

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՃԱՐՏԱՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՇԻՆԱՐԱՐՈՒԹՅԱՆ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ
ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ԽԱՉԱՏՈՒՐ ԳՐԻԳՈՐԻ ԳԱՐԴԱՆՅԱՆ

**ՍԵՑՄԱՄԵԿՈՒՄԱՑՄԱՆ ՇԵՐՏԱՎՈՐ ՌԵՏԻՆԵ ՄԵՏԱՂՅԱ ՀԵՆԱՐԱՆԵՐԻ
ՎԱՐՔԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ՍԵՑՄՄԻԿ ԱԶԳԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ**

Ե.23.01-«Շինարարական կոնստրուկցիաներ, շենքեր, կառույցներ,
շինարարական նյութեր և շինարարական մեխանիկա» մասնագիտությամբ
տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման
ատենախոսության

ՄԵՂՍԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬСТВА
АРМЕНИИ

ВАРДАНЯН ХАЧАТУР ГРИГОРЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СЛОИСТО РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ОПОР СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.23.01- «Строительные конструкции, здания, сооружения,
строительные материалы и строительная механика»

ЕРЕВАН 2017

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Ճարտարապետության և շինարարության
Հայաստանի ազգային համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝

տեխն. գիտ. դոկտոր, դոցենտ

Տ.Լ. Դադայան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

տեխն. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր

Է.Ե. Խաչիյան

տեխն. գիտ. թեկնածու, ասիստենտ

Հ.Ա. Հովհաննիսյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

«Ա. Նազարովի անվան երկրաֆիզիկայի

և ինժեներային սեյսմաբանության

ինստիտուտ» ՊՈԱԿ:

Պաշտպանությունը կայանալու է 2017թ. նոյեմբերի 10-ին, ժամը 14:00-ին
Ճարտարապետության և շինարարության Հայաստանի ազգային համալսարանին կից
գործող ՀՀ ԲՈՀ-ի «Ճարտարապետություն և շինարարություն» 030 մասնագիտական
խորհրդի նիստում, հետևյալ հասցեով՝ 0009, ք. Երևան, Տերյան փ. 105:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՃՀԱՀ-ի գիտական գրադարանում հետևյալ
հասցեով՝ 0079, ք. Երևան, Մառի փ. 17/1:

Սեղմագրին կարելի է ծանոթանալ ՃՀԱՀ-ի պաշտոնական կայքում՝ www.nuaca.am

Սեղմագիրն առաքված է 2017թ. հոկտեմբերի 9-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝

Ճարտարապետության թեկնածու, դոցենտ



Ս.Ա. Թովմասյան

Тема диссертации утверждена в Национальном университете архитектуры и строительства
Армении

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Т.Л. Дадаян

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Э.Е. Хачиян

кандидат технических наук, ассистент

Г.А. Оганесян

Ведущая организация:

ГНКО «Институт геофизики и инженерной
сейсмологии имени А. Назарова»

Защита состоится 10-го ноября 2017г. в 14:00 часов на заседании специализированного совета
030 - «Архитектура и строительство» ВАК РА, действующего при Национальном университете
архитектуры и строительства Армении, по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна 105.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке НУАЧА по адресу: 0079, г. Ереван,
ул. Марра 17/1.

С авторефератом можно ознакомиться на официальном сайте НУАЧА: www.nuaca.am

Автореферат разослан 9-го октября 2017г.

Ученый секретарь специализированного совета:

кандидат архитектуры, доцент



Товмасыан С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Землетрясения - одно из наиболее частых природных явлений, представляющих опасность для людей. Ежегодно на земном шаре происходит свыше 300 тысяч землетрясений разной интенсивности, большинство из которых проявляются в густозаселенных районах.

Современное состояние науки и техники не позволяет пока решить задачу предотвращения разрушительных землетрясений. Более того, даже прогноз землетрясений, в широком смысле этого слова, представляет собой трудноразрешимую задачу. Поэтому основным направлением по борьбе с возможными человеческими жертвами и с предотвращением повреждений или разрушений зданий является их качественное проектирование и строительство. Для качественного проектирования необходимо как уточнение существующих методов расчета зданий, так и выявление различных параметров, влияющих на напряженно-деформированное состояние их несущих элементов.

Вся территория Армении находится в сейсмоактивном регионе. Во многих случаях к этому можно добавить неблагоприятные условия строительной площадки: плохие грунты, близость тектонических разломов, сложный рельеф и т.д. Основной конструктивной системой для многоэтажного строительства в РА, после создания в 1994 году новых строительных норм по сейсмостойкому строительству, является монолитный железобетонный рамно-связевой каркас, где в качестве связей в системе выступают железобетонные диафрагмы жесткости, установленные непрерывно по всей высоте здания.

Наряду с традиционным многоэтажным строительством в Армении применяются также различные системы, уменьшающие сейсмическое воздействие на здания и сооружения. Одной из таких систем является сейсмоизоляция. Использование сейсмоизоляции в зданиях началось во второй половине XX века, при этом первоначально такие опоры нашли широкое применение при конструировании сейсмостойких опор мостов, а затем с некоторым изменением начали применяться и для сейсмоизоляции зданий. В мире существуют различные типы сейсмоизоляции как по характеру работы, так и по материалу. За последние 25 лет на территории РА было построено значительное количество зданий (порядка пятидесяти) с сейсмоизоляцией, при этом в качестве сейсмоизоляции использовались группы установленных слоисто-резинометаллических опор сейсмоизоляции (СРМОС).

Сейсмоизоляция зданий имеет ряд преимуществ перед традиционно применяемыми методами проектирования зданий с равнопрочными конструкциями. Среди них можно выделить снижение сейсмических нагрузок на конструкции верхнего строения здания (суперструктуры). Для зданий, подвергающихся реконструкции (усилению) с применением сейсмоизоляции в цокольной части, можно сохранить его оригинальный облик, не нарушая архитектурных особенностей. Надежность сейсмоизолированных зданий гораздо выше при воздействии интенсивного землетрясения, по сравнению со зданиями без СРМОС. Это связано с тем, что сейсмоизолированное здание допускает значительные перемещения в сейсмоизоляторах (поглощая значительную часть энергию на их уровне) без разрушения конструкций при сейсмическом воздействии, а в здании с традиционным усилением невозможно избежать развития трещин, повреждений, а иногда и разрушений несущих конструкций.

Для инженера-проектировщика очень важно иметь общее представление о деформативности элементов системы сейсмоизоляции, что позволит на стадии

проектирования в одних случаях избежать излишних запасов и сократить расход материалов, в других - более осторожно подходить к проектированию многоэтажных зданий с системой сейсмоизоляции.

Исследование поведения СРМОС при действии различных нагрузок, оценка их напряженно-деформированного состояния, а также уточнение влияния различных параметров и факторов на их работу является одним из основных направлений по уточнению методики расчета зданий с сейсмоизоляцией.

Большой вклад в развитие исследований и разработку инженерных методов расчета на сейсмические воздействия внесли Айзенберг Я.М., Амбарцумян В.А., Био М.А., Гольденблат И.И., Дарбинян С.С., Завриев К.С., Карапетян Б.К., Корчинский И.Л., Медведев С.В., Мелкумян М.Г., Мононобе Н., Назаров А.Г., Николаенко А.А., Поляков С.В., Ржевский В.А., Хаунзер В.Г., Хачиян Э.Е. и др. При этом необходимо отметить особый вклад Мелкумьяна М.Г. во внедрение системы сейсмоизоляции в гражданское строительство РА.

Важное значение в оценке поведения здания при сейсмическом воздействии имеет правильное моделирование работы сейсмоизоляторов. Поскольку сейсмоизоляторы, применяемые в РА, не работают на растяжение, возникает необходимость исследования их поведения при действии различных нагрузок. Для оценки напряженно-деформированного состояния сейсмоизоляторов необходимо их трехмерное моделирование с применением нелинейных жесткостных характеристик.

Тема диссертационной работы посвящена поведению и выявлению не учитываемых ранее параметров, влияющих на напряженно-деформированное состояние сейсмоизоляторов, применяемых в РА для многоэтажных зданий, при сейсмических воздействиях.

Цель и задачи исследования. Целью работы является исследование поведения слоисто резинометаллических опор сейсмоизоляции при сейсмических воздействиях. Для достижения намеченной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- исследование напряженно-деформированного состояния СРМОС от действия вертикальных как статических, так и сейсмических сил;
- исследование влияния вертикальной нагрузки на горизонтальную жесткость СРМОС;
- сравнение результатов исследования напряженно-деформированного состояния несущих элементов многоэтажных железобетонных рамно-связевых зданий с системой сейсмоизоляции и без нее при сейсмическом воздействии;
- сравнение расхода материала несущих конструкций многоэтажных железобетонных рамно-связевых зданий с применением системы сейсмоизоляции и без нее;
- исследование напряженно-деформированного состояния СРМОС с учетом как линейной, так и нелинейной их работы при расчете по акселерограммам различных землетрясений;
- анализ изменения усилий в опорах системы сейсмоизоляции вследствие их перераспределения при сейсмическом воздействии.

Метод исследования основан на:

- сравнительном анализе различных современных методов расчета на сейсмическое воздействие с применением существующих данных экспериментальных исследований работы сейсмоизоляторов, полученных различными учеными;

- компьютерном моделировании напряженно-деформированного состояния сейсмоизоляторов с учетом нелинейной работы СРМОС на основе метода конечных элементов.

Научная новизна работы. В процессе исследования получены результаты, отличающиеся новизной:

- выявлено влияние вертикального обжатия на максимально допустимое горизонтальное перемещение сейсмоизолятора;
- предложен учет возможного “отрыва” сейсмоизолятора при сейсмическом воздействии из-за отсутствия восприятия растягивающих усилий в сейсмоизоляторах;
- выявлено перераспределение усилий в сейсмоизоляторах многоэтажных зданий при сейсмическом воздействии из-за явления “отрыва” в некоторых из них.

Практическая значимость работы. Результаты работы могут быть использованы при проектировании высотных зданий с применением сейсмоизоляторов. Предлагаемые зависимости позволят более точно оценить возможные максимально допустимые горизонтальные перемещения СРМОС от вертикально действующих суммарных статических и сейсмических нагрузок.

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты анализа напряженно-деформированного состояния рамно-связевых железобетонных многоэтажных зданий с применением СРМОС при сейсмическом воздействии;
- методика расчета зданий и сооружений с применением СРМОС;
- результаты анализа напряженно-деформированного состояния СРМОС от действия внешних нагрузок;
- учет возможного “отрыва” сейсмоизолятора вследствие возникающего при сейсмическом воздействии перераспределения усилий в системе сейсмоизоляции.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были доложены на:

- Международной конференции “Seismics 2014” (г. Тбилиси, Грузия, 2014г.);
- Международной научной конференции, посвященной 85-летию кафедры железобетонных и каменных конструкций и 100-летию со дня рождения Н.Н. Попова (г. Москва, Россия, 2016г.);
- семинарах кафедры “Строительные конструкции” НУАСА (г. Ереван, Армения, 2014 - 2016 гг.);
- основные положения работы и полученные результаты были представлены в проектно институте ОАО “Армпроект”;
- представлены рекомендации по учету в строительных нормах РА.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано шесть научных статей, список которых представлен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы из 99 наименований и двух приложений. Диссертация изложена на 113 страницах компьютерного текста (включая список литературы), содержит 24 таблицы и 76 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, представлены методы исследования, научная новизна и практическое значение работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава “Опыт применения слоисто резинометаллических опор сейсмоизоляции” посвящена обзору развития практики применения СРМОС в различных странах мира и, в частности, в Армении.

Отмечено, что развитие теории и практическое применение различных систем сейсмозащиты связаны с уменьшением инерционных сил, возникающих в зданиях и сооружениях при сейсмическом воздействии.

На данный момент системы сейсмоизоляции применяются по всему миру, где по количеству зданий и сооружений с системами СРМОС Республика Армения занимает шестое место. Лидирующими странами в применении СРМОС являются Япония и Китай, при этом по данному показателю Япония практически вдвое опережает Китай.

Рассмотрены наиболее интересные примеры из практики применения СРМОС в различных типах зданий, построенных в Японии, Китае, США, Российской Федерации и Республике Армения.

В настоящее время в Республике Армения наблюдается тенденция к применению систем сейсмоизоляции не только для малоэтажных, но также и для высотных зданий, наглядным примером чего являются восемнадцатизэтажный жилой комплекс “Северный Луч” и здание “Elite Plaza” высотой 85 м в городе Ереване.

Вторая глава “Анализ существующих исследований работы СРМОС и оценка их напряженно-деформированного состояния под действием внешних нагрузок” посвящена исследованию работы СРМОС под действием внешних нагрузок, оценке влияния горизонтальных деформаций СРМОС на их несущую способность для системы сейсмоизоляции, применяемой в РА, а также оценке влияния вертикальной составляющей внешней нагрузки на деформативность СРМОС на основе анализа их нелинейного моделирования.

Раздел 2.1 посвящен анализу существующих исследований работы СРМОС под действием внешних нагрузок. Проведен детальный анализ различных параметров сейсмоизоляторов, применяемых в разных странах. Рассмотрены современные СРМОС, которые представляют собой слоистую конструкцию, состоящую из чередующихся стальных листов и слоев высококачественной резины со связующим веществом. При этом стальные листы в конструкции СРМОС служат для предотвращения выпучивания резиновых слоев под действием вертикальных сил, т.е. от них зависит вертикальная жесткость опоры, а от резиновых слоев зависит горизонтальная податливость опоры, поскольку сама резина обладает небольшой сдвиговой жесткостью. Отмечено, что именно эти свойства СРМОС меняют спектр собственных частот сейсмоизолированных зданий при горизонтальных колебаниях. При таких колебаниях в резине возникают силы, которые пытаются вернуть опору, а вместе с ней и вышележащее здание в исходное положение.

В работе приведены конструкции и основные характеристики сейсмоизоляторов, применяемых в современном сейсмостойком строительстве: фланцевых и бесфланцевых, с сердечником и без него, с низким и повышенным демпфированием.

На рис. 1 а представлена конструкция СРМОС, применяемая в РА, с ее геометрическими размерами, а на рис. 1 б - узел крепления опоры к конструкциям здания. Сейсмоизоляторы такой конструкции относятся к виду бесфланцевых и могут

воспринимать многократно повторяющиеся циклические усилия сжатия и сдвига. В табл. 1 приведены физико-механические характеристики и вес СРМОС.

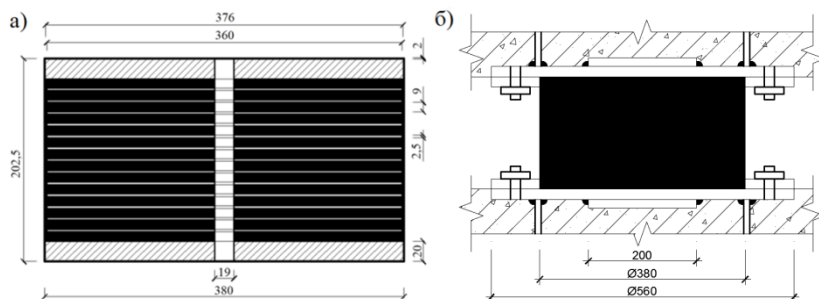


Рис.1. СРМОС, применяемая в настоящее время в Армении:

а - геометрические размеры; б - узел крепления опоры к конструкциям здания

Таблица 1

Физико-механические характеристики и вес СРМОС, применяемой в РА

N	Наименование	Единицы измерения	Величина	Точность
1	Модуль сдвига резины	МПа	0,97	$\pm 0,15$
2	Вертикальная жесткость опоры	кН/мм	300	не менее
3	Горизонтальная жесткость опоры	кН/мм	0,81	-
4	Горизонтальное расчетное перемещение	мм	280	не более
5	Вертикальная расчетная нагрузка на опору	кН	1500	не более
6	Вес опоры	кг	77,5	$\pm 2,5$

Раздел 2.2 посвящен оценке влияния горизонтальных деформаций СРМОС на их несущую способность для системы сейсмоизоляции, применяемой в РА. Для этого рассмотрено несколько параметров, влияющих на работу сейсмоизоляторов.

При исследовании напряженно-деформированного состояния СРМОС под воздействием внешних нагрузок принято, что для описания простой модели сейсмоизолятора необходимы четыре параметра: K_1 (жесткость упруголинейного элемента), K_2 (жесткость упругопластичного элемента), F_0 и D_y (соответственно сила и перемещение, когда напряжения в упругопластичном элементе достигают предела текучести).

Исходя из того, что в практике работа СРМОС описывается билинейной моделью, основные параметры которой берутся из существующих гистерезисных петель, получено, что максимальная величина эффективного затухания зависит только от отношения величин K_1 и K_2 :

$$a = \frac{K_1 - K_2}{K_2}. \quad (1)$$

При этом вычисление величины $K_2 = K_{eff} - F_0 / D$ для любого типа системы сейсмоизоляции несложно, а величина K_1 может варьироваться в широком диапазоне. Величину характерной прочности сейсмоизолятора можно определить достаточно точно из условия

$$F_0 = \frac{W_D}{4D} = \frac{\pi}{2} K_{eff} D \beta, \quad (2)$$

откуда видно, что значение величины K_I не влияет на эффективную жесткость системы, однако значительно влияет на затухание опоры, особенно при его максимальном значении.

После того, как вышеуказанные параметры получены, модель опоры может быть создана при помощи любой программы, основанной на методе конечных элементов, включающей в себя те основные элементы, которые поддерживают все нужные параметры (например, 3D-BASIS, DRAIN-2DS, SAP2000, ETABS и т.д.).

Исследование СРМОС основано на предположении, что деформация такова, что плоские сечения остаются перпендикулярными к недеформированной центральной оси, но необязательно перпендикулярны относительно горизонтальной плоскости. Для этого опора рассмотрена как колонна, длина которой равна h , а площадь поперечного сечения - A , и определена жесткость при сдвиге на единицу длины: $P_S = GA_S$, где эффективная площадь сдвига:

$$A_S = A \frac{h}{t_r}. \quad (3)$$

Здесь h - общая высота опоры сейсмоизоляции (суммарная толщина слоев резины и стальных листов), а t_r - общая высота резиновых слоев.

Увеличение величины A необходимо для учета того факта, что сталь не деформируется в составной системе. Поскольку жесткость при изгибе изменяется, то для одного слоя толщиной t она будет

$$EI_S = E_C \left(\frac{1}{3} \right) I \frac{h}{t_r}. \quad (4)$$

При этом горизонтальная жесткость равна

$$K_H = \frac{GA_S}{h}, \quad (5)$$

а эйлерова нагрузка на изгиб для колонны без деформации сдвига:

$$P_E = \pi^2 \frac{EI_S}{h^2}. \quad (6)$$

Поскольку величина нагрузки критического изгиба P_{cr} вычисляется решением следующего уравнения:

$$P^2 + PP_S - P_S P_E = 0, \quad (7)$$

следовательно, величина критической нагрузки P_{cr} будет

$$P_{cr} = \frac{-P_S + \sqrt{P_S^2 + 4P_S P_E}}{2}. \quad (8)$$

Принимаем

$$P_S \approx GA \text{ и } P_E \approx \frac{1}{3} \frac{6GS^2 I \pi^2}{h^2} \approx GA \left(\frac{2\pi^2 S^2 I}{A h^2} \right). \quad (9)$$

Для большинства типов сейсмоизоляторов при условии, что $P_E \gg P_S$, $S = \sqrt{E_C / 6G} > 5$, выражение критической нагрузки может выглядеть таким образом:

$$P_{cr} = \sqrt{P_S P_E} = \sqrt{\left(GA \frac{h}{t_r} \right) \times \left(\frac{\pi^2}{h^2} \frac{1}{3} 6GS^2 A r^2 \frac{h}{t_r} \right)} = \frac{\sqrt{2\pi G A S r}}{t_r}. \quad (10)$$

Подставив в (9) величины физико-механических параметров сейсмоизоляторов, применяемых в РА, получим следующие значения:

$$P_S \approx 177 \text{ кН}, P_E \approx 52705 \text{ кН}, S = 8,3.$$

Поскольку для сейсмоизоляторов, применяемых в РА, условия $P_E \approx 52705 \text{ кН} \gg P_S \approx 177 \text{ кН}$, $S = 8,3 > 5$ удовлетворяются, то, используя выражение (10), можем получить величину критической нагрузки: $P_{cr} \approx 3055 \text{ кН}$.

Для изучения поведения сейсмоизолятора при одновременном сочетании действия вертикальной нагрузки и максимального горизонтального перемещения рассмотрены две существующие гипотезы о приближении к предельному состоянию изолятора. Первая гипотеза заключается в том, что критическое смещение, определяемое как перемещение, при котором изолятор демонстрирует нулевую возрастающую горизонтальную жесткость, представляет собой боковое смещение, при котором сжимающие напряжения уменьшенной зоны определяются из отношения вертикальной силы к площади A_r , где A_r – совпадающая площадь проектируемого верхнего и нижнего сечений сейсмоизолятора (рис 2). При этом максимальные напряжения сжатия на этом участке могут увеличиваться вплоть до p_{cr} .

Вторая гипотеза состоит в том, что совпадающая площадь A_r заменяется $\sqrt{AA_r}$. Этот вариант более достоверный, поскольку концентрация вертикального напряжения, вызванного перемещением, не будет влиять на изгибаемую жесткость, но может уменьшить жесткость сдвига.

Во время исследований рассмотрены обе гипотезы для опоры сейсмоизоляции, имеющей круглое сечение с радиусом R (рис. 2).

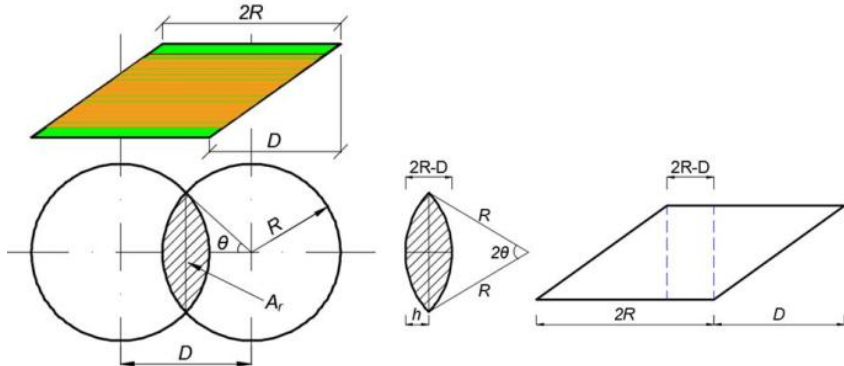


Рис.2. Совпадающая площадь сечения верха и низа круглой в плане СРМОС

Величина совпадающей площади A_r получена из рис. 2:

$$A_r = \frac{\pi R^2}{180} \theta - \frac{R^2 \sin 2\theta}{2} = 2R^2 \left(\frac{\pi}{180} \theta - \sin \theta \cos \theta \right). \quad (11)$$

Для отношения величин P и P_{cr} по первой гипотезе получено

$$\frac{P}{P_{cr}} = \frac{A_r}{A} = \frac{2R^2 \left(\frac{\pi}{180} \theta - \sin \theta \cos \theta \right)}{\pi R^2} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{180} \theta - \sin \theta \cos \theta \right). \quad (12)$$

Зависимость D от θ определена из рис. 2:

$$\begin{cases} h = R(1 - \cos \theta), \\ h = \frac{2R - D}{2}. \end{cases} \quad (13)$$

Приравняв уравнения, приведенные в (13), получим следующее:

$$R(1 - \cos \theta) = \frac{2R - D}{2}, \quad (14)$$

$$D = 2R \cos \theta \Rightarrow \theta = \arccos \frac{D}{2R}. \quad (15)$$

Подставив выражение (15) в формулу (12), получим отношение величин P и P_{cr} по первой гипотезе:

$$\frac{P}{P_{cr}} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{180} \arccos \frac{D}{2R} - \frac{D}{2R} \sin \left(\arccos \frac{D}{2R} \right) \right). \quad (16)$$

Найдено отношение величин P и P_{cr} по второй гипотезе:

$$\frac{P}{P_{cr}} = \sqrt{\frac{A_1}{A}} = \frac{\sqrt{2R^2 \left(\frac{\pi}{180} \theta - \sin \theta \cos \theta \right)}}{\sqrt{\pi R^2}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times \sqrt{\left(\frac{\pi}{180} \theta - \sin \theta \cos \theta \right)}. \quad (17)$$

Подставляя формулу (15) в (17), по второй гипотезе получим

$$\frac{P}{P_{cr}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times \sqrt{\frac{\pi}{180} \arccos \frac{D}{2R} - \frac{D}{2R} \sin \left(\arccos \frac{D}{2R} \right)}. \quad (18)$$

Результаты, полученные из расчетов по обеим гипотезам в зависимости от угла θ в диапазоне от 0 до 90° и горизонтального перемещения D , отображены на рис. 3 и приведены в табл. 2.

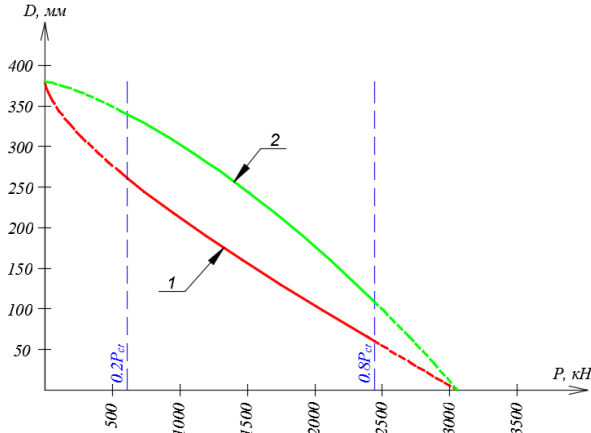


Рис.3. Кривые, описывающие потерю устойчивости сейсмоизолятора в зависимости от вертикальной силы и горизонтального перемещения:
1- при расчете по первой гипотезе, 2 - при расчете по второй гипотезе

Следует отметить, что эту зависимость можно рассматривать при предельных перемещениях и нагрузках в промежутке $(0, 2...0,8)P_{cr} = 611,0...2444,0 \text{ кН}$.

Таблица 2

Результаты расчета сейсмоизолятора по потере устойчивости

θ (°)	P/P_{cr}	$P(\kappa H)$	P/P_{cr}	$P(\kappa H)$	D (мм)
	Первая гипотеза		Вторая гипотеза		
0	0,000	0,0	0,000	0,0	380
10	0,002	6,9	0,047	144,7	374
20	0,018	53,8	0,133	405,5	357
30	0,058	176,2	0,240	733,6	329
35	0,090	274,2	0,300	915,3	311
40	0,131	400,1	0,362	1105,6	291
42,5	0,155	473,9	0,394	1203,2	280
45	0,182	555,0	0,426	1302,2	269
50	0,242	739,5	0,492	1503,1	244
55	0,312	953,1	0,559	1706,4	218
60	0,391	1194,5	0,625	1910,3	190
70	0,573	1751,0	0,757	2312,8	130
80	0,780	2382,9	0,883	2698,1	66
90	1,000	3054,9	1,000	3055,0	0

Анализируя полученные данные, следует отметить, что сейсмоизоляторы демонстрируют разные показатели величин горизонтального перемещения при различной вертикальной нагрузке, т.е. ограничивая горизонтальное перемещение, следует указывать соответствующую величину вертикальной нагрузки.

Согласно результатам расчета по второй гипотезе, сейсмоизолятор, применяемый в РА, при величине вертикальной нагрузки 1500 кН, перемещаясь в горизонтальном направлении на 244 мм, остается устойчивым, однако при перемещении на 280 мм величина вертикальной нагрузки не должна превышать 1200 кН.

Далее рассмотрена устойчивость системы при горизонтальной F_H и вертикальной P нагрузках. Стабильность системы будет обеспечена, если сумма всех моментов относительно точки O будет равна нулю (рис. 4 а).

Горизонтальная составляющая внешней нагрузки создает опрокидывающий момент, равный $F_H \times h$, а вертикальная составляющая стабилизирует и обеспечивает устойчивость сейсмоизолятора, при этом восстанавливающий момент равен $P(2R-D)$. Приравнявая эти моменты при максимально допустимом перемещении сейсмоизолятора, получим следующее равенство:

$$P(2R - D_{max}) = hF_H. \quad (19)$$

Соотношение между поперечной силой F_H и перемещением D показано на рис. 4 б. Принимая $F_H = K_H D$, получается

$$\frac{D_{max}}{2R} = \frac{P}{P + K_H h}. \quad (20)$$

Принимая K_H равным GA/t_r , а сжимающие напряжения $p = P/A = 13233 \text{ кН} / \text{м}^2$, получим следующее отношение для сейсмоизоляторов, применяемых в РА:

$$\frac{D_{max}}{2R} = \frac{1}{1 + (G/p)(h/t_r)} \approx 0,9. \quad (21)$$

Отсюда следует, что для сейсмоизоляторов, применяемых в РА, отношение максимального перемещения к их диаметру приблизительно равно 0,9. Таким образом, если боковое смещение составляет меньше, чем 90% диаметра

сейсмоизолятора, можно ожидать, что он будет устойчив к повороту. Однако необходимо провести дополнительные исследования, поскольку напряженно-деформированное состояние вплоть до потери устойчивости сейсмоизолятора еще недостаточно изучено.

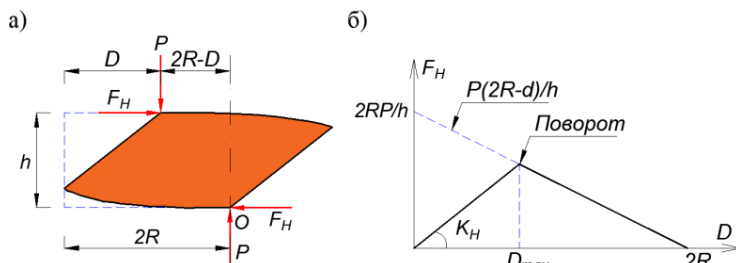


Рис.4. Схема и зависимость, принятые для расчета СРМОС:

а - расчетная схема, характеризующая механизм поворота сейсмоизолятора;

б - зависимость горизонтальной силы от перемещения

В разделе 2.3 проведена оценка влияния вертикальной составляющей внешней нагрузки на деформативность СРМОС на основе анализа их нелинейного моделирования. Опора представлена в виде 3D модели (рис.5 а). При описании сейсмоизолятора использовались элементы КЭ 236, которые предназначены для прочностного расчета пространственных конструкций с учетом физической нелинейности материала. Жесткостные характеристики СРМОС в расчетной схеме приняты с учетом нелинейной работы опоры. Горизонтальная нагрузка задана величиной сейсмического воздействия, а величина вертикального обжатия представлена суммарной вертикальной нагрузкой, передаваемой суперструктурой на опору.

Поскольку верхняя и нижняя поверхности СРМОС опоясаны опорными кольцами, которые, в свою очередь, крепятся к конструкциям здания, то при воздействии горизонтальной силы в верхней плоскости воздействие на опору будет передаваться только посредством той части опорного кольца, со стороны которой приложена сила. Что касается нижней плоскости, то жесткое закрепление задано только в той части опорного кольца, которая противоположна направлению действующей силы (рис.5 б).

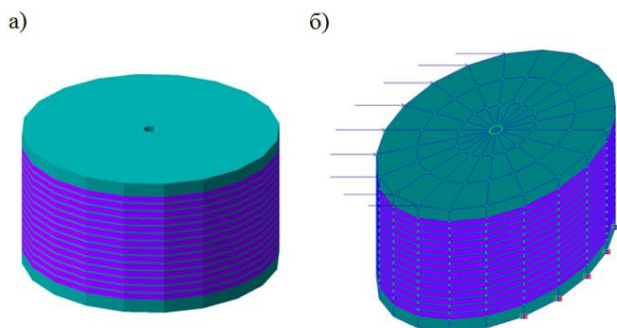


Рис.5. Вид 3D модели СРМОС, применяемой в Армении:

а - общий вид опоры; б - конечно-элементная модель опоры

Для изучения роли вертикального обжатия в работе СРМОС от действия горизонтальной силы при решении задач приняты следующие значения: для горизонтальных сил - от 30 до 200 кН, а для вертикальной сжимающей силы - от 0 до 1500 кН.

Из графика, представленного на рис. 6, видно, что при увеличении горизонтальной силы в диапазоне от 30 до 56 кН горизонтальное перемещение опоры практически не меняется с изменением вертикального обжатия (уменьшение составляет около 7%). При дальнейшем увеличении горизонтальной силы проявляется зависимость горизонтального перемещения от вертикального обжатия.

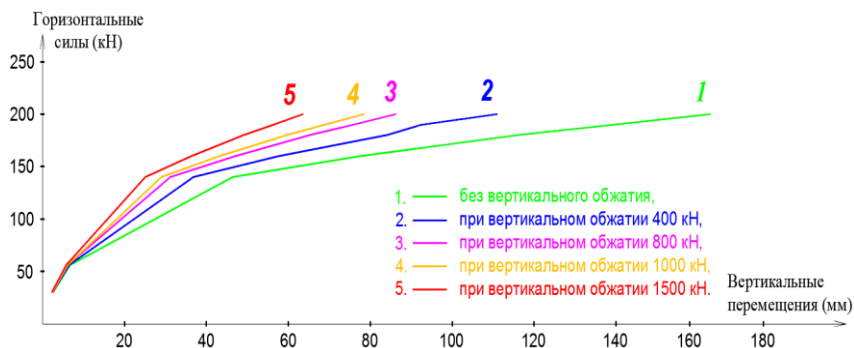


Рис. 6. График изменения горизонтального перемещения СРМОС в зависимости от горизонтальной силы

Поскольку в зданиях с сейсмоизоляторами на опоры, кроме вертикального обжатия, действует и сейсмическое воздействие, то величина вертикального обжатия на некоторые опоры увеличивается, а на некоторые, наоборот, резко уменьшается, что может привести к перераспределению жесткостей в системе сейсмоизоляции. Это изменение особенно может быть заметно для несимметричных в плане зданий, а также зданий, части которых имеют разную высоту, когда на каждую опору в системе сейсмоизоляции приходится различная вертикальная нагрузка. Следовательно, при расчете зданий с системой СРМОС рекомендуется учитывать эффект, возникающий при одновременном воздействии горизонтальной силы с вертикальным обжатием.

Третья глава “Анализ изменения напряженно-деформированного состояния несущих элементов рамно-связевых железобетонных многоэтажных зданий с применением СРМОС” посвящена изучению поведения и изменения расхода материалов несущих конструкций железобетонных рамно-связевых зданий разной этажности с системой сейсмоизоляции и без нее.

В разделе 3.1 на основании спектральной методики расчета, которая заложена в основу нормативных документов по проектированию и строительству сейсмостойких сооружений, рассмотрена величина расчетного горизонтального перемещения на уровне системы сейсмоизоляции:

$$D = \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 a k_0 \frac{\beta(T)}{B(n)} k_1^z. \quad (22)$$

Рассмотрены значения коэффициента $B(n)$, который учитывает разницу декремента затухания системы по нормам РА, США и Еврокоду (табл. 3).

Таблица 3

Значения коэффициента $B(n)$ согласно нормам РА, США и Еврокоду

Критическое затухание n в %	5	7	10	15	20
Согласно нормам РА	1	1,15	1,33	1,56	1,75
Согласно нормам США	1	1,09	1,21	1,38	1,53
Согласно европейским нормам	1	1,10	1,22	1,41	1,58

Получено, что разница величины коэффициента $B(n)$ между расчетами по формулам США и Еврокоду при критическом затухании 10% не превышает 1%, а при критическом затухании 20% - составляет 3,2%. Сравнивая эти величины с величинами, представленными в нормах РА, получается довольно ощутимая разница, а именно: при критическом затухании 10% величина $B(n)$ в нормах РА больше на 8,3...9,0%, а при 20% - 9,7...12,6%. При этом обратим внимание на тот факт, что, увеличивая величину затухания СРМОС, значение коэффициента $B(n)$ будет расти, т.е. перемещение верха сейсмоизолятора при тех же равных условиях будет меньше.

В разделе 3.2 исследовано напряженно-деформированное состояние шестнадцати-, девяти- и шестизэтажных зданий рамно-связевой конструктивной схемы с системой сейсмоизоляции из слоисто резинометаллических опор и без нее. Рассмотренные три здания разной этажности, которые имеют одинаковые размеры в плане: 36,0 × 24,0 м, но различное расположение диафрагм. Высота всех этажей в зданиях принята равной 3 м. Сечения колонн всех зданий приняты равными 500 × 500 мм, за исключением шестизэтажного здания с сейсмоизоляцией, где сечение принято – 400 × 400 мм. Ширина сечения ригелей из технологических соображений была принята равной ширине колонны. Высота сечения ригелей принята равной 600 мм в поперечном направлении здания и 550 мм – в продольном. Для шестнадцатиэтажного здания толщина диафрагм для первых пяти этажей принята равной 30 см, для следующих пяти этажей – 200 мм, для остальных этажей - 160 мм. Для шести- и девятиэтажных зданий толщина всех диафрагм принята равной 200 мм. Для зданий с СРМОС для всех случаев толщина диафрагм равна 160 мм. Толщина междуэтажных перекрытий и покрытий как для зданий с СРМОС, так и без них принята равной 16 см. Класс бетона и арматуры для всех несущих элементов здания принят соответственно В25 и А500С.

Количество СРМОС, расположенных между подвальным и первым этажами, принято: 103 штуки - для шестизэтажного, 149 штук - для девятиэтажного и 255 штук - для шестнадцатиэтажного зданий.

В расчетной схеме использовались следующие нагрузки: постоянная равномерно распределенная нагрузка на перекрытия - 2,5 кН/м², временная длительная равномерно распределенная нагрузка на перекрытия - 0,39 кН/м², временная кратковременная равномерно распределенная нагрузка на перекрытия - 1,56 кН/м².

Расчеты проводились для третьей сейсмической зоны, где интенсивность сейсмического воздействия - ожидаемое ускорение равно 0,4g. Категория грунтов принята II.

Опоры сейсмоизоляции моделируются конечными элементами упругой связи между узлами. В этом случае жесткость опоры в горизонтальном направлении принимается 0,81 кН/мм, а вертикальная жесткость - 243 кН/мм.

Расчет моделей производится линейно-спектральным методом, который реализован практически во всех программных комплексах, предназначенных для расчета зданий и сооружений.

Результаты, полученные при исследовании девятиэтажных зданий, показывают, что период колебаний здания с системой сейсмоизоляции по первой форме в 3,75 раза превышает аналогичный период для здания без СРМОС (рис.7).

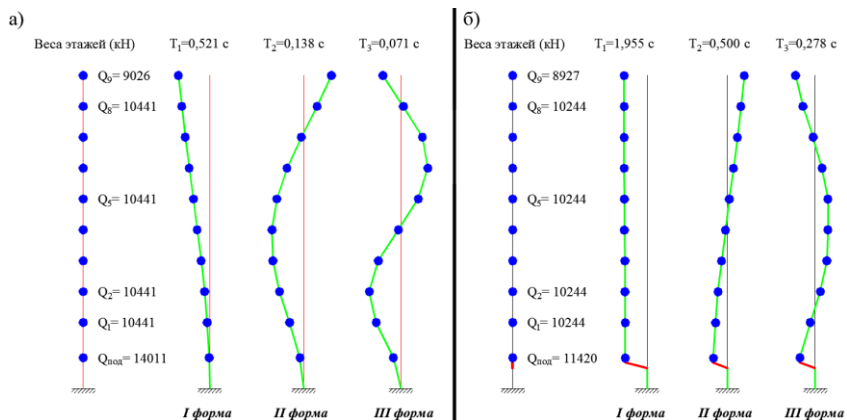


Рис.7. Веса этажей и формы собственных колебаний девятиэтажного здания:
а - без СРМОС; б - с СРМОС

Инерционная сила на уровне покрытия здания с системой сейсмоизоляции в 5 раз меньше, чем в здании без системы с сейсмоизоляцией (рис. 8).

Что касается здания с системой сейсмоизоляции, то максимальный перекося этажа составляет 4,67 мм, что в 2,11 раза меньше, чем в здании без сейсмоизоляции (рис. 9). Это позволит предотвратить падение перегородок и неконструктивных элементов и получение травм у людей во время расчетного сейсмического воздействия.

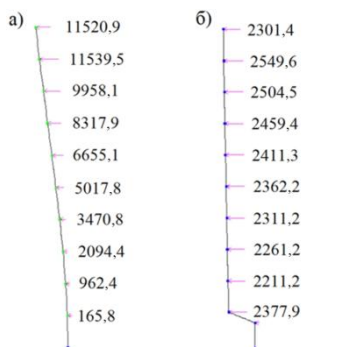


Рис.8. Поэтажные инерционные силы (кН): а - здания без СРМОС;
б - здания с СРМОС

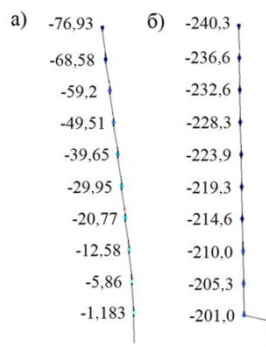


Рис.9. Перемещения этажей здания (мм): а - здания без СРМОС;
б - здания с СРМОС

При рассмотрении распределения усилий и напряжений в несущих конструкциях девятиэтажных зданий с системой сейсмоизоляции и без нее выявлено, что в колонне первого этажа здания с сейсмоизоляцией величина изгибающего момента на 30% больше, чем в здании без нее. На остальных этажах величина изгибающего момента в

здании без сейсмоизоляции в среднем в 2,1 раза больше, чем в здании с сейсмоизоляцией.

Величина максимального изгибающего момента в ригелях первого этажа здания с сейсмоизоляцией получается в 2,15 раза больше, чем в тех же ригелях в здании без сейсмоизоляции. На остальных этажах величина изгибающего момента в здании без сейсмоизоляции в среднем в 2,1 раза больше, чем в здании с сейсмоизоляцией.

Рассмотрено также изменение напряженного состояния диафрагм в той же раме, в здании с сейсмоизоляцией и без нее, при воздействии в одном случае только сейсмической нагрузки, а в другом - суммарной статической и сейсмической нагрузок. Величина максимального значения главных растягивающих напряжений в диафрагмах здания с сейсмоизоляцией на промежутке между отметками от -3,0 до +6,0 м в 3 раза меньше только от сейсмической нагрузки и в 3,3 раза меньше от суммарной статической и сейсмической нагрузок, чем в тех же диафрагмах в здании без сейсмоизоляции.

Результаты анализа шестизэтажного здания показывают, что период колебаний здания с СРМОС по первой форме в 5,24 раза больше аналогичного периода для тех же зданий без СРМОС. А суммарная поперечная сила на уровне фундамента здания с системой сейсмоизоляции в 2,5 раза меньше, чем в тех же зданиях без системы сейсмоизоляции.

Получено, что в колонне последнего этажа здания с сейсмоизоляцией величина изгибающего момента в 2,6 раза меньше, чем в здании без нее. Величина максимального изгибающего момента в ригелях здания с сейсмоизоляцией в 2,1 меньше, чем в тех же ригелях в здании без сейсмоизоляции.

Величина максимального значения главных растягивающих напряжений в диафрагмах здания с сейсмоизоляцией на промежутке между отметками от -3,0 до +6,0 м только от сейсмической нагрузки в 3,3 раза меньше, чем в тех же диафрагмах в здании без сейсмоизоляции.

Далее рассмотрены некоторые результаты исследования шестнадцатизэтажного здания. Отмечено, что период колебаний здания с СРМОС по первой форме в 2,44 раза больше, чем аналогичный период для тех же зданий без СРМОС. При этом суммарная поперечная сила на уровне фундамента здания с системой сейсмоизоляции в 2,5 раза меньше, чем в тех же зданиях без системы сейсмоизоляции.

В колонне последнего этажа здания с сейсмоизоляцией величина изгибающего момента в 3,5 раза меньше, чем в здании без нее. Величина максимального изгибающего момента в ригелях здания с сейсмоизоляцией в 2,0 раза меньше, чем в тех же ригелях в здании без сейсмоизоляции.

Величина максимального значения главных растягивающих напряжений в диафрагмах здания с сейсмоизоляцией на промежутке между отметками от -3,0 до +24,0 м только от сейсмической нагрузки в 3,6 раза меньше, чем в тех же диафрагмах в здании без сейсмоизоляции.

Рассмотрев работу шестнадцати-, девяти- и шестизэтажных зданий с СРМОС и без нее, отметим, что, благодаря системе сейсмоизоляции, в исследованных зданиях величины, характеризующие напряженно-деформированное состояние: усилия в несущих конструкциях, перемещения и перекосы этажей, а также суммарная поперечная сила на уровне фундамента, значительно уменьшаются. В свою очередь, уменьшение поперечной силы, связанное с применением сейсмоизоляции, приведет к уменьшению количества арматуры в зданиях.

В разделе 3.3 исследовано изменение расхода материалов несущих конструкций железобетонных рамно-связевых зданий с применением СРМОС.

Для подробно рассмотренных выше трех зданий разной этажности (шести-, девяти- (рис.10) и шестнадцатизэтажных) с системой сейсмоизоляции и без нее выполнен подбор арматуры, который показал, что общая закономерность для зданий с разной этажностью сохраняется.

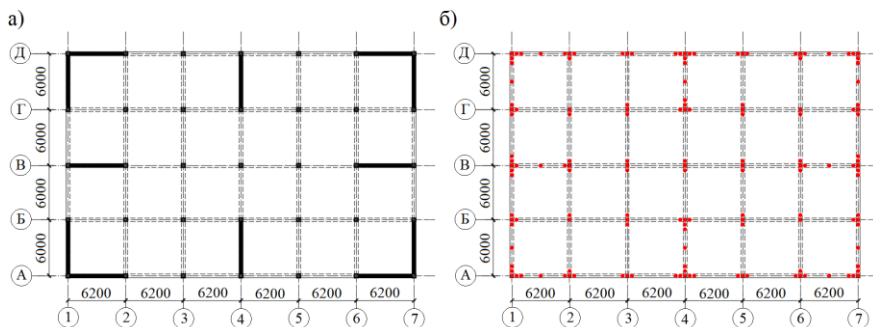


Рис.10. Планы расположений:

а - диафрагм, б - СРМОС для девятиэтажного здания

Расход арматуры в колоннах уменьшается на 60...70%, в то же время в обоих случаях объем бетона почти не меняется (табл.4). Расход бетона и арматуры в перекрытиях с применением СРМОС не меняется, при этом он составляет порядка 50% от всего расхода, из-за чего суммарный расход арматуры уменьшается до 20...30%. Расход бетона в нашем случае уменьшается и не превышает 5%.

Результаты расчетов показали, что расход арматуры для железобетонных рамно-связевых зданий с системой сейсмоизоляции меньше, чем в тех же зданиях без нее, и в нашем случае разница в арматуре для шестизэтажного здания составляет 20,1%, для девятиэтажного здания - 26,6%, а для шестнадцатизэтажного здания - 27,1%. Разница бетона в нашем случае для шестизэтажного здания составляет 4,72%, для девятиэтажного здания - 2,39%, а для шестнадцатизэтажного здания - 1,72%.

Таблица 4

Расход материалов несущих конструкций для девятиэтажного здания

N	Наименование железобетонной конструкции	Расход арматуры			Расход бетона		
		без применения СРМОС, т	с применением СРМОС, т	разница, %	без применения СРМОС, м³	с применением СРМОС, м³	разница, %
1	Колонны	43,7	13,8	68,4	262,5	262,5	0
2	Диафрагмы	70,3	25,3	64,0	523,2	442,6	15,4
3	Ригели	92,2	52,3	43,3	1 072	1 072	0
4	Перекрытия и покрытие	225,9	225,9	0	1 521	1 521	0
5	Итого	432,1	317,3	26,6	3 379	3 298	2,39

Четвертая глава “Учет перераспределения усилий в СРМОС при сейсмических воздействиях” посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния СРМОС с учетом их линейной и нелинейной работы при расчете по акселерограммам

землетрясений, а также учету перераспределения усилий в системе сейсмоизоляции при сейсмическом воздействии.

Раздел 4.1 посвящен исследованию напряженно-деформированного состояния СРМОС с учетом их линейной работы при расчете по акселерограммам землетрясений. С этой целью выбрано пять акселерограмм, из которых: две реальные записи и три - синтезированные. Максимальные значения ускорений акселерограмм посредством коэффициента модификации приводятся к величине ускорения $4,0 \text{ м/с}^2$.

Для того чтобы получить перемещения и ускорения верха СРМОС и остальных этажей во времени, проведен прямой динамический расчет. Аппроксимация модели вышерассмотренного девятиэтажного здания с системой сейсмоизоляции осуществлена в виде невисомого стержня с сосредоточенными в уровнях перекрытий массами. Жесткости стержней, в том числе и жесткость системы сейсмоизоляции моделированного стержня, были подобраны таким образом, чтобы величины периодов собственных колебаний здания, а также перемещений этажей в результате этого преобразования оставались практически такими же, что и для реального девятиэтажного здания (менее 3%). Затухание СРМОС в расчетах было принято 10%. Работа системы СРМОС в расчетных схемах принята линейной.

Результаты расчетов представлены в виде графиков изменения величин перемещений и ускорений первого этажа девятиэтажного здания во времени при воздействии акселерограммы “Ашоцк” (запись Спитакского землетрясения в поселке Ашоцк, 1988г.). Сравнение величин максимальных перемещений, полученных при воздействиях разных акселерограмм, показало, что при приближении величины преобладающего периода колебания грунта к величине собственных колебаний здания перемещения как верха СРМОС, так и всего здания увеличиваются. Следовательно, величины максимальных перемещений этажей здания при расчете по акселерограммам зависят от величин преобладающего периода колебаний грунта акселерограммы.

Далее исследовано влияние величины затухания СРМОС на перемещение ее верха. Был решен ряд задач, в которых пошагово изменялось затухание СРМОС в пределах от 5 до 20% для различных величин преобладающего периода колебания грунта.

Из полученных результатов видно, что величина затухания СРМОС имеет большое влияние на величину перемещения ее верха. На примере расчета девятиэтажного здания при воздействии акселерограммы “Ашоцк” сравнены величины перемещений этажей при затухании СРМОС, равном 10 и 15%.

Получено, что при затухании СРМОС, равном 15%, перемещения этажей оказались меньше, и разница по сравнению с перемещениями при затухании опор равных 10% составляет порядка 5,3...5,8%.

В разделе 4.2 исследовано напряженно-деформированное состояние СРМОС с учетом их нелинейной работы при расчете по акселерограммам землетрясений. Чтобы более наглядно показать разницу между работой СРМОС при ее линейном и нелинейном описании, выполнен расчет девятиэтажного здания при воздействии разных акселерограмм.

Результаты расчетов показали, что разница в перемещениях, полученных при различном описании СРМОС, хотя и бывает в пользу нелинейного описания, но носит неравномерный характер (рис.11). В некоторых случаях эта разница незначительна, а в некоторых, наоборот, довольно ощутима, и в нашем случае она составила 54%. Это доказывает, что уменьшение значения перемещений этажей здания при нелинейном описании СРМОС зависит от характера спектра акселерограммы.

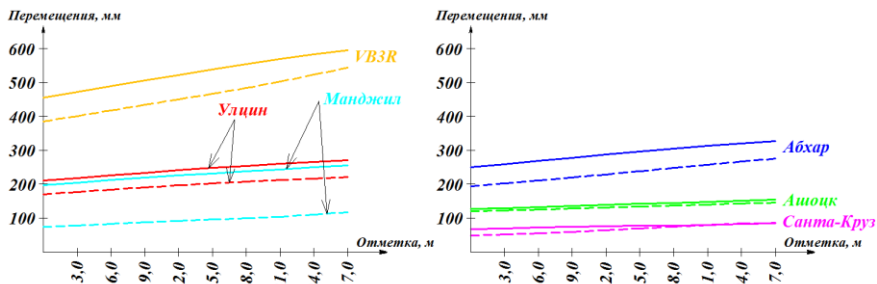


Рис.11. График зависимости перемещений этажей по высоте здания при линейном (сплошная линия) и нелинейном (пунктирная линия) описаниях СРМОС при воздействии акселерограмм:

а - “Манджил”, “Улицн”, “VB3R”; б - “Санта-Круз”, “Ашоцк”, “Абхар”

Раздел 4.3 посвящен оценке изменения усилий с учетом их перераспределения в СРМОС при сейсмических воздействиях. Вышепринятая расчетная схема здания ограничивает анализ изменения напряжений в системе сейсмоизоляции, в частности, изучение перераспределения усилий между опорами в системе сейсмоизоляции при явлении так называемого “отрыва”.

Для изучения данного явления произведены расчеты шестнадцатизэтажного здания рамно-связевой конструктивной схемы (рис. 12). Размеры здания в плане: $36,0 \times 18,0$ м, высота здания - 48,0 м. Высота типового этажа - 3,0 м, а подвального - 2,5м.

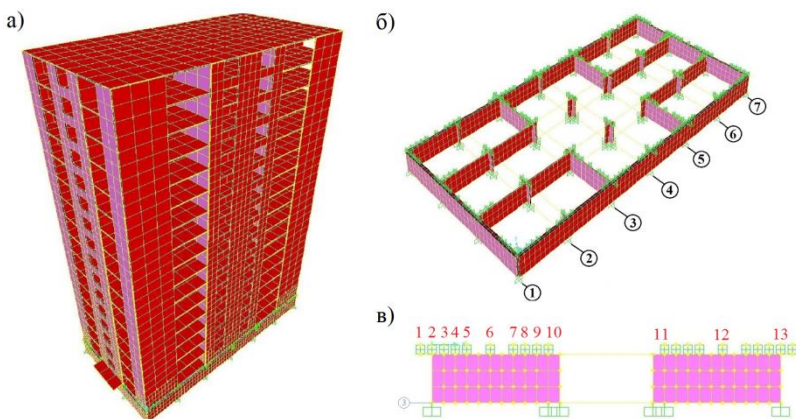


Рис.12. Расчетная схема шестнадцатизэтажного здания по программе SAP2000:

а - пространственная модель; б - общий план расположения СРМОС;

в - нумерация СРМОС по оси “3”

В расчетах СРМОС описаны двумя методами. В первом из них опора способна воспринимать в вертикальном направлении как сжимающие, так и растягивающие усилия, а во втором - только сжимающие усилия. При описании СРМОС использовались ее нелинейные характеристики. Расчеты проводились от

вертикальных статических нагрузок, а также от воздействия акселерограммы “Ашоцк”, которая посредством коэффициента модификации доведена до 0,4g.

Для решения данной задачи использован программный комплекс “SAP2000”, в котором реализован расчет методом “FNA”. Быстрый нелинейный анализ (FNA) - метод анализа, который используется в зарубежных странах для динамического нелинейного анализа зданий и сооружений по акселерограммам землетрясений.

Расчеты шестнадцатизатяжного здания проводились вышеуказанным методом, поскольку для решения задачи с большим количеством узлов и элементов методом прямого интегрирования требуется достаточно много времени.

Для более наглядной демонстрации эффекта “отрыва”, а также во избежание решения достаточно объемной задачи, воздействие акселерограммы задано только в поперечном направлении здания.

На рис.13 показаны зависимости усилий от времени, возникающие при вертикальной работе в элементе 1 по оси “З”.

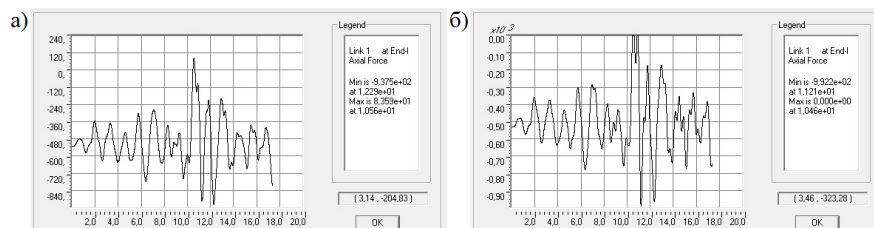


Рис.13. Зависимости усилий в опоре 1 от времени при ее вертикальной работе:
а - на растяжение и сжатие, б - только на сжатие

Получено, что при расчете по первому варианту (рис. 13 а), когда в расчетной схеме для описания СРМОС применяется элемент, воспринимающий вертикальное как сжатие, так и растяжение, в опоре 1 возникают растягивающие усилия. Однако при расчете по второму варианту вышеуказанное растягивающее усилие отсутствует (рис. 13 б), поскольку в этом случае для описания СРМОС применялся конечный элемент, воспринимающий только вертикальное сжатие. Вследствии этого происходит перераспределение сжимающих усилий между опорами системы сейсмоизоляции. Результаты расчетов показывают, что увеличение максимальных сжимающих усилий в результате перераспределения доходит до 6,6%.

Поскольку при расчетах зданий на сейсмические воздействия, кроме горизонтальных сейсмических нагрузок, действуют также и вертикальные, следует также учесть вертикальную компоненту акселерограммы “Ашоцк”.

Как и следовало ожидать, в элементах, которые воспринимают как сжимающие, так и растягивающие усилия, произошло увеличение растягивающих усилий, в результате чего эффект перераспределения сжимающих усилий в элементах, работающих только на сжатие, увеличился (табл. 5).

Отметим, что для большинства СРМОС в этом случае разница между максимальными сжимающими усилиями в результате перераспределения составляет в среднем 6...8%, но для некоторых опор эта разница варьируется в пределах 11...13%. Следовательно, среднее увеличение сжимающих усилий в опорах в результате перераспределения можно принять около 10%. Для получения более точных величин сжимающих усилий был произведен расчет здания от вертикальной статической нагрузки при воздействии акселерограммы “Ашоцк” в поперечном и вертикальном

направлениях здания методом прямого интегрирования, который зачастую применяется в подобных расчетах.

Таблица 5

Максимальные сжимающие усилия в СРМОС по оси “З”, возникающие от вертикальной статической нагрузки и при воздействии акселерограммы “Ашоук” в поперечном и вертикальном направлениях здания, при расчете методом FNA (кН)

Номер СРМОС	Максимальные сжимающие усилия в СРМОС в разные моменты времени воздействия акселерограммы		Разница (%)
	при работе СРМОС на растяжение и сжатие	при работе СРМОС только на сжатие	
1	1013,0	1098,0	7,7
2	1180,0	1280,0	7,8
3	1118,0	1213,0	7,8
4	1045,0	1118,0	6,5
5	974,2	1096,0	11,1
6	946,6	1009,0	6,2
7	1060,0	1219,0	13,0
8	1176,0	1349,0	12,8
9	1326,0	1518,0	12,7
10	1486,0	1697,0	12,4
11	1210,0	1325,0	8,7
12	980,3	998,8	1,9
13	1518,0	1545,0	1,8

Полученные результаты показывают, что сжимающие усилия, полученные методом прямого интегрирования, меньше усилий, полученных при расчете методом быстрого нелинейного анализа - в среднем на 15%.

Следовательно, с целью получения более точных результатов рекомендуется выполнять расчеты зданий методом прямого интегрирования. Однако вышеуказанный анализ показал, что, несмотря на метод расчета, перераспределение усилий в системе сейсмоизоляции, возникающее от сейсмического воздействия, однозначно существует. Во избежание сложностей, возникающих при выполнении нелинейного расчета зданий с сейсмоизоляцией, рекомендуется выбрать такую расчетную схему и такое расположение сейсмоизоляторов, чтобы исключить возможность возникновения их “отрыва” при сейсмическом воздействии.

ВЫВОДЫ

1. Для применяемых в РА сейсмоизоляторов получена зависимость максимально допускаемых горизонтальных перемещений от действия вертикальной силы с учетом сейсмических воздействий. Показана необходимость одновременного рассмотрения максимального горизонтального перемещения и вертикальной силы, действующей на СРМОС, для оценки ее несущей способности при сейсмическом воздействии.

2. Получена закономерность изменения максимальной горизонтальной жесткости СРМОС в зависимости от ее вертикального обжатия. Установлено, что изменение горизонтальной жесткости опоры сейсмоизоляции возрастает с увеличением вертикального обжатия сейсмоизолятора.

3. На основе исследований многоэтажных зданий разной этажности с системой сейсмоизоляции и без нее выявлены основные параметры, влияющие на изменение напряженно-деформированного состояния конструкций этих зданий. Сравнительный анализ показал изменения деформативных характеристик суперструктур (для

девятиэтажного здания значения перемещений и перекосов этажей с применением сейсмоизоляции уменьшаются в 2,1 раза, а значения суммарных поперечных сил на уровне сейсмоизоляции - в 2,5 раза). В результате сравнительного анализа высотных зданий разной этажности выявлено, изменение расхода материалов несущих конструкций (колонны, ригели, диафрагмы, плиты перекрытия) выше подвального этажа с системой сейсмоизоляции и без нее. Так, в рассмотренных случаях для шести-, девяти- и шестнадцатизэтажных зданий применение сейсмоизоляции привело к уменьшению расхода материалов несущих конструкций выше уровня подвального этажа: до 5% для бетона и от 20 до 27% - для арматуры.

4. Показано, что величины перемещений зданий с сейсмоизоляцией, заданной нелинейными конечными элементами, имеют меньшие значения по сравнению с теми же зданиями, где СРМОС описаны линейными КЭ, при этом эта разница (от 6 до 54%) носит неравномерный характер и зависит от спектральных характеристик акселерограмм.

5. Учитывая, что сейсмоизоляторы, применяемые в РА, не работают на растяжение, изучена возможность их “отрыва” при сейсмическом воздействии, что приводит к перераспределению усилий в системе сейсмоизоляции. На основе нелинейного анализа для рассмотренного шестнадцатизэтажного здания с сейсмоизоляцией выявлено, что увеличение сжимающих усилий в СРМОС в результате перераспределения усилий составляет в среднем около 10%, при этом “отрыву” подвергается 27,7% установленных опор. Учитывая сложность нелинейного расчета зданий с сейсмоизоляцией, рекомендуется обеспечить такие условия, чтобы в сейсмоизоляторах не возникало явления “отрыва”.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Դադայան Տ.Լ., Վարդանյան Խ.Գ. Բազմահարկ երկաթբետոնե շրջանակակապային շենքերում սեյսմամեկուսիչների կիրառման արդյունավետությունը // ԵՃԵՂՀ գիտական աշխատությունների ժողովածու.- 2013.- Հատոր. III (50).- էջ 114-120:

2. Dadayan T.L., Vardanyan Kh.G. The decrease of seismic forces for multistory reinforce concrete shear wall-frame buildings with application of seismic isolation // International conference ‘Seismics 2014’. - Georgia, Tbilisi, 2014.-Vol.1.- P. 12-19.

3. Варданян Х.Г. Возможность учета перераспределения усилий в сейсмоизоляторах зданий при расчете на сейсмическое воздействие // Научные труды НУАСА.- 2016.- Т. III (62).- С. 144-147.

4. Դադայան Տ.Լ., Վարդանյան Խ.Գ. Ռետինամետաղե սեյսմամեկուսիչ հենարաններով երկաթբետոնե շրջանակակապային համակարգով շենքերի տնտեսապես շահավետության մասին // ՃՀՀԱՀ գիտական աշխատություններ.- 2015.- Հատոր IV(59).- էջ 126-133:

5. Дадаян Т.Л., Варданян Х.Г. Изменение расхода материалов несущих конструкции железобетонных рамно-связевых зданий с применением сейсмоизоляторов // Сборник докладов Международной научной конференции, посвященной 85-летию кафедры железобетонных и каменных конструкций и 100-летию со дня рождения Н.Н. Попова.- М., 2016.- С. 80-85.

6. Варданян Х.Г. Влияние вертикального обжатия на горизонтальную жесткость подушки // Научные труды НУАСА.- 2017.- Т. I (64).- С. 126-129.

ԽԱՉԱՏՈՒՐ ԳՐԻԳՈՐԻ ԿԱՐԴԱՆՅԱՆ

ՍԵՅՍՄԱՄԵԿՈՒՍԱՅՄԱՆ ՇԵՐՏԱՎՈՐ ՌԵՏԻՆԵ ՄԵՏԱՂՅԱ ՀԵՆԱՐԱՆՆԵՐԻ
ՎԱՐՔԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ՍԵՅՍՄԻԿ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ա Մ Փ Ո Փ Ա Գ Ի Ր

Սույն ատենախոսության նպատակն է գնահատել սեյսմամեկուսացման շերտավոր ռետինե մետաղյա հենարանների (ՄՇՌՄՀ) լարվածադեֆորմացիոն վիճակը արտաքին բեռնվածքների ազդեցությունից, ինչպես նաև հաշվի առնել դրանց մեջ առաջացող ճիգերի վերաբաշխումը սեյսմիկ ազդեցությունների դեպքում: Նշված նպատակին հասնելու համար առաջադրվել են հետևյալ հիմնական խնդիրները.

- ուսումնասիրել ստատիկ և սեյսմիկ ուղղաձիգ ուժերի ազդեցությունից ՄՇՌՄՀ-ի լարվածադեֆորմացիոն վիճակը,

- ուսումնասիրել արտաքին բեռնվածքի ուղղաձիգ բաղադրիչի ազդեցությունը ՄՇՌՄՀ-ի հորիզոնական կոշտության վրա,

- համեմատել սեյսմամեկուսացման համակարգով և առանց դրա բազմաափսիս երկաթբետոնե շրջանակակապային հիմնակմախքով շենքերի կրող տարրերի լարվածադեֆորմացիոն վիճակը սեյսմիկ ազդեցության դեպքում,

- համեմատել սեյսմամեկուսացման համակարգով և առանց դրա բազմաափսիս երկաթբետոնե շրջանակակապային հիմնակմախքով շենքերի կրող կոնստրուկցիաների նյութերի ծախսերը,

- ուսումնասիրել ՄՇՌՄՀ-ի լարվածադեֆորմացիոն վիճակը տարբեր երկրաշարժերի աքսելերոգրամներով հաշվարկի դեպքում՝ հաշվի առնելով դրանց ինչպես գծային, այնպես էլ ոչ գծային աշխատանքը,

- վերլուծել սեյսմամեկուսացման համակարգում նորմալ լարումների փոփոխումը՝ հաշվի առնելով ճիգերի վերաբաշխումը սեյսմիկ ազդեցությունից:

Ատենախոսական աշխատանքի հիմնական արդյունքներն են.

1. ՀՀ-ում կիրառվող սեյսմամեկուսիչների համար ստացվել է առավելագույն թույլատրելի հորիզոնական տեղափոխությունների կախվածությունը ուղղաձիգ ուժի ազդեցությունից՝ հաշվի առնելով սեյսմիկ ազդեցությունը: Մեյսմիկ ազդեցության դեպքում ՄՇՌՄՀ-ի կրողունակությունը գնահատելու համար ցույց է տրվել դրա առավելագույն տեղափոխության և իր վրա ազդող ուղղաձիգ ուժի միաժամանակ դիտարկման անհրաժեշտությունը:

2. Ստացվել է ՄՇՌՄՀ-ի առավելագույն հորիզոնական կոշտության փոփոխման օրինաչափությունը՝ կախված դրա վրա ազդող ուղղաձիգ սեղմող

ուժից: Ներկայացված է, որ հենարանի հորիզոնական կոշտության փոփոխությունը սեյսմամեկուսչի ուղղաձիգ սեղման ուժի մեծացման հետ միասին աճում է:

3. Սեյսմամեկուսացման համակարգով և առանց դրա տարբեր հարկայնությամբ բազմահարկ շենքերի հետազոտման արդյունքում բացահայտվել են այդ շենքերի կոնստրուկցիաների լարվածադեֆորմացիոն վիճակը փոփոխող հիմնական պարամետրերը: Համեմատական վերլուծության հիման վրա ստացված են վերհենարանային մասի դեֆորմատիվ բնութագրերի փոփոխությունը (ինը հարկանի շենքի համար հարկերի տեղափոխությունները և շեղվածքները սեյսմամեկուսացման կիրառման դեպքում նվազում են 2,1 անգամ, իսկ սեյսմամեկուսացման մակարդակում գումարային լայնական ուժերի մեծությունները՝ 2,5 անգամ): Սեյսմամեկուսացման համակարգով և առանց դրա տարբեր հարկայնությամբ բարձրահարկ շենքերի համեմատական վերլուծության հիման վրա ստացվել է վերհենարանային մասի կրող կոնստրուկցիաների (սյուներ, պարզունակներ, դիաֆրագմաներ, ծածկի սալեր) նյութերի ծախսի փոփոխությունը: Այսպես, սեյսմամեկուսացման կիրառումը դիտարկված վեց, ինը և տասնվեց հարկանի շենքերի դեպքում հանգեցրել է վերհենարանային մասի կրող տարրերի նյութերի ծախսի նվազեցմանը՝ բետոնինը մինչև 5%, իսկ ամրանինը 20-ից մինչև 27%:

4. Ցույց է տրված, որ ՄՇՌՄՀ-ի աշխատանքի ոչ գծային մոդելավորման դեպքում սեյսմամեկուսացված շենքի տեղափոխություններն ունեն ավելի փոքր արժեքներ, քան գծային մոդելավորման դեպքում, ընդ որում, այդ տարբերությունը կրում է անհամաչափ բնույթ և կախված է աքսելերոգրամի սպեկտրի բնույթից (6%-ից մինչև 54%):

5. Հաշվի առնելով, որ ՀՀ-ում կիրառվող սեյսմամեկուսիչները չեն աշխատում ձգման, հետազոտված է դրանց «պոկման» հնարավորությունը սեյսմիկ ազդեցության դեպքում, որը հանգեցնում է ճիգերի վերաբաշխմանը սեյսմամեկուսացման համակարգում: Սեյսմամեկուսացման համակարգով դիտարկված տասնվեց հարկանի շենքի համար ոչ գծային վերլուծության հիման վրա ստացվել է, որ ճիգերի վերաբաշխման արդյունքում ՄՇՌՄՀ-ում սեղմող ճիգերի մեծություններն ավելանում են մոտ 10%, ընդ որում «պոկման» է ենթարկվում տեղադրված հենարանների 27,7%-ը: Հաշվի առնելով սեյսմամեկուսացման համակարգով շենքերի ոչ գծային հաշվարկների բարդությունները՝ խորհուրդ է տրվում ապահովել սեյսմամեկուսիչներում «պոկման» երևույթը բացառող պայմաններ:

THE INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF SEISMIC ISOLATION LAYERED
STEEL-RUBBER BEARINGS IN CASE OF SEISMIC IMPACTS

S U M M A R Y

The goal of the present dissertation is to evaluate the stress-strain state of seismic isolation layered steel-rubber bearings under the influence of external loads, and to take into consideration the redistribution of forces, occurring in seismic isolators in case of seismic impact. For this purpose, the following problems are considered:

- investigating the stress strain state of seismic isolators under the impact of static and seismic vertical forces;
- investigating the impact of the external load's vertical component on the seismic isolator's horizontal stiffness;
- comparing the stress-strain state of the multistorey reinforced concrete building load bearing elements with and without seismic isolation system in case of seismic impact;
- comparing the materials' consumption of the multistorey reinforced concrete buildings' load bearing structures with and without seismic isolation system;
- investigating the stress-strain state of seismic isolators in case of calculating with different earthquake accelerogrammes, taking into consideration their linear and non-linear work;
- analyzing the change of normal stresses in the seismic isolation system, taking into account redistribution of forces under seismic impact.

The main results of the dissertation are:

1. For seismic isolators applied in RA, the dependence of the maximum allowable horizontal displacements on the impact of the vertical force is obtained, considering seismic impact. To evaluate the bearing capacity of seismic isolators at seismic impact, the necessity of simultaneous consideration of the maximum allowable horizontal displacements and the vertical forces is shown.

2. The regularity of the change in the maximum horizontal stiffness of the seismic isolators depending on the vertical compression forces, affecting that is obtained. The results show that the change of horizontal stiffness increases with the growth of the seismic isolator's vertical compression force.

3. As a result of investigating different multistorey buildings with and without seismic isolation system, shows the main parameters, changing the stress-strain state of those buildings' structures. The change of the superstructure's deformation characteristics was found on the basis of comparative analysis (for a 9 - storey building in case of seismic isolation, storey displacements and drifts decrease 2,1 times, and at the level of seismic isolation, the values of additional horizontal forces decrease 2,5 times). The comparative analysis of these multistorey buildings of various heights with and without seismic isolators shows the change in the material consumption of superstructure's bearing members (columns, beams, diaphragms, slabs). Hence, the application of seismic isolation investigated in case of six, nine and sixteen-storey buildings lead to the decrease in materials consumption of superstructure's bearing elements: concrete up to 5%, and reinforcement from 20 to 27%.

4. In case of non-linear modeling of a seismic isolator, the displacements of buildings with seismic isolation have smaller values than in case of linear modeling. Moreover, the difference has a non-uniform character and depends on the type of the accelerogram's spectrum (6...54%).

5. Considering that seismic isolators applied in Armenia do not work under tension forces, their 'uplift' possibility under seismic impact is investigated, which leads to redistribution of forces in the seismic isolation system. The non-linear analysis of the sixteen-storey building with a seismic isolation system shows that, as a result of redistribution of forces, the values of compressing forces in seismic isolators increase by 10%, where 27,7% of bearings is exposed to 'uplift'. Taking into consideration the difficulties of non-linear calculations of buildings with a seismic isolation system, it is recommended to ensure such conditions so that the phenomenon of 'uplift' will not occur in seismic isolators.

