

Черепинский Ю.Д.



Черепинский Ю.Д. окончил Харьковский инженерно-строительный институт. С 1958 года работал в Государственном проектно-институте Казпромстройпроект (г. Алматы).

Заключил 4 курса механико-математического факультета Казахского Университета, а также аспирантуру при ЦНИИСК им. Кучеренко (г. Москва).

С 1975 года работал в научно-исследовательском институте сейсмостойкого строительства и архитектуры КазНИИССА.

Доктор технических наук.

Область научных интересов связана с сейсмоизоляцией зданий с использованием специального вида фундаментов КФ.

E-mail: ycher@telus.net



СЕЙСМОИЗОЛЯЦИЯ ЗДАНИЙ

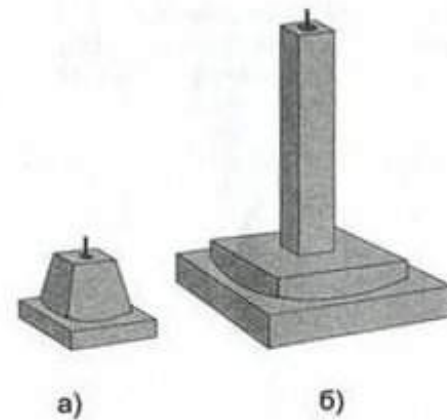
Строительство на кинематических фундаментах

«Blue Apple»
МОСКВА
2009

Черепинский Ю.Д.

СЕЙСМОИЗОЛЯЦИЯ ЗДАНИЙ

(СБОРНИК СТАТЕЙ)



МОСКВА
«Blue Apple»
2009

УДК 550.3
ББК 26.21
Ч 467

*Книга издана при поддержке
АНО «Региональный альянс
для анализа и уменьшения бедствий»*

ISBN 978-5-212-01113-6

© Черепинский Ю.Д., 2009
© «Blue Apple», 2009

СОДЕРЖАНИЕ

От издателей. М.А. Клячко	4
Предисловие	5
Сейсмоизоляция зданий с применением кинематических фундаментов	7
Сравнительный анализ сейсмоизолирующих конструктивных решений	14
К сейсмостойкости железобетонных каркасов с диафрагмами жёсткости	25
К вопросам инженерной оценки сейсмостойкости жилых зданий	30
Некоторые аспекты сейсмической реакции сейсмоизолируемых зданий	35
Защити свой дом от землетрясения	43
Общее заключение	46

ОТ ИЗДАТЕЛЕЙ

Настоящий сборник включает наиболее полную опубликованную авторскую информацию о сейсмической изоляции зданий с помощью стоек-опор, называемых кинематическими фундаментами Ю.Д. Черепинского, или просто КФ. Разработке и внедрению КФ для снижения сейсмической реакции зданий автор публикуемых статей посвятил более 45-ти лет, и его с полным основанием можно назвать одним из пионеров современного этапа строительства сейсмоизолированных зданий.

В настоящее время на территории бывшего СССР (преимущественно в Казахстане и России) построено более 200 сейсмоизолированных зданий, в которых использованы КФ.

Необходимо отметить высокий энтузиазм и большие усилия, которые потребовались автору для практической реализации своих идей. В то же время, нельзя не признать тот факт, что сопутствующих теоретических обоснований и, главным образом, натурных экспериментальных исследований, всесторонне обосновывающих эффективность и требуемую надежность применения КФ на сегодняшний день недостаточно, и область наиболее эффективного применения КФ не обозначена.

Мы рекомендуем это издание широкому кругу специалистов сейсмостойкого строительства как значимую страницу в истории современной сейсмоизоляции зданий, и как материал для комплексной проверки, мониторинга и контроля надежности ранее возведенных на КФ зданий и, наконец, для усовершенствования и дальнейшего внедрения этой отечественной разработки.

Председатель Совета Регионального альянса
по анализу и уменьшению бедствий
М.А. Клячко

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сборник представленных ниже статей отражает результаты более чем тридцатилетних усилий специалистов, работавших вместе с автором в области экспериментально-теоретических исследований и проектирования сейсмостойких зданий с подвижными фундаментами. В сборнике отсутствуют сложные выкладки, связанные с теоретическими исследованиями, но делаются ссылки на их результаты, касающиеся практики расчёта.

Вначале мы исходили из того, что при землетрясении жёсткость здания, по мере накопления повреждений в конструкциях, уменьшается. Вместе с ней, согласно нормативной методике, снижается и сейсмическая нагрузка. Но снижение нагрузки может достигаться и за счёт так называемых подвижных, иначе сейсмоизолирующих фундаментов, принятых в расчётах с некоторой пониженной нелинейной жёсткостью.

Поскольку нелинейные процессы в конструкциях при землетрясении не поддаются точному определению, главное требование к сейсмоизолирующим фундаментам относится не к их нелинейной характеристике, а к прочности и устойчивости при ожидаемых перемещениях. Поэтому теоретические выводы относительно количественного эффекта сейсмоизоляции тоже не отличаются точностью. Результатами испытаний экспериментальных зданий достоверно подтверждается лишь её работоспособность. Эффект конкретной сейсмоизоляции хотя и является результатом расчётно-теоретических исследований, но во многом подсказан инженерной интуицией.

В подтверждение этого можно сослаться на уникальные по сложности сооружения прошлых столетий, построенные без высокоточных расчётных систем на ЭВМ. К тому же,

сама идея сейсмоизоляции родилась в древности, когда людям удавалось спасать свои жилые строения от разрушений с помощью простых камышитовых подушек.

Основное место в сборнике отводится так называемым фундаментам КФ, одному из первых практических решений этого типа, доступного в массовом строительстве. Они, в сравнении с другими решениями, прошли наиболее полную и дорогостоящую проверку, возможную прежде в системе бюджетных ассигнований бывшего Советского Союза.

Автор не исключает повтор некоторых утверждений и даже рисунков, допуская, что каждая статья может читаться отдельно от других. Но только все вместе они отражают единую идею и необходимость сейсмоизоляции зданий.

Статья 1 даёт представление о проведенных исследованиях КФ. В кратком изложении в статье приводится описание теоретических и экспериментальных подходов к решению проблемы и её результатов, послуживших началом для экспериментального строительства.

В статье 2 тоже кратко сопоставляются наиболее известные сейсмоизолирующие решения с позиции их практической применимости.

Статья 3 затрагивает вопросы сейсмостойкости получивших распространение каркасных зданий с диафрагмами жёсткости и способ её повышения с помощью КФ.

Статья 4 рассчитана на специалистов в области проектирования зданий и инженерный состав строителей. В ней представлен анализ сейсмостойкости зданий с позиций нормативной методики и реальной работы конструкций в условиях землетрясений. Дётся обоснование обязательного применения сейсмоизоляции для многих типов домов при массовом жилищном строительстве.

Статья 5 содержит некоторые разъяснения расчётной модели КФ в составе здания в связи с неверными замечаниями, допущенными в одной из статей журнала "Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений".

Статья 6 является заключительной. В ней основная идея сейсмоизоляции представлена в иной форме, отличной от представлений о работе упругих конструкций. Статья предназначена для читателей, проявивших интерес к проблеме, но ограниченных по разным причинам во времени для просмотра предыдущего материала.

СЕЙСМОИЗОЛЯЦИЯ ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ФУНДАМЕНТОВ

(ранее опубликована)

ВВЕДЕНИЕ

Традиционный способ обеспечения сейсмостойкости сооружений предусматривает повышение несущей способности конструкций за счет увеличения их размеров и прочности. Увеличение размеров конструкций, с другой стороны, приводит к увеличению жесткости и веса сооружения, что, в свою очередь, вызывает возрастание инерционной (сейсмической) нагрузки.

Новый способ повышения сейсмостойкости, который обсуждался среди проектировщиков уже в шестидесятые годы, условно был назван сейсмоизоляцией. Сейсмоизолирующие конструкции ослабляют связь с основанием, что приводит к изменениям динамических характеристик здания и снижению интенсивности воздействия землетрясений.

К одному из первых решений этого типа, предложенных для массового применения, относятся кинематические фундаменты КФ, разработанные с участием ЦНИИСК (г. Москва) в КазНИИССА (г. Алматы). Результатом длительных исследований КФ стали построенные дома в различных сейсмоопасных районах бывшего СССР. Землетрясения на Камчатке, Курильских островах, в Иркутске и Алматы позволили убедиться в работоспособности КФ, оценить их сейсмоизолирующий эффект и выявить некоторые ошибки в проектировании домов.

КОНСТРУКЦИЯ КФ

Конструкция КФ (рис.1,2) представлена подвижным элементом со сферической пятой, опирающейся на плоскую плиту или твердое основание. Шарнирная связь с надфундаментным строением обеспечивает подвижность в горизонтальной плоскости по всем направлениям. КФ изготавливаются из бетона марки не менее 300 и армируются стальными сетками.

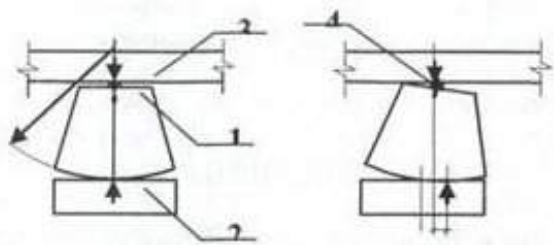


Рис. 1. Конструктивная система КФ

1 — КФ; 2 — опорная плита; 3 — растверк; 4 — шарнирное соединение

Шарнирное соединение выполняется в виде связующего анкера и плоской стальной шайбы.

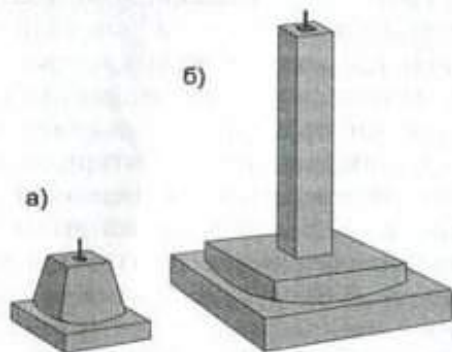


Рис. 2. Формы КФ

а — тумба; б — стойка

Шарнирное соединение является одновременно ограничителем перемещений, так как связующий анкер создает возрастающее сопротивление повороту КФ. Из конструк-

тивной схемы фундамента видно, что гравитационная сила, удерживающая КФ в состоянии устойчивого равновесия, определяет его горизонтальную жесткость и зависит от веса надфундаментного строения, высоты КФ и радиуса кривизны R пяты. Размеры кинематического фундамента зависят от величины вертикальной нагрузки, прочности используемого материала и интенсивности сейсмического воздействия.

ОЦЕНКА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ И ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

Оценка сейсмостойкости природных объектов исследований выполняется согласно принятой расчетной модели и критериям предельного состояния.

В практике эксперимента наиболее удобными критериями сейсмостойкости зданий являются перекосы этажей Δ , увязанные со степенью повреждаемости конструкций. Эти данные могут быть получены при статических и динамических испытаниях в виде силовой характеристики $R(\Delta)$, графически представленной диаграммой деформирования.

Перекосы Δ объединяют разнородную деформацию этажа и в этом смысле являются ее интегральной мерой. Максимально допустимые перекосы $[\Delta]$ соответствуют заранее заданным предельным состояниям. Например, при $[\Delta] = H/500$ (H -высота этажа) происходит только повреждение стен, а при $[\Delta] = H/200$ — обрушение перекрытий. С учетом интегральных критериев расчетная динамическая модель может быть принята в виде консоли с дискретным распределением этажных масс m_i и этажными диаграммами $R(\Delta_i)$, рис.3.

Расчетная модель в значительной мере является условной. Главное требование, предъявляемое к ней, состоит в том, чтобы она отражала динамическое состояние здания при испытании: частоту и формы резонансных колебаний, а также его диссипативную способность.

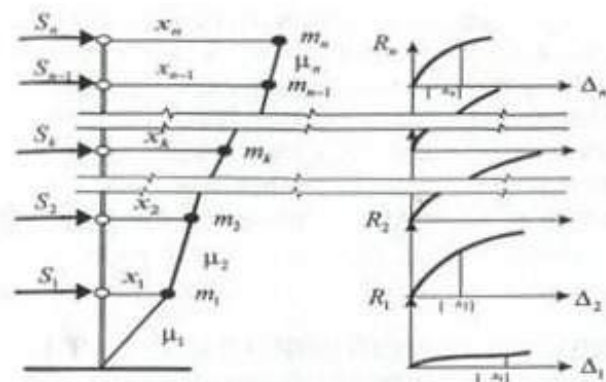


Рис. 3. Расчетная динамическая модель

Математическим отображением такой модели является система нелинейных уравнений, у которых правая часть выражена через ускорения основания $\ddot{x}_0(t)$:

$$m_i \ddot{x}_i(t) + \mu_i \dot{x}_i(t) + [R_i(\Delta_i) - R_{i+1}(\Delta_{i+1})] = m_i \ddot{x}_0(t) \quad (1)$$

где: μ_i , $R(\Delta)$ — параметры затухания и деформация этажей.

Обобщенные координаты $x_i(t)$ при численном интегрировании отражают колебание масс m_i и перекосы Δ_i во времени, что в операторной форме может быть представлено как выходные сигналы преобразования $L(t)$:

$$x_i(t) = L(t)\ddot{x}_0(t) \quad (2)$$

Рассматривая принятую модель как некоторое подобие натурального объекта, правомерность оператора $L(t)$ допускается и при входном сигнале $F(t)$, вызывающем резонансный режим колебаний:

$$x_i(t) = L(t)F(t) \quad (3)$$

Идентифицируя в (3) параметры μ_i , $R_i(\Delta_i)$ в соответствии с результатами испытаний, расчетные сейсмические колебания затем могут быть получены из (2).

Воздействия $\ddot{x}_0(t)$ в (2) задаются определенным набором акселерограмм, взятых из мирового банка данных, или реализациями нестационарного, случайного процесса, на-

иболее близко отражающими сейсмологическую ситуацию района строительства.

Методический подход к оценке сейсмостойкости остается неизменным и для любого здания, включая сейсмоизолируемое, в котором динамические особенности представлены силовой характеристикой $R_i(\Delta_i)$ нижнего уровня — этажа. Необходимыми условиями эффекта сейсмоизоляции являются:

- пониженная жесткость нижнего уровня $R_i(\Delta_i) \ll R_i(\Delta_i)$, $i \geq 2$.
- повышенная диссипативная способность этого уровня.

Под эффектом сейсмоизоляции подразумевается снижение сейсмических нагрузок в сравнении с нагрузками на здания — аналоги, т.е. без сейсмоизоляции.

Многочисленные испытания с помощью силовых отяжек, мощных вибраторов и взрывных устройств, а также расчетно-теоретический анализ сейсмической реакции этих домов свидетельствуют о высокой эффективности КФ — снижение сейсмической нагрузки достигает 3-4-х кратной величины и более.

Большая часть домов на КФ относится к многоэтажному строительству. В них снижение сейсмических нагрузок было востребовано по разным причинам, включая повышение этажности, снижение расхода материала и др.

На рис. 4 показан разрез и интерьер подвала жилого дома в городе Иркутске.

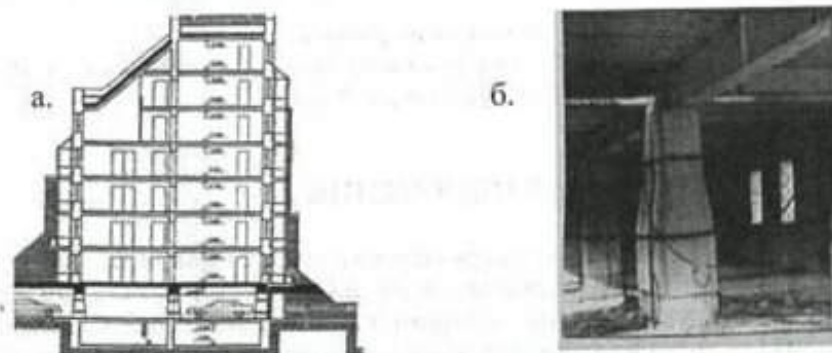


Рис. 4. Дом на КФ в городе Иркутске
а — разрез; б — интерьер подвала

Расположение КФ в подвальном помещении позволило разместить в нем автостоянку. Традиционные колонны в этом случае снижают сейсмостойкость и не рекомендуются при высокой сейсмичности. Такое же расположение КФ использовалось в г. Алматы в каркасно-кирпичных домах, с одновременным повышением их этажности, и в монолитных домах при пониженном расходе арматуры в стенах.

В малоэтажных домах без подвала конструкция фундамента упрощается. Основанием для дома иногда служит ростверк, показанный на рисунке 5 в виде вытрамбованной полости. В сельской местности малообеспеченные люди строят свои дома из глиняных блоков (самана), не рассчитанных на сейсмические нагрузки.

В этом случае минимальный набор конструктивных элементов ростверка становится достаточно эффективной защитой даже при землетрясении 9 баллов.

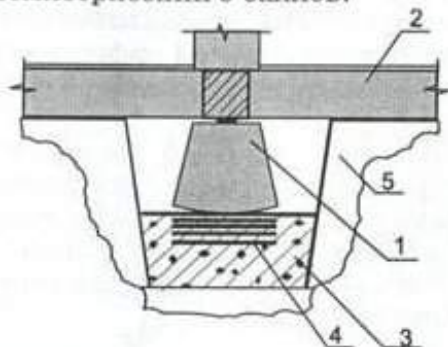


Рис. 5. Узел опирания ростверка на КФ

1 — КФ; 2 — ростверк; 3 — бетонная подушка; 4 — арматурные сетки;
5 — вытрамбованный грунт

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально-теоретические исследования КФ, в целом, подтверждают основное назначение сейсмоизоляции, как средства снижения сейсмических воздействий на определённые типы зданий массового использования. Однако, по результатам динамических испытаний многих экспериментальных объектов, особенно при повышенной интенсивнос-

ти воздействия, очевидной становится условность принятых методов расчёта их нормативной сейсмостойкости. Методы не учитывают скорость развития и длительность расчётной интенсивности, а также вероятность её превышения. Поэтому сейсмоизолирующая опора КФ представляет исключительно важный элемент в составе здания, но он нуждается в дальнейшей апробации в условиях реальных землетрясений.

Затрагивая вопросы экономической эффективности, нужно отметить, что она зависит от рациональности принятого конструктивного решения здания в целом. Из опыта проектирования многих зданий следует, что стоимость за счет КФ не повышается. Наоборот, возможность увеличить этажность, снизить объемы антисейсмических мероприятий, использовать менее прочные, но более дешевые материалы и т.д., дает ощутимые экономические выгоды.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМОИЗОЛИРУЮЩИХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ

(ранее опубликована)

Значительные повреждения и частичное разрушение зданий массового использования, к которым относятся жилые дома, отмечаются при всех землетрясениях. В мировой практике сейсмостойкими принято считать здания, в которых ожидаемые повреждения и разрушения не сопряжены с гибелью людей. После разрушительных землетрясений уцелевшие здания не восстанавливаются из-за технической сложности или больших материальных затрат.

Здания, рассчитанные на воздействие сильного землетрясения, выдерживают меньшие по интенсивности землетрясения часто без видимых повреждений. Накапливаясь со временем, они могут привести к тем же последствиям, что и сильные землетрясения. Механизм потери сейсмостойкости хорошо прослеживается во время испытаний зданий мощным вибратором. Практически, одинаковые повреждения получаются как за счёт интенсивности вибраций, так и за счёт длительности или повторяемости менее интенсивных вибраций.

В сейсмоизолируемых зданиях видимые повреждения могут не отмечаться вовсе. Энергия колебаний в этом случае расходуется, главным образом, на перемещения в уровне фундаментов, имеющих пониженную жёсткость в сравнении с вышерасполагаемыми этажами. Такой результат отмечался при испытаниях дома на КФ, даже при размахе колебаний 8 см и более.

Первые виброиспытания многоэтажного крупнопанельного дома на фундаментах КФ были проведены ещё в

70-е годы в г.Навои. Для сравнения испытывался такой же дом-аналог на ленточном фундаменте. Результаты испытаний показали большой сейсмоизолирующий эффект КФ и способность дома воспринимать длительные динамические нагрузки без отмечаемых повреждений. Дом-аналог, в отличие от сейсмоизолируемого дома, получил повреждения, не допускающие его дальнейшую эксплуатацию.

Положительный результат подтвердился при таких же сопоставительных испытаниях домов в Алматы, что позволяло рекомендовать это решение для экспериментального строительства во всех других районах, подверженных землетрясениям.

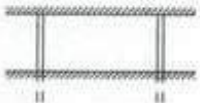

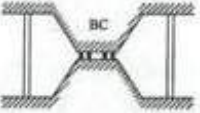
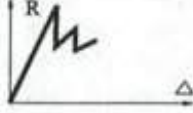
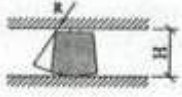
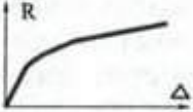

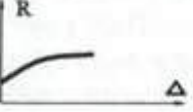
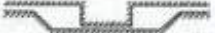
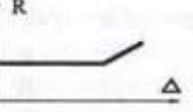

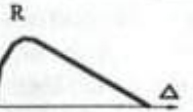
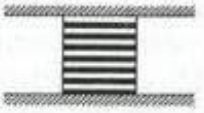

В настоящее время имеется немного конструктивных решений сейсмоизоляции, известных как возможные варианты. Выбор того или иного варианта, по-видимому, непростая задача для пользователя. Имея многолетний опыт в области исследований различных решений такого типа, мы приводим здесь свои соображения по их общей оценке, исходя из практики проектирования и строительства сейсмостойких зданий.

Ещё раз отметим, все сейсмоизолирующие фундаменты в виде подвижных опор в основании предназначены для снижения сейсмических нагрузок на здания и сооружения. Отличаясь пониженной горизонтальной жёсткостью, такие опоры снижают деформации здания и нагрузки на него за счёт собственных смещений. В этом случае, эффект сейсмоизоляции зависит от силовой характеристики опоры $R(\Delta)$, устанавливающей связь горизонтальной силы R с перемещением Δ . Снижение $R(\Delta)$ способствует повышению эффекта сейсмоизоляции. В этом случае надёжность сейсмической защиты всего здания в большей мере зависит от способности фундаментов воспринимать значительные перемещения, не разрушаясь.

Согласно сложившимся представлениям, более простыми при современных строительных технологиях являются сейсмоизолирующие устройства опорного типа, в отличие от устройств, подвешенных на тросах. Наиболее известные из них, когда-либо использованные в строительстве, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Некоторые решения сейсмоизоляции

N	CONSTRUCTIVE SCHEME	AT FIRST USED	DIAGRAM DISPLACEMENT
1		USA 1936	
2		RUSSIA 1967	
3		KAZAKHSTAN 1966	
4		KAZAKHSTAN 1972	
5		RUSSIA 1976	
6		RUSSIA 1976	
7		NEW ZEALAND	

1. Упругие стойки в нижних этажах зданий – «гибкий этаж» раньше других начали использовать как сейсмоизолирующее устройство ещё в 30-е годы прошлого века. Положительная роль «гибкого этажа» отмечена была при землетрясениях невысокой интенсивности, при которой деформация стоек не превышает линейно-упругую стадию. При пластических деформациях узловые усилия в стойках не перераспределяются на другие конструкции. Поэтому при высокой интенсивности в здании, в первую очередь, разрушаются стойки «гибкого этажа», что приводит к обрушению самого здания. Это убедительно показали разрушительные землетрясения в Турции. Кроме того, работа стоек в упругой стадии связана с большей вероятностью резонансных режимов, что тоже приводит к развитию больших усилий и пластических деформаций даже при средней интенсивности землетрясения. Здесь мы можем сослаться на землетрясение в г. Скопле, Югославия, 1963 год.

2. С целью снижения резонансных деформаций стоек используются конструктивные энергопоглотители, повышающие диссипативную способность здания за счет «вязкости», либо разрушения самих энергопоглотителей. Последние принято рассматривать как выключающиеся связи, которые при разрушении приводят к резкому снижению жесткости и резонансной частоты колебаний здания. Однако, разрыв связи приводит и к дополнительному импульсу инерционных сил на объект, оценка которого не поддается учёту. К неудобствам энергопоглотителей следует также отнести затраты средств на их восстановление.

3. Идея «гибкого этажа» сохраняется при замене упругих стоек кинематическими (КФ) гравитационного типа, допускающими большие перемещения, не разрушаясь. Кинематическая схема такой опоры представлена на рис. 1.

Для построения силовой характеристики используется условие равновесия моментов – опрокидывающего от силы S и удерживающего от веса P :

$$M_{\text{опрак}} = S(H + \Delta H);$$

$$M_{\text{удерж}} = P t + (m_1 + m_2),$$

из равенства которых, при $S=R(\Delta)$, следует:

$$R(\Delta) = (P t + (m_1 + m_2)) / (H + \Delta H), \quad (1)$$

где $R(\Delta)$ – силовая характеристика в уровне опор;
 H – высота опоры;
 ΔH – высота подъема;
 t – плечо вертикальной силы, создающей удерживающий момент;
 $m_1 + m_2$ – реактивные моменты при смятии в шарнире и на опорном основании.

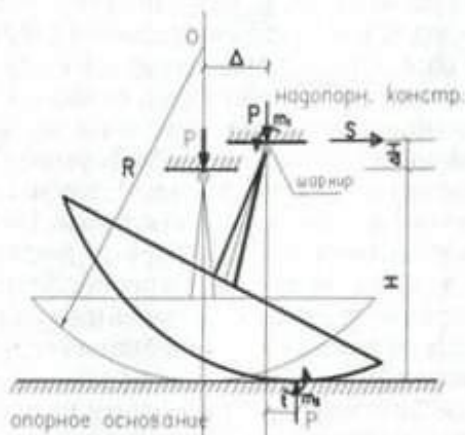


Рис. 1. Распределение сил в опоре при кинематическом перемещении

Если плечо силы, создающий удерживающий момент, выразить через смещение Δ при заданном радиусе кривизны R и высоте H , а также пренебречь некоторыми величинами второго порядка малости, получим:

$$R(\Delta) = [P \cdot (R-H) / H^2] \Delta + (m_1 + m_2) / H \quad (2)$$

Графическое построение силовой характеристики показано на рис. 2а. Первая часть формулы отражает линейную зависимость $R(\Delta)$ без учета физических свойств элементов опоры и узлов их сопряжения. Ее графическое отображение представлено диаграммой перемещений $ДП_1$. Угол наклона $ДП_1$ или жесткость на линейном участке, подобно математическому маятнику, не зависит от массы здания M , поэтому, при абсолютной твердости материала опоры и идеальном шарнире, круговая частота колебаний ω такой системы с

грузом P зависит только от геометрических параметров R и H :

$$\omega = \sqrt{g(R-H) / H}$$

где g – ускорение свободного падения.

Соответственно, период свободных колебаний равен:

$$T = 2\pi \cdot H / \sqrt{g(R-H)} \quad (3)$$

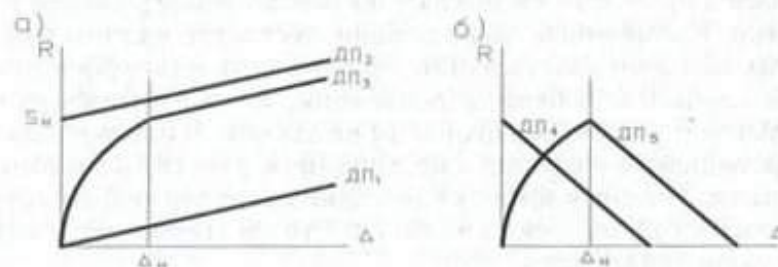


Рис. 2. Построение диаграммы перемещений:
 а) для опоры 3; б) для опоры

Следствием $R=H$ и $T=\Delta$ является отсутствие устойчивого равновесия (безразличное равновесие), при котором следует ожидать накопление остаточных смещений. Рассматривая такие смещения как нежелательные, всегда принимается $R > H$, создающие подъем ΔH и $M_{удерж}$.

Вторая часть формулы (2) учитывает влияние реактивных моментов m_1, m_2 , повышающих начальную жесткость опоры. На рис. 3 показан механизм образования m_1 в зависимости от размеров плитки h неидеального шарнирного узла.

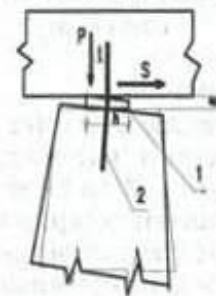


Рис. 3. Шарнирное соединение опоры 3:
 1 – плитка; 2 – связующий анкер

Момент m_2 зависит от твёрдости материалов на границе перекатывания. С учетом моментов m_1, m_2 начало движения теоретически становится возможным при начальной силе $S_H > (m_1 + m_2) / H$, и силовая характеристика должна иметь вид ДП₂. Но в результате локальных деформаций в указанных узлах, накапливаются нелинейные перемещения $\Delta_{нл}$, и диаграмма принимает окончательный вид ДП₃. Нелинейный характер изменения жесткости на начальном участке диаграммы практически исключает резонансные режимы колебаний. Кроме этого, повышенная жёсткость на этом участке (угол наклона касательной) делает опору малоэффективной при слабых колебаниях основания, а также малочувствительной к ветровым нагрузкам на здание. В случае больших перемещений жесткость на линейном участке во много раз меньше. Поэтому эффект снижения нагрузок возрастает при сильных сейсмических толчках, что соответствует основному назначению опор.

4. Силовая характеристика для опоры 4 имеет вид ДП₂, как для опоры N3, но без нелинейного участка. Количественные отличия между ними вызваны заменой моментов $m_1 + m_2$ на силы трения, а $M_{удерж}$ определяется кривизной опорной поверхности. В целом, по своим кинематическим свойствам эти две опоры идентичны.

5. Скользящая опора 5 может быть отнесена к гравитационному типу лишь условно, при $R=H$. В пределах рабочей площадки силовая характеристика определена силой сухого трения, зависящего от материала скользящих поверхностей, и формула (1) принимает вид:

$$R(\Delta) = m_2,$$

где m_2 — сила сухого трения.

Возможная гравитация при смещениях, превышающих размеры рабочей площадки, рассматривается как ограничитель перемещений, который за счет угла наклона снижает ударные эффекты. Влияние ударных эффектов не поддается учету и рассматривается как запредельное или аварийное состояние. При этом следует принимать во внимание и ударные эффекты обратного действия, когда опора возвращается на горизонтальную поверхность.

К особенностям скользящих опор 4, 5 следует отнести выбор материала скользящих поверхностей, от которого зависит сейсмическая нагрузка на здание. При небольшой силе трения и высоком эффекте сейсмоизоляции возможны накопления остаточных смещений при слабой сейсмичности и даже при ветровом воздействии, что создает неудобства в эксплуатации зданий.

6. Опора, в виде свободно стоящих столбиков, проявляет сейсмоизолирующие свойства, но отличается деградирующей силовой характеристикой, представленной диаграммой ДП₄, рис. 2б. С учётом нелинейных деформаций смятия, окончательный вид диаграммы принимает вид ДП₅. В отличие от ДП₃, на этой диаграмме линейный участок ниспадающий, что делает опору неустойчивой в случае возрастающей или продолжительно действующей силы $S \geq S_H$.

По этой причине в конструктивном решении предусматриваются упоры-ограничители. Однако, полезность упоров для ограничения перемещений весьма сомнительна, поскольку, в случае соударений с опорой, возникают дополнительные импульсные воздействия на здание. Кроме того, сама оценка устойчивости на ниспадающем участке остается методически не исследованной. Однако опора проста в исполнении и при невысокой интенсивности сейсмического воздействия может проявлять сейсмоизолирующие свойства.

7. Резинометаллические опоры (РМО) в виде многослойных столбов из листов резины (каучука) и металла со свинцовым сердечником, очевидно, является эффективным средством сейсмоизоляции, получившим признание в Японии, США и Китае и некоторых других странах. Простая конструктивная форма РМО делает их удобной для применения в зданиях, вместо упругих стоек "гибкого этажа". В то же время имеется ряд причин, ограничивающих их распространение в районах с менее развитой строительной технологией. Две из них мы относим к наиболее существенным:

— высокая стоимость, связанная с заводским изготовлением, не позволяет их использование в массовом строительстве, тем более в местах, удалённых от завода-изготовителя;

— работоспособность РМО рассчитана на срок не более 40–50 лет, в связи с потерей упругих свойств резины в зависимости от её качества.

Ряд землетрясений последних лет свидетельствуют об актуальности проблемы сейсмоизоляции сооружений во многих странах мира. С одной стороны, уже имеется опыт в области эксперимента, расчета и проектирования сейсмоизолируемых зданий, который позволяет сравнивать имеющиеся решения сейсмоизоляции в конкретных условиях исполнения. С другой стороны, сейсмоизоляция, как новое научное направление, не имеет единой методологии научно-технического обоснования, позволяющего делать объективные выводы по полезности того или иного решения и, соответственно, о его целесообразности.

Под методологией подразумевается следующее.

1. Методы теоретических и экспериментальных исследований, включая построение расчетных моделей воздействия и объектов исследований.

2. Отработка конструктивной реализации сейсмоизолирующей опоры с учетом существующего технического уровня строительного производства.

3. Опыт проектирования экспериментальных зданий, включая проверку работоспособности сейсмоизолирующей конструкции в условиях реальных землетрясений.

Из перечисленных пунктов следует вывод, что работа над любым новым конструктивным решением требует длительного времени и больших материальных затрат. Поэтому очень немногие из этих решений, по-видимому, могут найти применение в строительстве.

Кинематические опоры №3, таблица 1, условно названные КФ, исследовались на протяжении нескольких десятилетий, в соответствии с методологией, перечисленной в п.1 ч. 3. В них участвовали специалисты в области теории сейсмостойкости и эксперимента, а также проектирования зданий, что позволило разработать временные нормативные правила расчёта и проектирования [2]. Простое исполнение и невысокая стоимость делает КФ при массовом строительстве более предпочтительными, чем другие сейсмоизолирующие решения во многих сейсмоопасных регионах. Подтверждением тому может служить довольно обширная география их использования, включая регионы Камчатки, Сибири, Казахстана, Узбекистана.

На рис. 4 показан один из домов в Алматы с гаражами в подвальном помещении. Дом превышает ограничения по этажности, установленные для площадок с повышенной сейсмической опасностью. Но при этом, он отличается и повышенной комфортностью внутренней планировки.



а)



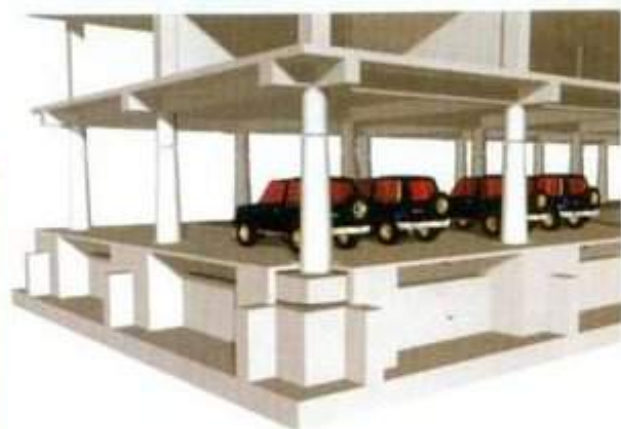
б)

Рис. 4. КФ в многоэтажных зданиях:
а) дом на КФ в Алматы; б) фрагмент подвала



Дома на КФ в стадии завершения и готовые к сдаче

На строительстве микрорайона



Конструкция бесподвального здания с КФ на первом этаже (проект)



Новый вид КФ рассчитанного на нагрузку 1000 т. Для многоэтажных домов



Конструкция многоэтажного здания с подвалом и КФ на первом этаже (проект)

К СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАРКАСОВ С ДИАФРАГМАМИ ЖЁСТКОСТИ

Здания, построенные с использованием железобетонных каркасов, обладают рядом достоинств, касающихся дизайна внутренних помещений и технологической свободы в планировке. Вместе с тем, пониженная сейсмостойкость каркасных зданий подтверждается рядом землетрясений. Она объясняется недостаточной степенью статической неопределённости расчетной схемы несущего каркаса, обеспечивающей перераспределение усилий в случае перегрузки отдельных конструктивных элементов. Увеличение сечений стоек и ригелей, с целью получения некоторого запаса прочности, снижает свободное пространство и не дает ожидаемого эффекта сейсмостойкости, поскольку вместе с прочностью возрастает жесткость каркаса и связанная с ней сейсмическая нагрузка.

В настоящее время в сейсмостойком строительстве находят применение монолитные железобетонные каркасы (иногда безригельные) с диафрагмами жесткости (ДЖ), позволяющие в какой-то мере сохранять свободу в планировке и повышать этажность зданий.

Техническая идея этого решения заключается в разделении нагрузок особого сочетания: горизонтальные сейсмические нагрузки передаются на ДЖ, а каркас воспринимает, в основном, вертикальные нагрузки.

Такое разделение качественно меняет динамическую реакцию здания при землетрясении и может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на сейсмостойкость, что вызывает необходимость в более тщательном инженерном анализе расчетной модели.

Под ДЖ подразумевается протяженная в плане железобетонная стена в пределах одного, двух и более пролётов на всю высоту здания. К свойствам новой расчетной модели

следует отнести ее повышенную, в сравнении с каркасом, жесткость, что приводит к возрастанию сейсмических сил. Сейсмостойкость здания при этом фактически зависит от несущей способности ДЖ, повреждения которых и связанные с ними нелинейные деформации должны рассматриваться как недопустимые.

В этом случае снижение сейсмической нагрузки, предусмотренные действующим СНиП на нелинейность деформаций, следует считать необоснованным, поскольку это означало бы наличие поврежденных диафрагм. С другой стороны, увеличение сейсмической нагрузки без этого снижения, приведет, к громоздким конструктивным решениям здания в целом.

В этом случае КФ является хорошим дополнением для повышения сейсмостойкости каркасных зданий с ДЖ, позволяющим не только эффективно снижать сейсмические нагрузки, но, что тоже очень важно, равномерно распределять их в основании за счет КФ и жесткого диска нижнего перекрытия.

К положительным свойствам КФ следует отнести и их способность смещаться относительно вышерасположенных конструкций, что предохраняет здание от накопления повреждений при длительных или многократных колебаниях основания при землетрясении.

КФ позволяют решать еще одну важную задачу, связанную с организацией технологически свободных нижних этажей. Под технологически свободными подразумеваются этажи с достаточно большой свободной площадью, не стесненной несущими стенами. Больше всего под это определение подходят, как выше отмечалось, каркасные решения, позволяющие планировку увязывать с высотой и шагом колонн каркаса. Такая планировка удобна для размещения магазинов, офисов, клубов и пр. Это особенно касается зданий, построенных в городах на магистральных улицах с учетом общего ансамбля. Количество несущих стен в них сводится к минимуму, а наружные стены часто представлены витражами, не обладающими прочностью.

Свободная площадь часто нужна и в подвальной части жилых домов, где могут размещать гаражи или автостоянки.

При наличии ДЖ свободная планировка во многом стеснена и, в этом случае, наиболее безопасным решением могут служить кинематические опоры КФ. Их расположение на первом этаже в виде отдельно стоящих стоек позволяют значительно снизить величину сейсмической нагрузки, независимо от количества ДЖ (рис. 3).

Одновременно снижается нагрузка на ниже располагаемые конструкции, что позволяет, например, в подвальном помещении обходиться меньшим количеством ДЖ. Такое снижение полезно и при слабых грунтах в основании, усиливается сваями. Сваи предназначены, в основном, для восприятия вертикальных нагрузок, поэтому с учетом горизонтальных сил всегда предусматривается дополнительное количество свай. Примером тому может служить строительство многоэтажных домов на КФ в Новокузнецке, позволившее значительно сократить количество свай за счет снижения сейсмической нагрузки.



Рис. 3. Использование КФ в нижнем уровне многоэтажного здания.

Не менее интересный эксперимент имел место в г. Алматы, где КФ разместили на втором этаже 10-и этажного здания, предназначенном для технических нужд.

На рис. 4 показаны поперечный и продольный разрезы расчетной модели этого здания (проект АО «СКИФ», г.

Алматы). В нём, в результате снижения сейсмической нагрузки, в нижних этажах принято минимальное количество ДЖ.

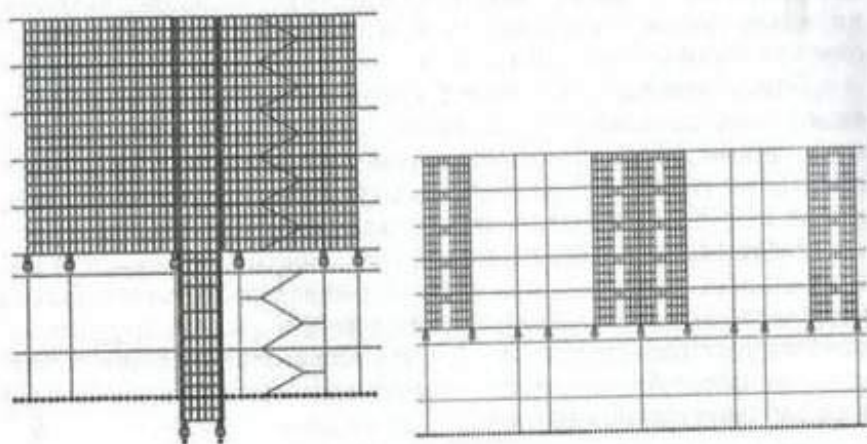


Рис. 4. Поперечный и продольный разрезы здания с ДЖ и расположением КФ на техническом втором этаже

Дом, согласно условиям договора с заказчиком, должен был испытываться вибратором В-3, в присутствии специалистов других стран. К сожалению, испытания не проводились и крайне необходимые сведения о динамических характеристиках нового решения отсутствуют.

Касаясь методики нормативного расчета такого здания, следует пояснить представление КФ в расчетной пространственной модели. На рис. 5 они изображены шарнирными стойками с упругим ограничением верхнего конца $C_{кф}$ [1]. За счёт подвижности ограничителя снижается общая жёсткость верхнего строения, связанная с увеличением его периода колебаний T в K_s раз, табл. 2 [1], что приводит, с учётом всех нормативных ограничений, к уменьшению нормативных сил передаваемых с верхних этажей.

На нижний уровень нагрузка с верхних этажей передаётся через недеформируемую стойку со скользящим ограничителем поворота.

Коэффициенты K_s в [1] получены сопоставлением сейсмической реакции расчётных моделей: с жёсткими и кине-

матическими опорами. Сейсмические воздействия принимались в виде ускорений основания представленных множеством (более 700) искусственных акселерограмм и записями землетрясений из мирового банка данных, а также разночастотными гармониками и импульсами различной конфигурации.



Рис. 5. Расчётное представление КФ в составе расчётной модели здания

С учётом нормативных ограничений эффект снижения сейсмической нагрузки, как правило, приходится занижать, что рассматривается в запас сейсмостойкости. Одновременно появляется скрытый эффект, связанный со способностью здания выдерживать повторные воздействия без накопления повреждений.

Литература.

1. Инструкция по проектированию зданий с использованием сейсмоизолирующих ф-тов КФ. РДС РК 07, г. Алмата, 1998 г.

К ВОПРОСАМ ИНЖЕНЕРНОЙ ОЦЕНКИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Большинство людей, проживающих в сейсмически опасных районах, под сейсмостойкостью своих домов представляют их прочность, позволяющую выдерживать землетрясения без повреждений, во всяком случае, без значительных повреждений.

Действительно, при проектировании дом рассчитывается на воздействие прогнозируемого для района строительства наиболее сильного землетрясения, называемого расчётным сейсмическим воздействием. Под сейсмостойкостью в этом случае подразумеваются допустимые усилия в основных несущих конструкциях, превышение которых приводит к опасным для жизни людей разрушениям. Предполагается, что, если все другие сейсмические воздействия по интенсивности не превысят расчётное воздействие, усилия в конструкциях будут всегда в пределах допустимых, исключая повреждения. Таким образом, соблюдение нормативных требований обеспечивает дому сейсмостойкость и безопасное проживание его жителям.

Однако, получаемые усилия в конструктивных элементах являются всего лишь некоторым приближением к реальному, что объясняется исходными предпосылками к расчётному сейсмическому воздействию и расчётным моделям здания. Сейсмическая нагрузка, представленная в виде неизменных во времени сил, определяется в соответствии с собственными формами колебаний здания, исходя из жёсткости неповреждённых конструкций и заданной интенсивности землетрясения.

На самом деле, непредсказуемое превышение расчётной интенсивности за время землетрясения всегда снижает жёсткость здания в результате накапливаемых повреждений,

особенно при длительном воздействии. По нормативным правилам сейсмическая нагрузка принимается без учёта фактора времени, то есть при неизменной жёсткости конструкций, заранее сниженной за счёт ожидаемых повреждений.

Представление сейсмической нагрузки во времени, в виде реализаций некоего случайного процесса, или записей прошлых землетрясений тоже не решает проблем, связанных с изменением жёсткости, хотя современные вычислительные средства могли бы проследивать постепенное исключение разрушаемых элементов конструкций. Но при этом остаётся неопределённой последовательность повреждений элементов, в зависимости от случайного сочетания переменных во времени сейсмических нагрузок с вертикальными нагрузками, распределёнными в здании тоже случайным образом.

Ответы на все эти вопросы не могут быть однозначными, из-за чего оценки сейсмостойкости по кодам разных стран имеют качественные и количественные отличия.

В этой связи невольно напрашивается вопрос, что даёт расчёт, строго выполняемый с соблюдением нормативных правил, нужен ли он?

Если его сравнивать с расчётами тридцатилетней давности, то, благодаря современным вычислительным средствам, расчёт намного приближен к точности вычислений, позволяющей оценивать усилия в конструкциях любой сложности от различных нагрузок, включая сейсмическую. Её распределение в конструкциях в сочетании с другими нагрузками позволяет инженеру в соответствии со своим опытом и интуицией выявлять наиболее опасные места концентрации усилий и принимать решения даже не предусмотренные строительными нормами и правилами. В этом смысле, польза расчётов очевидна. Учёт сейсмической нагрузки в любом случае приводит к усилению конструкций и повышению сейсмостойкости здания.

Что касается нормативных правил в целом, то они в дальнейшем не могут не претерпевать изменения по мере улучшения средств и методов исследований.

Но уже сейчас к недостаткам действующих правил можно было бы отнести отсутствие разделов, связанных с защитой зданий от повторных землетрясений, меньших по интенсивности расчётных и негласно отнесённых к неопасным. В то же время считается, что два-три землетрясения одинако-

вых по интенсивности приводят к тем же последствиям, что одно землетрясение на балл выше. В этом случае усиление повреждённых зданий необходимо уже после первых сейсмических толчков с тем, чтобы здание было готовым выдерживать расчётное воздействие. В противном случае для каждого здания нужно указывать, сколько и какой интенсивности может оно выдерживать, хотя расчётами всё это при современном представлении о сейсмостойкости подтвердить невозможно.

Однако, более часты случаи множественных сейсмических воздействий, чаще всего незначительной интенсивности, не вызывающих особого беспокойства жителей. Такие воздействия тоже приводят к состоянию неготовности здания к расчётному воздействию, но в течение длительного срока, исчисляемого годами или десятилетиями. В качестве примера можно сослаться на крупнопанельные дома в Петропавловске-Камчатском, потребовавшие усиления стен с помощью монолитного железобетонного ограждения. Другим примером могут служить кирпичные дома в Казани, где с некоторых пор стали проявляться слабые сейсмические толчки техногенного происхождения, вызывающие трещины в стенах многих домов. В прессе, в связи с этим уже не раз поднимался вопрос защиты жилищного фонда города.

Всё вышесказанное неоднократно подтверждалось результатами испытаний кирпичных и крупнопанельных домов с использованием вибратора. Повреждения в них отмечались даже при невысокой интенсивности нагрузки, только лишь за счёт её длительного, либо многократного действия.

Становится очевидным, что наиболее эффективной и экономически выгодной защитой в таких случаях являются фундаменты сейсмоизолирующего типа, роль которых не только в снижении расчётного сейсмического воздействия, но и в почти полной нейтрализации слабых воздействий. Сейсмоизоляция продлевает "жизнь" домов и, что не менее важно, снижает психологическое напряжение у жителей во время землетрясений. Поэтому вывод из такого утверждения может быть только один: некоторые типы зданий вообще без сейсмоизоляции возводить не следует.

Вопрос лишь в выборе конструктивного решения сейсмоизоляции, учитывающего сложность исполнения, стоимость, степень исследованности, техническую характерис-

тику. Основные решения этого типа, когда-либо использованные в строительстве, приведены в [1].

Среди них решение №3, названное КФ, выделяется по длительности исследований, в которых на протяжении более трёх десятков лет принимали участие специалисты в области теории, расчёта, эксперимента и проектирования, что позволяет его считать наиболее проверенным решением. Оно включало, помимо теоретических исследований, не одно, а много испытаний натуральных зданий на КФ в сопоставлении с такими же зданиями-аналогами на обычных фундаментах. Из них пять с использованием вибратора В-3, позволявшего доводить здания-аналоги до потери несущей способности. Такие испытания в условиях новой России проводить уже не будут из-за слишком большой стоимости экспериментов.

Значительный объём внедрения свидетельствует о доступности КФ в самых отдалённых местах страны, а длительный срок использования позволял выявлять и исправлять допускаемые ошибки в проектировании, некоторые из которых проявились только в результате воздействий землетрясений большой интенсивности.

Всё это сделало КФ наиболее востребованной сейсмоизолирующей конструкцией среди других отечественных конструкций этого типа. Тем не менее, для последователей в области сейсмоизоляции остаются вопросы, связанные с совершенствованием форм КФ в зданиях нового конструктивного исполнения. По этой причине работа с КФ нуждается в продолжении.

В настоящее время в строительстве находят применение резинометаллические опоры РМО (№6, табл.1), имеющие, как и КФ, давнюю историю своего появления. Благодаря своим кинематическим особенностям их можно было бы отнести к наиболее эффективной сейсмоизоляции, но недолговечной из-за старения резины. По некоторым сообщениям, срок использования РМО сейчас увеличился до 50-60 лет и в перспективе, по-видимому, может быть ещё большим. Но препятствием для повсеместного или массового применения таких опор остаётся высокая стоимость, связанная с заводским изготовлением, что при массовом строительстве делает их недоступными, особенно, в местах, удалённых от заводов-изготовителей.

Касаясь практического использования сейсмоизоляции в строительстве, нельзя обойти важный вопрос, связанный с областью её применимости. Многочисленные расчёты свидетельствуют, что эффект сейсмоизоляции проявляется лишь в зданиях жёсткого типа, период собственных колебаний которых не более 0,7 сек. В гибких зданиях повышенной этажности эффект практически не проявляется.

Вся экспериментальная часть исследований связана с испытаниями домов не превышающих 9 этажей. Рассматривая эксперимент как основной раздел исследований, необходимый для подтверждения сейсмоизолирующего эффекта, такое ограничение этажности для опор любого вида можно было бы считать разумным.

Что касается КФ, то в работе над ними с самого начала решалась задача защитить частные саманные дома невысокой прочности в сейсмических районах Казахстана. Дальнейшие исследования связывались с жилыми домами общего пользования, с целью повышения этажности, либо снижения расхода материалов. Большая потребность имеется в домах с технологически свободными первыми этажами, которые часто выполняются в рамно-каркасном решении, снижающем сейсмостойкость здания. В этом случае сейсмоизоляция становится особенно полезной.

Несколько слов следует добавить относительно методов расчёта зданий с использованием сейсмоизоляции, которые могут быть представлены в инструкциях по применению конкретной сейсмоизолирующей конструкции. Эти методы в любом случае приходится привязывать к действующим нормативным правилам с некоторым занижением ожидаемой эффективности. Что касается КФ, технические условия по их использованию изложены в [2].

Литература.

1. *Черепинский Ю.Д.* Сравнительный анализ сейсмоизолирующих фундаментов опорного типа. «Сейсмостойкое строительство, безопасность сооружений», №5, г.Москва, 2004 г. (статья 2).

2. Инструкция по проектированию зданий с использованием сейсмоизолирующих ф-тов КФ. РДС РК 07, г. Алма-Ата, 1998г.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ СЕЙСМОИЗОЛИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ

Прежде, чем затрагивать эту, ставшую актуальной тему, хотелось бы уточнить само определение сейсмоизоляции и в этой связи кратко коснуться истории её рождения.

Дома с "гибким этажом", в которых вместо жёстких стен на первом этаже возводился каркас $R(\Delta)$ с лёгким заполнением, получил известность в США ещё в 30-е годы прошлого столетия. Упругие стойки каркаса рассматривались как пониженная связь здания с грунтовым основанием, что служило объяснением отмеченного в каких-то случаях эффекта снижения сейсмических нагрузок.

Как средство сейсмозащиты "гибкий этаж" также использовался в ряде других стран, пока не было отмечено и его негативное влияние. В некоторых случаях, резонируя с сейсмическим воздействием, он становился причиной обрушения всего здания. Упругая связь с основанием нуждалась либо в повышенной прочности, либо в эффективных энергопоглотителях.

В подтверждение такого мнения можно сослаться на стальные пружинные амортизаторы А.Ф.Зеленькова, построившего с их использованием дом после Ашхабадского землетрясения, и появление в более позднее время в Японии резинометаллических опор со свинцовыми энергопоглотителями.

Но уже в начале прошлого столетия малоизвестными авторами предлагались различные решения с более эффективной изоляцией здания от грунтовых колебаний. Это достигалось за счёт разного вида подвижных опор с использованием скользящей основы, катков, шаров, подвесок на гибких тягах. Все они оставались на уровне предложений, не имея достаточного научно-технического обоснования.

Фундаменты КФ (КазНИИССА, г. Алматы) стали первой такой попыткой, где впервые был использован термин сейсмоизоляция зданий, подразумевавший, в отличие от упругой амортизации, кинематические принципы снижения инерционных нагрузок.

Их нестыковка с методами расчёта зданий, установленных СНиП, оказалась основным препятствием для внедрения в сейсмостойком строительстве, потребовавшего длительного времени на исследования и участия в них специалистов различного профиля. Результатом исследований в Казахстане стали первые руководящие материалы в виде Инструкции, в какой-то мере отвечающей требованиям сейсмических СНиП. Но об этом будет сказано ниже.

Поводом к настоящему изложению послужила статья [1] с теоретическим анализом сейсмоизолирующих опор, имевшим место в строительстве. Автор одной из них, связавший когда-то свою профессиональную деятельность с расчётами и проектированием сейсмостойких зданий, а также проблемой сейсмоизоляции, посчитал необходимым высказать некоторые критические замечания по поводу сделанных в [1] выводов.

Первое, что необходимо сказать, оценка сейсмоизолирующих решений с использованием методов теоретической механики, практически непригодна в строительном проектировании. Обычно она выполняется на упрощённых, точнее, отвлечённых расчётных моделях без учёта их физических свойств и взаимосвязи с другими конструкциями в составе здания. Такая оценка даёт весьма отдалённое представление о полезности этих решений в зданиях.

Теоретическая оценка эффекта КФ (названных в [1] опорами Ю.Д. Черепинского) когда-то тоже выполнялась для упрощённой одно-массовой модели, исходя из соотношения кинетической и потенциальной энергий (уравнения Лагранжа II рода). Но это было, как уже упоминалось, первое научное исследование в новой для строительной практики области. Поэтому полученный эффект снижения инерционных нагрузок оказался пригодным только для диссертации, но не мог быть использован в рабочем проектировании.

Представление о работе конструкций при землетрясении во многом корректируется результатами испытаний на-

турных зданий статическими и динамическими нагрузками высокого уровня по величине и длительности действия. Приходится убеждаться, что не только методы теоретической механики становятся непригодными из-за больших деформаций конструкций, но и методы строительной механики требуют значительной корректировки с учётом нелинейного характера этих деформаций.

Такие деформации точному учёту не поддаются в составе сложного комплекса составных частей здания, но оказывают на сейсмическую реакцию большое влияние, которое сейсмические СНиП учитывают условно. Но о каких-либо изменениях в СНиП, связанных с нелинейностью, говорить не приходится.

Учитывать ещё одну, менее значительную, нелинейность при совмещении кинематики опор с упругопластическими деформациями конструкций тоже не имеет смысла. Основное назначение опор в снижении инерционной нагрузки, о котором методами теоретической механики сказать вообще ничего нельзя.

Поэтому основной метод исследований связан с экспериментами, включавшими испытания зданий различной этажности нагрузками, сопоставимыми по интенсивности с ожидаемыми при землетрясениях, либо испытания самими землетрясениями.

Вот почему на исследования КФ потребовались даже не годы, а десятилетия (более 30 лет) и участие специалистов различного профиля: математиков-теоретиков, экспериментаторов, конструкторов. Вряд ли подобная по объёму и стоимости работа возможна когда-либо в будущем при изменившемся государственном устройстве.

Приведённые выше соображения, безусловно, учитывались в [2], где представлен краткий инженерный анализ наиболее известных сейсмоизолирующих решений. Среди них опорам-фундаментам КФ, имевших, сравнительно с другими решениями, наибольший объём исследований и применения в городах б. СССР, отводится несколько больше места. Но все другие решения, с учётом определённых ограничений, подтверждают способность снижать сейсмическую нагрузку. Ниже речь пойдёт об опорах КФ и об их действительном эффекте при горизонтальных сейсмических воздействиях.

Несмотря на достаточное число публикаций по результатам исследований, работа КФ трактуется авторами [1] неверно. Они делают свои выводы исходя из неограниченных по амплитуде колебаний отдельно стоящей опоры, не учитывая шарнирное соединение. Тем самым отмечается аналогия КФ с опорой в виде свободно стоящего столбика. Так ли это?

Этот вопрос не может остаться без ответа, так как он в какой-то мере связан с практикой строительства и нуждается в разъяснениях.

В авторском свидетельстве (1965 г.) опора характеризуется двумя основными признаками: сферической поверхностью снизу и шарнирным соединением сверху, как показано на рис. 1, взятом из [2].

Оптимальный выбор размеров опоры и конструкции технического шарнира зависит от расчетных нагрузок. По этой причине технический шарнир выполняется в виде стальных плиток, обеспечивающих опоре пространство, достаточное для поворота. При этом, обязательным элементом шарнира является связующий анкер в центре, выполненный из мягкой стали.

Так называемый "рабочий столбик" можно было бы усматривать в составе опоры, если его ширину сверху представить по размерам технического шарнира, а внизу размерами подвижной площадки смятия при перекатывании. Однако, приближение площадки смятия к краю опоры не допускается, исходя из условия её прочности. Кроме того, размеры опоры, как любой другой, диктуются ещё и расчётными смещениями в составе здания.

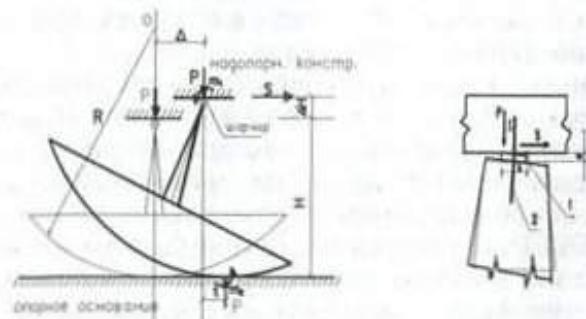


Рис. 1. Кинематическая схема опоры и технического шарнира

Таким образом, опора КФ, с учётом шарнира, может быть сравнима только с опорой на скользящем элементе, при замене трения качения трением скольжения. Против этой опоры у авторов [1] аргументов нет.

Далее, в расчётах здания используется не механизм движения опоры, а силовая диаграмма перемещений $R(\Delta)$, которая характеризует опору как условно упругую стойку, за счёт способности возвращаться в исходное положение. Такие диаграммы, позволяющие оценивать возможности конкретного решения с позиций строительной механики, а не кинематики.

Используемые программные комплексы, типа "Лира", могут учитывать только взаимодействие упругих тел, в том числе заданное нелинейной зависимостью $R(\Delta)$, но не учитывают движения. А без использования таких комплексов здания не проектируются.

Не повторяя выкладок, приведенных в [2], по построению силовой диаграммы перемещений $R(\Delta)$, и соответствующее ей изменение сейсмической нагрузки S , воспользуемся её конечным выражением:

$$R(\Delta) \Delta S \Delta [P \cdot (R - H) \Delta H^2] \cdot \Delta + (m_1 + m_2) \Delta H \quad (1)$$

где: P – вес здания; Δ – смещение опоры относительно основания;

R – радиус нижней поверхности опоры; H – высота опор;

m_1, m_2 – моменты в техническом шарнире и на опорной поверхности.

Условно упругая характеристика $R(\Delta)$ в силу своей незначительной величины и согласно нормативной методике расчёта, даёт значительный эффект снижения сейсмических нагрузок. В реальных условиях снижение нагрузки регулируется соотношением R, H , которое в случае равенства определяет максимальное значение нагрузки при любой как угодно большой интенсивности колебаний грунтового основания, являясь в некотором смысле для здания ограничителем этих нагрузок:

$$S_1 \Delta (m_1 + m_2) \Delta H \quad (2)$$

Нетрудно представить, что при допущении идеального шарнира и абсолютной твёрдости материала опоры горизонтальные колебания грунта, согласно (2), оказывать влияние на здание не будут. Поэтому назначение экспериментальных работ и состоит в выборе параметров R , H и m_1 , m_2 , обеспечивающих достаточный динамический эффект и прочность опоры при ожидаемом смещении. Под динамическим эффектом подразумевается снижение нагрузок в сопоставлении со зданием-аналогом на фундаментах традиционного исполнения.

В результате таких сопоставительных испытаний выявилось и влияние длительности действия динамической нагрузки, которое проявляется только в зданиях-аналогах. Повреждения в них отмечаются даже при невысокой интенсивности динамической нагрузки, что никакими расчётами учесть нельзя.

В отличие от зданий-аналогов, в сейсмоизолируемых зданиях повреждения не отмечались ни при повышенной интенсивности нагрузки, ни при её длительности.

В экспериментальных домах параметры опор принимались в диапазоне $R \Delta H \Delta 1,1$ и $1,5$, при которых диаграмма перемещений $R(\Delta)$ на прямолинейном участке возрастает незначительно. Рассматривая такую диаграмму как характеристику условной жёсткости, которая в несколько раз меньше жёсткости этажей, надпорные конструкции здания можно считать достаточно жёсткими, позволяющие не учитывать по методике СНиП другие формы колебания. Тем самым расчётная динамическая модель здания во многом упрощается. К этому можно добавить повышенную диссипативную способность КФ, отмечаемую при свободных колебаниях здания, что исключает необходимость в дополнительных энергопоглотителях.

Значение $R \Delta H \Delta 1,5$, по-видимому, следует считать предельным, поскольку это связано с вертикальными колебаниями здания. Как свидетельствуют жители домов, испытавшие в своих квартирах землетрясения до 7 баллов, горизонтальные толчки ими почти не ощущаются, а только вертикальные плавные покачивания, "как на волнах". Такие покачивания снижаются при $R \Delta H$.

Проведенное КазНИИССА значительное число виброис-

пытаний в сейсмоопасных районах бывшего СССР, а также анализ влияния реальных землетрясений на сейсмоизолируемые здания позволили получить некоторый опыт более объективного суждения о различных решениях сейсмоизоляции.

В этой связи необходимо уточнить само определение сейсмоизолирующих опор. Если обратиться к таблице 1 из [2], то к ним следует отнести только опоры №№ 3 и 6, в которых здание полностью отделяется от грунта средствами качения или скольжения (№6 точнее назвать перекатыванием). По эффективности их можно было бы считать в какой-то мере равнозначными, в зависимости от выбранных геометрических параметров и качества используемых материалов. Все они в составе многоэтажных зданий ещё в 80-х годах испытывались в КазНИИССА и дали, в той или иной мере, положительный результат с рекомендациями для дальнейшей отработки.

К тому времени по КФ уже был накоплен большой объём экспериментально-теоретического, а также практического материала (проектирование и строительство). В этом смысле, КФ оказались "пробным камнем", не исключавшим ошибки в проектах. Наиболее серьёзная из них была допущена в Южно-Курильске, где КФ располагались под подвалом, на глубине почти 4 метра. В результате сейсмоизолирующий эффект отмечался жителями лишь год-два, пока не уплотнился грунт (на Курилах происходит до 30 землетрясений в год) и не был отмечен позже при более сильном землетрясении (8 баллов MSK). Но эффект снижения нагрузок проявлялся не раз в других районах.

Форма КФ удобна для зданий различного конструктивного исполнения, как малоэтажных, так и многоэтажных, до 9–12 этажей включительно. Сейчас, например, актуальной проблемой становятся автостоянки в подвальном помещении многоэтажных домов. Она проще всего решается с использованием КФ в виде стоек.

При более широком применении сейсмоизоляции в строительстве, невольно возникают необходимость в её нормативном изложении. Однако, расчёты и проектирование сейсмоизолируемых зданий не просто приспособлять к

действующим СНиП. Инструкция по КФ была первой такой попыткой, в которой не затрагивалась противоречивость расчётных положений СНиП.

Литература.

1. Авидон Г.Э., Карлина Е.А. "Особенности колебаний зданий с сейсмоизолирующими фундаментами А.М. Курзанова, Ю.Д. Черепинского", ж. «Сейсмостойкое строительство, безопасность сооружений», №1, 2008 г.

2. Черепинский Ю.Д. Сравнительный анализ сейсмоизолирующих фундаментов опорного типа. Журнал «Сейсмостойкое строительство, безопасность сооружений», №5, г. Москва, 2004 г.

ЗАЩИТИ СВОЙ ДОМ ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Разрушительные землетрясения последнего десятилетия в странах Европы и Азии не обходятся без человеческих жертв, что требует поиска более эффективных средств сейсмозащиты. Это особенно относится к жилым зданиям — наиболее массовому типу строительства и наименее защищённому от землетрясений.

В соответствии с сейсмическими строительными кодами повреждения здания при расчётном землетрясении принято считать допустимыми. Потеря сейсмостойкости отождествляется лишь с обрушениями, которые всегда связаны с человеческими жертвами. Но объём повреждений, предшествующий обрушениям, расчётным путём установить невозможно, поскольку все антисейсмические расчёты в той или иной мере носят условный характер. Всё же, исходя из экономических соображений и небольшой вероятности расчётного землетрясения, формальное соблюдение кодов считается достаточным для обеспечения безопасности людей.

Специалистам известно, что повреждения конструкций имеют место также при землетрясениях меньших по интенсивности расчётных, но более частых. Накапливаясь, они снижают принятую в исходном состоянии прочность конструкций, и со временем делают их неспособным воспринимать расчётную нагрузку. Тем не менее, изменить существующую практику сейсмостойкого строительства пока не реально. "Суперпрочные" дома будут слишком дорогими и, следовательно, недоступными для наиболее многочисленной части населения.

В этой ситуации, сейсмоизолирующие опоры-фундаменты являются не только дешёвым, но и эффективным способом защиты от землетрясений средней и большой интенсивности, позволяющие избежать их трагических последствий. Этот способ люди интуитивно пытались использовать ещё в

древности, подкладывая под стены жилищ камышитовые подушки, ослабляющие связь с основанием. С той же целью в начале прошлого столетия начали применять в строительстве многоэтажных зданий так называемый "гибкий этаж" в виде упругих стоек в нижнем уровне. Но, как оказалось, стойки не всегда положительно влияют на сейсмостойкость здания и сами становились в каких-то случаях причиной его обрушения. Вот почему уже в те годы малоизвестными авторами предлагались более надёжные решения, с использованием скользкой основы, катков, шаров, подвесок на гибких тягах. Все они оставались тогда на уровне предложений, не имея научно-технического обоснования.

Фундаменты КФ (КазНИИССА, г. Алматы) в 1965 были первой такой попыткой, где использовался термин "Действительная сейсмоизоляция зданий, подразумевавшая, в отличие от упругих стоек "гибкого этажа", кинематические принципы снижения связи с основанием. Новые принципы следовало увязать с упругопластическими методами расчёта зданий, заложенными в действующие СНиП. Потребовались длительные (более 30 лет) расчётно-теоретические и экспериментальные исследования с участием специалистов различного профиля прежде, чем была утверждена в Казахстане (1998 г.) первая Инструкция, в какой-то мере отвечающая методике нормативных расчётов.

Положительное влияние КФ на сейсмическую реакцию жилых домов (до 9 этажей включительно) оценивалось, главным образом, по результатам динамических испытаний вибратором большой мощности. Оно подтверждалось также результатами обследований домов после перенесённых ими землетрясений от 4 до 8 баллов, позволявшие выявлять и некоторые ошибки в проектах. Не лишне добавить, что большой объём дорогостоящих исследований был возможен только в условиях СССР. Поэтому КФ оказались наиболее апробированным решением при достаточно простом исполнении, позволявшим быстрее других решений находить применение в сейсмоопасных районах Казахстана, Узбекистана, России (города БАМа, Камчатки, Сахалина, Кемеровской и Иркутской обл. и др). Сейчас особенно остро стоит вопрос о защите малоэтажной застройки в сельских районах, где часто дома строятся с нарушениями СНиП. В этих случаях КФ

становятся хорошим средством сейсмозащиты, доступным даже частным домовладельцам.

Тем не менее, как всякое инженерное решение КФ нуждается в разнообразии форм и конструктивных узлов в зависимости от конструктивного решения здания. Такая работа предстоит последователям с приходом новых специалистов. К сожалению, вновь приходящим в науку нужны собственные идеи, которые, как правило, для них становятся путевой целью.

Всё вышесказанное следует рассматривать как предисловие к оценке реального динамического эффекта КФ, который фактически не связан с методами, изложенными в Инструкции, компромиссно привязанной к установленным нормативам.

Представим массивный объект, стоящий на скользком основании. При горизонтальном движении основания с любым ускорением, силы инерции (в нашем случае сейсмические силы) не могут превышать сил трения скольжения. То же самое следует ожидать для объекта, стоящего на шарах радиуса R , с той лишь разницей, что силы трения скольжения заменяются силами трения качения m_2 . Если учесть, что опорное основание имеет ограниченные смещения в любую сторону, то шары можно заменить его нижней половиной, шарнирно связанной с объектом. При этом отмеченный выше эффект сохраняется. Во избежание остаточных смещений опорное основание должно было бы иметь вогнутую поверхность.

Нижняя половина шара представляет кинематическую, иначе расчётную модель КФ с высотой $H=R$. Боковые стороны могут иметь любое очертание, симметричное относительно вертикальной оси: например, в виде тумбы, либо стойки с уширенной пятой. При плоском опорном основании, возвращающий эффект достигается за счёт момента в техническом шарнире m_1 , возникающем при повороте КФ. В этом случае, максимальная величина нагрузки, передаваемой на объект, независимо от ускорений основания, не превысит величину:

$$S = (m_1 + m_2)H;$$

Если принимать $R > H$, сила S несколько увеличивается из-за дополнительного момента $P \cdot r$ (см. рис.1 предыдущей статьи), но не значительно.

Таким образом, сейсмоизолирующий эффект опор состоит в изоляции больших нагрузок при землетрясениях, превышающих по интенсивности S . В этом случае основная инженерная задача состоит в отработке геометрических параметров опоры и конструкции шарнира с учётом их прочности при ожидаемых перемещениях. Такая работа связана не столько с расчётами, сколько с испытаниями КФ на прессе, и динамическими испытаниями в составе зданий мощным вибратором (В-3, конструкции ЦНИИЭПжилищ). Исполнителям (КазНИИССА, г. Алматы) требовалось длительное время на исследования, но их нельзя считать завершёнными. Необходимо выявлять новые формы КФ и узлы сопряжений.

Анализ динамической реакции во многом меняет представления о влиянии интенсивности и длительности действия нагрузки, позволяющие судить о роли сейсмоизоляции, как о крайне необходимом средстве сейсмической защиты в жилищном строительстве.

Что касается КФ, то уже отмечаемое их смещение при землетрясениях $\Delta 4$ балла (MSK) свидетельствует, что такую нагрузку на здание следует ожидать при всех более сильных землетрясениях. Некоторое увеличение ожидается лишь в случае $R > H$, если смещение здания относительно основания при этом превышает 2–3 см.

ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящий сборник преследует цель подытожить результаты многолетней работы над проблемой, называемой теперь сейсмоизоляцией зданий. Эта проблема родилась когда-то в среде молодых проектировщиков, увлечённых идеей снижения сейсмических нагрузок с помощью специального вида фундаментов. Согласно действующим СНиП, сейсмические нагрузки на здание всегда представлялись неизменными во времени силами, определяемые в зависимости от частоты и формы собственных колебаний его расчётной модели.

Однако, работа над новой проблемой, включающей её теоретические и экспериментальные разделы, во многом

меняют представление о реальной работе конструкций при землетрясении, подтверждая неизбежную условность принимаемых в мире методик практических расчётов при проектировании. Поэтому всякие сейсмоизолирующие фундаменты, помимо экспериментальной проверки их несущей способности, нуждаются в некотором её резерве на случай превышения нормативной расчётной нагрузки и ожидаемого смещения.

В сравнении с другими конструктивными решениями сейсмоизоляции, КФ проходили такую проверку в большом объёме, как отдельного элемента, так и в составе зданий с использованием вибратора большой мощности. Более того, только здания на КФ испытывались в сопоставлении со своими аналогами в традиционном исполнении, доводимыми до потери несущей способности и тем самым позволявшим получать относительный эффект сейсмоизоляции.

Работоспособность КФ отмечалась также и при землетрясениях в домах, построенных в различных городах бывшего СССР.

Значительную по объёму и длительности работу автор не считает своим личным достижением. В ней принимали участие специалисты, чьи знания могли быть выше других участников в том или ином разделе экспериментально-теоретических исследований, расчётных комплексов на ЭВМ и проектировании экспериментальных зданий, но в силу обстоятельств результаты по всем этим разделам оставались в поле зрения автора, осуществлявшего общее руководство. Вот почему КФ можно рассматривать как достаточно обоснованное решение, объединяющее коллективные знания и усилия.

В то же время, никакое решение нельзя считать завершённым. По-видимому, новые технологии в строительстве, связанные с использованием более качественных материалов могут повлиять на форму КФ и узлы их сопряжения с конструкциями зданий. Этот процесс нельзя останавливать.

Подписано в печать 29.07.2009. Формат 60x88 1/16. Бумага офсетная №1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,0+вкл. Тираж 500 экз. Заказ № 5674.

ООО "Синее яблоко",
119019, г. Москва, Столовый пер., 7А

Отпечатано в ФГУП "Производственно-издательский комбинат ВИНТИ",
140010, г. Люберцы Московской обл., Октябрьский пр-т, 403.
Тел. 554-21-86.