

Б. А. КИРИКОВ



ДРЕВНЕЙШИЕ
И НОВЕЙШИЕ
СЕЙСМОСТОЙКИЕ
КОНСТРУКЦИИ

• НАУКА •

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Межведомственный Совет по сейсмологии
и сейсмостойкому строительству

Б.А. КИРИКОВ

ДРЕВНЕЙШИЕ
И НОВЕЙШИЕ
СЕЙСМОСТОЙКИЕ
КОНСТРУКЦИИ

Ответственный редактор
доктор технических наук
Я.М. АЙЗЕНБЕРГ



МОСКВА
"НАУКА"
1990

Древнейшие и новейшие сейсмостойкие конструкции / Б.А. Кириков. — М.: Наука, 1990. — 72 с. ISBN 5-02-006041-0

В предлагаемой книге, написанной в форме беседы с любознательным читателем, автор попытался собрать все идеи и соответственно их конструктивные воплощения, направленные на обеспечение сейсмостойкости сооружений. Прослеживается путь некоторых идей от глубокой древности до наших дней. Популярная форма книги не помешала рассмотреть в ней и современные проблемы сейсмостойкого строительства.

Для специалистов в области сейсмостойкого строительства и всех интересующихся проблемами сейсмостойкости.

Ил. 45. Библиогр.: 45 назв.

Рецензенты: *А.И. Цейтлин, В.А. Ивович*

Редактор издательства *Н.В. Федоренко*

Ancient and Newest Earthquake Resistant Structures / B.A. Kirikov. — Moscow: Nauka Publishers, 1990. — 72 p. ISBN 5-02-006041-0

This book written as a conversation with a curious reader sets forth the task, however impracticable, of collecting under one cover all ideas and their structural realizations ensuring earthquake resistance of structures as accumulated by the century-old history of mankind. Some ideas are traced from hoary antiquity to nowadays. The popular form of the book does not hamper the consideration of modern problems of earthquake engineering.

The book is addressed to specialists and all those taking interest in seismology.

Il. 45. Ref.: 45.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Если бы меня спросили, к какому жанру технической литературы отнести эту книгу, я бы не задумываясь ответил: "Это популярный учебник" (если такой жанр вообще существует). Автор книги приглашает, руководствуясь только капризом и логикой мысли, пропутешествовать по всем континентам и временам в поисках примеров, нужных для последовательного рассказа об идеях сейсмостойкости.

С одной стороны, это чисто популярная книга. Она написана живым, образным языком без применения сложной научной терминологии, что делает ее интересной для многих читателей. В ней осмысливаются примеры из истории землетрясений как нашего времени, так и глубокой древности. Вы можете побывать в Ассирии в VIII в. до н.э., на кирпичной платформе, служащей основанием дворцу царя Саргона II, а оттуда отправиться на современную телевизионную башню в Алма-Ату.

С другой стороны, это вполне серьезный учебник, где излагаются все современные проблемы сейсмостойкости, причем в историческом аспекте. Автор явно симпатизирует древним строителям и показывает, что многие, казалось бы, совершенно новые проблемы сейсмостойкости существовали и в глубокой древности. В этом смысле книга будет интересна для молодежи, так как знакомит ее не только с современными идеями, но и показывает их связь с научным наследием прошлого.

Автор многие годы занимается научно-исследовательской работой в области сейсмостойкого строительства и поэтому изложил свои взгляды на некоторые проблемы сейсмостойкого строительства. Надеюсь, они заинтересуют специалистов-исследователей в области сейсмостойкого строительства.

Существующие популярные книги о землетрясениях рассказывают преимущественно о сейсмологии. Книга же, посвященная чисто строительным вопросам, публикуется впервые.

Огромную работу по иллюстрированию книги проделала Л.В. Мянчина, что сделало книгу более наглядной.

Я.М. Айзенберг

О ЧЕМ ХОЧЕТСЯ РАССКАЗАТЬ В ЭТОЙ КНИГЕ

Та область человеческих знаний, которую мы обобщенно называем строительством, возникла вместе с человеком. Уже Адам был наполовину строителем. Ему поневоле надо было научиться строить, чтобы создать Еве комфорт и прятать ее от так называемых неблагоприятных погодных условий. Интересен факт, не нашедший пока объяснения: первые цивилизации появились в районах с повышенной сейсмической активностью. Строители самых примитивных жилищ столкнулись с проблемой защиты их от землетрясений. Проблема актуальна и по сей день. Ежегодно эти стихийные бедствия уносят тысячи человеческих жизней и разрушают сотни зданий.

За свою многовековую историю человечество выработало ряд приемов и принципов для постройки сейсмостойких зданий. Эти принципы, как у нас говорят, прошли многовековую проверку на реальных объектах. Часть из этих объектов хорошо сохранилась до наших дней, другая разрушилась в результате землетрясений. Обследуя сооружения и изучая принципы древних зодчих, современные строители могут почерпнуть много полезного для себя. Дело в том, что совершенствуются методы расчета, создаются новые строительные материалы, а многие конструктивные приемы и принципы строительства так и остаются. Колонна всегда будет колонной, предназначенной для поддержания кровли. У древних мастеров было прекрасное качество, которое почти полностью нами утрачено, это чувство интуиции и пропорции. Там, где нам надо проводить многотрудные расчеты, неизвестно насколько соответствующие действительности, древний зодчий принимал решение на глазок, руководствуясь только своей интуицией.

О чем же будет рассказано в этой книге? Не о возникновении землетрясений, измерении их балльности, количестве жертв и последствиях. Об этом есть много чудесных книг, написанных нашими и зарубежными учеными. Автор ставил другую задачу: рассказать об идеях и принципах сейсмостойкого строительства, которые были отобраны тысячелетней историей строительного искусства, показать, что современное сейсмостойкое строительство уходит своими корнями в далекую древность, обобщить принципы сейсмостойкого строительства прошлого, настоящего и поговорить о перспективах на будущее. И еще. Анализируя с точки зрения сейсмостойкости постройки древних и современных строителей, автор дал им свое толкование, которое может не совпасть с тем, что думает по этому поводу уважаемый читатель.

Итак, отправимся в мир сейсмостойких конструкций, пусть наши мысли и наша любознательность свободно перенесутся в любую точку времени и пространства в поисках жемчужин знаний.

КОЕ-ЧТО О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

Ни одно из великого множества предложенных в настоящее время математических выражений не в состоянии описать то сложное движение грунта под сооружением, которое происходит во время землетрясения. Больше того, если мы даже найдем такое математическое выражение для конкретного землетрясения, толку от него будет мало. Современное землетрясение не повторяет прошлое и не будет повторено в будущем. Все, что связано с землетрясением, случайно. Случайно время возникновения, положение очага в земной коре, случайны свойства грунтов, через которые проходят сейсмические волны, когда они мчатся вверх, к поверхности земли. По-моему, лучшую математическую модель сейсмического воздействия дает теория случайных функций, а еще лучше теория случайных полей, позволяющая представить хаос, царящий под фундаментом сооружения во время землетрясения, и закономерности, одновременно имеющие место там же. Остается для дальнейших пояснений начать рисовать вереницу формул. Но не будем этого делать, постараемся и здесь и в дальнейшем обойтись наглядными образами и понятиями.

Я долго размышлял о наглядной модели для изображения движения грунта под сооружением во время землетрясения. И не придумал ничего лучше клубков змей, остервенело дерущихся за что-то жизненно важное. Эти змеи или змеобразные драконы сильны. Они свободно, не напрягаясь, не меняя своих колец, подбрасывают легкие здания. Под тяжелыми им труднее, их клубки деформируются, они бесятся, сильнее давят на фундамент, а из-за сильного противодействия тяжелого здания движения грунтов-змей получаются стесненными, меньшими. Это проблема взаимодействия грунта и сооружения во время землетрясения. На предложенной модели можно объяснить и другие проблемы, касающиеся сейсмического воздействия: толчки на любую точку подошвы сооружения наносятся головами, хвостами и туловищами змей в произвольные моменты времени в случайной последовательности. Вот вам и представление сейсмического воздействия случайным полем.

Ясно, что чем мощнее землетрясение, тем сильнее будут толчки. Сегодня сила или интенсивность землетрясения измеряется баллами. Первая в мире шкала интенсивности появилась в конце прошлого столетия. В СССР в 1931 г. была утверждена 12-балльная шкала. Та шкала, что применяется сейчас, составлена Институтом физики Земли в 1952 г., в последующие годы она уточнялась. Все эти шкалы описательные. С их помощью величина балла прошедшего землетрясения определяется по повреждениям в зданиях, выполненных без применения специальных антисейсмических мероприятий.

Вот это-то и заставит в ближайшем будущем отказаться от подобных шкал. Дело в том, что в идеале все здания в сейсмоопасных районах в настоящее время должны быть сейсмостойкими и не разрушаться при землетрясениях.

Как тогда быть с понятием балла? К счастью, тут есть выход.



Рис. 1. Причудливые колебания земли под зданием во время землетрясения

Необходимо конкретные землетрясения характеризовать реальными величинами, полученными с помощью приборов. Можно надеяться, что в ближайшем будущем вместо загадочных баллов по японской шкале мы услышим действительные характеристики землетрясений. Например, нам объявят: "В 100 км к югу от Ташкента произошло землетрясение. В эпицентре ускорение достигало 500 см/с^2 , смещение — 6 см, преобладающий период колебания земли — 0,15 с, продолжительность — 10 с. В Газли, Бухаре и Самарканде было то-то и то-то". Думается, такое сообщение более наглядно. К этому мы, собственно, и пришли при создании современных методов расчета на сейсмостойкость. Все инженеры-расчетчики хотят считать по реальным записям землетрясений, а не по расчетному баллу, сейсмологи соответственно определяют для каждого района свои ожидаемые характеристики землетрясений. Попытки как-то классифицировать землетрясения были уже у античных авторов, но в будущем, думается, понятие балла отомрет и расчетная интенсивность сейсмоопасных районов будет задаваться реальными, ожидаемыми с определенной вероятностью характеристиками: максимальными ускорениями, смещениями, продолжительностью и др.

Об одной такой важной характеристике землетрясения, понятие о которой нами будет использовано в дальнейшем, давайте теперь поговорим. Для этого вернемся опять к нашей сказочно-зоологической модели. В динамике сооружений, ветвью которой является теория сейсмостойкости, имеется понятие „собственный период колебания“. Это время, за которое любой маятник (здание, крыло самолета, поверхность земли), будучи отклоненным от положения равновесия, совершит один полный цикл колебания и вернется в исходное положение. Все, что колеблется, имеет собственный период колебания. В том числе любое сооружение, если его качнуть, будет совершать затухающие колебания со своим собственным периодом. Величина собственного периода характеризует гибкость сооружения.

Точно так же выведенная из равновесия разрушениями, произо-

шедшими в глубинах земных, колеблется поверхность земли во время землетрясения. Однако здесь имеется одна особенность. Сейсмические волны проходят от сложного по конфигурации очага землетрясения до поверхности земли через неоднородную грунтовую толщу. В результате колебания земли состоят одновременно из нескольких колебаний, каждое из которых имеет свое максимальное отклонение и свой собственный период. Но из всех этих колебаний есть одно или два преобладающих, несущих самые большие отклонения, определяющие особенность данного землетрясения. Величины этих преобладающих периодов являются важной характеристикой землетрясения. Здесь можно обнаружить некоторые закономерности. В зоне, близкой к очагу, преобладают колебания с маленьким периодом, а с удалением от него период колебаний в целом увеличивается. Все это легко представить на нашей змеиной модели землетрясения. В приочаговой зоне будут шевелиться маленькие быстрые змейки, а по мере удаления от нее змейки начнут расти и на достаточном удалении под зданием будут медленно извиваться громадные толстые змеи с гигантскими кольцами, размеры которых соизмеримы с размером здания. Эффект их действия на конкретное здание будет, разумеется, разным.

Здесь мы подошли к самому главному. В случае совпадения или близости преобладающих периодов колебания грунта и здания может возникнуть резонанс и вероятность разрушения здания станет большой. Чистого резонанса произойти не может, так как колебания почвы при землетрясении носят нерегулярный характер и их преобладающий период постепенно меняется во времени. Задача сейсмостойкого строительства заключается, собственно, в том, чтобы избежать указанного нежелательного случая. Надо знать, какое в данном месте нужно строить здание: гибкое или жесткое. Все зависит от того, с какими преобладающими периодами ожидаются землетрясения. Но предсказать это не так просто и далеко не всегда удается, хотя для некоторых районов СССР такие данные уже имеются.

Итак, из этой главы мы должны запомнить два момента. Первый: движение грунта под сооружением имеет очень сложный характер и соответственно вызывает неравномерные хаотические перемещения отдельных частей зданий и их фундаментов. Второй: во время землетрясения может произойти явление, близкое к резонансу между колеблющимся грунтом и сооружением, если их собственные периоды совпадают. Естественно, необходимо стремиться к тому, чтобы этого не случилось. Как это делается? Об этом речь впереди.

КАК ЗДАНИЯ ДЕЛАЮТ СЕЙСМОСТОЙКИМИ

Прежде всего ответим на такой вопрос. Что такое сейсмостойкое здание? Сейсмостойким считается такое здание, которое в результате землетрясения получит повреждения, не представляющие опасности для жизни людей и сохранности материальных ценностей, находящихся в нем. Можно и так. Эти здания имеют малую



Рис. 2. Неравномерные осадки грунтов при землетрясении — причина разрушения здания

вероятность получения повреждений, опасных для жизни людей и сохранности материальных ценностей во время землетрясения.

Теперь другой вопрос. Какими способами землетрясения разрушают наши здания? Таких способов два. По первому способу при относительно слабом фундаменте и слабом грунте разрушения зданий происходят от вызванных землетрясением неравномерных осадок грунта. Случай такого разрушения хорошо демонстрирует Карпатское землетрясение от 4 марта 1977 г. Достигнув г. Яссы, оно было еще достаточно интенсивным, но разрушить современные здания методом сильного раскачивания уже не могло. Ему помог рельеф местности. Пострадавшие здания стояли на довольно пологом склоне. Структура склона показана на рисунке. Он состоял из скальных террас, прикрытых мягкими породами. При землетрясении осадки были неравномерными и здания просто разламывались.

При втором способе здание так сильно раскачивается, что напряжения в элементах конструкций и в местах их соединения превосходят предел их прочности и здание разрушается. Неравномерные деформации грунтов при землетрясениях могут происходить по различным причинам: из-за неоднородности механических свойств грунтов, их разжижения, оползней.

Естественно задать третий вопрос. Какие существуют принципиальные подходы к созданию сейсмостойких зданий? Достаточно условно можно выделить три таких подхода.

Первый подход, самый распространенный, состоит в создании конструкций повышенной прочности, способных без значительных повреждений переносить землетрясения, ожидаемые в данном районе. Конечно, чтобы создавать такие сооружения, особой гениальности не требуется. Но все-таки усиливать эти здания надо с умом. Необходимо соблюдать несколько канонов, подтвержденных опытом многих веков: симметричность планировки конструкции, прочность и гибкость соединения элементов и надежность фундаментов. При этом должна обеспечиваться прочность материалов конструкции и хорошее качество работ. Необходимо стремиться снизить сейсмические нагрузки за счет как можно большего отличия собственного периода колебания здания от ожидаемого преобладающего периода колебаний грунта во время землетрясения. По этому принципу здание необходимо усиливать и соответственно удорожать в разумных пределах, чтобы оно было достаточно надежным и не было чрезмерно дорогим. Как выявить этот предел, вопрос особый, об этом разговора не будет.

Идеальным воплощением данного подхода к созданию сейсмостойких конструкций было бы здание-шар или здание ванька-встанька. В каком-то популярном журнале я уже видел одноэтажные домики-шары, построенные в Японии для летнего отдыха. В принципе можно построить и многоэтажные здания. Ясно, что они будут спокойно, без разрушений плавать в сейсмических волнах, вероятно сильно раскачиваясь, но стоимость их по сравнению с обычными строениями будет чрезвычайно высока.

Второй подход основан на следующем. Известно, что, чем крепче и жестче здание связано с колеблющимся грунтом, тем больше в нем возникает сейсмическая нагрузка, так как лучше передаются колебания от грунта к зданию. Задача второго подхода — снизить сейсмическую нагрузку за счет ослабления связи между грунтом и сооружением, созданием так называемых сейсмоизоляторов. В настоящее время существует очень много типов сейсмоизоляторов. Это направление активно развивается во многих странах, так как на этом пути, как шутят специалисты по сейсмостойкому строительству, есть возможность строить здания в сейсмоопасных районах дешевле, чем в несейсмических.

В идеале здание надо совершенно отрезать от грунта. Принципиально это возможно, если создать здание-вертолет или подвесить его на воздушных шарах, воздушной подушке или мощных электромагнитах. Но во что это обойдется? Хотя такие здания будут обладать совершеннейшей сейсмостойкостью, это пока только фантазия. Дальше буду говорить только о технически осуществимых в настоящее время и дешевых системах сейсмоизоляции и постараюсь провести параллель с существовавшими в древности системами сейсмоизоляции. Правда, есть сложность, заключающаяся в том, что очень часто, изучая древние конструкции, трудно отличить, какие мероприятия древние зодчие проводили с целью снижения сейсмической нагрузки, а когда, применяя какое-то конструктивное решение из других соображений, получали антисейсмическое мероприятие.

Наконец, о третьем подходе к созданию сейсмостойких конструкций. Если внимательно присмотреться к окружающему нас миру, то можно заметить, что закон о приспособляемости и выживании всего существующего относится не только к живой материи, но и к неживой. Этот закон можно узко трактовать применительно к конструкциям в сейсмических районах.

Уже говорилось, что каждый сейсмоопасный район может иметь свой преобладающий период колебаний грунта при землетрясениях. Теперь представим такую ситуацию: произошло землетрясение и часть зданий имела собственный период колебаний, близкий к преобладающему периоду колебаний грунта от землетрясения. Возникает резонанс, появляются большие сейсмические нагрузки, здания сильно раскачиваются. Если они не чрезмерно прочны, у них два выхода: развалиться или адаптироваться, т.е. приспособиться к высокому уровню нагрузки.

В чем же заключается адаптация? Существует два пути. В здании

могут разрушиться какие-то элементы и связи, в результате оно потеряет жесткость, станет более гибким, его собственный период резко возрастет, резонанс исчезнет, упадет сейсмическая нагрузка, а здание в целом сохранится. Другой путь адаптации состоит в том, что здание за счет своих конструктивных особенностей может стать более жестким при больших отклонениях, собственный период его колебаний уменьшится и резонанс опять будет снят. Если идти по этому пути создания сейсмостойких конструкций, задача их создателя заключается в том, что он должен предусмотреть возможные варианты включения и выключения элементов конструкции или дополнительных связей, т.е. запрограммировать разрушения и сделать их неопасными для жизни людей.

Идеальным представителем этого направления была бы избушка на курьих ножках, которая и к сейсмической волне повернется сама нужным боком и выключит жесткость ноги-опоры, если это нужно, и крылом обопрется о землю, если надо ввести дополнительную связь. Короче, это целый механический вычислительный электронный комплекс, способный реагировать на внешнее воздействие. Прообразы таких систем уже имеются, о них разговор дальше.

Итак, мы имеем три метода сейсмозащиты зданий. Первый — сделать здание прочным, как орех, второй — оторвать любым способом здание от земли (назовем это пассивной сейсмозащитой), третий — дать зданию возможность перестроиться в направлении снужения сейсмической нагрузки (это уже активная сейсмозащита).

Начнем с двух последних методов, они выглядят более эффективно и занимательно, а потом доберемся и до первого, наиболее древнего, универсального и всеобъемлющего.

АПОСТОЛЫ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ СЕЙСМОЗАЩИТЫ

В середине 60-х годов в нашем институте часто появлялся высокий человек преклонного возраста, неизменно в шляпе, часто небритый, но чудовищно упорный. Он путем заявлений, статей и жалоб на консерватизм науки добивался двух вещей: чтобы ему дали степень кандидата технических наук и чтобы через Организацию Объединенных Наций по всему миру распространить его идею домов на пружинных сейсмоамортизаторах. Мы, тогда все знающие и все понимающие молодые ученые, видя недостатки и несовершенства его конструкции, остряли и посмеивались. Но теперь и нам, дожив до его возраста, хотелось бы быть такими же энергичными и одержимыми идеей. Ведь именно он — Федор Данилович Зеленков — открыл счет системам сейсмоизоляции в нашей стране.

После разрушительного землетрясения 1948 г. в Ашхабаде под напором Ф.Д. Зеленкова там было возведено обычное трехэтажное кирпичное здание без добавочного усиления, но на пружинных сейсмоамортизаторах.

О своем методе сейсмоизоляции сам Ф.Д. Зеленков пишет так [1]: "В данной работе впервые описан новый метод обеспе-

Рис. 3. Дом на пружинах

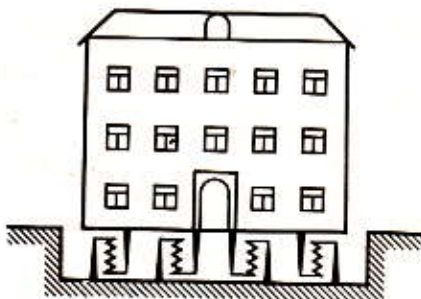
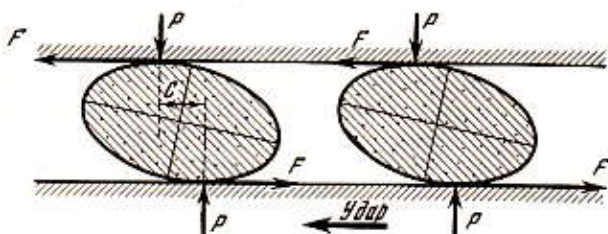


Рис. 4. Эллипсы вращения в действии



чения целостности кирпичных жилых зданий при разрушительных землетрясениях с силой девять и выше баллов. Он не предусматривает дополнительных креплений стен зданий и увеличения их жесткости, применяемых до настоящего времени и не гарантирующих их целостность, а предохраняет их от разрушения применением амортизаторов или поглотителей ударов.

Для этой цели использован специальный фундамент, который отделяет, то есть изолирует, здание от земли воздушным зазором и тем самым от сейсмических ударов со стороны земли".

К сожалению, между зданием и грунтом находится не только воздушный зазор, но еще и пружины, на которых оно висит. На этих пружинах строение может раскачиваться во всех направлениях и во всех направлениях будут свои собственные периоды колебания. Сейсмическое воздействие имеет целый набор периодов колебаний. С какими-то из них здание обязательно резонирует и будет сильно раскачиваться. Предложенная конструкция может служить только динамическим гасителем колебаний, т.е. изолировать от колебания с каким-либо одним периодом, а при землетрясении их целый букет. Для того чтобы эта пружинная система служила сейсмоамортизатором, в нее необходимо ввести элемент, повышающий затухание системы и упругие ограничители колебаний. И конечно, предложенная система не решает всех проблем сейсмостойкого строительства, как утверждал ее автор Ф.Д. Зеленьков.

Осень 1973 года. Идет конференция, посвященная двадцатипятилетию самого тяжелого в нашей стране по последствиям Ашхабадского землетрясения 1948 г. В перерыве между докладами симпатичный человек ставит на стол президиума две небольшие модельки.

Объясняет и предлагает попробовать их в действии. Это В.В. Назин — автор систем сейсмозащиты, выполненных в виде эллипсоидов вращения. Под его руководством в Севастополе были запроектированы и построены здания, оснащенные этими эллипсоидами [2].

Как работают эти эллипсоиды? Название им дано не совсем правильно. Наверное, правильнее было бы их назвать шароидами потому что этот эллипсоид получается из шара, если от него отрезать два одинаковых сегмента и затем склеить. Если эти эллипсоиды заложить между нижней частью здания и его фундаментом, то во время землетрясения фундамент сдвинется, здание останется стоять на месте в силу своей инертности и отрезанности от фундамента, сами эллипсоиды соответственно повернутся (как показано на рисунке). Из рисунка ясно, что чем больше смещение фундамента от землетрясения, тем больше поворот эллипсоидов и тем больше момент силы, возвращающей эллипсоид в исходное положение. Система будет нелинейной. Ее собственный период будет переменным, определяющимся в каждый момент времени радиусом кривизны эллипсоида и его положением. Ясно, что конструкция здания с таким оснащением будет самопроизвольно проскакивать резонансные состояния, тем самым предохраняя себя от сейсмического удара. Большую роль здесь играет радиус кривизны эллипсоидов. Чем он больше, тем больше собственные периоды колебания всего здания. Разработан даже вариант многоэтажного здания с высотой эллипсоида на весь первый этаж. Не пугайтесь, это не гигантские отливки, похожие на корабли инопланетян, а почти обыкновенные колонны, в верхней и нижней частях которых устроены сферические поверхности нужного рабочего размера. Модель такого здания и была продемонстрирована В.В. Назиным на конференции в Ашхабаде. Для сравнения была показана модель обычного здания.

Обычное здание моделировалось с гладким основанием, на котором в виде легких, не связанных между собой пластинок, один на другой громоздились этажи. Достаточно было дернуть за основание, как было видно, что этажи смещаются, т.е. в здании возникла сдвигающая сейсмическая сила. На другой модели в первом этаже были устроены эллипсоиды вращения. Когда прилагали сдвигающее усилие к фундаменту, эллипсоиды основательно поворачивались, но сдвига верхних этажей не происходило, так как сейсмические ускорения в верхнюю часть не проникали. Таков принцип действия еще одной системы сейсмоизоляции, примененной в нашей стране в большом масштабе.

Системы сейсмоизоляции, состоящие из набора различных криволинейных поверхностей, использовались ранее и сейчас широко используются во всем мире, но о них разговор дальше. Еще в 1925 г. были опубликованы предложения М. Вискордини (см.[3]) по устройству в подземной части здания катковых опор или колонн со сферическими верхними и нижними опорами.

При выполнении таких конструкций требуются прочные материалы и точность изготовления. Пятиэтажное здание с системой сейсмо-

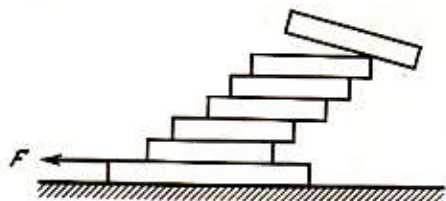


Рис. 5. Модель обычного здания

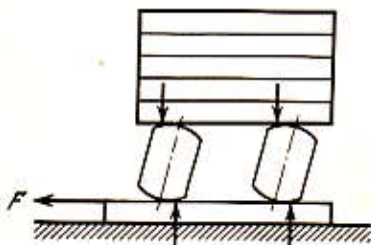


Рис. 6. Модель здания с системой сейсмозащиты

защиты В.В. Назина было установлено на 6,5 тыс. армированных эллипсоидов вращения высотой 6 см [3]. Большинство из них было раздавлено, и свою функцию они не выполнили. В восьмиэтажном здании с высокими эллипсоидами вращения были получены положительные результаты при дополнительном введении элемента затухания.

Идею здания на эллипсоидах вращения, когда выведенное из равновесия здание силой собственного веса возвращается в исходное положение, считаю замечательной. Требуется только тщательное исполнение и некоторые совершенствования. Например, при возникновении крутящего момента в здании (а он всегда будет) крайние эллипсоиды поднимутся выше, чем центральные, которые могут выключиться из работы и отпасть; тогда крайние будут перегружены и раздавлены. Этого можно избежать, если вместо гладкой поверхности сцепления сделать зубчатую, как в шестеренках, выполнить эти элементы в металле как типовые и оснащать ими здания в сейсмоопасных районах.

Так называемые адаптивные системы активной сейсмозащиты зданий, о которых уже говорилось выше, начал пропагандировать в нашей стране Я.М. Айзенберг [4]. Изучая любое пострадавшее от землетрясения здание, современное или древнее, можно заметить стремление зданий выжить, приспособиться, не рухнуть. В этом отношении лучше даже изучать уцелевшие древние сооружения, потому что они перенесли весь набор землетрясений в данном районе за длительный исторический отрезок. И если устояли, то уж поистине сумели приспособиться и есть в них какая-то изюминка, которую надо найти.

Может устоять не все сооружение, а только его часть, может остаться целой одна колонна или их группа. Причины их стойкости необходимо изучать. Это, с одной стороны, позволит представить сейсмичность района, а с другой — узнать гибкость конструкции, которая предпочтительна в данном районе.

Вспомним Ашхабадское землетрясение в 1948 г. [5]. По ул. Свободы была расположена мечеть, построенная в 1911 г. из обожженного кирпича на прочном известковом растворе в лучших традициях среднеазиатского зодчества. Эта мечеть состояла из центрального

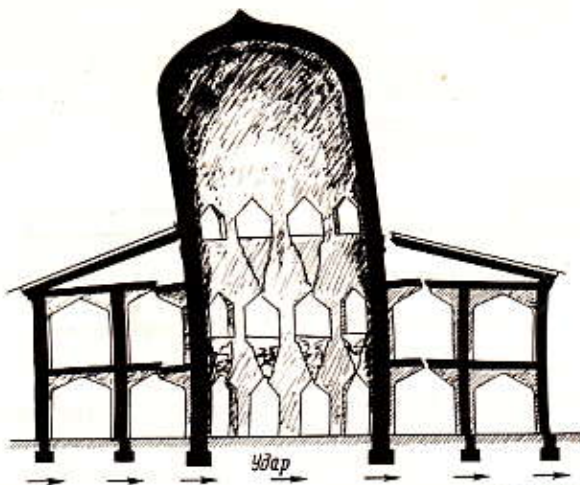


Рис. 7.В результате повреждений здание из жесткого стало гибким

девятигранного барабана высотой от основания до вершины купола 33 м и еще двух значительно более низких концентрически расположенных барабанов с арочными перекрытиями, которые составляли пристройку. Эта конструкция была, конечно, очень жесткой, что видно даже по рисунку, т.е. собственный период колебания был маленький, по-видимому, такой же маленький преобладающий период колебания был у близкого землетрясения, поэтому конструкция при землетрясении работала в резонансном режиме, ей грозило разрушение. Мечеть начала бороться за жизнь. Объединение центральной и окружающей ее частей в единое целое придавало всей конструкции чрезвычайную жесткость. Прежде всего разрушились связи, соединявшие их. Далее каждая часть конструкции боролась самостоятельно. У боковой пристройки срезались опоры, здесь передача движений от фундамента на здание шла только через трение. Вот вам прототип скользящих поясов, о которых мы будем далее говорить. Идею подсказывает сама природа. Центральная часть повела себя иначе. У нее все опоры уцелели, их было трудно срезать, они были очень прочными. Тогда здание решило пожертвовать своими стенами над первым и вторым ярусами оконных проемов. При их разрушении образовались трещины под углом 45° к горизонту. Теперь вертикальные опоры купола могли свободно, с учетом нужного здесь трения, скользить друг относительно друга. Жесткость центральной части мечети резко уменьшилась за счет исключения связей, роль которых сыграли надоконные арки. Теперь центральная часть уцелела, так как купол опирался не на жесткую, а на гибкую конструкцию. Последовательность разрушения сооружения немного идеализирована, на самом деле она, конечно, была не такой четкой.

На способность конструкций приспосабливаться к землетрясениям и обратил внимание Я.М. Айзенберг. Остается добавить, что надо

так проектировать конструкции, чтобы заранее предусматривать элементы, которые мы можем позволить разрушить землетрясению, а потом снова их восстановить.

Первыми из этой серии систем сейсмозащиты были запроектированы здания с гибким первым этажом [4]. Идея их такова. Строится здание, у которого первый этаж гибкий, т.е. здание имеет большой собственный период колебания. Но мы часто не знаем, какое будет землетрясение — с большим или маленьким преобладающим периодом. Из-за этого вводим дополнительные связи, ужесточая первый этаж. Все здание тоже делается жестким, с маленьким собственным периодом колебания. В качестве дополнительных связей можно применить металлические раскосы или каменные и кирпичные перегородки, но так, чтобы при перегрузке всего здания они разрушились первыми и чтобы потом их можно было восстановить. Дальнейшая механика такова. Если землетрясение имеет большой период собственных колебаний, то жесткое здание с целыми связями на него не реагирует. Если землетрясение имеет маленький собственный период, то жесткое здание на него реагирует, выключает свои предусмотренные связи и делается гибким, т.е. отключается от землетрясения. Эта идея совершенствовалась и будет еще совершенствоваться, об этом речь впереди.

В нашей стране много и других энтузиастов идеи специальных систем сейсмозащиты. Всех их уже трудно перечислить. Есть удачные решения, есть абсурдные или трудновыполнимые. В ближайших разделах разговор пойдет в основном о конструкторском воплощении идеи сейсмозащиты.

АНТЕЙ И СЕЙСМОСТОЙКОЕ ЗДАНИЕ

Как известно из греческой мифологии, герой Антей черпал силы от матери — богини земли Геи и по этой причине старался ее всегда касаться, тогда он был непобедим. С сейсмостойким зданием происходит все наоборот. Чем меньше оно связано с землей, тем больше у него шансов уцелеть. Как уже говорилось, задача систем сейсмозащиты состоит в том, чтобы отрезать здание от земли, изолировать от ее колебаний. Поговорим о тех способах сейсмозащиты, которые уже существуют.

Разумеется, не будем скрупулезно рассматривать все существующие конструкции, а поговорим только об отдельных представителях каждого направления сейсмозащиты.

Все существующие элементы сейсмозащиты выполняют роль связи между сооружением и его фундаментом. Чем эта связь слабее, тем лучше. Сам фундамент колеблется вместе с грунтом во время землетрясения, вернее, плавает в грунте. На фундамент ставятся сейсмоизоляторы, а уж на них возводится здание.

Самыми простыми и самыми распространенными во всем мире являются многослойные сейсмоизоляторы [6]. Они состоят из металлических пластинок, между которыми находятся резиновые прокладки.

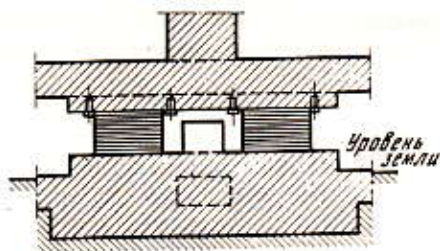


Рис. 8. Резинометаллический слоистый сейсмоизолятор

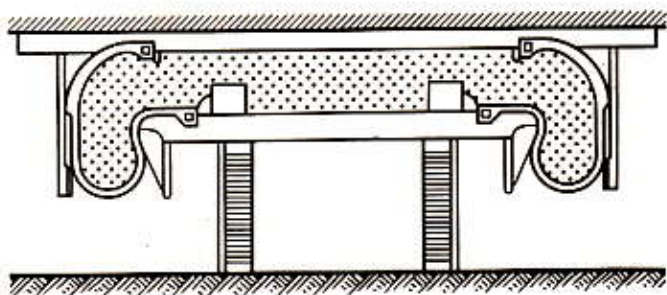


Рис. 9. Резинометаллический сейсмоизолятор с воздушной подушкой

Как они работают, ясно из рисунка. Существует много модификаций этого сейсмоизолятора. Если в середину сейсмоизолятора загнать свинцовый стержень для увеличения затухания, то получится новозеландский вариант. Кстати, древние строители для соединения элементов конструкции широко применяли свинец. Для увеличения затухания применяется также пластичная резина — американский вариант. Если заложить между алюминиевыми пластинками специальную пластмассу, получим армянский вариант. Можно пойти еще дальше. Если учесть, что многослойные изоляторы хорошо деформируются в горизонтальном и плохо в вертикальном направлении, а сейсмическое воздействие ударяет по зданию не только сбоку, но и вверх, то надо применять японский вариант. Он состоит, как показано на рисунке, не только из резинометаллических опор, но и из воздушной подушки высокого давления, которая и смягчает вертикальный удар. Много и других вариантов [6].

Следующие по простоте сейсмоизоляторы — это так называемые скользящие пояса. Они выполняются в виде ряда опор, расположенных между фундаментом и верхней частью здания. Каждая опора состоит из двух металлических или пластмассовых пластинок не связанных между собой. Нижняя пластинка прикреплена к фундаменту, а верхняя соответственно к верхней части здания. При достаточно сильном и, следовательно, опасном землетрясении сейсмические силы превзойдут силы трения, существующие между пластинками, и здание будет спасено проскальзыванием относительно движущегося фундамента. Отсюда ясно, что большего, чем силы трения, усилия на здание передано быть не может. По этой причине в

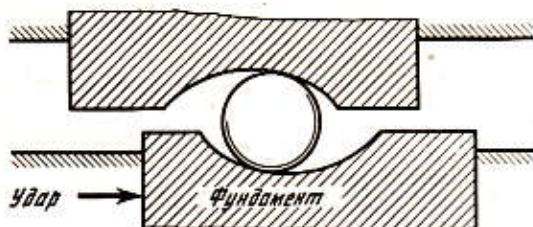


Рис. 10. Вместо скольжения — качение

таких сейсмоизоляторах для снижения сейсмической нагрузки стремятся снизить коэффициент трения. В Японии, например, металлические пластины смазывают маслом, что снижает сейсмическую нагрузку в 10 раз. В Китае есть конструкции малоэтажных кирпичных "зданий, построенных на песке". В этих зданиях между нижними балками здания и фундаментом насыпан специальный песок, который обеспечивает их взаимное проскальзывание. Считается, что так обеспечивается сейсмостойкость даже зданий низкого качества [6]. Во всех этих конструкциях необходимо предусматривать упругие ограничители, чтобы здание не соскользнуло с опор. Если совсем избавиться от сил трения между зданием и фундаментом, то сейсмическая сила в здании не возникнет. В общем-то это технически осуществимо. Если построить здание плавающим в бассейне с гибкими стенками, куда может быть налита не только вода, а какая-либо другая тяжелая жидкость для повышения архимедовой силы, то получим универсальный сейсмоизолятор. При любом землетрясении двигаться будут только гибкие стенки бассейна, при современных легких строительных материалах это вполне осуществимо.

С целью снижения все того же трения существуют сейсмоизоляторы, в которых трение скольжения заменено трением качения. Все они состоят из комбинаций шаровых поверхностей и, как правило, устроены так, что после землетрясения силой веса сооружения возвращаются в исходное положение. Применение их более эффективно, но и изготовление значительно более сложно и дорого. Выше уже приводился пример такого сейсмоизолятора, выполненного в виде эллипсоидов вращения. Вместо эллипсоидов могут применяться чугунные шары. Работа их будет аналогичной. Для упрощения технологии изготовления, чтобы не мучиться с различными криволинейными поверхностями, устраивают просто катковые опоры, как было сделано в Канаде [6], а в исходное положение опоры возвращают упругие пружины.

Существует еще маятниковый (назовем так) способ сейсмоизоляции. Один из вариантов такой конструкции показан на рисунке. Здесь к верхней плите фундаментного колодца на четырех тяжах подвешена плита. На плиту опираются железобетонные колонны здания, которое получается подвешенным. Для увеличения затухания такой маятниковой конструкции на дно колодца можно насыпать песок [7]. Здание будет иметь значительно больший период собствен-

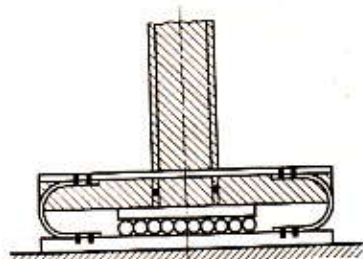
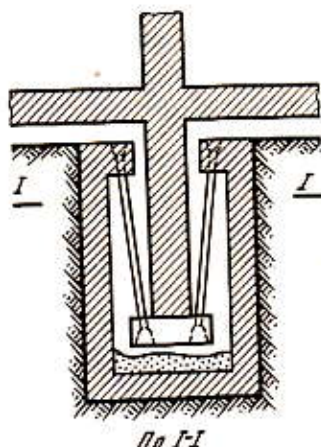


Рис. 11. Катковая опора



По I-I

Рис. 12. Маятниковая подвеска здания

ных колебаний, чем без подвески. В результате опять основание будет колебаться во время землетрясения, а верхняя часть в силу своей инертности будет стоять на месте. Вариантов такой конструкции существует много.

Хорошо зарекомендовали себя многоэтажные подвесные здания при землетрясении 1957 г. в городе Мехико. Эти каркасные здания стояли на монолитных железобетонных плитах, которые были подвешены к оголовкам металлических свай, пропущенных через отверстия в этих плитах [3].

Были перечислены основные типы элементов сейсмозащиты, чтобы объяснить принцип их работы.

Необходимо отметить, что практически ни один из перечисленных элементов сейсмозащиты в чистом виде не применяется. Бóльший эффект дает комбинация элементов. Существует много способов повышения затухания системы, что значительно снижает сейсмические нагрузки, так как не дает конструкции сильно раскачиваться.

На рисунке показана такая комбинированная система, примененная в США [6]. Здесь и катковая опора в виде двухрядного набора шаров, и анкерные болты, которые должны срезаться при превышении сейсмической нагрузки определенного уровня, когда потребуется включить катковую систему сейсмозащиты. Здесь и неопределенный элемент, являющийся гасителем колебаний. Вот такой джентельменский набор должен обеспечить сейсмостойкость здания. Чрезвычайно важно разрабатывать системы сейсмозащиты к особо ответственным сооружениям: мостам, блокам атомных станций, сооружениям с вредным производством.

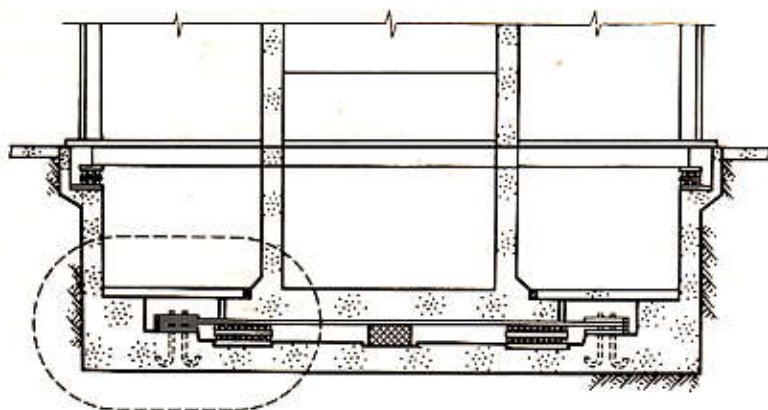


Рис. 13. Комбинированный сейсмоизолятор

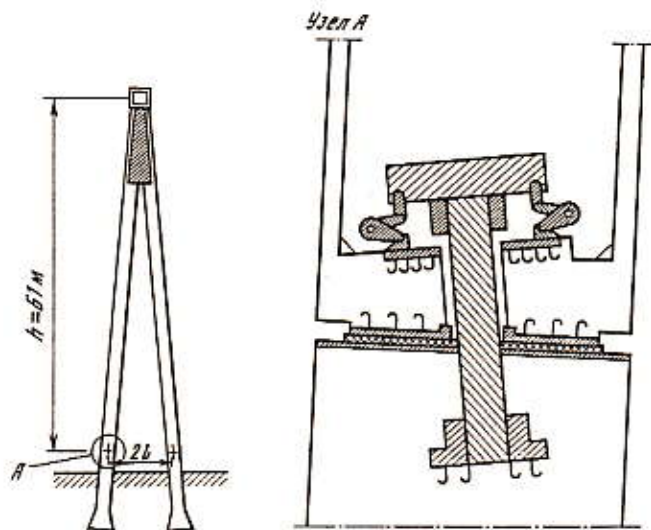


Рис. 14. Качающийся устой моста

Конечно, названные системы сейсмозащиты не исчерпывают всего многообразия того, что уже изобретено и что еще будет изобретено. Но наше путешествие продолжается.

Хочется привести один любопытный пример. В Новой Зеландии применяются сейсмостойкие конструкции "шагающего" типа, по-русски их можно назвать ваньки-встаньки. Там был запроектирован устой моста такого типа высотой в 61 м. Если делать обычный устой подобной высоты, то он будет страшно тяжелым и соответственно в нем возникнут гигантские сейсмические нагрузки при землетрясении. Чтобы этого избежать, легкие А-образные устои отрезают от фундамента специальным узлом, как показано на рисунке.

Такой узел позволяет всему устою покачиваться во время землетрясения и силой собственного веса возвращаться в исходное положение. Перемещения устоя будут небольшими, и это несколько не повредит прочности самого моста. Период собственных колебаний системы получается большим, и фактически во время землетрясения колебаться будут фундаменты, а устои с мостом останутся неподвижными [8].

Из приведенных примеров пассивной сейсмозащиты, применяемой в настоящее время, ясен принципиальный подход к этому способу. Поговорим теперь немного об активной сейсмозащите, о способах, которые найдут широкое применение в будущем.

КОГДА ПРИДЕТ НАСТРОЙЩИК

Как уже говорилось, здания сами активно противостоят землетрясениям, если в процессе разрушения их конструкция меняется в нужную сторону. А можно ли заранее настроить здание на ожидаемое землетрясение? Существуют постройки с предварительно напряженной на всю высоту и длину арматурой, есть здания, напрягаемые навивкой металлической ленты. При вводе в конструкцию здания металлических стержней и изменении их натяжения будет меняться собственный период колебания сооружения. Остается определить нужное натяжение и настроить здание так, чтобы его собственный период значительно отличался от периода колебания сейсмических волн. К сожалению, пока не всегда можно предсказать характеристики ожидаемых землетрясений. Вот тогда и вводят дополнительные включающиеся и выключающиеся связи в виде ограничителей-упоров, стержней, болтов, заклепок, включение или разрушение которых резко меняет жесткость всей конструкции и позволяет зданию отстраиваться от резонансного эффекта [4].

По принципу отстройки здания от уже проходящего землетрясения можно построить здание-робот. Такая конструкция была разработана в Японии. В ней автоматически в зависимости от параметров сейсмических волн, подошедших к фундаменту здания, меняется в соответствующем направлении жесткость первого этажа, а значит, и всего сооружения. Принцип работы такой конструкции показан на рисунке. На уровне первого этажа введены диагональные связи, в каждой из которых имеются поршневые элементы. Поршневые цилиндры соединены между собой трубкой. По ней в соответствии с нагрузкой связей на поршни перетекает жидкость.

В зависимости от скорости протекания жидкости меняется жесткость диагональных связей, а значит, и собственный период колебаний всего здания. Осталось регулировать скорость перетекания жидкости. Для этого на трубке есть задвижка, а на фундаменте здания — сейсмометрический прибор и небольшая вычислительная машина с соответствующей программой. Происходящее землетрясение одновременно записывается и обрабатывается и тут же подается нужная команда на задвижку. Получается, что жесткость

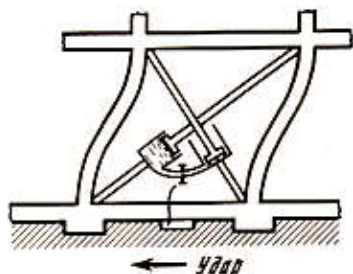


Рис. 15. Здание — робот

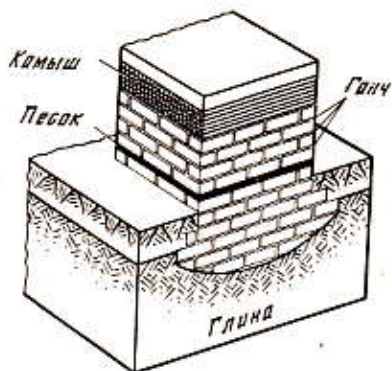


Рис. 16. Типовой набор антисейсмических мероприятий древних зодчих

здания корректируется во время землетрясения. Предсказывать, какой будет преобладающий период землетрясения, не надо. Здание должно отстроиться от любого из них.

Сейсмостойкие здания-роботы можно будет когда-нибудь построить, пользуясь и другими принципами. Например, поставить сейсмометрические приборы где-то вдали от здания, и, когда пойдет сейсмическая волна, они оповестят здание: "Идет мощное землетрясение". Вычислительный центр здания примет решение: "Это землетрясение опасно. Включить сейсмозащиту". Заработают двигатели, ударят струи воды, воздуха в днище здания, возникнет магнитное или исчезнет гравитационное поле или еще не знаю что, и здание всплывет на какой-то из этих подушек на несколько сантиметров над фундаментной плитой. Землетрясение проскочит, и по команде все тех же приборов здание торжественно опустится на свое место. Пока это, конечно, фантазия. Но появятся новые, чрезвычайно легкие строительные материалы, новые двигатели, а с ними новые возможности. Пока же наука постигает принципы сейсмостойкости, а практика в соответствии с ними разрабатывает обычные, назовем так, сейсмостойкие конструкции. Об этих принципах и будет идти речь дальше, но прежде всего хочется рассказать о древних аналогах тех систем сейсмозащиты, о которых мы говорили только что.

А настройщик придет тогда, когда будет что настраивать, пока же мы до этого не доросли.

ЧТО НАМ ПРЕДЛОЖИЛИ ЗОДЧИЕ ДРЕВНОСТИ

Трудно удержаться и не рассказать о том, как только что рассмотренные принципы современных систем сейсмозащиты были осуществлены в древности. Поражают сооружения зодчих Средней Азии X—XVII вв. Не будем говорить о том, что, при каком

царе или шахе и в какой империи было сделано, а вспомним лучше, какие здания уцелели и донесли идею своего зодчего до нас.

Для уцелевших сооружений совершенно четко можно выделить типовой набор приемов, которые обеспечили сейсмостойкость этих зданий. Все эти приемы показаны на рисунке, но прежде чем их пояснить, назовем принцип, которому следовали древние зодчие, возводя свои сооружения.

"Убеждение старых зодчих Средней Азии в том, что нет в руках человека средств, которые можно было бы по силе противопоставить мощи землетрясений, привело их к точке зрения, что только эластичные строительные материалы и конструкции являются действительными антисейсмическими факторами в руках архитектора". Так сформулировал этот принцип Н.М. Бачинский, изучая памятники Средней Азии [9]. Сейчас такие средства появились, и об этом было сказано.

О просчетах древних зодчих говорить пока не будем, а рассмотрим то фантастически верное, что они придумали в качестве мероприятий по защите зданий от землетрясений. Почти все монументальные сооружения Средней Азии возведены на фундаментах, основанием для которых служат подушки из чистой гончарной глины. Толщина этих подушек от 60 до 80 см [9, 10]. Хорошо промешанная, определенной влажности, защищенная от высыхания, сырая гончарная глина обладает высокими долговечными пластическими свойствами. Это и учли древние строители. Можно твердо сказать, что назначение этих глиняных подушек двоякое. Во-первых, они исключали возникновение концентраций напряжений в фундаменте сооружения от неравномерных осадок и способствовали равномерной загрузке фундамента. Во-вторых, в силу высокой пластичности глины во время землетрясения часть колебаний земли гасится в этой подушке. Последнему способствует и выпуклая форма фундамента.

Древние считали, что этого сильного мероприятия недостаточно, и поэтому шли значительно дальше. Кладка фундамента из кирпича или камня могла проводиться на растворе из той же глины, но основным вяжущим раствором, обладающим упругопластическими свойствами, во всех старых монументальных сооружениях Средней Азии является один из видов гипса — ганч. Изготавливался ганч обжигом из местного алебаstra. Употребление ганча было доведено до совершенства. С помощью различных добавок ему придавали различные нужные в данном случае свойства. Для получения ганча с повышенными вяжущими и прочностными свойствами в него добавляли лёсс, золу и уголь. Для кладки, где предполагалась повышенная влажность, применялся ганч с примесью золы соответствующей травы. Для замедления скорости схватывания ганцевого раствора в него сыпали шереш-порошок, получаемый из корней растений. Одним словом, раствор был универсальным. Можно добавить, что известковые растворы были известны среднеазиатским зодчим, но ганчевые ценились больше за их эластичные свойства.

Думается, что древний фундамент с упругими свойствами за счет раствора из глины или ганча на эластичной подушке из гончарной глины ничуть не хуже современных сейсмоизоляторов из слоистой резины. Эффект их действия одинаков, только древняя конструкция долговечнее и надежнее.

При выходе кладки на поверхность, т.е. на стыке фундамента и цоколя, один горизонтальный шов под всем зданием устраивался на тощем лёссовом растворе с песком. По современному это одновременно и скользящий пояс, и выключающая связь. При превышении сейсмической нагрузкой определенного уровня слабый раствор разрушается и здание проскальзывает. Сейсмическая нагрузка этого уровня уже превзойти не может. Древним и этого казалось мало.

Поднимаемся выше, на уровне нескольких десятков сантиметров над землей новая преграда — "камышовый пояс". Он встречается на памятниках Средней Азии, в некоторых древнегреческих конструкциях Причерноморья. Устраивался он следующим образом. Кладка, выведенная на нужный уровень с помощью раствора, выравнивалась. Далее перпендикулярно плоскости стены укладывались стебли камыша ровным слоем 8—10 см. Иногда это были кирпичи, склеенные из отдельных камышинок. Работа эта была, ювелирной, стебли укладывались аккуратно, плотно друг к другу, чтобы при укладке последующих слоев кирпича камыш не раздавливался. Такой "камышовый пояс" хорошо проветривался и соответственно не гнил, сохранившись до наших дней. Иногда в здании делали два "камышовых пояса". Современным аналогом такой конструкции являются кинематические опоры — здания на шарах, эллипсоидах, катках. Работа их понятна. Основание с фундаментом движется, а здание в силу своей инертности стоит на месте, так как движение через кинематические опоры и "камышовый пояс" не передается [9].

Думаете, древние на этом успокоились? Как бы не так! Это мы бы с Вами успокоились и начали рапортовать о своих успехах и составлять заявки на изобретение. Древние пошли дальше. Они использовали упругие свойства ганча, рассматривая его как эликсир от землетрясений. Свойства раствора и его толщина менялись по высоте сооружения. Так, в одном из монументальнейших сооружений Средней Азии, в мавзолее Султана Санджара (XII в.), в нижних рядах кладки стен раствором служит ганч с золой и древесным углем, выше ганч с кирпичной мукой, а далее ганч с песком. При этом в нижней части здания толщина шва достигала толщины кирпича (5 см), а по мере роста стен вверх швы становились все тоньше и тоньше, и в верхней трети сооружения толщина шва была обычная, современная — 10—12 мм. Присутствие в сооружениях толстых упругопластичных прокладок в стенах из раствора придавало сейсмостойкость всему зданию за счет гашения энергии землетрясения. Объем ганчeveго раствора в сооружениях достигал 30%, что значительно сказывалось на свойствах здания, выполненного из такого жесткого материала, каким является кирпич, делая его гибким.

Вот такая поразительная аналогия между современными и древними сооружениями напрашивается при изучении архитектурных памятников. Иден абсолютно те же, только разное исполнение. И древнее часто симпатичнее своей основательностью, поэтому, продолжая наше путешествие, рассматривая особенности сейсмостойкого строительства, демонстрационные примеры будем стараться брать из истории.

И еще несколько слов о древних зодчих, которые умели работать, а главное — умели думать и наблюдать. Казалось бы, употребление раствора из ганча доведено до совершенства, он удовлетворяет всем требованиям строителей, можно успокоиться, но поиски продолжались. Встречались и другие виды растворов, более совершенные. Например, обнаружено [9], что арка в мавзолее Ходжи Ахмеда Ясави была сложена из обожженного кирпича на неведомом смолообразном растворе желтовато-серого цвета с чрезвычайно высокими эластичными свойствами. Раствор состоял из смеси какой-то смолы с песком и лёссом. На кирпич этот раствор наносился, по-видимому, в подогретом виде и схватывался с ним необычайно прочно. Скрепляющий раствор особенно важен для ответственных элементов конструкции, таких, как арки, своды, купола. Один только такой раствор в конструкции мог обеспечить ей исключительную долговечность, даже в условиях частых землетрясений, если, конечно, нет грубых ошибок в планировке здания.

Узнав о достижениях древних, сразу возникает мысль. В наш бурный век технического прогресса, когда химия полимеров сделала колоссальные успехи, есть ли достаточно прочные и пластичные растворы, которые могут повысить сейсмостойкость здания, влияя не только на его прочность, но и на гибкость. Я знаю только один такой случай. Совсем недавно на стройках Сибири начали внедряться так называемые дома с сухими стыками [11]. Первоначальная их идея заключалась в том, что вместо обычного замерзающего цементного раствора при строительстве в условиях сибирского холода для герметизации стыков между панелями стали применять отходы целлюлозной промышленности. Эти отходы химии не замерзали на морозе и обеспечивали изоляцию горизонтальных и вертикальных швов. При динамических испытаниях с помощью вибромашины такого здания, в котором панели, по сути дела, стояли на упругопластичных прокладках, оказалось, что здание стало более гибким, чем оно было бы на цементном растворе. Там, где строятся эти здания в зоне БАМа, сочетаются мороз и сейсмика, поэтому при расчете зданий на сейсмические воздействия учитывается их повышенная гибкость, зависящая от материала "сухих" стыков и их толщины.

Прочтя этот параграф, кто-нибудь подумает, что не все современные системы сейсмоизоляции имеют аналоги у древних и что приведенные удивительные конструкции сейсмозащиты касаются только зодчества Средней Азии. Это не так. Может быть здесь перехваляются древние строители, но у них было много инте-

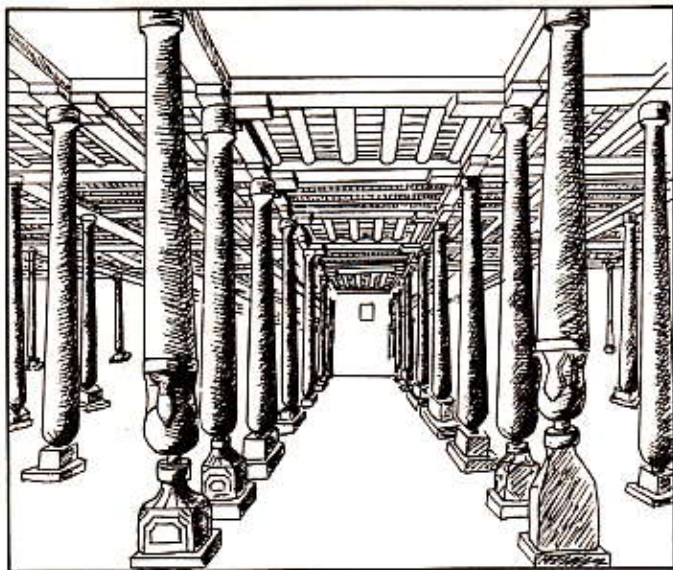


Рис. 17. Джума-мечеть в Хиве

ресного, проверенного, есть аналоги всем современным системам сейсмозащиты и даже больше, кроме сейсмозащиты, связанной с вычислительной техникой. Рассмотрим еще два аналога.

Выше рассказывалось о домах на шарах, которые применяются в современном сейсмостойком строительстве. Оказывается, этот принцип использовался в Японии более тысячи лет тому назад [12] в жилищном строительстве. Основу этих зданий составлял легкий деревянный каркас с легким наполнителем. Стойки каркаса опирались на камни с отверстиями для шипов стоек. Эти шипы предохраняли стойки от соскальзывания с камней, которые свободно, независимо друг от друга, двигались во время землетрясения в соответствии с движением поверхности земли, так как не были закопаны в землю, а свободно стояли на слое гравия. Вот вам в том и другом случае шарнирно осуществленная связь между зданием и грунтом.

Эта же идея в более совершенном конструктивном исполнении осуществлялась зодчими все той же Средней Азии [13]. Здесь для поддержки больших пролетов перекрытия террас или, как они называются в Средней Азии, айванов применялись и применяются красивые резные деревянные колонны, которые имеют шип внизу, входящий в отверстие в каменной опоре, что обеспечивает шарнирную опору нижней части. При любых подвижках основания колонны работают только на сжатие и горизонтальные движения фундамента на перекрытия не передаются. Очень нагляден в этом отношении, по-моему, приведенный рисунок, где показан лес таких колонн, поддерживающих легкое деревянное перекрытие Джума-

мечети в Хиве. В старинной мечети, построенной еще в XI в., семнадцать рядов колонн, по 13 в каждом ряду. Многие колонны были заменены в последующие века, но с десятков сохранилось от древности, это самые красивые колонны. Видны разной формы каменные опоры с отверстиями. Конструктивно это шарнир между перекрытием и грунтом [13], не передающий горизонтальные подвижки основания сооружению.

Другой пример. Как одно из средств сейсмозащиты выше упоминались различные подвесные конструкции. К сожалению, одно из чудес света, висячие сады Семирамиды, в современном понимании не были висячими, они были просто подняты на жестких кирпичных сводчатых конструкциях. Зато в Китае с XVI в. на самом деле возводились висячие конструкции. Чаще всего в виде мостов. Длина таких мостов достигала 150 м, ширина — 2,5 м. На берегах устраивались опоры, к которым крепились канаты или железные цепи, по ним делался настил. Наиболее долговечными оказались мосты из железных цепей. В 1701 г. в провинции Сычуань через реку Дадухэ был построен мост Лудинтесцяо длиной 100 м, шириной 3 м. Он имел девять цепей диаметром 9 см каждая, по которым был уложен деревянный настил [14]. Движение опор подобного гибкого моста во время землетрясения не могло вызвать его разрушения.

ВСЕМИРНО ИЗВЕСТНАЯ СЕЙСМОСТОЙКАЯ КОНСТРУКЦИЯ

Прежде чем окончательно переходить к общим вопросам сейсмостойкости, хотелось бы еще рассказать об одном конструктивном решении, которое явно было создано на заре человеческих цивилизаций, прошло испытание временем, широко применялось раньше, применяется и сейчас. Чтобы строить дома по этому принципу, не требуется никаких особых знаний, достаточно просто здравого ума.

Речь идет о жилых домах с деревянным каркасом с заполнением из различных местных материалов; обожженного и необожженного кирпича, саманной массы, т.е. глины с соломой или с шерстью животных, и вообще всего, что есть под рукой, вплоть до коровьих лепешек. Потом вся конструкция обмазывается глиной и после высыхания и покраски получают теплые, удобные дома. Кровля делается по такому же принципу.

Кстати, этим способом возводились не только скромные жилища, но и стены крепостных сооружений и дворцы вельмож, как это делалось в Древнем Египте [15]. За тысячу лет до новой эры такие дома строились в Китае, в столице государства Инь [16]. На протяжении нескольких столетий дома в Индии [17] возводились из несущих, вертикально поставленных столбов с обмазкой глиной. В Средней Азии и на Кавказе такие дома строились как в глубокой древности, так и сейчас [18, 19]. Не продолжая

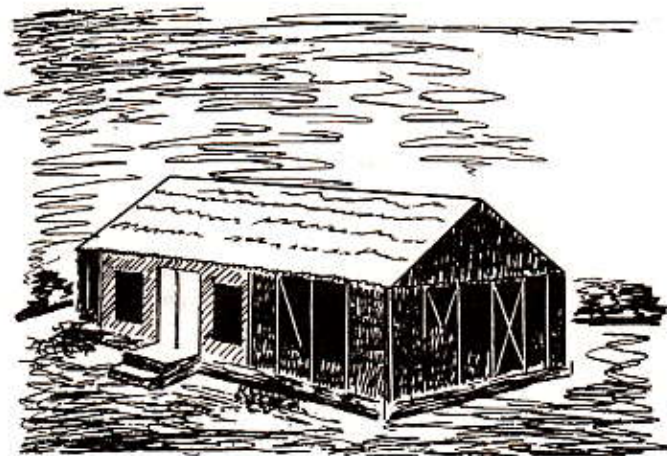


Рис. 18. Самая распространенная в мире сейсмостойкая конструкция

перечень, можно сказать, что везде и во все времена, где были глина и дерево, возводились легкие и гибкие каркасно-глиняные дома, в том числе и в сейсмически опасных районах, так как было замечено, что эти сооружения являются достаточно сейсмостойкими.

Обследование таких домов в Средней Азии после Газлийского землетрясения 1976 г. позволило сделать вывод, что их сейсмостойкость равна сейсмостойкости обычных кирпичных домов из обожженного кирпича, а в некоторых случаях выше и что их разрушение наступает при максимальном расчетном землетрясении в 9 баллов. Показанные на рисунке разрушения такого дома после Газлийского землетрясения не представляют большой опасности для жизни людей [18].

Те же результаты получены после Дагестанского землетрясения 1970 г. [19]. Слабым местом подобных сооружений оказалась раздельная работа деревянного гибкого каркаса и жесткого глиняного заполнения, который при сотрясениях просто вываливался. В тех случаях, когда для улучшения сцепления каркаса и кладки применялась обвязка проволокой, здания получались более надежными. Вывод был сделан такой: при хорошем качестве кирпича и раствора сырцовые постройки, не перегруженные тяжелой кровлей и не ослабленные чрезмерно оконными и дверными проемами, а также при усилении каркаса проволокой и обвязкой деревянным поясом, могут обладать значительной сейсмостойкостью.

Думается, что с этих простейших сооружений из палок и глины началось решение проблем сейсмостойкости. В них все довольно наглядно. Потом возникали огромные государства, появлялись города, культовые сооружения, дворцы, крепости, мавзолеи, мосты, высотные здания, гидротехнические плотины, атомные станции и т.п. Каждое новое сооружение выдвигало свою проблему, ставило свою задачу. Попробуем выявить общие принципы сейсмостойкости, которым должно следовать любое сооружение в сейсмоопасном районе.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

Обидно, что в термодинамике или в астрономии существуют свои основополагающие законы, а в такой замечательной науке, как теория сейсмостойкости, их нет. Теория сейсмостойкости, так же как медицина, политика и экономика, интересует всех, все в ней разбираются и все знают, как надо и что надо делать. Давайте все-таки сформулируем основные законы теории сейсмостойкого строительства, хотя ясно, что Америку мы не откроем.

Закон первый. Жесткости и массы в сооружении должны быть распределены равномерно и симметрично относительно плоскостей, проходящих через центр тяжести сооружения.

Закон второй. Сооружение не должно быть чрезмерно длинным.

Закон третий. Сооружение не должно быть слишком высоким.

Все остальные особенности сейсмостойких сооружений вытекают из трех основных законов. Теперь некоторые комментарии к ним.

Требование снижения веса сооружения, проектируемого для сейсмического района, не выделено в отдельный закон, хотя это очень важный пункт, так как сейсмическая сила пропорциональна весу сооружения. Об этом будем говорить в других разделах.

Далее, из этих законов ни в коем случае не следует, что нельзя делать несимметричные, длинные и высокие здания. Законы только предупреждают, что если вы их нарушаете, то в конструкции должна быть предусмотрена дополнительная повышенная прочность или какое-то другое мероприятие, которое снизит перегрузки, возникающие из-за нарушения законов сейсмостойкости.

Кстати, все три закона можно свести к одному: делать все возможное и невозможное, чтобы избежать концентраций напряжений в какой-то части конструкции от сейсмического воздействия.

Вот это, собственно, главное в сейсмостойком строительстве. Если при землетрясении в какой-то части сооружения происходит резкая концентрация усилий, то в этом месте здание должно быть разрушено, а дальше возникнет лавинообразное обрушение всей конструкции. Автор не имеет в виду специально предусмотренные элементы сейсмозащиты, разрушение которых ведет к снижению сейсмических нагрузок за счет изменения динамических свойств сооружения. Продемонстрируем действие законов сейсмостойкости на конкретных примерах.

В первом законе есть слова "симметрично относительно плоскостей". Сколько же их должно быть? Чем больше, тем лучше. Как следует из этого закона, компоновка сооружения в виде шара, имеющего бесконечное число плоскостей симметрии, самая лучшая. Но пока такие здания не строятся, а вот сооружения цилиндрической формы сколько угодно. Если в таком сооружении достаточно прочный фундамент, массы и жесткости распределены равномерно, то конструкция получается сейсмостойкой. Это хорошо подтверждает Ташкентский Дворец искусств, выдержавший землетрясение 1966 г. Здание имеет цилиндрическую форму, диаметр 55 м, фундамент и цоколь из монолитного железобетона, стены

из армированных керамзитобетонных скорлуп, в стыках между ними армированные монолитные сердечники. Перекрытие легкое, состоящее из стальных ферм с центральной опорой [3]. Высота и длина дворца умеренная, компоновка его соответствует законам сейсмостойкости. Здание достаточно легкое, соответственно поведение при землетрясении прекрасное.

Теперь давайте посмотрим, как выполнялись законы симметрии сейсмостойких конструкций в древности. Существует понятие "центрические здания" [20]. Это понятие связано с тем, что многие монументальные сооружения в те давние времена перекрывались куполами с различными опираниями на несущие стены. Отсюда и получалось, что при купольном перекрытии (а купол — конструкция центрально-симметричная) рационально и само здание делать симметричным, круглым или квадратным. Другое дело, что для сейсмостойкости этих зданий одной симметрии часто не хватало, так как они были чрезвычайно тяжелыми и недостаточно прочными.

Идеально симметричным можно считать мавзолей Саманидов, построенный в Бухаре более 1000 лет тому назад [13], сохранившийся до наших дней. В планировке мавзолея соблюдены все законы сейсмостойких конструкций. Размеры его скромные — $10,8 \times 10,7$ м. В конструктивном смысле он состоит из куба, перекрытого полусферическим куполом, опирающимся для прочности на арки. По углам здание поддерживается четырьмя колоннами. Сооружение отличается соразмерностью как в конструктивном, так и в эстетическом смысле. Жесткость всех стен одинаковая, так как в мавзолее в каждой стене имеется дверь. Материал прочный — обожженный кирпич на ганчевом растворе. У этого сооружения две плоскости симметрии, стоит он на прочном фундаменте, возвышающемся над уровнем земли в виде небольшой платформы. Мавзолей Саманидов не был разрушен землетрясениями в отличие от многих более поздних и современных ему построек из сырцового кирпича, гигантских размеров, со сложными роскошными компоновками.

Рассмотрим несколько примеров из истории армянской архитектуры [21]. На рисунке показаны планы четырех сооружений. Все они построены в V—VI вв., перенесли примерно одинаковый набор землетрясений. Цифрой 1 обозначен план кафедрального собора в Эчмиадзине. Храм, построенный в конце V в., в настоящее время имеет крестово-купольное перекрытие, сооруженное в XVII в. До VII в. у собора было деревянное перекрытие. Эчмиадзинский собор один из древнейших крестообразных христианских храмов. Он имеет практически две плоскости симметрии.

В планировке храма Св. Иоанна в с. Мастара (2) двухплоскостная симметрия здания нарушена, но компактность сооружения обеспечила ему сейсмостойкость. Интересна компоновка храма Св. Рипсимэ, находящегося также в Эчмиадзине (3). Здесь явно чувствуется стремление, с одной стороны, облегчить сооружение, образуя в стене ниши и помещения, с другой стороны, придать стенам, несущим мощный купол, прочность и жесткость.

Рис. 19. Мавзолей Саманидов

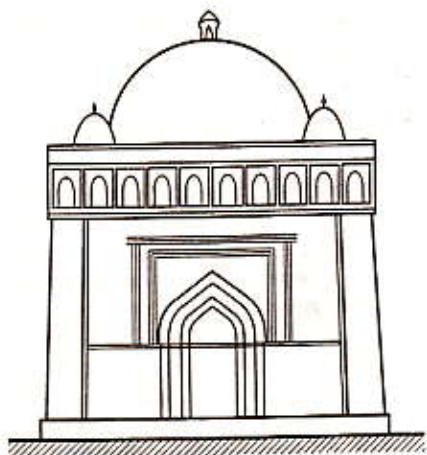
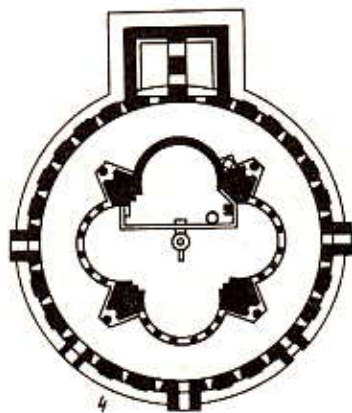
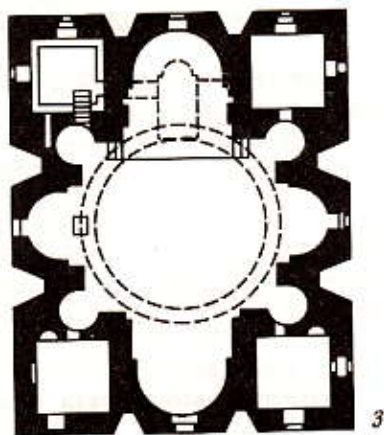
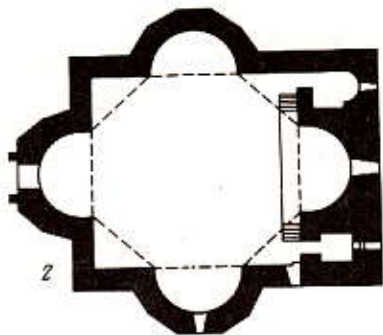
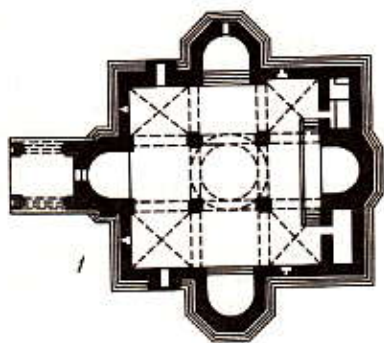


Рис. 20. Планы древних центрических зданий



На последнем рисунке (4) показан план гигантского храма Бдящих Сил — Звартноца, строительство которого было начато в 643 г. и стало общенародным. Этот храм располагался в Эчмиадзине. Он представлял собой круглое трехъярусное сооружение с диаметром основания 35 м и высотой около 45 м. Четыре внутренних пилона несли верхний ярус, состоявший из барабана и купола. За этими пилонами стояли одиночные колонны диаметром 0,9 м, на которые опирались арки, несущие второй ярус. Здание было изящным и легким, но интуиция, которая тогда заменяла расчет, подвела зодчего. Центризм здания был, конечно, обеспечен, но 22-метровые пилоны, поддерживавшие верхнюю часть, оказались слишком гибкими, а отдельно стоящие колонны, державшие второй ярус, — слишком перегруженными. И все-таки храм простоял более 300 лет, и только после этого его разрушило землетрясение [20]. Есть мнение, что перенапряжены были другие колонны, но это не меняет дела. Ясно, что несущие конструкции были загружены неравномерно.

Короче говоря, о важнейших требованиях к сейсмостойким конструкциям, которым следовали древние строители — центризме и симметрии — можно говорить сколько угодно. Вспомните египетские и древние американские храмы и пирамиды, ассирийские и вавилонские зиккураты, китайские и японские пагоды, греческие и римские храмы, индийские ступы, среднеазиатские минареты и мечети. Почти во всех сооружениях эти требования выполнялись. Напоминаю, что несимметричное расположение масс в сооружении ведет к появлению в нем при землетрясении дополнительных крутящих моментов и соответственно к перегрузке отдельных элементов, что в конечном счете может привести к разрушению.

Для зрительной фиксации требования симметрии сейсмостойких зданий посмотрим еще на два древних сооружения. Это среднеазиатский минарет XI в. в Джар-Кургане (а) из кирпича на восьмигранном основании [13] и мавзолей высотой 14 м, диаметром 10 м в г. Барда (б), построенный в XIV в. [22]. Восхищает соразмерность форм, прочность, симметрия и равномерность распределения масс и жесткостей. Примеров симметрии современных сооружений приводить не буду, так как в них, как правило, за основу при проектировании взят прямоугольный ящик и, следовательно, условие симметрии почти всегда соблюдается.

Продолжим рассмотрение первого закона сейсмостойкости. В нем говорится о соблюдении условий симметрии расположения масс и жесткостей. Выше мы делали акцент в основном на массах, теперь поговорим о симметрии жесткостей. Именно этот пункт чаще других нарушался в древности, нарушается и сейчас. Возьмем современные примеры. Вспомним Югославское землетрясение 1963 г., большие разрушения в г. Скопле [3]. Сильно пострадали 10-этажные башенные каркасные здания, внутри которых имелись бетонные колодцы, заключающие в себе лифты и лестницы. Заполнение каркаса было устроено из кирпича на известковом растворе толщиной 25 см, перегородки тоже из кирпича, но уже пустотелого. Из

Рис. 21. Гармоничная соразмерность древних сооружений



описания конструкции понятно, что каркас и лифтовая шахта имели различную жесткость, и если не обеспечить их совместную работу, то должно было произойти то, что произошло. Сейсмические силы воспринимались наиболее жесткими частями конструкции — стенами лестничных клеток и заполнением стен и перегородками. Они были сильно повреждены, и только после этого в работу вступил гибкий каркас, который и удержал здание от обрушения.

Строительство зданий Т, П, Z, Г-образных форм и других подобных для сейсмических районов не допускается. Жесткость в таких конструкциях не будет распределена равномерно, поэтому в местах примыкания отдельных частей, которые при землетрясении будут стараться двигаться независимо, произойдет концентрация напряжений, что приведет к разрушению в этом месте. В том же Скопле разрушился вокзал П-образной формы с несущими кирпичными стенами. В центре здания был устроен зал, перекрытый 40-метровыми прогонами. Во время землетрясения крылья вокзала стали двигаться независимо, сбросили перекрытие зала и здание развалилось.

Сразу возникает вопрос. А что же делать? Сооружения сложной конфигурации в плане делать все-таки надо. Ответ очень простой. Необходимо разрезать здание сложной формы антисейсмическими швами на простейшие элементы, так чтобы во время землетрясения они двигались независимо друг от друга. Никаких концентраций усилий при этом не возникнет. Подробный разговор

об антисейсмических швах еще впереди, а пока еще один любопытный пример из современности о неоднородной жесткости. В Скопле разрушилось одно административное здание, построенное на наклонном участке местности. Все в этом здании было симметрично, кроме неравномерной жесткости в уровне первого этажа. А получилось это из-за того, что на неровном участке местности были поставлены колонны одинакового сечения, но различной длины. С одной стороны здания колонны были очень гибкими, с другой — очень жесткие. Когда произошло землетрясение, жесткие колонны были срезаны, так как вся инерционная сила от здания пришлось на них, а гибкие колонны просто подалась, воспринимая только малую часть сейсмической нагрузки. Здание разрушилось как картонный домик.

Точно такая же ситуация возникла при землетрясении в Сан-Фернандо в 1971 г. [23]. Как видно из рисунка, там разрушилась стенка прямоугольного железобетонного резервуара, и в коротких ближайших к стенке колоннах образовались шарниры. Большая часть сейсмической нагрузки от перекрытия пошла на элементы с большей жесткостью.

Многие, наверное, еще помнят сообщения о Кайракумском землетрясении 1985 г., когда сильно пострадал ковровый комбинат, были жертвы. Разрушилось шедовое перекрытие на комбинате. Как оно было устроено, показано на рисунке. Слева несущая плиты перекрытия балка опиралась на консоль короткой колонны, справа опирание шло через колонну небольшого сечения. Слева получилась жесткая связь, справа — гибкая. При первых же сейсмических толчках, перпендикулярных балкам перекрытия, в опорных колоннах внизу и сверху образовались шарниры. В дальнейшем, когда колонны перестали быть вертикальными, действовал уже механизм, сбросивший балки перекрытия. Все перекрытие цеха рухнуло. Таких примеров можно привести множество, но давайте посмотрим, как обстояло дело у древних строителей.

Любопытно отметить, что совершенствование строительных приемов, и создание новых архитектурных форм в древности не всегда сопровождалось одновременным улучшением сейсмостойкости конструкций. В Средней Азии было два поворота в истории архитектуры, после которых сооружения стали менее сейсмостойкими [13]. Первый заключался в том, что на рубеже XI—XII вв. от центрических планировок (вспомним мавзолеев Саманидов) перешли с целью придания большей пышности к портално-купольным мавзолеем, от равных между собой фасадов к выделению главного фасада и оформлению его в виде тяжелого портала. Центричность сооружений при этом нарушалась. Давление портала на грунт было выше, чем остального мавзолея, и поэтому, как правило, фундамент первого был значительно больше заглублен, хотя и портал, и мавзолей составляли единую массу. Закон равномерного распределения масс и жесткостей был нарушен. При землетрясении более жесткий и тяжелый заглубленный портал, естественно, старался оторваться от остальной части сооружения, создавались concentra-

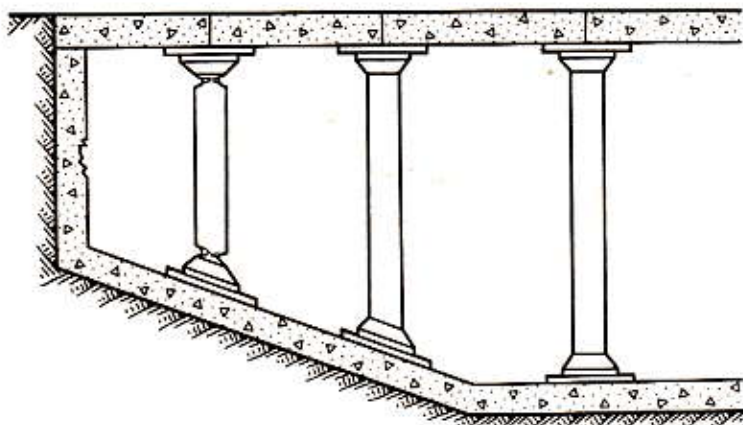


Рис. 22. Разрушение наиболее жестких колонн

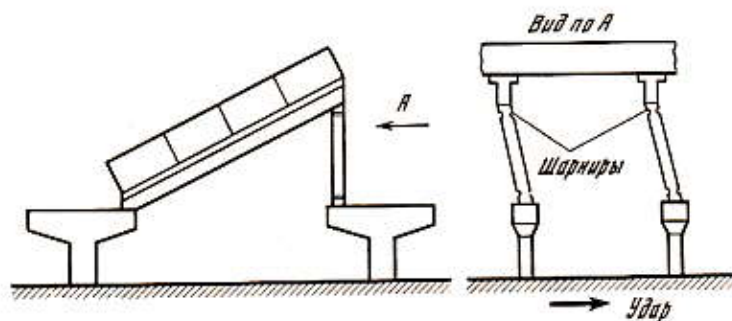


Рис. 23. Схема разрушения перекрытия цеха коврового комбината

ции напряжений. и это могло привести к разрушению всей конструкции. Здесь хорошо было бы предусмотреть антисейсмический шов, отрезав портал от здания, но до этого древние не додумались.

Заранее предусмотренные деформационные швы в древних сооружениях встречаются, но редко. У древних греков башни устраивались отрезанными от оборонительных стен. В Средней Азии недавно восстановлен мавзолей Ахмеда Ясави, построенный в конце XIV в. Тимуром. Этот архитектурный комплекс разделен вместе с фундаментом четырьмя двухэтажными коридорами на восемь независимых секций.

В качестве примера нарушения равномерного распределения жесткостей в древних сооружениях на рисунке показан разрез мавзолея Джамал-Уль-Хак-Уаддина или "мечеть" в Анау середины XV в. [24]. Мавзолей построен из обожженного кирпича хорошего качества на ганчевом растворе. Неоднородная жесткость (с фасада приделан

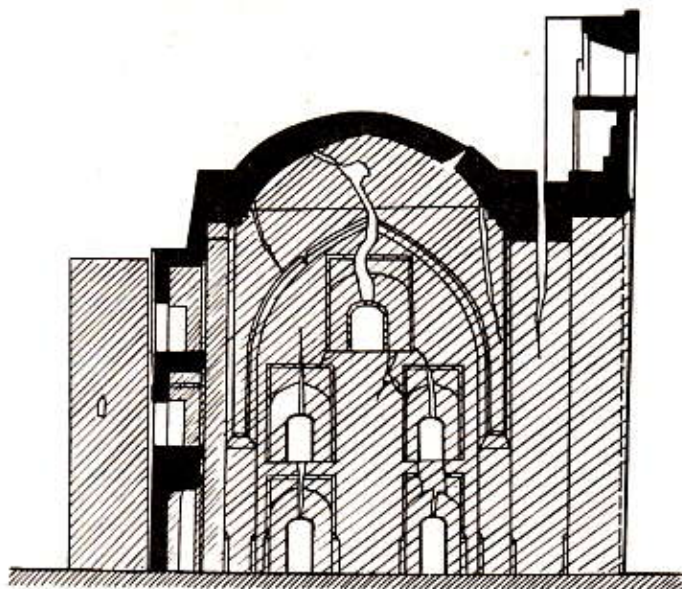


Рис. 24. Разрушение мавзолея Джемал-Уль-Хак-Уаддина

тяжелый портал, а сзади пристроены две массивные башни), передача нагрузки от купола на стены через кирпичные конструкции, армированные деревянными брусками из арчи, привела к неравномерным осадкам купола. Результат виден на рисунке. Само здание начало создавать антисейсмический шов, между порталом и остальной частью возникла огромная трещина. Трещина в куполе появилась из-за неравномерных осадок. В центральной части трещины пошли от купола до основания через все световые отверстия, разделив здание на две почти равные части. Треснувший купол не выдержал Ашхабадского землетрясения 1948 г., рухнул, и сейчас от мечети остались только части портала и задних башен, а кирпич из нее можно найти в хозяйственных постройках соседних селений или разбросанным вокруг.

Второй поворот в истории архитектуры Средней Азии произошел в XIV—XV вв. во время возникновения мировой империи Тимура, когда в столице империи Самарканде были сосредоточены ценою войн и ограбления других народов огромные богатства, собраны выдающиеся мастера и ремесленники, созданы огромные трудовые армии. Это явилось толчком к сооружению зданий невиданных размеров, началась буквально гигантомания. Росла высота мечетей и минаретов, купола перекрывали все большие пролеты. Но рост абсолютных размеров сооружения не проходит безнаказанно. Увеличение в 2 раза пролета арочного свода приводит к росту в 4 раза изгибающего момента. Значительно повышаются величины сейсмических нагрузок и соответственно вызываемые ими напряже-

ния. Напряжения от изгибающих моментов, вызванных сейсмическими нагрузками, с ростом высоты возрастают в квадрате.

Основной материал среднеазиатских памятников — кирпичная кладка, плохо работающая на сдвиг и растяжение, часто не может воспринять таких усилий. Отсюда многочисленные обрушения, трещины, оплывшие кирпичные массивы [10]. В минаретах той поры основная функция башни для созыва мусульман на молитву отходит на второй план, и они превращаются в деталь архитектурного комплекса. Чрезвычайная стройность минаретов, иногда имеющих не одно, а два звена, равно как огромная высота приподнятых на барабанах вторых куполов, вступает в конфликт с сейсмическими условиями Средней Азии. В памятниках XV в. землетрясения сбросили верхушки минаретов или целые их стволы, обрушили купола, опрокинули оказавшиеся нерациональными тяжелые мраморные колонны [13]. Поведение этих гигантских сооружений наглядно демонстрирует действие второго и третьего основных законов сейсмостойкости: здание не должно быть слишком длинным и слишком высоким.

Надо отдать должное древним зодчим, они догадывались о существовании этих закономерностей и поэтому для новых архитектурных форм стремились применить новые конструктивные решения. Прежде всего появились мощные заглубленные на 4—5 м фундаменты из рваного камня на особом, водостойчивом "кыровом" растворе, призванные обеспечить устойчивость на опрокидывание массивных порталов и стройных минаретов. Везде стали применяться двойные купола. Для поддержки внешнего декоративного купола, вознесенного на большую высоту, была создана система кирпичных ребер, распределяющая нагрузку между внутренним куполом и стенами. Увеличение высоты здания способствовало перемещению вверх центра тяжести сооружения, что, конечно, увеличивало опрокидывающий момент при землетрясении. Разрабатывалась более совершенная, чем традиционная, система пересекающихся арок, поддерживающих купол. Это позволило уменьшить диаметр купола при перекрытии больших пространств. Возникли новые типы тонкостенных ганчевых сводов и куполов-оболочек. Все это снизило вес сооружений и понизило положение центра тяжести [13].

Почему же все-таки нельзя строить протяженные сооружения в сейсмически опасных районах? Сразу оговоримся, что здесь имеются в виду жесткие здания из кирпича, камня, бетона. Если такое жесткое здание будет слишком длинным, т.е. его длина будет соизмерима с длиной поверхностной сейсмической волны, то, грубо говоря, попав на гребни волн, оно будет сильно изгибаться и в нем появятся дополнительные напряжения, связанные с волновым эффектом. Что же делать, чтобы избежать этого нежелательного эффекта? Если не прибегать к ухищрениям, которые дают системы сейсмозащиты, есть два пути. Первый путь — разрезать длинное сооружение антисейсмическими швами на отдельные секции ограниченной длины. У нас в стране принято ограничение 60—80 м. Второй путь — создавать гибкие сооружения, подобные древнему

китайскому мосту на цепях, которые должны изгибаться почти без сопротивления в соответствии с движением поверхности земли во время землетрясения. Напряжения в них от этого соответственно не возникают.

Тут появляются некоторые вопросы. Будет ли проявляться волновой эффект в изолированных секциях, отделенных от основного здания антисейсмическими швами? Будет, да еще как. Движение грунтового основания будет проходить так, как было показано на змеиной модели (см. рис. 1). Но ясно, что чем здание длиннее и жестче, тем больше эффект. Неоднородное сейсмическое поле стремится прежде всего разодрать, согнуть, перекрутить фундамент сооружения. От фундамента усилия передаются на всю постройку. При этом не надо забывать, что сейсмическая сила зависит от параметров самого сооружения, его веса, размеров, гибкости. Если рядом с высотным сооружением воткнуть в землю палку, то от одного и того же землетрясения усилия на них будут разными. Теперь перейдем к примерам из истории о создании протяженных сооружений.

Антисейсмические швы древние делали явно редко. Оборонительные стены, типа Великой Китайской, тянулись на многие километры без всякой разрезки. Достаточно проанализировать конструкцию укреплений Дербента, построенных в VI в., в эпоху правления персидских царей Сасанидов [25]. В этих укреплениях, состоящих из оборонительных стен и крепости, нигде и намека нет на разрезку протяженных конструкций. Только греки устраивали крепостные башни отрезанными от стен. Здания сложной конфигурации также не разрезались на простейшие части.

Отправимся в середину I тыс. до н.э. в афинский Акрополь. Только храм Парфенон удовлетворял всем законам симметрии в архитектурном и конструктивном смысле, а другой храм Эрехтейон был построен вопреки всем этим законам. В плане он состоял из нескольких прямоугольных зданий неодинаковой жесткости, фундаменты этих зданий были заложены на различных уровнях [26]. Несимметричные да еще заложённые на различных уровнях фундаменты, отрицательно влияют на сейсмостойкость зданий, так как неоднородность сейсмического поля под сооружением возрастет. Фундаменты, расположенные ближе к поверхности, будут иметь большие перемещения, чем заглубленные, т.е. неоднородные фундаменты сильнее разрываются под действием сейсмических волн, чем плоские.

Остатки Эрехтейона стояли на краю обрыва, где эффект землетрясения может быть больше из-за наложения поверхностных сейсмических волн в месте примыкания двух поверхностей.

В Армении находится языческий храм Гарни, построенный в I в. в лучших традициях эллинистических архитектурных форм и недавно восстановленный [27]. Храм сложен из хорошо пригнанных базальтовых блоков длиной до 4 м и весом до 5 т, скрепленных металлическими скобками и стержнями, залитыми свинцом. Он поставлен на небольшую искусственную каменную платформу, имеет одну плоскость симметрии и скромные размеры. Все, казалось бы,

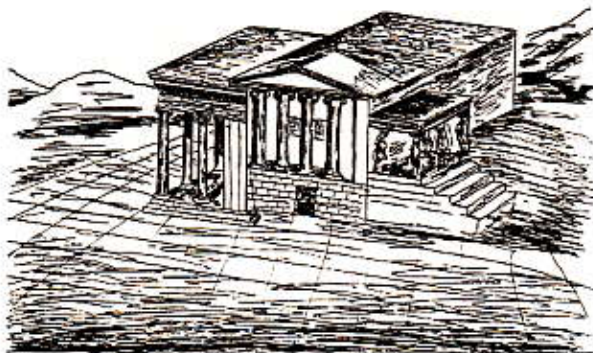


Рис. 25. Несимметрия греческого Эрехтейона

хорошо, но существует один недостаток — храм расположен на краю обрыва. Есть различные гипотезы о причинах разрушения Гарни землетрясением. Во всяком случае, большой вред этому храму нанесло изобретение огнестрельного оружия, так как окрестные жители начали выплавлять и выковыривать свинец из швов и соединений между блоками стен и частями колонн. Основной же причиной надо считать, по-видимому, сильные колебания почвы во время землетрясения края мыса, на котором стоит храм. Рухнул он только в XVII в. от достаточно сильного землетрясения, какого в этом месте со времени постройки храма не было.

В настоящее время храм Гарни восстановлен.

Закон равномерного распределения масс и жесткостей в сейсмостойких конструкциях — понятие всеобъемлющее. Он относится не только к конструкции здания и его фундаменту, но и к грунтам, на которых оно стоит, рельефу, геологии местности, где оно строится. Грунты различной жесткости или наклонное залегание слоев в основании сооружений нарушают закон однородности (вспомним разрушение здания в г. Яссы при Карпатском землетрясении 1977 г.).

Вернемся к храму Эрехтейон. Надеюсь, что причудливая форма храма не навела читателя на мысль о безыскусности греческих строителей в компоновке зданий и устройстве фундаментов. Древние греки умели принимать очень квалифицированные решения: с подготовкой искусственного основания, как было с Парфеноном, или заменой слабых грунтов под храмом Зевса в Олимпии.

В Древнем Египте строго придерживались определенных строительных правил. Правда, есть случаи, которые позволяют предполагать, что египтяне относились к устройству фундаментов несколько легкомысленно, иногда его вообще не делали. Но это не совсем так.

Интересно, что показали исследования фундамента храма Рамзеса IV в. Дер эль-Бахри. Его возводили на скале с откосом. Во избежание скольжения камней фундамента согласно египетским

правилам скалу необходимо было разравнять и сделать горизонтальной. Для этого строители выбили в скале выемку 240×40 м. Затем на дно котлована насыпали сухого песка, а уж потом начали укладку блоков фундамента [28].

Перенесемся мысленно из Египта на несколько столетий вперед в Среднюю Азию, и там встретим точно такую же методику подготовки грунтового основания под сооружение с целью придания этому основанию однородных свойств. По степным и пустынным районам Хорезма разбросано немало сооружений на песчаной подушке III—VI вв. Здесь скалистые неоднородные грунты выравнивались с помощью устройства котлованов с последующим засыпанием их песком. Мавзолеем на горе Техт-и-Сулейман около города Ош стоит на крутом склоне точно как в Египте, где сооружение поставлено в выбитый в горе котлован, заполненный рыхлой землей и песком [9]. Роль таких песчаных подушек двоякая, хотя и направленная к единой цели — созданию сейсмостойких сооружений. С одной стороны, эти песчаные подушки являются мягким экраном для отражения сейсмических волн, с другой — они способствуют равномерному распределению нагрузки от сооружения на грунт.

Поговорим об устройстве гибких сейсмостойких протяженных сооружений. В США ведутся разработки конструкций большепролетных сейсмостойких пневматических покрытий для стадионов, театров, концертных залов. При этом может быть разработан в пневматическом исполнении весь комплекс сооружения, например бассейна. В этот комплекс войдут перекрытия, надувные трибуны, сам бассейн. Размеры сооружения могут меняться в зависимости от требуемой вместимости. Ясно, что ограничений на эти размеры с точки зрения сейсмике никаких нет.

Существует также разработка фантастической гелиенаполняемой конструкции, похожей на корабль инопланетян, с внутренней платформой, на которой можно разместить оборудование, временные жилые здания, научные станции, диаметром до 500 м. Как видно из рисунка такое сооружение состоит из пневмокаркасного перекрытия, рабочей платформы и пневматического опорного кольца. Его вместимость — 400 тыс. человек. С помощью вертолета конструкцию можно доставить в любое место и установить в воздухе, на земле, на воде. Землетрясения, разумеется, ей не страшны [29], она будет от них изолирована.

Другой интересный пример гибкого протяженного здания — выставочный зал в городе Китаюсю в Японии [30]. Покрытие зала подвешено на 16 стальных мачтах, размещенных снаружи здания вдоль продольных стен, по восемь мачт с каждой стороны. Весь зал размером 173×43 м состоит из восьми секций размерами $21,6 \times 42,7$ м. Каждая секция подвешена на двух мачтах. Опираие мачт выполнено шарнирно через упругие прокладки. На расстоянии 25 м от здания имеются свайные блоки, к которым и прианкерены мачты. К местам пересечения балок перекрытия подходят венты от мачт. Настил покрытия собран из легких железобетонных элементов. Комментировать сейсмостойкость таких легких подвесных конструкций считаю излиш-

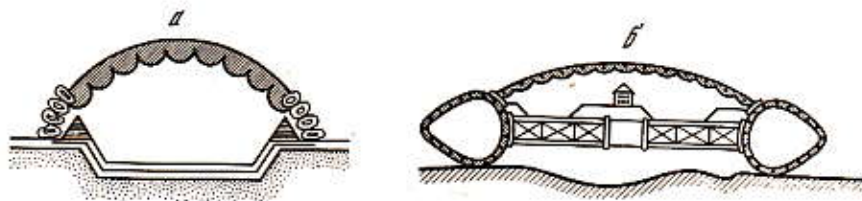


Рис. 26. Пневматические сейсмостойкие конструкции

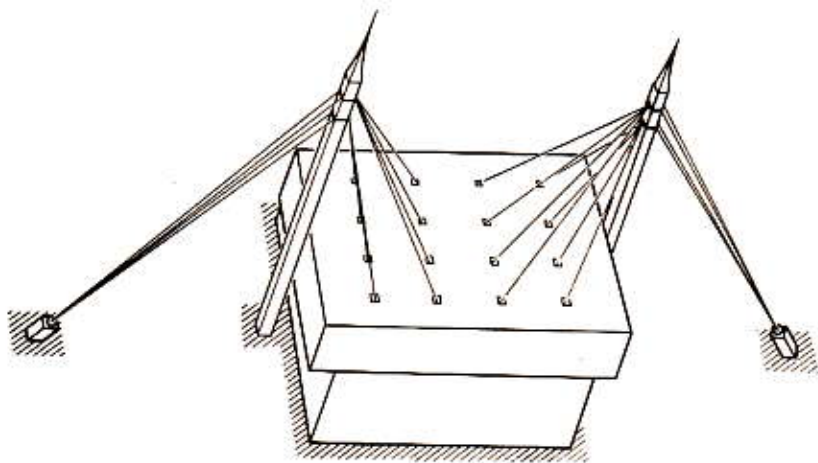


Рис. 27. Конструкция здания с подвесным перекрытием

ним, хотя я бы заанкерил мачты не только в поперечном направлении, но и в продольном.

Осталось рассмотреть третий закон, утверждающий, что сейсмостойкое сооружение не должно быть слишком высоким. Возражать против такого закона трудно. Легко представить, как сильно будет раскачиваться во время землетрясения высокое сооружение, какие чудовищные всеразрушающие напряжения будут возникать в его основании, какие космические ускорения и соответственно перегрузки будут стремиться оторвать его верхнюю часть. Однако современный и древний опыт учит, что не все высокие сооружения разрушаются от землетрясений. Есть такие, что не только выдержали, но и вели себя лучше, чем низкие сооружения. В чем же дело? Дело в правильном выборе конструкции, ее прочности и гибкости, определении соотношений ее масс и жесткостей в соответствии с теми параметрами землетрясений, которые ожидаются в данном месте. Не будем углубляться в дебри теории, рассмотрим два примера.

Украшением современной Бухары служит минарет Калян, воздвигнутый в 1227 г. Современная его высота около 46 м, диаметр у основания 9 м. Его мощный конический столб завершается ци-

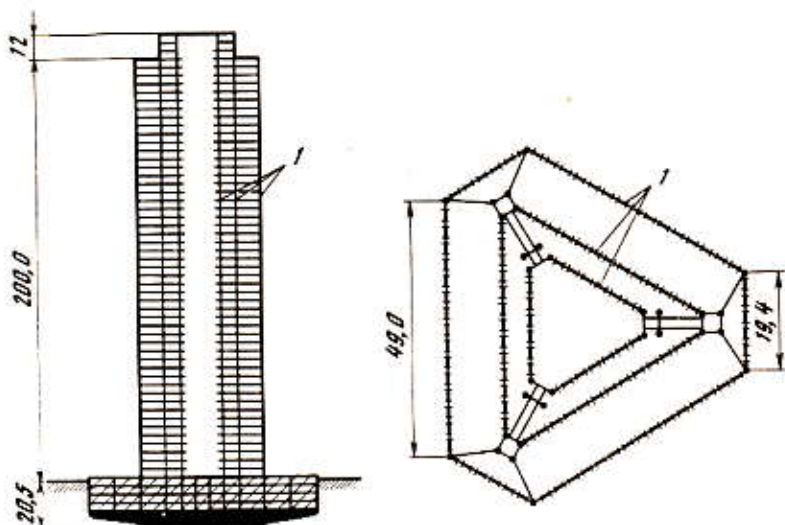


Рис. 28 Современное высотное здание в Японии

линдрическим фонарем. Любопытно, что два предшествующих минарета у соборной мечети Бухары рухнули, и только ныне существующий возведенный на чрезвычайно глубоком фундаменте в 10 м, оказался сейсмостойким. При этом он выложен из обожженного кирпича на ганчевом растворе, что придает ему эластичность.

За время существования минарета Калян в Средней Азии было построено много высотных сооружений, но землетрясения пощадил единицы, которые сумели выдержать все выпавшие на их долю испытания. В их числе и минарет Калян [13]. На его примере виден весь процесс естественного отбора. Сначала методом проб подбирался фундамент. С третьей попытки удалось определить нужную глубину заложения фундамента, но перебрали с гибкостью самого сооружения. Опять сработал закон выживания всего сущего: чтобы снизить гибкость, лишняя верхняя секция отвалилась. А мы получили знак из глубины веков: "Сооружение с такой гибкостью и таким глубоким фундаментом будет сейсмостойким в данной районе". Кстати, минарет Калян имеет собственный период колебания около 1 с, что соответствует собственному периоду колебания 9—12-этажных каркасных жилых зданий.

В настоящее время в Японии строится много высотных сейсмостойких зданий по той же схеме, что и минарет Калян: умеренно гибкая легкая верхняя часть с соблюдением всех принципов симметрии и развитый сильно заглубленный фундамент. Любопытно, что современные и древние строители пришли к одному и тому же принципу строительства высотных сооружений в сейсмически опасных районах. На рисунке показано 52-этажное здание в Токио высотой 212 м с четырьмя подземными этажами [31]. Несущая конструкция здания представляет собой соединение в единое целое трех сталь-

ных пространственных рам. Фундамент выполнен из жесткой железобетонной плиты, далее идут два подземных этажа из обычного железобетона. Заглубление фундамента составляет более 20 м. Получился настоящий сухопутный корабль, приспособленный для плавания в сейсмических волнах. Кстати, как обычный морской корабль с большой осадкой меньше раскачивается на волне, так и сооружение с глубоким фундаментом или свайным основанием меньше раскачивается на сейсмической волне, чем сооружение с мелким заложением фундамента, опирающееся на поверхностные слои земли, где сильнее себя проявляют поверхностные волны.

Рассмотрим некоторые частные вопросы, связанные со строительством в сейсмических районах.

ЭФФЕКТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ФУНДАМЕНТ

Действие сейсмической волны на здание начинается с фундамента и в зависимости от того, как повел себя фундамент, определяется поведение всего здания. Когда мы разбирали системы сейсмозащиты, то говорили о том, что элементы сейсмозащиты вставляются между фундаментом и зданием, чтобы отрезать одно от другого и этим снизить эффект землетрясения. Но даже без всяких элементов сейсмозащиты конструкция фундамента здания влияет на его сейсмостойкость. Разговор об этом начнем с примера.

Вспомним о поведении каркасных высоких зданий с кирпичным заполнением при землетрясении в Скопле в 1963 г. Лифтовые шахты и заполнитель каркаса, как более жесткие элементы, разрушились, в работу включился каркас, и здание стало гибким и вышло из почти резонансного режима. Не был упомянут еще один элемент, повысивший сейсмостойкость башен. Здания были поставлены на сплошные железобетонные плиты, выступающие за периметр, и заложены на глубине 4 м.

Если бы башни опирались на отдельно стоящие фундаменты под колоннами, то им скорее всего не помогла бы никакая перестройка жесткости, они бы рухнули, как рухнули все окружавшие их сооружения, так как грунты основания были рыхлые (речные наносы) [32]. Роль фундаментной жесткой сплошной плиты в том, что она выравнивает и осредняет хаотическое поле, существующее под сооружением во время землетрясения. Здание уже не разрывается несинхронными движениями отдельных фундаментов колонн, а движется с фундаментом как единое целое. Как мероприятие по повышению сейсмостойкости сооружений, заглубленные фундаментные плиты применяются сейчас довольно широко.

Основная идея этих плит — выровнять, осреднить, срезать пики сейсмического поля под сооружением — нашла наиболее полное и совершенное конструктивное воплощение в древних постройках. Здесь имеются ввиду естественные и искусственные платформы фантастически гигантских размеров, на которых возводились отдельные сооружения, архитектурные комплексы и целые города. От Японии и

Китая до Индии, Вавилона, Персии и далее до древних государств Америки (майя и инков) везде применялись такие платформы. С одной стороны, они должны были произвести эмоциональный эффект на приближающихся к этим постройкам, а с другой стороны — имели чисто оборонительное значение. Но прочность платформ была достаточной для защиты сооружения от сейсмических волн. Рассмотрим примеры.

В Ассирии за каких-нибудь пять лет, начиная с 712 г. до н.э., был построен город Дур-Шаррукин, резиденция царя Саргона II. Сам город был снабжен различными оборонительными сооружениями, а в северной его части на прямоугольной платформе была устроена цитадель, где находились храмы, дворец царя и дома приближенных. Платформа имела площадь 10 га и высоту надземной части 14 м, была сложена из сырцового кирпича на глиняном растворе, армированном тростником и облицована каменными глыбами весом до 25 т. На платформе возвышалась крепостная стена высотой 14 м [27].

Назначение таких платформ с точки зрения сейсмоки и в свете современных теорий — отражать сейсмические волны, а те, которые не отразились, будут гаситься гигантской массой и проутюживаться, выглаживаться большеразмерной жесткостью.

А вот цитадель-замок персидского царя Кира был построен в 550 г. до н.э. на платформе размером 78 x 79 м, сложенной из громадных, хорошо обработанных блоков и расположенной у вершины холма [27]. Подобных примеров существует великое множество.

Перенесемся в Америку, на полуостров Юкатан в самый большой город майя Тикаль, в VI в. до н.э. Раскопки показали, что центральная часть этого города состояла из девяти больших групп зданий на искусственно выровненных возвышенностях, по-нашему платформам, между которыми проходили глубокие впадины [27]. Это поразительно, но совсем недавно мне пришлось читать заявку на изобретение, где автор совершенно серьезно предлагает в качестве меры защиты города от землетрясений прорыть вокруг зданий глубокие рвы, стенки которых будут отражать поверхностные сейсмические волны и этим снижать их действие на здания. Идея верна, другое дело, как жить в такой искусственной Венеции; кроме того, автор просто опоздал со своей идеей на 2,5 тысячелетия. Идеальный город по Платону разделялся концентрически расположенными рвами на отдельные части [16], хотя это деление скорее всего обуславливалось сословными признаками. С какой целью копались рвы у майя, мы не знаем, но на снижение эффекта землетрясения они сказывались. В начале XX в. в городе Верном, нынешней Алма-Ате, эти рвы копались именно с сейсмической точки зрения и об этом речь впереди. А теперь давайте закончим с фундаментными плитами и платформами.

Пусть читатель не думает, что плиты и платформы есть абсолютная истина и что их необходимо делать всегда и всюду под сейсмостойкими зданиями. Это не так. Выше приводился пример Джума-мечети в Хиве на шарнирных колоннах с отдельно стоящи-

ми каменными фундаментами и гибким деревянным перекрытием. Ясно, что тут никакой общей фундаментной плиты не надо. Есть и другие примеры, но все они относятся к гибким зданиям и эластичному соединению между зданиями и грунтом.

Логичнее, наверное, было бы после фундамента перейти к стенам и крыше и на этом закончить рассказ, но пойдем немного другим путем, поговорим о материалах, из которых они делаются. Начнем с дерева.

ДЕРЕВО И СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ

С точки зрения специалистов в области сейсмостойкого строительства два эти понятия, дерево и сейсмостойкость, синонимы. Надо уж очень постараться, чтобы сооружение из дерева получилось несейсмостойким. Дерево обладает всеми нужными качествами: легкостью, гибкостью, прочностью. Если бы оно еще было долговечным! Итак, начнем с одной из самой любопытнейшей в мире деревянной конструкции, о которой очень редко упоминается в литературе. Любопытна она тем, что придумал ее один человек.

В районе города Верного в 1887 г. произошло сильнейшее землетрясение, почти полностью разрушившее город, уцелели только деревянные здания, в которых солидно пострадали каменные трубы и печи. В 1889 г. с учетом опыта Верненского землетрясения были разработаны и изданы "Меры, указанные технико-строительным комитетом, которые необходимо применять в городских поселениях Семиречинской области". Как правило, после этого жилые дома строились деревянными рублеными с укреплением углов и соединением венцов [3]. Особенно отличился при восстановлении города Верного военный инженер Зенков Андрей Павлович [33], предложивший ряд принципов сейсмостойкого строительства, которыми следовало руководствоваться при восстановлении города. Назову некоторые из них, а вы сопоставьте их с тем, что было сказано выше.

Сейсмостойкое здание должно:

1. Строиться из дерева или его заменителей.
2. Иметь очень глубокий фундамент. Опустите глубоко в землю фундамент — и вы не будете бояться за целостность вашего жилища.
3. Иметь обширные зазоры между землей и фундаментом. Подвал должен быть устроен под всем домом, так как он перехватывает сейсмические волны.
4. Необходимо огораживать здания рвами.

Последнее положение А.П. Зенков проверил на своем личном доме. Когда произошло катастрофическое Семиречинское землетрясение 1911 г., А.П. Зенков в своем доме, окопанном рвом, не испытывал тех сильных сотрясений, что ощущали жители окружающих домов. Разрушительная фаза землетрясения 1911 г. продолжалась около 5 мин. К этому времени город Верный был застроен главным образом деревянными сейсмостойкими домами и пострадал мало. Интересно заметить, что в Средней Азии жилые дома иногда и сейчас ока-



Рис. 29. Кафедральный собор в Алма-Ате

пывают канавами и рвами, чтобы уберечься от землетрясений, и это считается народным средством.

К 1911 г. в Верном было построено много зданий по проектам А.П. Зенкова: жилые дома, купеческие лабазы, офицерское собрание, но главным его достижением надо считать кафедральный собор, построенный из тяньшаньских елей, скрепленных металлическими штырями. Этот собор украшает Алма-Ату до сих пор, перенес землетрясение 1911 г. и все последующие и можно надеяться, что перенесет многие будущие землетрясения. Это одно из самых высоких деревянных сооружений в СССР, его высота 53,3 м. Если вы посмотрите на рисунок этого собора, то увидите, что у него много выступающих башенок, симметрия только по одной плоскости, но все эти недостатки компенсируются легким, прочным и упругим материалом, из которого он сделан.

Предание, что собор был сделан без единого гвоздя, не соответствует действительности, для крепления применялись металлические скобы и гвозди. Окончательно развеяли это предание реставрационные работы, проводившиеся несколько лет назад, когда не жалели гигантских гвоздей, изготовленных по спецзаказу.

Много толков вызвала большая трещина, куда свободно мог залезть человек, образовавшаяся около собора при землетрясении 1911 г. Трещина шла прямо на собор, потом его обогнула и далее пошла своим путем. Были толкования о божественной силе и святости места; на мой взгляд, дело все же в прочности фундамента собора.

В заключение хочется привести слова А.П. Зенкова, замечательного человека и прекрасного инженера, напечатанные в "Семирчинских областных новостях": "Я верю, что наш город украсится солидными, в несколько этажей каменными, бетонными и другими долго-

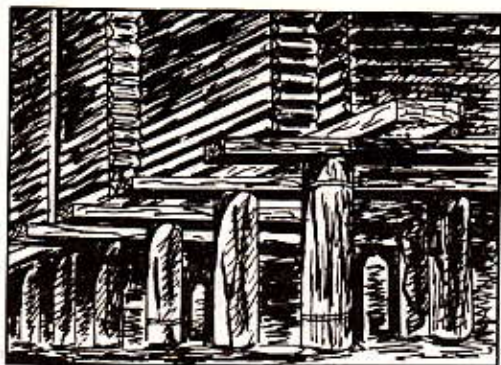


Рис. 30. Сокровищница Сёсоин

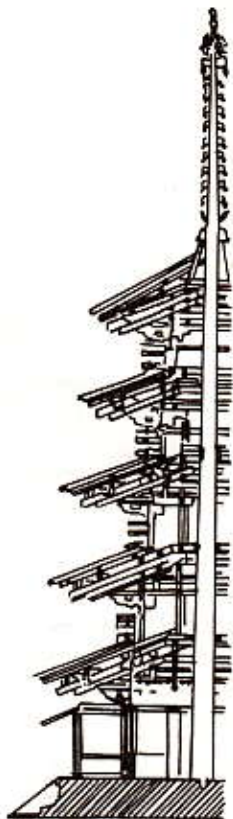


Рис. 31. Японская пагода

вечными строениями... При специальном устройстве фундаментов вполне допустима конструкция грандиозных по высоте 30—40-этажных зданий..." [33].

Теперь перенесемся в Японию, где до XVI—XVII вв. основным строительным материалом было дерево. Поговорить о древних деревянных постройках Японии интересно еще и потому, что там существуют удачные конструктивные воплощения в дереве.

Четкую и ясную конструктивную схему имеет сокровищница Сёсоин, находящаяся в древней столице Японии Нара и построенная императором Сёму в 752 г. Прямоугольное в плане здание упирается на 40 деревянных колонн высотой 2,7 м, укрепленных железными обручами. На оголовки колонн уложены балки, образующие перекрестную систему, как это видно на рисунке. Стены сокровищницы поддерживают двухскатную кровлю и представляют собой сруб из трехгранных в сечении брусьев. Сёсоин разделен на три части внутренними перегородками, устроенными из бревен и связывающими продольные стены между собой [14]. Работа такой конструкции при землетрясении идеально проста. Опорные колонны, заделанные в грунт двигаются независимо. Опорная перекрестная система

балок и само здание настолько гибки и податливы, что, не напрягаясь и не разрушаясь, могут двигаться и дышать так, как двигаются и дышат верхушки сравнительно гибких колонн.

Там же и в то же время было воздвигнуто самое большое в мире деревянное здание — зал Великого Будды, его размеры в плане 87 х 50 м, высота 49 м. Конструктивная схема немного усложнена наличием второго яруса, но принцип работы тот же, все элементы гибкие, не передающие усилия.

В 607 г. было закончено строительство буддийского ансамбля Хорюдзи—храма Поучений недалеко от города Нара, являвшегося одновременно и храмом, и школой проповедников буддизма в Японии. В этом ансамбле нас интересует одно из древнейших деревянных сооружений Японии — пагода. Высота ее 32 м, размер в плане первого яруса 6,4 х 6,4 м. Интересно то, что центральный столб, проходящий на всю высоту пагоды, выполнен из целого ствола исполинского дерева хиноки диаметром в основании 0,91 м, укреплен на каменном фундаменте одним шипом. Верхний конец выступает из остова пагоды и служит шпилем. У пагоды всего пять ярусов. Колонны каждого яруса опираются на венцы балок нижнего яруса, которые поддерживают тяжелые крыши, покрытые серой черепицей. Центральный столб связан с балками второго и третьего ярусов [14]. История существования пагод показывает, что они обладают исключительной сейсмостойкостью и устойчивостью против воздействия тайфунов. Это объясняется рациональным сочетанием элементов конструкций: легкий, гибкий центральный ствол и массивный по сравнению со стволом башенный остов. Они имеют значительно отличающиеся между собой собственные периоды колебаний и поэтому во время землетрясения или тайфуна, в зависимости от их преобладающего периода, резонировать начинает какой-то один элемент, легкий или тяжелый, но в любом случае другой не дает ему раскачаться, служит гасителем колебаний.

Эта же идея используется в современных постройках. Существуют здания с монолитным жестким стволом и гибкой каркасной пристройкой. В них по сравнению с пагодами, наоборот, центральная часть жесткая, воспринимающая всю горизонтальную нагрузку, а пристройка гибкая.

В наше время не возводятся гигантских деревянных сооружений. Строятся главным образом небольшие жилые здания, которые, как правило, являются сейсмостойкими. Но бывают случаи, что они разрушаются. Познакомимся с Аляскинским землетрясением 1964 г., когда сильно пострадал город Анкоридж [34]. При этом катастрофическом землетрясении имело место множество неприятностей: большая продолжительность землетрясения, оползни, движение глыб потрескавшихся мерзлых грунтов, резонанс 14-этажных зданий. Щитовые деревянные дома с легкой кровлей вели себя хорошо. Были случаи, когда длинные деревянные дома попадали в зону оползня, изгибались и перекручивались, но не разваливались. Один легкий деревянный домик буквально дрейфовал по движущимся глыбам мерзлых грунтов. Но случалось, что деревянные здания с тяжелой, перегруженной кровлей из глиняной черепицы обрушивались.

Вспомним Газлийские землетрясения. Два сильных землетрясения в 1976 г., повторный толчок в 1978 г. и наконец сильное землетрясение 1984 г. По этим землетрясениям собран богатейший материал, издано несколько книг. По поводу поведения деревянных домов при землетрясениях был сделан следующий вывод [18]. Деревянные и в особенности щитовые дома способны выдержать самые сильные землетрясения. Из 81 обследованного деревянного дома после землетрясений 1976 г. не было случаев обрушения хотя бы одной стены. По сейсмостойкости эти дома заняли первое место среди всех видов зданий в Газли. Можно добавить, что при землетрясении 1984 г. в поселке Цветущий, который находился в эпицентре землетрясения, рухнуло все, кроме щитового дома. Эту главу можно закончить словами: "Слава сейсмостойкому дереву, если бы оно еще не горело и не гнило" и перейти к другому древнему материалу — камню.

ПРОСТО КАМЕНЬ И КИРПИЧ

Какой строительный материал древнее, дерево или камень, сказать трудно. Скорее всего, они оба одинаково древние. Пример тому Кносский дворец 1600 г. до н.э. на острове Крит [27,35], при строительстве которого применялись комплексные конструкции из камня и дерева. Каменная кладка и кладка из кирпича дополнительно укреплялись деревянными брусьями, деревянные колонны, расширяющиеся вверх, поддерживали балки из камня. В условиях частых землетрясений такой прием, конечно, обеспечивал сейсмостойкость кладки, так как дерево придавало ей эластичность. Армирование каменной и кирпичной кладок деревом встречается во многих древних постройках, вплоть до таких ответственных элементов зданий как купола. Для чего же это делалось?

Камень и кирпич не являются таким совершенным материалом как дерево, но они долговечны, не горят и вообще широко распространены. С точки зрения сейсмостойкости у камня существуют такие недостатки: он тяжел, прочен, но хрупок, не обладает упругими свойствами, и, наконец, прочность и гибкость построек из него зависят от того, как соединены отдельные камни в общий монолит. Но из этого материала надо строить. Получается, что вся работа с камнем как строительным материалом направлена на то, чтобы придать зданию из него нужные свойства: прочность, эластичность, монолитность (однородность) и по возможности его облегчить. Выходит, что все это знали строители Кносского дворца более 3,5 тыс. лет тому назад, когда создавали дворец в сейсмически опасном районе, используя каменную кладку, армированную деревянными толстыми брусьями. Она и облегчена, и эластична, и перевязана, чтобы не рассыпаться.

Все когда-либо существовавшие виды кладки можно разделить на две большие группы. К первой относится кладка без применения связующих растворов, "насухо". Связь между отдельны-

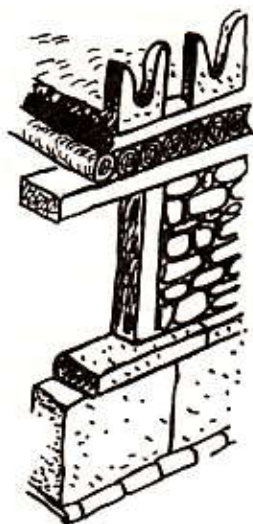


Рис. 32. Камень армированный деревом, Кносс 1600 г. до н.э.

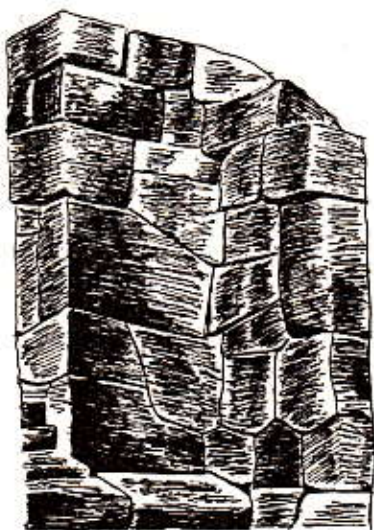


Рис. 33. Каменная кладка инков

ми камнями осуществляется посредством силы трения или как-то иначе. Во второй группе применяются вяжущие растворы для связи камней в единый монолит. Эту группу кладок можно в свою очередь разделить на две группы: 1) кладка ведется из однородных элементов; 2) из обработанного камня делается только облицовка, связанная с внутренней забутовкой, состоящей из необработанного камня и раствора. Все эти виды кладки могут быть армированы деревом или металлом.

Почти вся каменная кладка в Европе на протяжении тысячелетий до римской эпохи осуществлялась без строительного раствора. В Древнем Египте, где применялись огромные каменные блоки, раствор не играл существенной роли, так как камни держались за счет трения под действием огромной тяжести. Чтобы образовать массу кладки, близкую к монолиту, блоки скреплялись скобами. Те скобы, что использовались египтянами, принято называть ласточкиными хвостами. В верхней части двух смежных камней, подлежащих соединению, вырезали по пазу и скобу вставляли туда. Скобы делали из эбенового и черного дерева, гранита, меди или бронзы [28]. Позднее, в VII в. до н.э. в Греции эта техника совершенствуется, вместе с горизонтальными связями — скобами — стали применять вертикальные связи металлическими штырями. Они вставлялись в соответствующие вырезы в камне и потом через специальные отверстия заливались свинцом [26]. Эта техника широко была распространена в Древнем мире. Вспомните храм Гарни I в. [36]. Точно также была возведена морская стена в VI в. в городе-крепости Дербенте [25], позже разрушенная морем.

В Египте в IV в. до н.э. стали появляться и другие более экономич-

ные методы соединения блоков, например, с помощью шипов. В храме Исиды в Дельте были обнаружены большие фигурные облицовочные блоки. С одной стороны они были отшлифованы, а с другой имели шип, вырезанный из этого же куска и входящий в отверстие внутреннего блока. Стены Парфенона также построены из блоков без раствора, соединенных так, что выступы одних блоков входят в пазы других [28]. Колонны в Чичен-Ица у маяя в XIII в. соединялись из отдельных барабанов при помощи шипов [14]. Греки собирали колонны из отдельных тщательно притертых цилиндров с отверстиями в центре для деревянных или металлических штырей. В том и другом случае колонны получались довольно гибкими.

Интересна полигональная кладка насухо, которая применялась инками. Она состоит из тщательно пригнанных камней многогранной формы. Кладка получается однородной с высоким затуханием, нигде нет плоскостей скольжения и ни один камень вы не вынете, так как он заклинен соседними [37].

Связующий раствор из извести и песка, известный с древнейших времен персам и карфагенянам, появляется в Европе только с римлянами. Раствор из глины с примесью золы и битума для кладки кирпича использовали в начале III в. до н.э. в Двуречье, известковый раствор — с середины I в. до н.э. [27]. Рассмотрим пример хорошо выполненной древней кладки по так называемому "казематному методу". В 950 г. до н.э. на юго-западе Аравийского полуострова существовало рабовладельческое Сабейское царство, где высокого уровня развития достигла архитектура. Толстые стены ставились здесь по хорошо известному позднее в Сирии, Палестине и Малой Азии "казематному методу". Две параллельные стены из камня соединяются попеременно уложенными камнями на крепком растворе типа цемента или скрепляются асфальтом. Образующиеся при этом внутри пустоты заполняются землей, песком или камнем [27]. Таким образом получалась довольно сейсмостойкая кладка, прочная и с хорошим затуханием.

К концу III в. до н.э. относится появление знаменитого римского бетона, открывшего огромные возможности в строительном деле, в частности возведение литых куполов и даже целых зданий, колонн, где облицовкой служит фигурный кирпич, а сердечник состоял из литого бетона. Открытие римского бетона началось с применения известковых растворов. Ввиду отсутствия в одной из частей Италии хороших песков вместо них стали применять пуццоланы — вулканические пески, названные по месту их добычи, вблизи города Пуццуоли. Пуццоланы оказались хорошим вяжущим веществом в растворе, так как придавали ему водонепроницаемость, прочность и быстро схватывались. Соединение бетонной техники, арочно-сводчатых конструкций и высокой организации труда дало огромные возможности римскому зодчеству. Только благодаря им появились такие выдающиеся сооружения, как римские акведуки, Колизей и Пантеон [26]. Применение римского бетона позволило придать каменной кладке такие полезные свойства, как прочность и монолитность, но кладка все же оставалась тяжелой и неэластичной,

и с этим упорно боролись римские строители. Интересно, что бетонная техника, позволявшая создавать литые конструкции, не была воспринята в Византии. Здесь и стены, и своды делались из кирпича и камня на известковом растворе.

Историю развития и совершенствования методов каменной кладки хорошо проследить на примере Армении [36]. Уже рассказывалось, что при строительстве храма в Гарни в I в. применялась кладка насухо из больших чисто тесаных блоков, соединенных между собой железными скобами, а части колонн соединялись бронзовыми и железными штырями, залитыми свинцом. Железные штыри, залитые свинцом, использовали и в Звартноце. В центре массивных баз колонн для предотвращения их сдвига были высверлены глубокие гнезда, куда вставлялись стержни, которые потом заливались через специальные отверстия свинцом. Присутствие в каменной кладке элементов из свинца и железа придавало ей монолитность, прочность и упругопластические свойства. Тогда же появилась кладка из двух параллельных рядов камней, пространство между которыми заполнялось известковым бетоном. В первых постройках это пространство было незначительно и нагрузку несли камни, позднее камень стал служить облицовкой, а нагрузка перенеслась на заполняющий толщу стены известковый бетон. Кладка этим методом была широко распространена во всем мире: Риме, Армении, Грузии, Дербенте. Облицовочные камни могли быть одинаковыми по размеру прямоугольными, а могли быть тщательно пригнанными полигональными. История архитектурных памятников Армении показала, что система монолитных стен, ограниченных с двух сторон тонкими облицовочными плитами, с честью выдержала испытания на протяжении многих веков, не раз подвергаясь ударам сейсмической стихии.

Если вернуться в наш XX в., то идеи совершенствования каменной и кирпичной кладки остались почти те же. Мы все продолжаем совершенствовать растворы, чтобы улучшить сцепление между кирпичами. В цементные растворы начали вводить различные химические добавки, прогреваем кирпичные массивы, но все это только повышает прочность кладки, а нам нужна еще ее упругость. Тогда мы применяем фигурный кирпич с отверстиями, который позволяет армировать кладку стальной арматурой, вместо древнего армирования деревом. Фигурный кирпич Древнего Рима уже упоминался. Для того, чтобы кирпичное или каменное здание не развалилось во время землетрясения, мы его стягиваем как обручами, антисейсмическими поясами из железобетона. Вместо этого с той же целью в древности сооружения подпирались контрфорсами. Для того, чтобы зданию придать нужную гибкость, мы применяем железобетонный каркас, а камень или кирпич служит только как наполнитель внутри каркаса. Иногда так же поступают с пострадавшим от землетрясения зданием, на него надевают металлический или железобетонный каркас. Во всяком случае такого замечательного раствора, как ганч, который всей кладке придавал бы эластичность, пока в наш век химии никто не придумал.

Перейдем к следующему важнейшему свойству конструкции, ее весу.

ЛИШНИЙ ВЕС — ОН СЛОВНО БЕС

Добрались до еще одной очень важной характеристики сооружения — его веса. Дело в том, что, согласно второму закону Ньютона, сила инерции, а таковой является сейсмическая сила, равна массе, умноженной на ускорение, т.е. сейсмическая нагрузка, возникающая в здании, пропорциональна его весу. Чем больше вес сооружения, тем больше сейсмическая нагрузка на него. При этом важно, как вес распределен по конструкции. О том, что вес по сооружению должен быть распределен равномерно, мы уже говорили, но здесь необходимо добавить, что центр тяжести сооружения должен быть расположен как можно ниже. Чем выше центр тяжести, тем больше будет опрокидывающий момент во время землетрясения, тем больше будут изгибающие моменты в самом здании и тем больше перегрузятся фундаменты. Короче говоря, в сейсмостойких конструкциях необходимо не только стремиться к тому, чтобы снизить вес сооружения, но и понизить его центр тяжести.

Большой вес и высоко расположенный центр тяжести конструкции за счет тяжелых масс перекрытия — это те роковые факторы, которые погубили величественные греческие храмы. Конструкция храмов, часто даже симметричная, на хорошем фундаменте, состояла из сравнительно гибких колонн, соединенных массивным перекрытием с жесткими стенами. Высоко расположенная большая масса сооружения делала удар от землетрясения совершенно непреодолимым. Большинство греческих храмов рухнуло от землетрясений, хотя множество колонн сохранилось до сих пор. По-моему, вопросы сейсмической устойчивости греческих колонн никто до сих пор серьезно не занимался. А ведь это готовые ответы на вопросы и о сейсмическом режиме данных районов, и о динамических характеристиках сооружений, которые желательно строить здесь с точки зрения сейсмостойкости. Это, конечно, относится ко всем сохранившимся древним сооружениям в сейсмически опасных регионах.

Надо отметить, что почти все древние строители (о современных пока не будем говорить) боролись за снижение веса конструкции и понижение ее центра тяжести. Исключение, по-видимому, составляли египтяне. Поведение невероятно тяжелых египетских сооружений при землетрясениях стало интересовать в связи с задачей строительства морских нефтедобывающих гравитационных платформ в шельфовой зоне. Платформы должны противостоять напору ветра, морским штормам, ударам ледяных полей и сейсмическим воздействиям. Их размеры и масса соизмеримы с размерами и массой египетских пирамид.

Существуют и другие современные массивные сооружения: плотины гидроэлектростанций, блоки атомных станций, сооружения химической промышленности. Для всех них возникает задача взаимодействия с грунтом во время землетрясения. Дело в том, что сооружение своей массой влияет на поле сейсмического воздействия. Поверхность грунта под зданием движется во время землетрясения

не так, как она двигалась бы, если бы была свободной от него. Особенно это относится к большеразмерным и тяжелым сооружениям, какими являются египетские пирамиды и шельфовые платформы, которые сильно влияют на поле сейсмического воздействия. Получается, что с одной стороны увеличение веса сооружения увеличивает сейсмическую силу на него, а с другой — увеличение веса сооружения снижает само сейсмическое воздействие, передающееся на фундамент здания. По-видимому, для каждого сейсмически опасного района можно найти оптимальный вес конструкции. Но вернемся к египтянам.

Поговорим о колоннах египетских храмов, которые не только украшали сами храмы, но и отражали сущность строительных приемов египтян [28]. Первые каменные колонны возводились в припирамидном комплексе Джосера. Колонны высотой 5—6 м имели до 30 слоев кладки из тщательно пригнанных мелких блоков без каково-либо раствора и удерживались только весом вышележащих конструкций. Позднее перешли к монолитным каменным колоннам, которые встречаются и во времена Среднего царства. В эпоху Нового царства почти полностью перешли на составные колонны, но, в отличие от времени Джосера, когда в кладку колонн шли камни небольшого размера, почти 1,5 тыс. лет спустя употребляли крупные блоки. Каждый слой теперь состоял из двух полуцилиндров высотой от 0,9 до 1 м. Вес полуцилиндров колебался от 6 до 10 т. Они соединялись между собой двумя деревянными скобками типа ласточкина хвоста в верхней их части. И все это без всяких растворов удерживалось огромным вертикальным весом. Правда, в более поздние времена при эфиопских царях стали использовать растворы. Итак, строгая горизонтальность слоев, чередование через слой вертикальных стыков и горизонтальное соединение скобками полуцилиндров, а также большой вертикальный пригруз, обеспечивали прочность и устойчивость такого соединения в колонне. По этому же принципу соединялись все остальные элементы египетских храмов. Это пока единственный пример, когда большой вес играет положительную роль в сейсмических районах.

Если говорить о египетских пирамидах, то вес в их сейсмостойкости играет не последнюю роль. Во-первых, это сооружения с идеальной симметрией и идеальным равномерным распределением масс, с низким относительно высоты сооружению положением центра тяжести и во-вторых, их огромный вес и размеры оказывают значительное влияние на снижение сейсмического воздействия.

Разговор о борьбе с лишним весом естественно начать с перекрытий зданий. Ясно, что чем тяжелее у здания крыша, тем тяжелее само здание и тем выше у него центр тяжести. Я уже рассказывал о балочных перекрытиях, применяемых в Древнем Египте и Греции. Побеседуем теперь о сводчато-купольных перекрытиях, которые широко использовались во всем остальном Древнем мире, где был кирпич и камень. Есть сведения, что уже в Ассирии в 2100 г. до н.э. недалеко от города Ура применялись сводчатые перекрытия [38]. С точки зрения сейсмики купольные перекрытия вполне приемлемы, если

они выполнены в соответствии с требованиями сейсмостойкости. Симметрия и равномерность распределения масс и жесткостей в куполах обеспечена, но они боятся неравномерных осадок опорного кольца, которое воспринимает распор от купола и передает его на несущие конструкции стен. Если опорное кольцо будет недостаточно прочным и жестким и в случае неравномерных осадок стен деформируется, то в куполе появится неравномерное поле напряжений, что при недостаточной прочности купола может привести к его разрушению. Сам купол должен быть легким. Вот за эту равномерную передачу распора от купола на стены и за облегчение купола боролись древние зодчие, которые хорошо себе представляли задачу. Прекрасный пример этому — история римской архитектуры.

Сравним два величайших памятника римской архитектуры: Пантеон — храм всех богов, построенный в 118—128 гг., и собор Св. Петра, в разработке проекта которого участвовали Рафаэль и Микельанджело [26, 12]. Пантеон появился в то время, когда широчайшее распространение получил бетон, составивший основу стен и сводов. Для равномерного распределения бетона эти конструкции армировались кирпичной кладкой. Стены с обеих сторон облицовывались камнем или кирпичем.

Рассмотрим центральное здание Пантеона, которое представляет собой цилиндр с внутренним диаметром 43,5 м, перекрытый сферическим куполом диаметром 43,2 м. От древнейших времен до XIX в. такого гигантского купола не существовало. Распор купола определял значительную толщину (6,3 м) бетонной стены с кирпичной облицовкой, опирающейся в свою очередь на кольцевой фундамент шириной 7,3 м и глубиной 4,5 м. Но заметьте, стена не была сплошной, внутренними и внешними нишами она по сути дела была разбита на 16 радиальных опор-контрофорсов. Это облегчило ее больше чем на треть объема. Для равномерной передачи нагрузки от опорного кольца купола на опоры-контрофорсы, они перекрыты мощными кирпичными арками, которые и создают непрерывную кольцевую опору для купола. Благодаря этим конструктивным приемам в стене Пантеона почти нет лишних масс, что обеспечивает его сохранность в сейсмических условиях почти 2 тыс. лет.

На рисунке изображен разрез купола. Он отлит из горизонтальных слоев бетона, в нижней зоне армированного кирпичными арками. Интересно, что для облегчения веса купола состав бетона меняется с высотой. В нижних частях купола наполнителем бетона служат прочные тяжелые породы камня, а в верхних частях — легкая крошка туфа и легкие пемзы. Большую роль для облегчения купола играют отлитые одновременно с ним кессоны — углубления, устроенные с внутренней стороны купола, в результате чего потолок имеет ребристый вид. Устройство кессонов облегчило купол на одну шестую. Из этого краткого описания ясно, что уже тогда шла борьба за снижение веса конструкции. Теперь давайте посмотрим, как шла эта же борьба спустя 1,5 тыс. лет.

Купол собора Св. Петра имеет диаметр 42 м, но он значительно легче купола Пантеона за счет некоторых конструктивных приемов.

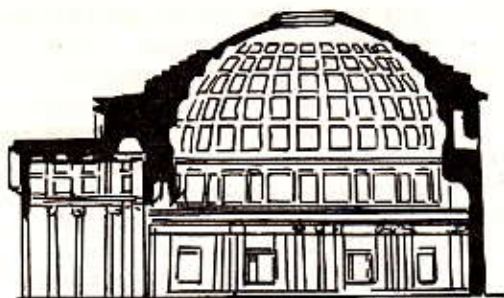


Рис. 34. Римский Пантеон

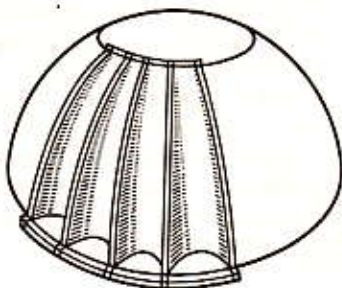


Рис. 35. Сверхлегкий купол из V-образных элементов

Прежде всего этот купол не имеет тяжелых литых из бетона опорных колец, они заменены растяжным металлическим кольцом, что кстати позволило отказаться от контрфорсов и намного уменьшить массу стен. Вместо шаровой применена стрельчатая, вытянутая вверх многогранная форма купола, что значительно уменьшило распор. Наконец, купол состоит из двух оболочек, соединенных ребрами жесткости, что придало ему необычайную прочность и жесткость при меньших затратах материалов.

Арабами в IX в. применялись деревянные купола в мечетях. Они состояли из двух независимых оболочек, каждая из которых напоминала по конструкции корпус корабля и была снабжена ребрами. Прочность при ударах морской стихии должна сохраняться и при сейсмических ударах. По этому принципу построена мечеть Эль-Сахра в Иерусалиме.

Интересен такой факт. Византийские своды возводились по возможности из кирпича без вспомогательных лесов. На время, пока схватится кирпичная кладка, в нижней части куполов устраивались металлические затяжки, потом их спиливали. Так было в константинопольской Софии. Опыт показал опасность их устранения с точки зрения сейсмостойкости куполов. В результате все здания позднейшего времени сохранили затяжки в куполах [39].

Продолжаем рассказ об уменьшении веса конструкций. Отправимся в Армению. До X в. там было налажено производство черепицы, которая позволяла покрывать купольные перекрытия различной формы. Позднее для облицовки стали использовать камень, что потребовало перейти на так называемые армянские своды — конические купола. Такая форма купола объясняется преимуществом при кладке из камня. Конусообразная форма упрощает кладку, при достаточно крутой линии наклона конуса камни удерживаются на силе трения, и купол выкладывается так же легко, как прямая стена. Кладка идет без кружал. С переходом на такие купола значительно увеличился вес кровли, зодчим пришлось подумать об уменьшении нагрузки на своды за счет облегчения забутовки, которой запол-

нялось обширное пространство между верхней и нижней поверхностями купола. Его стали делать пустотелым с помощью глиняных сосудов, заполнявших пространство. В анбердской замковой церкви были обнаружены крупные остродонные глиняные сосуды, поставленные поочередно дном вниз и дном вверх вдоль свода и залитые со всех сторон раствором. Так добивались облегчения сводов [36]. Прием облегчения конструкции перекрытия с помощью заделки в нее глиняных сосудов широко применялся и в других странах. Так, в Римской империи возводили облегченные купола из сосудов, залитых раствором. Делалось это следующим образом. Купол начинали лить от его опорной части, вставляя последовательно сосуд в сосуд и укладывая их по спирали до верхней замковой части купола [26].

В наше время борьба за снижение веса конструкций продолжается. На смену камню и кирпичу пришли легкие металлы и пластмассы. Приведем несколько цифр для убедительности [40]. Для купола Пантеона потребовалось 7,3 т камня на м^2 подкупольного пространства. Для купольной конструкции из металла стадиона в Хьюстоне диаметром 196 м — 0,28 т на м^2 стали.

Вес алюминиевого каркаса купола диаметром 121 м, построенного в Лонг Биче, всего 0,028 т/ м^2 . Интересно, что в наше время и это не предел. Купол диаметром 35 м из V-образных сферических сегментов, изготовленный из стекловолоконного армированного полиэстера, весит всего 0,010 т/ м^2 . Видно, что современные материалы дают большие возможности в смысле снижения веса, только неизвестно, сумеют ли они пережить Пантеон, да и нужно ли это. Рассмотрим еще несколько примеров применения легких конструктивных решений.

Напоминаю, что в соборе Св. Петра в Риме была конструктивно воплощена идея двойного купола с целью расположения материала в тех местах, где он работает и избавиться от ненужных лишней масс в центральной нерабочей зоне. Для обеспечения совместной работы оболочек они были соединены ребрами. В наше время эта идея доведена до абсолюта в пневматических двойных мембранных сооружениях [41]. Как видно из рисунка, такая оболочка, которой можно придать любую форму, изготавливается из двух мембран с воздухонепроницаемым покрытием, нужное расстояние между которыми поддерживается с помощью совместного действия стяжек и внутреннего давления. Такие пневматические конструкции применяются в тех случаях, когда желательно иметь небольшие упаковочные размеры при транспортировке и простой монтаж на месте назначения. Конструкция, показанная на рисунке, была использована как покрытие павильона на выставке в Цукуба в Японии.

Интересен тип стационарных пневматических конструкций, который применяется в Японии и носит название Воздушный Купол [42]. Он также состоит из двух мембран, но усиленных металлическими тросами. Нижние тросы имеют сильное натяжение и малый прогиб, мембрана, лежащая на них, образует потолок. Верхняя мембрана более выпуклая, хотя тоже представляет собой пологую оболочку. Такие воздушные купола могут перекрывать

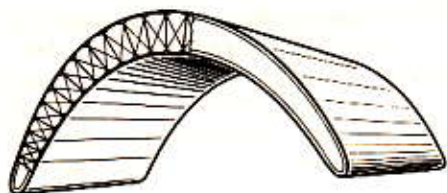


Рис. 36. Перекрытие в виде двойной мембраны



Рис. 37. Воздушный купол

пролеты более 200 м, имея вес 10 кг на м^2 перекрываемой площади. Для этих пневмоконструкций самыми опасными нагрузками будут ветровые (при тайфунах), а также снеговые, сейсмические же воздействия им не страшны.

Чтобы описать все типы современных складчатых и двойкой кривизны перекрытий, пришлось бы еще основательно потрудиться. Основная идея главы — убедить, что снижение веса — одно из основных требований, предъявляемых к сейсмостойким сооружениям. Осталось рассказать о надежности и безотказности работы всех конструктивных элементов сооружения.

ГДЕ ТОНКО, ТАМ И РВЕТСЯ

Как уже говорилось, для обеспечения безаварийной работы сейсмостойкой конструкции очень важно спроектировать ее так, чтобы нигде не возникли концентрации напряжений при сейсмическом воздействии. Перегруженные элементы разрушаются первыми, за ними идет цепная реакция разрушений по всему сооружению, вплоть до полного обрушения всего здания. Очень часто в современных зданиях, построенных из сборных железобетонных элементов, бывают перегружены соединительные детали. Разрушение связей между стеновыми панелями или другими элементами конструкций исключает их из общей работы конструкции. Древние в таких случаях часто устраивали дублирующие элементы.

Вспомните древний китайский подвесной мост на девяти цепях. Дублирующих элементов там было больше, чем нужно, но существовали еще какие-то причины такого их количества, скорее всего — снижение напряжений в цепях. Приведем еще один пример. От периода Суй (581—618 гг.) сохранился каменный арочный мост Аньцзио, пролетом центральной арки 37,5 и шириной 9,6 м. Мост сооружен в виде большой, плавно изогнутой арки, состоящей из 28 отдельных, параллельно установленных арок. Береговые опоры моста покоились в слабых аллювиальных грунтах, поэтому и была создана такая многоэлементная дублирующая конструкция [14].

Интересно, что арочные мосты вообще очень популярны в Китае. В наше время они также строятся, но уже не из камня, а

из железобетонных элементов, и собираются индустриальными методами из отдельных секторов без кружал. Разработаны типовые арочные легкие фермы для пролетов длиной до 150 м. Арочные фермы соединяются диафрагмами, по которым укладываются плиты-оболочки настила. Все это в соединении представляет единую жесткую систему и работает, конечно, лучше древних мостов, так как намного их легче и прочнее [43].

Учитывая специфику камня, в Египте и Греции также применялись дублирующие элементы. Каменные балки, работающие в условиях изгиба, собирались из двух, трех и более элементов. Если делать эти балки сплошными, то наличие мелкой трещины развивается часто на все сечение. Чтобы этого избежать, балки делались составными из нескольких элементов.

Древние строители решали и такой важный вопрос, как обеспечение равномерного распределения нагрузки, что также повышает надежность работы конструкции. Египтяне при возведении храмовых комплексов, в случае разной тяжести наземных частей, устраивали под ними фундаменты, не связанные друг с другом. Широко применялись также песчаные подушки как под фундаментом, так и между камнями самого фундамента, что способствовало также равномерному перераспределению нагрузок [28].

Чтобы обеспечить равномерный контакт между перекрытием и колонной, колонной и фундаментом, византийские архитекторы на оба конца по возможности монолитной колонны накладывали прокладки из свинца. Для того, чтобы свинец не расплющился и не выдавился под тяжестью перекрытия, его стягивали металлическим обручем [39]. В таком конструктивном решении колонна находилась в условиях равномерной вертикальной нагрузки. При подвижках происходило выравнивание распределения нагрузки за счет деформации мягкого свинца. Свинцовые прокладки смягчали удары на колонну в случае сейсмических воздействий.

Большое внимание в древние времена уделялось устройству различных проемов, дверей, окон в массивной каменной кладке. Если не предусмотреть никаких специальных мероприятий, то огромная нагрузка создаст неравномерное поле напряжений вокруг отверстия в кладке. Обрушение несущих конструкций над выходом из здания во время землетрясения ничего хорошего не обещает. Один из распространенных приемов уменьшения нагрузки на несущие конструкции — устройство разгрузочных треугольников, имеющих зазор с общей кладкой и соответственно не загруженных. Классический пример такого рода — Львиные ворота в Микенах, построенные в XIV—XIII вв. до н.э. Как видно из рисунка, в пространство над балкой вставлен треугольный камень. Иногда это пространство ничем не заполнялось [27]. Позднее в Армении на плоскую балку, перекрывавшую дверь, устанавливался камень в виде полукруга с тем же назначением, что и разгрузочный треугольник. Размеры разгрузочных полукругов достигали 3,5 м [36].

Существовали и другие приемы обеспечения целостности дверных проемов: над дверью устраивалась не одна арка из клинчатого



Рис. 38. Разгрузочный треугольник

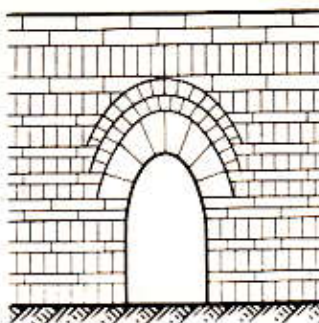


Рис. 39. Разгрузочная арка

камня, а две или больше. Они представляли собой разгрузочные арки, берущие часть нагрузки на себя [27].

Интересна борьба древних армянских зодчих за надежность. В купольных постройках, где арки, несущие купол, особенно были загружены, составные элементы арок стали снабжать зубом, который предотвращал выпадение клинчатых камней из арки в случае раскрытия швов во время землетрясения. Больше того, здесь видна тенденция не увеличивать количество камней, составляющих арку, а как раз наоборот, уменьшать. Камни скорее походили на кривые балки, чем на клинья [36].

Почему зодчие древности в сейсмически опасных районах полуциркульным формам арок предпочитали стрельчатые? Последние более надежны при сейсмическом воздействии, чем первые. При стрельчатом очертании арок и сводов замковая часть, т.е. самая верхняя центральная, никогда не вываливается при землетрясениях. Арка, получая весь комплект возможных повреждений — у пят, по середине кривой и в замковой части, — начинает работать как шарнирная система без обрушения [9].

В наш век конструкции стали совершеннее, создана теория расчета, применяются новые материалы с прекрасными свойствами: легкие, упругие, прочные, но, к сожалению, землетрясения по-прежнему, грозят неисчислимыми бедами, да и сам человек к этому явлению часто относится излишне легкомысленно. Учитывая экономическую сторону вопроса, сооружения проектируются с различной способностью к сейсмозащите, поэтому необходимо, чтобы существовало соответствие между этой способностью или, как говорят, сейсмовооруженностью зданий и сейсмической опасностью района. Вопрос этот очень сложный, экономить надо, но думается, учитывая наш уровень знаний о районах ожидаемых землетрясений, действовать надо с запасом.

Лучше завысить ожидаемую интенсивность будущих землетрясений, чем объявить сейсмически опасный район неопасным. Так было при землетрясении в Газли в 1976 г. Поселок был застроен



Рис. 40. Стрельчатая арка

без учета сейсмичности и при первом же толчке из 240 домов рухнуло 220. Жертв практически не было из-за благоприятного стечения обстоятельств. Хуже обстояли дела в том же году в Китае. Город Таншань с миллионным населением, застроенный несейсмостойкими домами, сравнялся с землей, при этом погибли 243 000 человек. Вообще 1976 г. принес много жертв от землетрясений. В Гватемале погибли 23 000 человек, в Италии около 1 000, в Новой Гвинее 6 000, на Филлипинах — 6 500, в Турции — 5 000 [44]. Вот вам данные по одному, хотя и пиковому, году. Борьба продолжается, сделать предстоит много.

Считаю, что изложение основных идей сейсмостойкости я закончил. Те, у кого хватило терпения дочитать до этого места, наверное, догадались, что обеспечение сейсмостойкости — понятие обширное и многогранное. Хотя в книге и есть параграф "Основные законы сейсмостойкости", но всех требований к сейсмостойким зданиям в него не уложишь. По сути дела, для каждого сооружения в конкретном районе застройки нужно решать свою задачу, поэтому закончить хочется главой, состоящей из отдельных заметок, дополнительно посвященных тем или иным вопросам, о которых не упоминалось раньше.

ВСЕ ОСТАЛЬНОЕ

В мире сейсмостойкости есть такая задача, о которой мы еще не говорили — это строительство подземных сооружений в сейсмически опасных районах. Прежде всего, имеется ввиду строительство таких сооружений как метро с его сложным комплексом подземных станций, туннелей и различных коммуникаций. Необходимо сразу отметить, что самые сильные колебания грунта во время землетрясения происходят в верхних слоях, где наибольший эффект оказывают поверхностные волны. С глубиной эти колебания уменьшаются. Известны случаи, когда шахтеры поднимались из шахт после землетрясения и о том, что оно было, узнавали

только на поверхности. После разрушительного землетрясения Канто в Японии в 1923 г., когда погибло почти 100 000 человек [44], трубы, даже очень большого диаметра, заложенные на глубину более 3 м, поврежденных почти не имели. Вообще не отмечалось серьезных случаев повреждений подземных сооружений при землетрясениях. Известен редкий случай незначительных повреждений в здании подземной электростанции Койна в Индии. Повреждения заключались в образовании трещин в перекрытии и стенах. Три зала электростанции были расположены на глубине примерно 150 м в базальтах. Они имели длину до 200 м, и эпицентр сильнейшего землетрясения лежал всего в нескольких километрах [45]. Короче говоря, подземное расположение сооружений благоприятно сказывается на их сейсмостойкости. Это же свойство учитывается при устройстве глубоких фундаментов, повышающих сейсмостойкость сооружения.

Любопытно то, что о сейсмостойкости подземных сооружений было известно на Крите в начале II тыс. до н.э. Кносский дворец превосходил по размерам и богатству все другие. На верхних этажах дворца находились официальные парадные залы, а вот жилые комнаты, спальни располагались в подвальном помещении — в нижнем этаже дворца, заглубленном на несколько метров в землю. На это была единственная причина. Критяне за свою двухтысячелетнюю историю пережили огромное количество землетрясений и убедились в том, что сооружение жилых помещений и в особенности спален в земляном массиве значительно снижает эффект землетрясения. Дома рядовых граждан города строились по этому же принципу. Они были в основном двухэтажными, тесно прижатыми друг к другу. Первый этаж был полуподвальный, призванный защищать от землетрясений, второй этаж укреплялся деревянными балками с той же целью [35].

К сожалению, многие вопросы, которые возникают в сейсмостойком строительстве, имеют неоднозначный ответ. При строительстве сооружения можно, казалось бы, предусмотреть все: и ожидаемый характер землетрясения и особенности данного здания, но вдруг какой-то малозначительный, неучтенный фактор сыграет роковую роль. Или землетрясение было не того состава, или осел насыпной грунт, лишняя перегородка дала неравномерную жесткость и произошло закручивание здания, или еще что-то совершенно неожиданное.

Сказать утвердительно, что строительство подземных сооружений всегда возможно в сейсмических районах, нельзя.

Надо еще посмотреть на рельеф, геологическое строение. Катастрофа, которая по своим размерам может соперничать с гибелью Атлантиды, произошла в Китае, в провинции Шеньси, в 1556 г., когда погибло 830 000 человек. Традиционно большинство населения жило не в домах, а в многоярусных пещерах, вырытых в плотной, но податливой толще лёсса, который достаточно хрупок и имеет низкую прочность. При ударах и вибрациях он рассыпается и превращается в мелкую пыль, струящуюся почти как жидкость. Так и произошло при землетрясении. Под действием чудовищных ударов и вибраций

огромные массы лёсса на склонах гор, пробуравленных жилищами людей, превратились в пыль и погребли под собой почти миллион жизней [32].

Аналогичный случай произошел на территории нашей страны двумя столетиями раньше. Несколько лет назад в Грузии отмечалось 800-летие пещерного монастыря Вардзия, сооруженного как оборонительный комплекс при царице Тамаре. Монастырь был устроен в склоне горы и имел несколько ярусов жилых келий, достаточно просторных, чтобы в случае опасности в них могли прятаться окрестные жители, имелся храм с фресками, водопровод, канализация, несколько внутренних спусков, и все это было запрятано внутри склона горы. Когда произошло землетрясение, грунт, ослабленный системой отверстий, оказался недостаточно прочным, произошел срез вдоль склона и в результате образовавшегося оползня открылась внутренняя система архитектуры древнего монастыря. Вся эта многоэтажная система пещер видна до сих пор.

Приведенные примеры разрушений пещерных поселений в Китае и Грузии при землетрясениях исключение, а не правило. В одном случае были очень слабые грунты, во втором — искусственно образованная поверхность обрушения. В Египте и Индии существует множество подземных гробниц, храмов и поселений, которые прекрасно перенесли сейсмические воздействия.

Мы побывали под землей, заберемся теперь под облака. Одно из высочайших сооружений древности — Фаросский маяк близ Александрии — был сооружен в начале III в. до н.э. во времена, когда Египет входил в Римскую империю. Этот маяк, имевший высоту не менее 120 м, причисляется к семи чудесам света. При такой огромной высоте он был сооружен из не очень-то сейсмостойкого материала — местного известняка и облицован мрамором. Он состоял из трех частей: нижней прямоугольной, средней восьмиугольной и верхней цилиндрического фонаря.

Размеры основания нижней прямоугольной части были $30,5 \times 30,5$ м, материал маяка жесткий, в основании была скала, отсюда ясно, что, несмотря на большую высоту, все сооружение было жестким. Верхняя часть маяка рухнула во II в. В IV в. он стал жертвой землетрясения и еще более укоротился. При каждой катастрофе он делался все короче и соответственно все жестче, что снижало его сейсмостойкость. В конце X в. на него обрушилось новое землетрясение, оставившее лишь четверть маяка. Землетрясение XIV в. окончательно разрушило этот величайший архитектурный шедевр древности, не обладавший свойством приспосабливаться к сейсмическим воздействиям.

В наше время, конечно, больше возможностей создавать сверхвысокие сооружения. Например, в Алма-Ате построена телевизионная башня высотой 372 м, с базой в основании всего 18,5 м. Вес ее металлоконструкций составляет 4760 т. Такое башенное сооружение для горного района с высокой сейсмичностью создано впервые. На высоте 248 м установлено четыре гасителя колебаний общей массой 40 т. Они предназначены для гашения колебаний

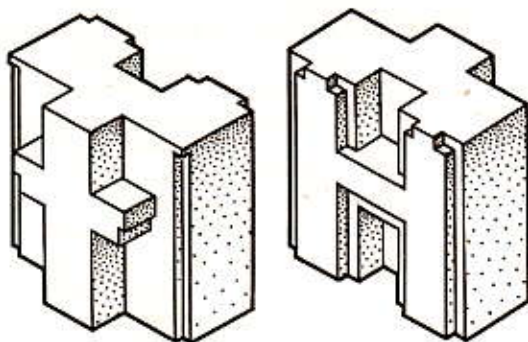


Рис. 41. Строительные блоки инков

башни, возникающих при ветровых порывах и сейсмических воздействиях. Их работа основана на том, что собственный период гасителей значительно отличается от собственных периодов колебаний башни. Остается ждать, чтобы посмотреть, как поведет себя эта башня при сильном землетрясении. Во всяком случае, действие гасителей колебаний снижает колебания от ветра в 3,6 раза [46]. Кстати, чего не встречается у древних — это идеи о создании гасителей колебаний.

Хотелось бы, чтобы у читателя не сложилось мнение, что с землетрясением бороться невозможно, что есть районы настолько сейсмоопасные, что в них какие-то сооружения не могут быть построены и т.д. Отвечаю, всегда и везде бороться с землетрясением можно и нужно, но весь вопрос в том, сколько эта борьба будет стоить.

Если бы мне задали вопрос: "Кто, по-вашему, лучший каменщик в мире?" Я бы, наверное, не очень долго думал, чтобы ответить, что лучшими каменщиками во все времена были древние народы Южной Америки, которых незадолго до прихода испанцев подчинили себе инки. Из всех поразительных примеров их искусства приведу только один в доказательство своих слов.

В III в. на юге озера Титикака основывается город Тиахуанаку. После испанского завоевания город в течение пяти веков разграблялся кладоискателями, кроме того, его развалины служили каменоломней. В городе сохранились блоки — части одного или нескольких зданий. Выполнены они были значительно искуснее современных, с очень точной подгонкой. Самый большой блок из Тиахуанаку имеет размеры $3,44 \times 3,30 \times 0,5$ м, самый тяжелый весит около 200 т. Повторяю, что с помощью бронзовых орудий они отесаны с удивительной тщательностью и точностью. Их прочно скрепляли каменные шипы и бронзовые скобы, для которых оставлялись отверстия и Т-образные углубления. В каждом блоке имелись борозды для крепления во время подъема и монтажа на место [27].

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И КАМНИ АРМЕНИИ

Книга была написана до сих пор, оставалось сочинить поучительную концовку, закончить формальности и отнести ее в редакцию. Но пришлось прервать работу, 5 декабря 1988 г. я улетел в Ашхабад на конференцию, посвященную 40-летию Ашхабадского землетрясения. Последствия этого ужасного землетрясения, случившегося глубокой ночью 5 октября 1948 г. теперь широко известны. Погибло порядка 90 тыс. жителей и был разрушен практически весь город. Сохранилось здание текстильной фабрики, элеватор и несколько одноэтажных кирпичных построек. Не рухнула также мечеть на проспекте Свободы. После землетрясения она выделялась своими минаретами на фоне разрушенного города. К сожалению, она была взорвана в 60-х годах. При взрыве купол не треснул, а торжественно парашютировал и раскололся только при ударе о землю.

Последствия катастрофического землетрясения 1948 г. до сих пор изучаются и осмысливаются. В Ашхабаде и застало меня известие о трагедии, происшедшей в Армении 7 декабря, спустя 40 лет после Туркменской катастрофы. Как специалист по сейсмостойкому строительству, через несколько дней я был в районах бедствия. Не буду описывать великие человеческие страдания и ужасное человеческое равнодушие, не буду пытаться сделать обобщенные выводы о причинах массовых разрушений зданий. Об этом наверняка будет написано очень много. Давайте с вами просто побродим по развалинам городов, послушаем очевидцев, посмотрим сами, подумаем над тем, что видим, и попытаемся представить картину случившегося.

Бесснежное солнечное декабрьское утро в Ленинакане. Все спокойно, каждый занят своим делом. Учитель школы N 21 по улице Маисяна вышел подышать воздухом, у него перерыв между уроками. Ему как-то неможется, кажется, что поднялась температура, жар. На такое состояние в это утро жаловались многие люди, есть такие, у которых пошла носом кровь. Учитель видит перед собой простор широкой улицы, обсаженной молодыми деревьями, тускло поблескивает пространство каменной мостовой. Небо, недавно еще чистое, затянула мгла, откуда-то издали послышался гул, как-будто едут тяжелые танки. Со стороны улицы Калинина беспокойное движение, падают люди, идет стена пыли. А вот теперь явственно видно, как приближаясь, волнообразно изгибаясь, движется каменная мостовая. Раздвигаются и сдвигаются камни мостовой, выбрасывая фонтаны пыли. Это видит не только наш учитель, но и другие люди. Они ищут в панике спасение от этой чудовищной опасности. Многим кажется, что их сейчас поглотит земная бездна. Одни в поисках, казалось, невозможного спасения ложатся плашмя на землю, другие хватаются за раскачивающиеся деревья. Никто не может удержаться на ногах. Грохочущая волна уходит вдаль, земля перестает колыхаться. Здания вроде бы целы и стоят на месте. Вот вам демонстрация в реальности змсиной модели землетрясения, о которой мы с вами

говорили в начале книги. Во всяком случае, если движение сейсмической волны можно увидеть без всяких приборов простым человеческим глазом, то совершенно ясно, что в расчетах на сейсмостойкость необходимо учитывать неравномерное волнообразное движение основания сооружения во время землетрясения. Об этом уже говорилось выше, а данный факт только подтверждает сказанное.

Послушаем еще одного очевидца — женщину, живущую на улице Калинина в доме 13 на первом этаже. Висзапно на улице слышен быстро приближающийся мощный гул, пол качнулся под ногами в одну, потом быстро в другую сторону, сильные горизонтальные колебания, потом как-то закрутило, и тишина. Женщина растерянно пытается осмыслить происходящее, и вдруг сильнейший вертикальный толчок отбрасывает ее на пару метров, к счастью, на мягкий диван. Подобных рассказов можно привести много, и далеко не все кончалось так удачно. Однако все они сводятся к одному. Было два толчка. В первом преобладали горизонтальные движения с закручиванием, второй был сильным вертикальным. Этот второй вертикальный толчок и был роковым для девятиэтажных каркасных зданий. По-видимому, не выдержав вертикальной перегрузки, сломались колонны, и произошло массовое обрушение девятиэтажных зданий. Это довольно редкий случай, когда постройка не падала на бок, а просто на месте стоящего ранее здания громоздилась куча обломков. Вот вам опять урок, преподанный нам землетрясением. В наших нормативных расчетах для таких зданий не требуется учитывать вертикальную составляющую, а на самом деле она существует. Хотя в данном случае основную губительную роль сыграло качество строительства и некоторые ошибки проекта, но вертикальная составляющая также внесла свой вклад. К этому еще надо добавить, что девятиэтажные здания попали почти в резонанс. Собственный период колебания этих домов был 0,55—0,6 с. Такой же преобладающий период был у колеблющегося грунта.

С точки зрения взаимодействия между колеблющимся грунтом и зданием в лучшем положении, чем девятиэтажные постройки, находились более жесткие одно-, двух- и трехэтажные здания, у которых собственный период колебания был значительно меньше, чем у грунта. У некоторых гибких сооружений собственный период колебания был в несколько раз больше, чем у сейсмической волны, например, без повреждений возвышаются над Лениниканом телевизионная башня и гигантская железобетонная дымовая труба.

Интересен феномен, который можно увидеть в Спитаке, городе, пострадавшем больше остальных, так как находился почти в эпицентре землетрясения. Рядом с искореженным технологическим зданием сахарного завода, построенным из здоровенных металлических колонн и балок, скромно стоит дымовая кирпичная труба 1950 г. В ней невозможно разглядеть ни малейшей волосной трещины, не говоря уже о каких-то обрушениях. Правда, эта труба по высоте охвачена металлическими обручами. Если внимательно присмотреться к ней, то в общем-то никакого феномена здесь нет. Просто в данном случае последовательно воплощены

конструкторские приемы, накопленные тысячелетней историей сейсмостойкости, и о которых мы с вами уже говорили. Посмотрите на эту красавицу трубу. У нее хорошие пропорции. Ее не назовешь длинной, но и не скажешь, что она слишком приземиста. Она скорее по форме напоминает среднеазиатский минарет, покрытый цветной глазурью и призванный сзывать верующих на вечернюю молитву, чем дымовую трубу, предназначенную отравлять атмосферу. У нее широкий и глубокий фундамент, она симметрична, да вдобавок стянута кольцевыми обручами. Собственно, все законы сейсмостойкости в ней воплощены. Результат феноменален: устояла там, где все остальное, даже металлическое и железобетонное, рухнуло. Вывод может быть только один. В рухнувших сооружениях не были соблюдены законы сейсмостойкости. Давайте рассмотрим некоторые из этих ошибок на примерах разрушенных зданий. При этом под ошибками будем подразумевать все: и плохое качество, и неправильно выбранный план сооружения и несимметрично расположенные несущие элементы здания.

Начнем с пятиэтажных зданий, которые, с моей точки зрения, по степени разрушенности занимают второе место после девятиэтажных. В Ленинкане можно было увидеть целые улицы таких рухнувших домов. При этом у всех них было три стадии разрушения, показанные условно на рисунке. Первая стадия — появление трещин по высоте здания в крайних секциях. Вторая — обрушение торцевых частей здания. Третья — разрушение центральной части здания. В зависимости от направления подхода сейсмической волны может рухнуть сначала средняя часть здания, а боковые будут продолжать стоять. Такие примеры тоже имеются.

В чем же дело? Оказывается, все очень просто. Нарушен один из главных законов сейсмостойкости: жесткости и массы в здании должны быть распределены равномерно. Посмотрим, как в плане расположены несущие стены. Они показаны на рис. 43, там же выделены условно плиты перекрытия. Как сопротивляется нагрузке отдельно стоящая стена? Она может сопротивляться в своей плоскости и почти не сопротивляться, если сила направлена перпендикулярно стене. При ударе волны в фасад здания, как показано стрелкой с цифрой 1, крайние стенки, стоящие к волне перпендикулярно, не могут оказать сопротивления и имеют большие перемещения, чем центральные стены, которые способны оказать сопротивление. В лучшем случае между частями здания, имеющими разные жесткости в этом направлении, образуется трещина. Если волна ударит по направлению 2, то имеет большие шансы рухнуть центральная часть здания.

Делу можно было помочь, если бы имелся жесткий диск перекрытия, который обеспечивал бы совместную работу стен различного направления, но связь в данном случае была слабой, на рисунке по этой причине она не показана, и поэтому разрушения шли именно так, а не иначе.

Такая элементарная ошибка, о которой знали еще в древности, обошлась довольно дорого. Подобных просчетов можно перечис-

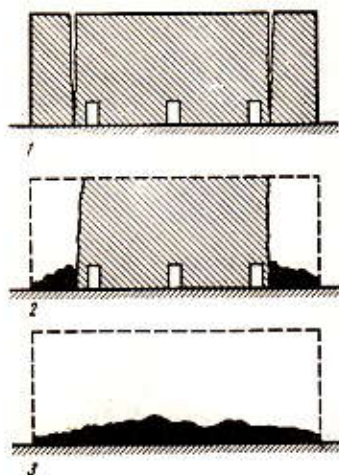
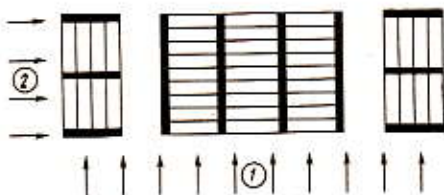


Рис. 42. Стадии разрушения пятиэтажных зданий в Ленинакане

Рис. 43. Неравномерное распределение жесткости стен



лить много, в том числе и в девятиэтажных зданиях. Но не будем мучить себя повторами.

Поговорим еще об одной ошибке, связанной с тем, что мы плохо изучаем и используем наследие древних. В городах Армении широко применяется кладка каменных стен, называемая "мидис". Ее происхождение связано и с местными строительными материалами и соответственно с местными традициями. Об этом типе кладки уже рассказывалось. Она делалась так. Устраивалось два ряда камней, которые служили облицовкой стен, а пространство между ними заливалось известковым раствором с заполнением необработанными камнями. Позднее стали уменьшать расстояние между рядами облицовочных камней для облегчения веса стен, но через несколько блоков вставляли длинные камни, обеспечивавшие монолитность стены. В той кладке, которая применяется сейчас, расстояние между камнями свели до критического минимума, перевязочный камень перестали делать, и вот результат: массивные обрушения каменных стен.

На рисунке показаны стадии "совершенствования" каменной кладки. При этом надо иметь в виду, что раньше применялся известковый раствор, обладающий пластическими свойствами, которых не имеет современный цемент. Больше того, толстый слой раствора мог обеспечить несущую способность стен даже без облицовочного камня. Современная каменная стена типа "мидис" без требуемой по самой ее идее перевязки длинными камнями является трехслойной и соответственно неоднородной. Она имеет довольно разнообразные возможности разрушиться, часть из них показана на рисунке. Здесь видно и слабое сопротивление изгибу, чего не было в древних стенах, и расслоение стен, в результате — потеря несущей способности, разрушение от внецентренного сжатия при выпадении камней. Бродя по Ленинакану, можно было увидеть много

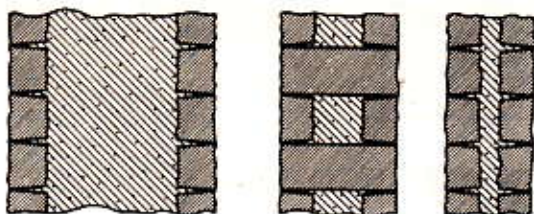


Рис. 44. Древние и современные типы каменной кладки



Рис. 45. Виды разрушения современной каменной кладки

разрушенных современных каменных стен такого типа, а вот стены, в которых имелась перевязка, устояли.

Видя все это, поневоле начинаешь задумываться и задавать себе вопросы. Почему человек стал таким неразумным? Почему он не накапливает самый элементарный житейский опыт? 22 октября 1926 г. в Ленинанкане произошло землетрясение практически такой же силы. Точно также город был разрушен, точно также вся наша страна, а также зарубежные страны, помогали восстановить город. Было проведено обследование разрушенных зданий и даны рекомендации по восстановлению города. В 1930 г. были составлены технические условия проектирования и постройки в сейсмических районах Закавказской СФСР. Если читать научные материалы того времени, то в них можно найти много полезного, практически использовать и сейчас. Ошибки повторены, собственно, те же, с добавлением новых. Во всяком случае каменные стены без перевязки были тогда строго запрещены, но применялись довольно широко. Будь эта мелочь, перевязка каменных стен, многие жизни были бы спасены.

Еще одно маленькое добавление. Хорошо, что существуют методы расчета на сейсмостойкость, хорошо, что они совершенствуются, но я глубоко убежден, что пока самым важным является хорошее конструирование, учитывающее опыт предыдущих землетрясений. Есть принципы проектирования сейсмостойких конструкций, их нарушать нельзя, природа этого не простит. Изложению этих

принципов и посвящена данная книга. Хочется надеяться, что свою задачу я хоть частично выполнил.

В заключение, прежде чем расстаться с читателем, хочется привести статью 229 законов Вавилонского царя Хаммурапи, жившего в XVIII в. до н.э. Эта статья гласит: "Если строитель построил человеку дом и свою работу сделал непрочно, а дом, который он построил, рухнул (неважно от чего) и убил домовладельца, этот строитель должен быть казнен". При таких строгостях в наше время после Ленинанканского землетрясения мы бы недосчитались многих строителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Земельков Ф.Д.* Дом на сейсмоамортизаторе. Ашхабад: Туркменистан, 1961. С. 168.
2. *Назин В.В.* Исследование гравитационной системы сейсмоизоляции с применением эллипсоидов вращения // Сейсмостойкое строительство: Реф. сб. / 1974. Вып. 1. С. 38—40.
3. *Поляков С.В.* Последствия сильных землетрясений. М.: Стройиздат, 1978. С. 312.
4. *Айзенберг Я.М.* Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. М.: Стройиздат, 1976. С. 232.
5. *Оразымбетов Н.Р., Сердюков М.М., Шанин С.А.* Ашхабадское землетрясение 1948 г. М., Госстройиздат, 1960. С. 308.
6. Современные методы сейсмозащиты зданий и сооружений. Обзорная информация. Сер. 8. Строительные конструкции. Вып. 7. ВНИИС Госстроя СССР, 1987. С. 66.
7. *Харитонов В.А.* Сейсмостойкое строительство на вечномёрзлых грунтах. Л.: Стройиздат, 1980. С. 80.
8. Сейсмическая реакция качающегося железобетонного устоя моста // Сейсмостойкое строительство: Реф. сб. / ЦИНИС. 1975. Вып. 1. С. 678—671.
9. *Бачинский Н.М.* Антисеймика в архитектурных памятниках Средней Азии. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. С. 48.
10. *Ципенюк И.Ф., Арадовский Я.Л., Гамбург Ю.А.* Конструкции и методы восстановления архитектурных памятников в сейсмических районах Средней Азии // Строительство и архитектура Узбекистана. 1978. N 3. С. 13—16.
11. *Айзенберг Я.М., Гайыров Б.К.* Расчетная диаграмма деформирования крупнопанельного здания с "сухими" стыками для приближенного расчета сейсмической реакции. Строительство в особых условиях // Сейсмостойкое строительство: Реф. сб. / ВНИИС Госстроя СССР. 1987. Сер. 14. Вып. 7. С. 7—10.
12. История архитектуры. Т. 1. М.: Стройиздат, 1984. С. 334.
13. *Пузаченкова Г.А., Ремпель Л.И.* Выдающиеся памятники архитектуры Узбекистана. Ташкент: Изд-во лит. УзССР. 1958. С. 292.
14. Всеобщая история архитектуры. Т. 9. М.: Стройиздат, 1971. С. 644.
15. *Шуази О.* История архитектуры. Т. 1. М.: Изд-во Академии архитектуры СССР. 1935. С. 576.
16. *Саваренская Т.Ф.* История градостроительного искусства. М.: Стройиздат, 1984. С. 376.
17. Всеобщая история архитектуры. Т. 1. М.: Стройиздат, 1970. С. 512.
18. *Джураев А.* Эффект газлийских землетрясений в зависимости от грунтовых условий. Ташкент: Фан. 1985. С. 84.
19. Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. М.: Наука, 1981. С. 260.
20. *Чураян А., Джабуа Ш.* Некоторые особенности центрических зданий. Тбилиси: Изд-во АН ГрузССР, 1953. С. 62.
21. Памятники архитектуры в современной Армении. Л.: Аврора, 1971. С. 112.
22. *Дадашев С.А., Усейнов М.А.* Архитектура Азербайджана. М. 1948. С. 96.
23. Engineering Features of the San Fernando Earthquake Fabrinary 9, 1971. Pasadena, California, 1971. P. 174.
24. *Бачинский Н.М.* Архитектурные памятники Туркмении. Вып. 1. М.: Ашхабад: Изд-во Академии архитектуры СССР. 1939. С. 128.
25. *Хан-Магомедов С.* Дербент. Горная стена. Аулы Табасарана. М.: Искусство, 1979. С. 286.
26. Всеобщая история архитектуры. Т. 2. М.: Стройиздат, 1973. С. 719.
27. *Кинк Х.А.* Древне-египетский храм. М.: Наука, 1979. С. 200.
28. Сейсмостойкие пространственные пневматические конструкции покрытий больше-

- пролетных сооружений (США) // Сейсмостойкое строительство: Реф. сб. / ЦИНИС. 1978. Сер. 14. Вып. 2. С. 10—13.
29. Стальные сейсмостойкие конструкции подвесного покрытия выставочного зала (Япония) // Сейсмостойкое строительство: Реф. сб. / ЦИНИС. 1978. Сер. 14. Вып. 8. С. 7—11.
30. Проектирование 52-этажного административного сейсмостойкого здания в Токио // Сейсмостойкое строительство: Реф. сб. / ЦИНИС. 1974. Вып. 1. С. 22—25.
31. Друма А.В., Шебаши Н.В. Землетрясение: где, когда, почему? Кишинев: Штиинца, 1985. С. 196.
32. Домбровский Ю.О. Хранитель древностей. М.: Сов. Россия, 1966. С. 256.
33. The prince William Sound, Alaska, earthquake of 1964 and aftershocks. United States Government printing office. Washington, 1967. P. 392.
34. Резанов И.А. Атлантида: фантазия или реальность? М.: Наука, 1976. С. 136.
35. Токарский Н.М. Архитектура древней Армении. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1946. С. 478.
36. Ганзелка И., Зикмунд М. Через Кордильеры. М.: Мол. гвардия, 1960. С. 350.
37. Брунов Н.И. Очерки по истории архитектуры. Т. 1. М.; Л. 1937. С. 442.
38. Шуази О. История архитектуры. Т. 2. М.: Изд-во Академии архитектуры СССР. 1937. С. 694.
39. Иштван С. Купольные конструкции из элементов стекловолоконного армированного полиэстера // Теория и экспериментальные исследования пространственных конструкций: Тр. междунар. конгр. 1985 г. М., 1985. Т. 4. С. 133—146.
40. Кацуо И., Тошихиро А. Конструирование и расчет пневматических двойных мембранных сооружений. Там же. С. 25—44.
41. Йошихиро М., Окада А. Экспериментальные исследования пологих воздухоопорных оболочек. Там же. Т. 2. С. 123—138.
42. Вей Ц., Гуо-Хунь Ц. Жесткие арочные мосты заводского изготовления с настилом в виде плит—оболочек. Там же. С. 317—332.
43. Гирд Д., Шах Х. Зыбкая твердь. М.: Мир, 1988. С. 222.
44. Окамато Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений. М.: Стройиздат, 1980. С. 344.
45. Остроумов Б.В., Каракозова В.И., Золотухин В.Г. Опыт проектирования, исследования и монтажа радиотелевизионной башни в Алма-Ате // Теория и экспериментальные исследования пространственных конструкций. Тр. междунар. конгр., 1985. М., 1985. Т. 3. С. 47—56.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
О ЧЕМ ХОЧЕТСЯ РАССКАЗАТЬ В ЭТОЙ КНИГЕ.....	4
КОЕ-ЧТО О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ.....	5
КАК ЗДАНИЯ ДЕЛАЮТ СЕЙСМОСТОЙКИМИ.....	7
АПОСТОЛЫ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ СЕЙСМОЗАЩИТЫ.....	10
АТЕЙ И СЕЙСМОСТОЙКОЕ ЗДАНИЕ.....	15
КОГДА ПРИДУТ НАСТРОЙЩИКИ?.....	20
ЧТО НАМ ПРЕДЛОЖИЛИ ЗОДЧИЕ ДРЕВНОСТИ.....	21
ВСЕМИРНО ИЗВЕСТНАЯ СЕЙСМОСТОЙКАЯ КОНСТРУКЦИЯ.....	26
ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ.....	28
ЭФФЕКТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ФУНДАМЕНТ.....	42
ДЕРЕВО И СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ.....	44
ПРОСТО КАМЕНЬ И КИРПИЧ.....	48
ЛИШНИЙ ВЕС — ОН СЛОВНО БЕС.....	52
ГДЕ ТОНКО, ТАМ И РВЕТСЯ.....	57
ВСЕ ОСТАЛЬНОЕ.....	60
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И КАМНИ АРМЕНИИ.....	64

Научное издание

Кириков Борис Алексеевич

ДРЕВНЕЙШИЕ И НОВЕЙШИЕ СЕЙСМОСТОЙКИЕ КОНСТРУКЦИИ

*Утверждено к печати Межведомственным Советом
по сейсмологии и сейсмостойкому строительству*

Художник С.Б. Генкина. Художественный редактор Н.Н. Михайлова
Графические работы Л.В. Мясина. Технический редактор О.В. Ардова. Корректор Л.А. Агеева

Набор выполнен в издательстве на электронной-фотонаборной системе

ИБ № 47149

Подписано к печати 04.01.90. Т — 00307. Формат 60×90 1/16
Бумага офсетная № 1. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл.печл. 4,5. Усл.кр.-отт. 4,8. Уч.-изд.л. 5,2. Тираж 1650 экз.
Тш. зак. 2216. Цена 1 руб.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Наука"
117864 ГСП-7, Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90
Ордена Трудового Красного Знамени 1-я типография издательства "Наука"
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12

1 руб.