

Современные методы сейсмоизоляции зданий и сооружений

Магистр А.Р. Арутюнян*,

ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Решение задач обеспечения целостности конструкции, или минимизации повреждений на основе конструктивных решений и специфических свойств зданий, является насущно необходимым в условиях регионов активных сейсмических проявлений. Актуальность решения этих задач отражена в постановлении Правительства России «О федеральной целевой программе «Сейсмотехника» от 25 сентября 2001 г. № 690, в которой обозначены проблемы сейсмостойкости как существующих, так и вновь возводимых зданий.

В современных конструктивных решениях нельзя повысить сейсмостойкость, только повысив величины сечений, прочность, вес. Конструкция может быть более прочной, но не обязательно экономически эффективной, потому что и вес, и инерционная сейсмическая нагрузка могут увеличиться еще больше. Требуются новые эффективные методы сейсмозащиты. Эти методы предусматривают изменение массы или жесткости, или демпфирования системы в зависимости от ее перемещений и скоростей. В настоящее время известно более 100 запатентованных конструкций сейсмозащиты.

Традиционные методы получили широкое распространение в различных странах, подверженных сейсмической опасности, и являются общепризнанными. Однако специальные методы сейсмозащиты во многих случаях позволяют снизить затраты на усиление и повысить надежность возводимых конструкций. В последние десятилетия в Японии, США, Новой Зеландии, странах СНГ предложены десятки различных технических решений специальной сейсмозащиты зданий и инженерных сооружений. Многие из этих предложений реализованы на практике.

Классификация методов антисейсмического усиления

Общая классификация систем сейсмозащиты, по мнению авторов [1, 2, 3], может быть представлена в виде схемы, представленной на рис. 1. В соответствии со сложившейся терминологией в теории виброзащиты будем подразделять специальную сейсмозащиту на активную (имеющую дополнительный источник энергии) и пассивную.

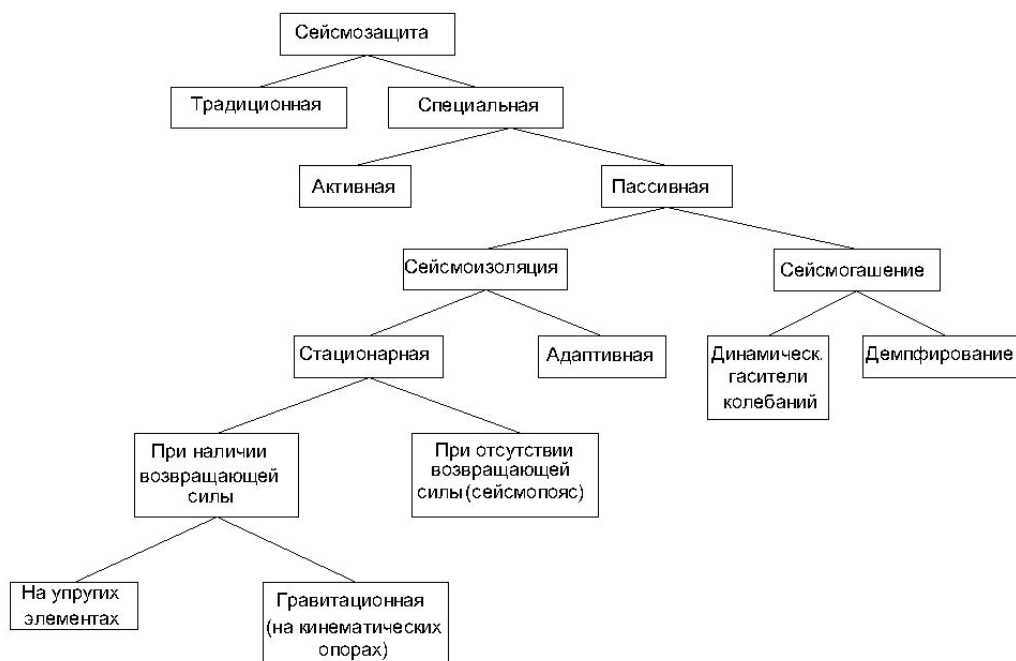


Рисунок 1. Классификация систем сейсмозащиты по принципу их работы

В данный момент существуют предложения по активной сейсмозащите, включающей дополнительные источники энергии и элементы, регулирующие работу этих источников, однако ее реализация требует значительных затрат на устройство и эксплуатацию. Это исключает возможность широкого применения активной сейсмозащиты для строительных конструкций. Ниже рассматриваются специальные методы пассивной сейсмозащиты, не использующие дополнительных источников энергии. Эти методы подразделяются на сейсмогашение и сейсмоизоляцию.

В системах сейсмогашения, включающих демпферы и динамические гасители, механическая энергия колеблющейся конструкции переходит в другие виды энергии, что приводит к демпфированию колебаний, или перераспределяется от защищаемой конструкции к гасителю.

В системах сейсмоизоляции обеспечивается снижение механической энергии, получаемой конструкцией от основания, путем отстройки частот колебаний сооружения от преобладающих частот воздействия. Различают адаптивные и стационарные системы сейсмоизоляции. В адаптивных системах динамические характеристики сооружения необратимо меняются в процессе землетрясения, «приспосабливаясь» к сейсмическому воздействию. В стационарных системах динамические характеристики сохраняются в процессе землетрясения.

Наибольшее распространение среди систем стационарной сейсмоизоляции получили сейсмоизолирующие фундаменты (СФ), которые достаточно широко применяются в отечественной и зарубежной практике сейсмостойкого строительства.

С позиции принятой классификации ниже приводится обзор методов сейсмозащиты сооружений, выполненный на базе зарубежного и отечественного опыта сейсмостойкого строительства.

Сейсмоизоляция зданий и сооружений

Идея сейсмоизоляции была реализована еще в средние века. Так, при строительстве среднеазиатских минаретов в фундаменты укладывались специальные «камышовые пояса» или подушки из сыпучего материала. Однако теория сейсмоизоляции получила развитие только в последние 20-25 лет. Первые работы в этой области были направлены на снижение инерционных сейсмических нагрузок путем снижения периода основного тона колебаний сооружения. Рассмотрение нормативных графиков коэффициентов динамичности, приведенных в нормах различных стран, показывает, что амплитуды спектральных кривых по мере увеличения периода собственных колебаний убывают. Это обстоятельство послужило причиной многочисленных предложений, обеспечивающих низкочастотную настройку сооружений вообще, и к применению разнообразных систем их сейсмоизоляции в особенности.

Существующие системы сейсмоизоляции на основании принятой выше классификации подразделяются на две группы:

- адаптивные
- стационарные

Причем стационарные системы могут иметь или не иметь возвращающую силу, действующую на сейсмоизолированные части сооружения. Приведем некоторые конструктивные примеры, иллюстрирующие принцип работы систем сейсмоизоляции.

1. Стационарные системы сейсмоизоляции

Наиболее типичным приемом устройства сейсмоизоляции при наличии возвращающей силы являются здания с гибким нижним этажом. Гибкий этаж может быть выполнен в виде каркасных стоек, упругих опор, свай и т. п. Один из возможных вариантов конструктивного исполнения гибкого этажа представлен на рис. 2. Конструкция состоит из гибких опор, выполненных из пакета упругих стержней небольшого диаметра, размещенных между надземной и подземной частями здания.

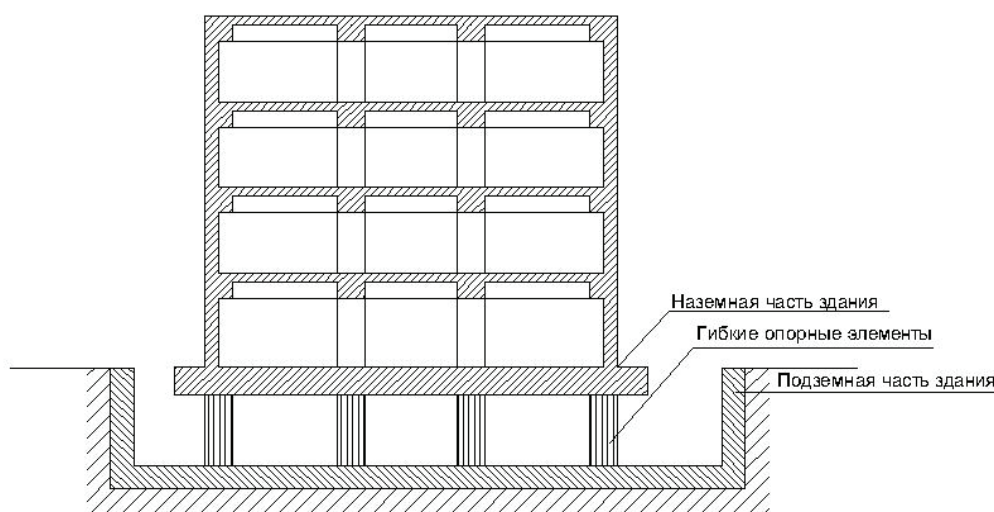


Рисунок 2. Здание с гибким нижним этажом

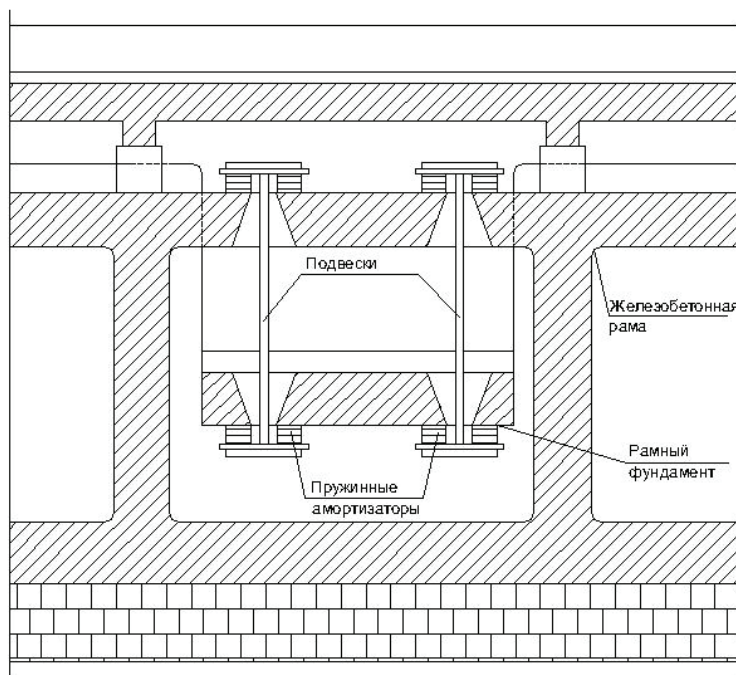


Рисунок 3. Схема фундамента подвесного типа

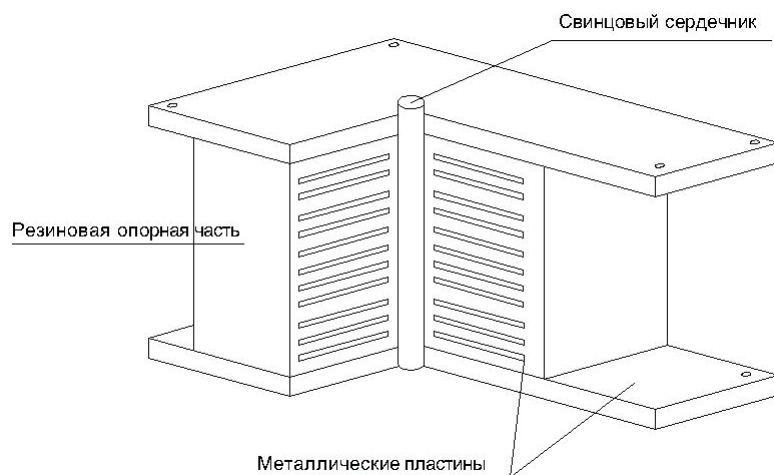


Рисунок 4. Антисейсмическая опора

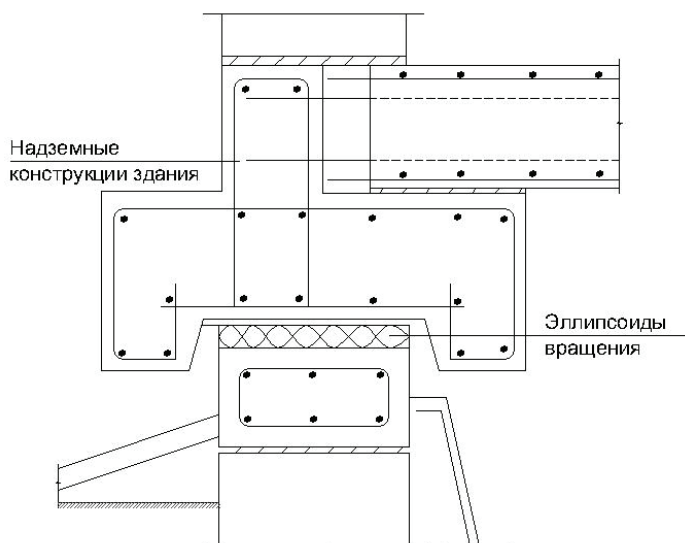


Рисунок 5. Сейсмоизоляционное устройство гравитационного типа

Упругие опорные элементы в виде подвесок использованы в здании по проекту Ф.Д. Зеленькова в Ашхабаде. Схематичный чертеж фундамента на рис. 3.

Здания на резинометаллических опорных частях получили широкое распространение за рубежом: в Японии, Англии, Франции. Исследования сооружений на резинометаллических опорах указывают на их высокую надежность, однако стоимость самих фундаментов оказывается значительной и может достигать 30% от стоимости здания. Некоторые конструктивные примеры резинометаллических опор, используемых за рубежом, представлены на рис. 4.

Серьезной проблемой при проектировании сооружений на упругих опорах явилась сложность обеспечения их прочности при значительных взаимных смещениях сейсмоизолированных частей фундамента. Это послужило причиной широкого распространения кинематических опор при сооружении сейсмоизолирующих фундаментов. Здания на гравитационных кинематических опорах были построены в Севастополе, Навои, Алма-Ате, Петропавловске-Камчатском. Пример конструкции сейсмоизоляции гравитационного типа представлен на рис. 5. На рис. 5 подвижные опорные части в виде эллипсоидов вращения размещены между надземной частью здания и фундаментом. Принцип действия такой конструкции состоит в том, что во время землетрясения центр тяжести опор поднимается, в результате чего образуется гравитационная восстанавливающая сила. При этом колебания здания происходят около положения равновесия, и их начальная частота и период зависят от геометрических размеров используемых опор.

Необходимо отметить, что построенные фундаменты этого типа не имеют специальных демпфирующих устройств, и при длиннопериодных воздействиях силой более 8 баллов, согласно выполненным расчетам, возможно падение здания с опор. Это указывает на опасность фундаментов на кинематических опорах, если в них не предусмотрены дополнительные демпфирующие элементы.

При значительном объеме строительства зданий и сооружений с сейсмоизоляцией на упругих кинематических опорах до настоящего времени отсутствуют данные об их поведении при землетрясениях, а имевшие место разрушения таких зданий указывают на необходимость детального обоснования их сейсмостойкости.

Сейсмоизоляция, не обеспечивающая возвращающей силы, действующей на сейсмоизолированные части конструкции, реализуется путем устройства скользящего пояса. Одно из наиболее известных технических решений такого типа - сейсмоизолирующий фундамент фирмы Spie Batignolle и Electricite de France.

Конструкция антисейсмической фрикционной опоры показана на рис. 6. Опора, поддерживающая верхнюю фундаментную плиту, состоит из фрикционных плит, армированной прокладки из эластомера (неопрена), нижней фундаментной плиты, бетонной стойки, опирающейся на нижнюю фундаментную плиту. Жесткость опор в вертикальном направлении примерно в 10 раз выше, чем в горизонтальном.

К настоящему времени с применением сейсмоизолирующих опор указанного типа построены здания АЭС в г. Круа (Франция) и в г. Кольберг (ЮАР).

Сейсмоизолирующий фундамент фирмы Spie Batignolle является классическим примером сейсмоизоляции с последовательным расположением упругих и демпфирующих элементов. При относительно слабых воздействиях, когда горизонтальная нагрузка на опорную часть не превосходит сил трения, система работает в линейной области; при увеличении нагрузки сила трения преодолевается и происходит проскальзывание верхней фундаментной плиты относительно нижней. При этом удается в несколько раз снизить нагрузки на оборудование и здание.

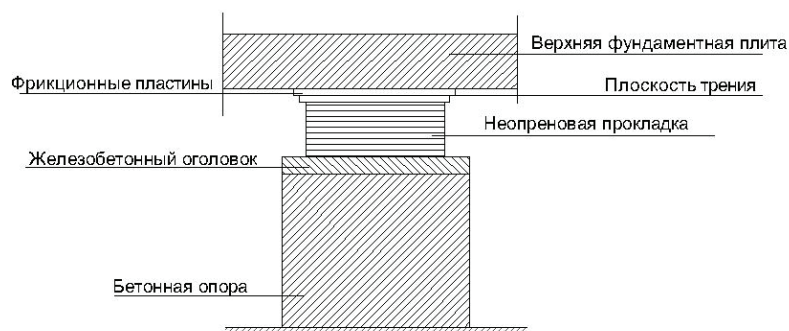


Рисунок 6. Сейсмоизолирующий фундамент фирмы Spie Batignolle

Несмотря на ряд достоинств сейсмоизолирующего фундамента Spie Batignolle, рассмотренная конструкция имеет ряд недостатков. Критический анализ французского решения имеется, в нем, в частности, отмечается, что выполненные теоретические расчеты фундамента производились на высокочастотные воздействия, при этом взаимные смещения фундаментных плит не превосходили 20 см.

Однако при длиннопериодных воздействиях, задаваемых акселерограммами землетрясений в Бухаресте (1978 г.), Ниигате (1923 г.), Мехико (1985 г.), нормированными на ускорение 0,4g, взаимные смещения фундаментных плит приближаются к 1 м. Для снижения этих смещений встает необходимость увеличения сил трения, что, в свою очередь, ведет к увеличению ускорений колебаний и снижению эффективности работы фундамента.

В качестве конструктивных недостатков фундамента следует отметить невозможность избежать неравномерного давления на опоры при строительстве на нескальных грунтах, отсутствие средств регулирования сил трения, сложность смены прокладок во время эксплуатации.

2. Адаптивные системы сейсмоизоляции

Рассмотренные выше примеры сейсмоизоляции представляют собой системы, в которых динамические характеристики сохраняются в процессе землетрясения. Наряду с этими решениями в практике сейсмостойкого строительства получили распространение адаптивные системы. В этих системах динамические характеристики сооружения необратимо меняются в процессе землетрясения, «приспосабливаясь» к сейсмическому воздействию. Особенности работы такой сейсмоизоляции детально исследованы в работах Я.М. Айзенберга. Конструктивный пример этой системы сейсмоизоляции представлен на рис. 7.

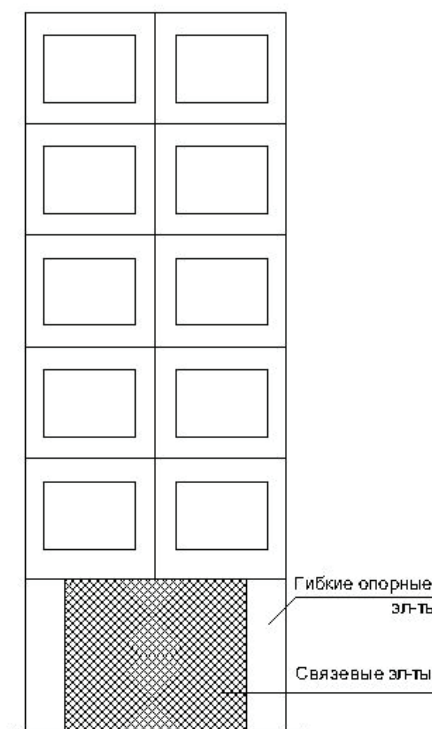


Рисунок 7. Пример конструктивного решения зданий с выключающимися связями

В нижней части здания между несущими стойками нижнего этажа установлены связевые панели, отключающиеся при интенсивных сейсмических воздействиях, когда в спектре воздействия преобладают периоды, равные или близкие к периоду свободных колебаний сооружения. После отключения панелей частота свободных колебаний падает, период колебаний увеличивается, происходит снижение сейсмической нагрузки. При низкочастотном воздействии период собственных колебаний здания со связевыми панелями значительно ниже величин преобладающих периодов колебаний грунта, поэтому резонансные явления проявляются слабо и связевые панели не разрушаются.

Применение выключающихся связей наиболее эффективно в том случае, когда уверенно прогнозируется частотный состав ожидаемого сейсмического воздействия. В качестве недостатков необходимо отметить, что после разрушения выключающихся связей во время землетрясения необходимо их восстановление, что не всегда практически осуществимо. Кроме того, как известно, в некоторых случаях в процессе землетрясения в его заключительной стадии происходит снижение преобладающей частоты воздействия. Вследствие этого возможно возникновение вторичного резонанса и потеря несущей способности конструкций здания. В этом случае требуется применение конструктивных мероприятий, что приводит к дополнительным затратам на строительство.

Выводы

Обычные мероприятия по сейсмозащите зданий и сооружений сводятся в основном к повышению несущей способности элементов и конструкций. Такая сейсмозащита осуществляется в соответствии со строительными нормами «Строительство в сейсмических районах» [4]. При этом выполняемые мероприятия не снижают сейсмических нагрузок на здания и сооружения, а только их учитывают.

В настоящей статье были аналитически рассмотрены современные методы сейсмоизоляции зданий и сооружений. Многие из представленных моделей требуют дальнейших корректировок в расчетах и проектировании, теоретических и практических испытаний [5]. Так, при проектировании зданий, оснащенных сейсмоизоляцией и демпферами, необходимо, помимо спектрального расчета, выполнять прямой динамический расчет с использованием инструментально зарегистрированных акселерограмм, что, в свою очередь, повышает требования к сейсмологическим прогнозам для площадки строительства.

Расчеты, выполненные Я.М. Айзенбергом [3], показали, что относительные горизонтальные сейсмические перемещения перекрытий в сейсмоизолированных зданиях существенно ниже, чем в неизолированных зданиях. Соответственно, повреждения при сильных землетрясениях в сейсмоизолированных зданиях значительно ниже, чем зданий неизолированных. Существенно ниже экономические потери. Применение сейсмических демпферов усиливает положительные эффекты.

Таким образом, применение сейсмоизоляции и сейсмогашения при правильном проектировании может значительно повысить такие характеристики как:

- надежность зданий;
- сохранность и надежность оборудования;
- экономические показатели зданий;
- отсутствие необходимости восстановительных работ после сильных землетрясений;
- комфорт для жителей.

Литература

1. Уздин А.М. и др. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. СПб, 1993. 176 с.
2. Айзенберг Я. М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. М.: Стройиздат, 1976. 232 с.
3. Айзенберг Я. М. Сейсмоизоляция высоких зданий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. №4, 2007. С. 41-43.
4. СНиП II -7-81. Строительство в сейсмических районах. М.: Госстрой России, 2000. 318 с.
5. Авидон Г.Э., Карлина Е.А. Особенности колебаний зданий с сейсмоизолирующими фундаментами А.М. Курзанова и Ю.Д. Черепинского // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. №1, 2008. С. 42-44.

* Анна Рубиковна Арутунян, Санкт-Петербург
Тел. моб.: +7(911)795-52-56; эл. почта: a_arutunyan@mail.ru