

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ СПЕКТРОВ ОТВЕТОВ ДЛЯ ВЫБОРА И РАСЧЕТА ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ МОСТОВ В СЕЙСМООПАСНЫХ РАЙОНАХ

Курбацкий Е. Н., д-р техн. наук, профессор; Бахссас Фуад Хассан аспирант, МИИТ, Москва

The authors describe experimental and theoretical research of the answer spectra conception and consider the most common types of seismically protective and energy-absorbing carriages.

Сильные землетрясения (с интенсивностью 7 баллов и более по шкале МСК-64) сообщают конструкции большое количество энергии, которая может вызвать сильные деформации, а иногда и разрушения. Для предотвращения таких последствий и для обеспечения "живучести" конструкций они должны иметь способность рассеивать энергию при колебаниях вследствие присутствия внутреннего конструкционного трения в материале, из которого они изготовлены, или неупругих деформаций. Проблемы рассеяния энергии особенно важны для мостов, так как конструкции мостов, и в особенности мостов с большими пролетами, обладают слабыми демпфирующими свойствами. Как правило, демпфирование составляет менее 5% от критического. При отсутствии специальных энергопоглощающих элементов в случае сильных землетрясений демпфирование колебаний происходит только за счет внутреннего трения и неупругих деформаций. Мосты, рассчитанные только на собственный вес и эксплуатационную нагрузку, при чрезвычайных воздействиях могут получить серьезные повреждения или даже разрушиться вследствие больших деформаций за пределами упругости.

Другой особенностью мостов, делающей их более уязвимыми при сейсмических воздействиях по сравнению с другими сооружениями, являются их низкие собственные частоты, лежащие в диапазоне от 0,5 до 5,0 Гц. Они близки к доминирующим частотам при сейсмических воздействиях.

Воздействие землетрясений на конструкцию можно существенно уменьшить, применив для этой цели специальные сейсмоизолирующие опорные части и поглотители энергии.

В последние годы после сильных землетрясений в различных частях земного шара во многих странах были разработаны новые типы опорных частей, усовершенствованы нормативные документы по расчету сейсмоизолированных мостов на сейсмостойкость. На первом, предварительном этапе подбора и проектирования виброизолирующих опорных частей в нормах многих стран [1] допускается использование упрощенных моделей. В настоящее время в российских нормах отсутствуют рекомендации по расчету сейсмоизолирующих устройств, поэтому изложим некоторые методики их расчета, получившие широкое распространение за рубежом.

Для уменьшения сейсмических воздействий на сооружение необходимо запроектировать конструкцию таким образом, чтобы исключить возникновение резонансных явлений на частотах, в областях которых при землетрясениях аккумулируется большая часть энер-

гии. Изменение параметров пролетного строения, влияющих на существенное изменение (масс, жесткости) собственных частот, как правило, не представляется возможным, поэтому наиболее приемлемым способом защиты от сейсмических воздействий является установка специальных опорных частей и демпфирующих устройств. Наиболее удобным для выбора, расчета и конструирования сейсмоизолирующих устройств является метод с использованием спектров ответов.

Концепция спектров ответов и история ее возникновения

Спектры реакций (ответов) — одна из наиболее важных, полезных и широко используемых концепций в теории и практике расчетов сооружений на сейсмостойкость. Будучи предложена более 80 лет назад, в настоящее время эта концепция используется практически во всех зарубежных нормативных документах и руководствах по расчету сооружений на сейсмостойкость.

В российских нормах для оценки сейсмических воздействий используется понятие "спектральный коэффициент динамичности" β . Кривые этого коэффициента в российских нормах строятся как функции периода свободных колебаний осциллятора. Это практически та же концепция в завуалированной форме. В зарубежных нормах тот же коэффициент называется спектром реакций (отклика или ответа), что в большей степени соответствует физической сущности этого параметра.

Экспериментальные исследования

Впервые идея использования спектров реакций для представления сейсмических воздействий была изложена в 1926 г. в Бюллетене Института исследования землетрясений Императорского Токийского Университета в статье первого директора этого института К.А. Сюэхиро [2]. Его анализатор сейсмических реакций состоял из 13 маятников с различными собственными частотами, изменяющимися в диапазоне от 0,55 до 4,5 Гц (или периоды в диапазоне от 0,22 до 1,81 с). Во время землетрясений колебания маятников записывались на вращающиеся барабаны, фиксируя реакцию маятников на реальное сейсмическое воздействие. На каждой диаграмме выбиралась только одна точка — максимальное перемещение данного маятника — и наносилась на график, в котором по горизонтальной оси откладывались в масштабе частоты (периоды) колебаний маятников, а по вертикальной — максимальные значения перемещений маятников при данном сейсмическом воздействии. Указанный прибор на несколько лет предвосхитил развитие теории спектров ответов. Схематично этот прибор и методика построения спектра ответа представлена на рис. 1.

Позднее в США в отделении Береговой и Геодезической службы Сан-Франциско (USCGS) было создано подобное устройство с большим числом маятников. В какой мере прибор Сюэхиро повлиял на ранние исследования американских ученых, неизвестно.

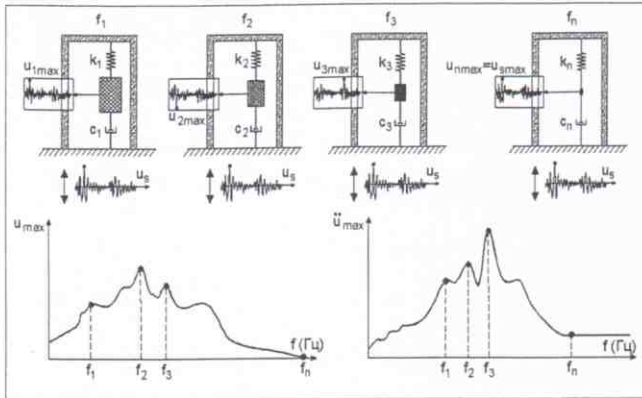


Рис. 1. Прибор Сюэхино и экспериментальное построение спектров ответов

В 1931 г. Сюэхино был приглашен Американским обществом гражданских инженеров для чтения лекций в Калифорнийском Технологическом Институте, в Стэнфордском университете и в Калифорнийском университете в Беркли. Эти лекции опубликованы в 1932 г. в серии работ Американского общества гражданских инженеров (ASCE).

В 1934 г. Х. Беньофф опубликовал идею, состоящую в том, что набор маятников с различными собственными частотами можно использовать для получения "сейсмограммы реакций". Кроме того, он также высказал идею о возможности количественной оценки разрушительности землетрясений, используя площадь "маятникового спектра".

Теоретические исследования

В 1930 г. в Калифорнийском технологическом институте большая группа талантливых ученых начала исследования в области сейсмологии и динамических расчетов сооружений при сейсмических воздействиях. Толчком к этим исследованиям стала Всемирная инженерная конференция в Токио в 1929 г., а также курс лекций по волновым процессам и вибрациям, которые прочитал профессор Теодор фон Карман.

Основы математической теории спектров ответов были изложены в докторской диссертации Био, выполненной под руководством фон Кармана. Работы Био продолжил Хаузнер, который анализировал воздействие землетрясений на сдвиговые и изгибаемые балки. При этом он подчеркивал, что спектры ответов являются более удобными в инженерных расчетах, чем спектры Фурье.

Для определения спектров ответов создавались специальные механические устройства. Отметим некоторые из них:

- графический интегратор Интеграф;
- вибрирующий стол для измерения реакций систем с одной степенью свободы Якобсона и Хоффа;
- крутильный маятник системы Саваджа;
- механический анализатор экспериментальных акселерограмм Био и Хаузнера.

Кроме того, в это же время был разработан метод численного интегрирования интеграла Дюамеля.

Все эти способы получения спектров ответов требовали создания громоздких устройств и много времени для обработки данных.

После окончания Второй мировой войны Хаузнер использовал электрические аналоговые машины для построения спектров ответов, что существенно увеличило скорость и точность обработки экспериментальных акселерограмм.

Методы вычисления спектров ответа для линейных систем

С появлением быстродействующих компьютеров возможности реализации численных методов с использованием больших массивов данных существенно возросли. Разработке численных методов построения спектров ответов способствовало и то, что современные измерительные комплексы позволяют получать сейсмограммы колебаний поверхности грунта при землетрясениях в удобной для дальнейшей обработки цифровой форме.

Для построения спектров ответов необходимо решить дифференциальное уравнение:

$$u + 2\xi\omega u + \omega^2 u = -y_s(t). \quad (1)$$

В правой части уравнения находится функция $y_s(t)$, описывающая колебания основания, полученная экспериментальным путем и заданная в дискретной цифровой форме.

ω есть частота собственного колебания осциллятора при отсутствии демпфирования, ξ — относительный коэффициент демпфирования.

Из полученного решения для осциллятора с заданной частотой ω и коэффициентом демпфирования ξ выбирается только одно максимальное значение. С целью построения кривой максимальных значений находят решения для набора осцилляторов, имеющих разные собственные частоты.

Для учета демпфирующих свойств различных строительных материалов необходимо построить семейство спектральных кривых с различными коэффициентами демпфирования. Например, для бетона он зависит от уровня напряжений и находится в пределах от 2 до 4%, для резинометаллических опорных частей этот коэффициент может меняться в широких пределах, от 6 до 18%.

В настоящее время разработано много способов построения спектров ответов с использованием известных численных методов:

- ♦ вычисление спектров ответов с использованием интеграла Дюамеля;
- ♦ метод прямого интегрирования;
- ♦ метод изображений Фурье финитных функций.

С целью вычисления спектров ответов используют также различные численные методы решения дифференциальных уравнений. Среди наиболее известных и часто используемых следует отметить θ -метод Вильсона, β -метод Ньюмарка, метод Рунге-Кутты, а также метод решения с помощью преобразования Фурье с использованием алгоритма "быстрого преобразования".

Спектры ответов для неупругих систем

При сильных сейсмических воздействиях сооружения будут работать в неупругой стадии. Поэтому во многих зарубежных нормах, разработанных в последнее время, допускается возможность работы материала конструкций за пределами упругости. Считается нецелесообразным и экономически невыгодным про-

ектировать сооружения таким образом, чтобы при воздействии сильных землетрясений конструкции работали только в упругой стадии. Поэтому допускаются разрушения отдельных элементов. Эти разрушения ограничиваются пластическими деформациями колонн, устоев, замковых элементов, которые сравнительно легко доступны для обследования, ремонта и не приносят большого вреда конструкции в целом.

Ньюмарк и Холл предложили метод построения спектров ответов с использованием упругопластических моделей. Соответствующее поведение конструкции описывается соотношением, которое графически представлено на рис. 2.

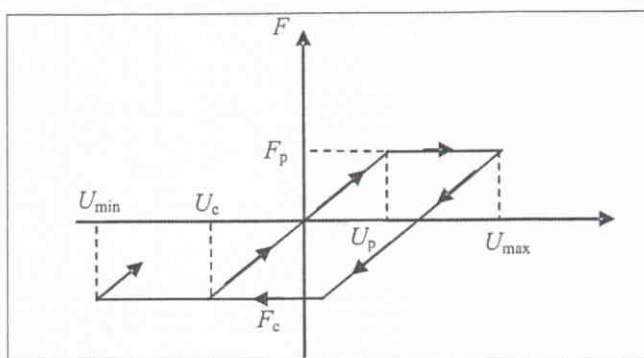


Рис. 2. Зависимость между силой и перемещениями при упругопластическом поведении системы с одной степенью свободы

В соответствии с рекомендациями Ньюмарка и Холла при построении спектров ответов для неупругих систем используют спектры ответов упругих систем, умноженные на понижающий коэффициент $\sqrt{2\mu-1}$, где μ — коэффициент пластичности.

Пример построения спектров ответа

Исходными данными для построения спектров ответов являются синтезированные акселерограммы колебаний поверхности грунта строительной площадки при возможных землетрясениях. На рис. 3 представлена акселерограмма колебаний поверхности грунта и соответствующий ей спектр ответов.

Для расчетов используют сглаженные спектры ответов, полученные в результате усреднения спектров ответов нескольких сильных землетрясений. В энергетическом отношении спектры ответов отображают области частот, в которых сконцентрирована большая часть энергии землетрясений. Анализ спектров ответов показывает, что, изменяя собственную частоту колебаний и демпфирование системы, можно существенно уменьшить реакцию сооружения на сейсмическое воздействие. Установка достаточно эластичных опорных частей взамен обычных позволяет удлинить период собственных колебаний от величины, меньшей 1 с, до 3–5 с. Это, в свою очередь, может уменьшить динамический коэффициент в 3–8 раз по сравнению с мостами с обычными опорными частями. Демпфирующие устройства также являются необходимыми элементами сейсмоизоляции. Демпфирующие устройства в некоторых случаях служат не только для поглощения энергии, но и в качестве ограничителей перемещений концов пролетных строений.

Для определения усилий, возникающих в опорных частях при землетрясении, необходимо:

- построить спектр ответов, используя заданную синтезированную акселерограмму;
- определить собственную частоту продольных и поперечных колебаний пролетного строения;
- при использовании моделей с большим числом степеней свободы определить все собственные частоты, которые попадают в область доминирующих частот спектра ответов;
- рассчитать инерционную силу, умножив массу пролетного строения на ускорение спектра ответов, соответствующее данной частоте;
- при использовании моделей с большим числом степеней свободы вычислить инерционные силы, умножив модальные массы на ускорения спектра ответов, соответствующие собственным частотам;
- определить усилия в опорных частях, приложив инерционные силы к пролетному строению.

Максимальные усилия в опорных частях при сейсмических воздействиях можно найти и другим способом, используя спектр максимальных перемещений. Тогда максимальное усилие в опорных частях будет определяться произведением максимального перемещения на жесткость опорной части. Как показывает анализ разрушений мостов при землетрясениях, повреждения происходят вследствие горизонтальных колебаний поверхности грунта [3].

Моделирование сейсмоизолированных конструкций

Упрощенная схема моста как системы с одной степенью свободы представлена на рис. 4. Приняты обозначения:

- m_0 — масса пролетного строения;
- c_0 — коэффициент вязкого (конструкционного)

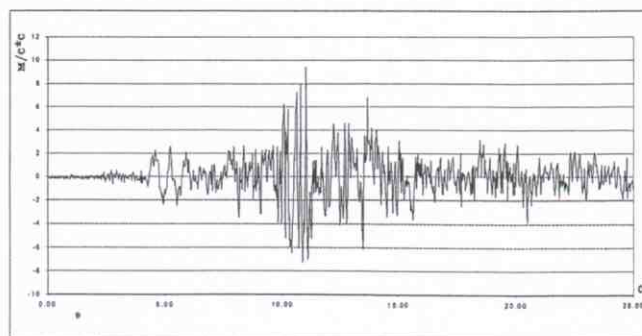


Рис. 3. Акселерограмма колебаний поверхности грунта и соответствующий ей спектр ответов

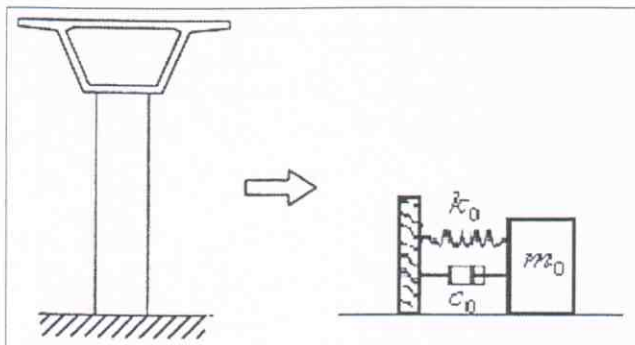


Рис. 4. Упрощенная расчетная схема

демпфирования опор;

k_0 — коэффициент суммарной жесткости опор;

u_g — акселерограмма колебаний поверхности грунта при землетрясении.

Дифференциальное уравнение движения пролетно-строения при воздействии землетрясений имеет вид

$$m_0 u + c_0 u + k_0 u = -m_0 u_g \text{ или } u + 2\xi \omega_0 u + \omega_0^2 u = -u_g, \quad (2)$$

где ξ — безразмерный коэффициент демпфирования (отношение реального демпфирования к критическому),

$$\text{где } \xi = c_0 \sqrt{a^2 + b^2} / 2\sqrt{k_0 m};$$

ω_0 — циклическая частота собственных колебаний без учета демпфирования,

$$\omega_0 = \sqrt{k_0 / m}.$$

Период собственных колебаний недемпфированной системы определяется выражением

$$T = 2\pi \sqrt{m / k_0}. \quad (3)$$

При малых коэффициентах демпфирования его влиянием на период колебаний можно пренебречь.

Добавление виброизолирующих опорных частей с коэффициентом жесткости k_i и коэффициентом демпфирования c_i можно моделировать расчетной схемой, представленной на рис. 5.

Дифференциальное уравнение колебаний такой системы имеет вид

$$m u + (c_0 + c_1) u + K u = -m u_g \text{ или } u + 2\xi \omega_0 u + \omega_0^2 u = -u_g, \quad (4)$$

где K — эквивалентная жесткость опор и опорных частей, $K = k_0 k_i / (k_0 + k_i)$;

ξ_i — эквивалентный безразмерный коэффициент

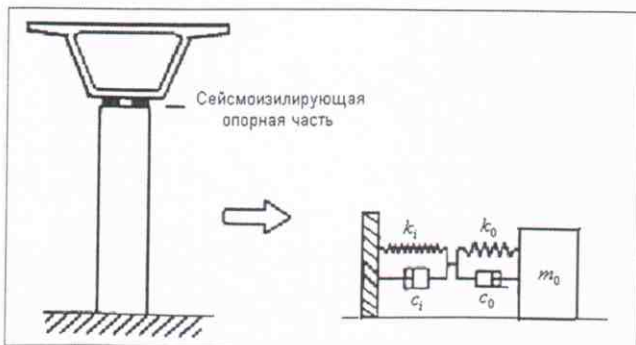


Рис. 5. Расчетная схема с учетом виброизолирующих устройств

демпфирования, учитывающий конструктивное демпфирование опор и рассеяние энергии демпфирующими устройствами,

$$\xi_i = (c_0 + c_i) \sqrt{k_0 + k_i} / 2m \sqrt{k_0 k_i},$$

ω_{0i} — частота собственных колебаний без учета демпфирования,

$$\omega_{0i} = \sqrt{K / m}.$$

Учитывая, что при использовании сейсмоизолирующих опор демпфирование может существенно влиять на параметры колебаний, определим период собственных колебаний системы с учетом демпфирования:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K(1-\xi_i^2)}} = 2\pi \sqrt{\frac{m(k_0 + k_i)}{k_0 k_i K(1-\xi_i^2)}}. \quad (5)$$

В качестве примера отметим, что для того, чтобы в случае применения виброизолирующих устройств период собственных колебаний возрос втрое, величина k_i составила 10% от k_0 .

Оценка влияния демпфирующих элементов на реакцию конструкции на сейсмические воздействия

В теории динамики сооружений и в нормах различных стран используется понятие критического коэффициента демпфирования, под которым понимают значения демпфирования, исключая гармонические свободные колебания. Он определяется по формуле

$$c_{cr} = 2\sqrt{k_0 m}. \quad (6)$$

Относительный (безразмерный) коэффициент демпфирования обычно задается в процентах от критического и определяется выражением

$$\xi = c_0 / c_{cr} = c_0 / (2\sqrt{k_0 m}). \quad (7)$$

Кроме механизма вязкого рассеяния энергии ее диссипация может проявляться из-за нелинейного поведения системы. Рассеяние энергии при нелинейном поведении описывается гистерезисными кривыми. Дифференциальное уравнение движения в этом случае можно представить в виде

$$m_0 u + c_0 u + f(u, u) = -m_0 u_g. \quad (8)$$

Существуют различные подходы решения таких задач. Наиболее точные решения получаются при учете действительного поведения демпфирующих устройств, когда необходимо решать нелинейные задачи. На практике достаточно точно эффективность демпфирующих устройств описывается эквивалентным вязким трением. Одним из способов расчета таких устройств является "метод эквивалентного коэффициента демпфирования", который определяется через отношение энергии, рассеянной демпфирующим устройством за один цикл E_d , к максимальной энергии деформации E_{max} , запасаемой системой:

$$\xi_{eq} = E_d / E_{max}. \quad (9)$$

Таким образом, схемы сооружений с дополнительным модальным демпфированием дают возможность применить для расчета хорошо разработанные методы линейного анализа во временной области с использованием синтезированных акселерограмм или спектральным методом с использованием спектров ответов.

Сейсмоизолирующие и энергопоглощающие устройства

В последние десятилетия разработано и испытано большое число сейсмоизолирующих и энергопоглощающих устройств для мостовых конструкций. Рассмотрим наиболее часто используемые в мостостроении типы опорных частей [4].

1. Эластомерные опорные части

Эластомерные (резинометаллические) опорные части (ОЧ) выполнены из синтетической резины. При установке на опоры эластомерные ОЧ на вертикальные воздействия работают как обычные ОЧ, так как имеют достаточно большую жесткость в вертикальном направлении. Относительно малая жесткость в горизонтальном направлении позволяет использовать их в качестве сейсмоизоляторов. Эластомерные ОЧ могут использоваться в широком диапазоне температур (от -40 до $+50$ °С).

В последние годы широко используются эластомерные ОЧ со свинцовым вкладышем. Такие ОЧ известны в мире под маркой LRB или DIS (рис. 6).

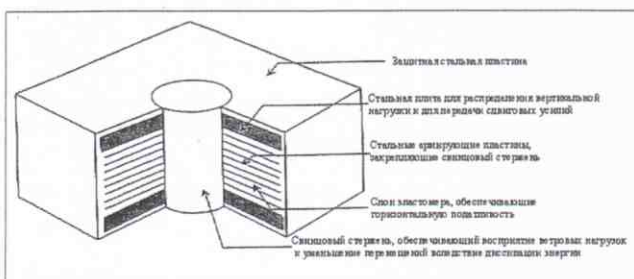


Рис. 6. Резинометаллическая опорная часть со свинцовым стержнем

Эффективность таких ОЧ обусловлена высокой диссипацией энергии свинцовой вставкой. Указанная ОЧ ведет себя как упругопластический элемент [5].

2. Фрикционные маятниковые сейсмоизолирующие опорные части

Скользящие маятниковые ОЧ предназначены для уменьшения динамических воздействий, передаваемых на сооружение и отдельные его элементы при землетрясениях.

Конструкция маятниковых ОЧ содержит две сферические поверхности (верхнюю и нижнюю), которые при колебаниях скользят одна относительно другой (рис. 7). При горизонтальных перемещениях пролетного строения часть кинетической энергии трансформируется в потенциальную, которая создает возвращающую упругую силу.

Такие ОЧ называются самоцентрирующимися. В расчетах они моделируются упругими элементами (пружинами).

3. Фрикционные скользящие сейсмоизолирующие опорные части

Одним из наиболее популярных и распространенных способов сейсмоизоляции мостовых конструкций является использование фрикционных скользящих ОЧ. Поглощение энергии в них происходит за счет работы сил трения и рассеяния ее в виде тепла в окружа-

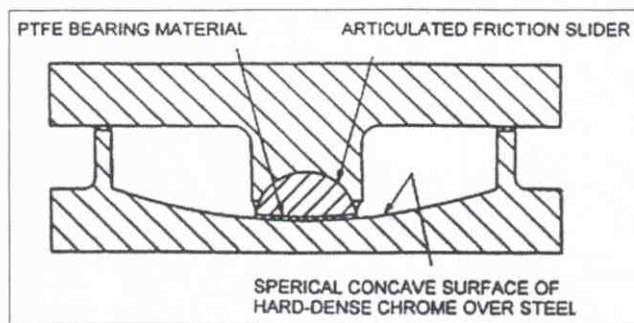


Рис. 7. Принципиальная схема маятниковой скользящей опоры

ющее пространство. Особенностью этих ОЧ является широкий диапазон частот, в котором они эффективно рассеивают энергию сейсмических воздействий и уменьшают амплитуды колебаний элементов конструкций.

На рис. 8 показана одна из получивших наиболее широкое распространение конструкций ОЧ такого типа, известная под маркой R-FBI (резинофрикционные изоляторы) [6].

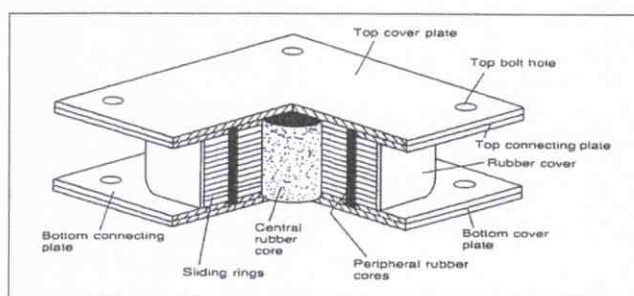


Рис. 8. Фрикционная опорная часть марки R-FBI

Резиновые стержни не несут вертикальную нагрузку, поэтому вулканизируются внутри ОЧ и обеспечивают распределение относительных перемещений пластин по высоте. Такая комбинация подвижных пластин и резины обладает фрикционными и упругими свойствами.

Литература

1. Guide specification for seismic isolation design [Текст] / American Association of State Highway and Transport Officials, Washington DC. — 1991.
2. Suehiro K. A seismic analyzer and the records obtained therein [Текст] / K. Suehiro // Bulletin of the Earthquake Research Institute. — University of Tokyo. — 1926. — 1:59–64.
3. Farzad Naeim. The Seismic Design Handbook [Текст] / Farzad Naeim, Zhongzhi Shi; Kluwer. — Academic Publishers, Springer, 2001.
4. Bridge Engineering Handbook [Текст] / Ed. Wai-Fah and Lian Duan; Boca Raton: CRC Press, 2000.
5. Dynamic Isolation System, Force Control Bearings for Bridges [Текст] // Seismic Isolation Design Rev. — 4, Lafayette, CA, Oct. 1994.
6. Mostghel N. Response sliding structures to earthquake support motion [Текст] / N. Mostghel, M. Khodaverdian // Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1987. — Vol. 11, 729–748.