. человек погибло в результате землетрясения и цунами, ещё примерно 3 тыс. – от травм и распространившихся болезней.

Большое Сицилийское землетрясение произошло 11 января 1693 г. при извержении Этны и повлекло разрушения в Южной Италии, на Сицилии и Мальте. Погибло от 60 до 100 тыс. чел. Наиболее пострадала юго-восточная часть Сицилии.

Землетрясение в Японии произошло в 14:00 по местному времени 28 октября 1707 года. В результате районам юго-западного Хонсю, Сикокуи, юго-восточного Кюсю был нанесён ущерб от среднего до тяжёлого. Землетрясение и вызванное им разрушительное цунами повлекло за собой гибель более пяти тысяч человек. Это землетрясение с магнитудой 8,6, возможно, вызвало извержение вулкана Фудзи, произошедшее 49 дней спустя.

Ассамское землетрясение произошло 12 июня 1897 г. в Ассаме, Британская Индия. По оценкам, его магнитуда составила 8,1. Считается, что гипоцентр (условная точка, в которой зародилось землетрясение) располагался на глубине 32 км. Ассамское землетрясение оставило в руинах каменные здания на площади 390 000 км², а всего затронуло более 650000 км² от Бирмы до Нью-Дели. Смертность – около 1500 жертв, материальный ущерб был весьма значительным. Минимальное смещение поверхности земли составило 11 м, с максимумами до 16 м. Это одни из самых больших вертикальных смещений из всех измеренных землетрясений. Расчётная область смещения распространилась на 110 км вдоль линии сдвига по поверхности и от 9 до 45 км ниже поверхности. Фактически в землетрясении была задействована вся толща земной коры. Изменения рельефа были столь выраженными, что практически вся местность изменилась до неузнаваемости.

2.2. Землетрясения двадцатого века

Мессинское землетрясение магнитудой 7,5 произошло 28 декабря 1908 года в Мессинском проливе между Калабрией и Сицилией (рис. 2.1). В результате были разрушены города Мессина и Реджо-Калабрия. Это землетрясение считается сильнейшим в истории Европы. Толчки вызвали смещение участков дна, после чего на Мессину с интервалами в 15–20 мин. обрушилось три волны цунами высотой до трёх метров. В самом городе в течение одной минуты произошло три сильных удара, после второго начались обрушения зданий. Всего от землетрясения пострадали более двадцати населённых пунктов в прибрежной полосе на Сицилии и в Калабрии. Повторные толчки продолжались в январе 1909 года. Существуют разные оценки общего количества погибших, максимальная цифра – 200000 чел.



Рис. 2.1. Разрушение церкви Сан-Рокко