

Обеспечение сейсмостойкости железнодорожных мостов



И. О. Кузнецова,
канд. техн. наук, доцент
кафедры «Мосты»
Петербургского
государственного
университета путей
сообщения (ПГУПС)



А. М. Уздин,
докт. техн. наук, профессор
кафедры «Теоретическая
механика» ПГУПС



А. А. Долгая,
канд. техн. наук,
ОАО «Трансмост»



М. В. Фрезе,
канд. техн. наук,
ОАО «Трансмост»



С. А. Шульман,
генеральный директор
Группы компаний
«Стройкомплекс-5»

Опорные сейсмоизолирующие устройства, примененные при строительстве железнодорожных мостов на олимпийских объектах в г. Сочи, не имеют аналогов в мировой практике сейсмостойкого строительства. Их высокие защитные качества обеспечиваются как при проектных, так и при максимальных расчетных землетрясениях. Эта система сеймозащиты позволяет прогнозировать характер накопления повреждений в конструкции, сохранить мост в ремонтпригодном состоянии в случае разрушительного землетрясения, а также обеспечивает нормальную эксплуатацию моста, не приводя к расстройству пути при эксплуатационных нагрузках.

Железнодорожный транспорт имеет исключительное значение для жизнеобеспечения территорий, подверженных сейсмическим воздействиям, особенно в урбанизированных районах: при землетрясениях в местах сосредоточения населения и развернутой экономической жизни требуются экстренные меры по спасению людей, материальных ценностей, а затем по первоочередному восстановлению разрушенных объектов.

Между тем при сильных землетрясениях железные дороги достаточно часто подвергаются серьезным разрушениям. Например, в Армении, при Спитакском землетрясении 1987 г., практически полностью был разрушен участок железной дороги от Кировокана до Ленинакана. Его восстановление велось силами военных железнодорожников в течение 7 дней. Все это время пострадавшие испытывали острую нужду в спасательных средствах, питьевой воде, медикаментах. Промышленность района была парализована в течение нескольких месяцев. Подобная обстановка складывалась и в других странах, например во время землетрясений в Кобе (Япония) и на Тайване.

Таким образом, обеспечение срочных перевозок в районах сильных землетрясений невозможно без принятия мер по повышению сейсмостойкости самих железных дорог, позволяющих осуществлять эти перевозки. Однако до настоящего времени комплексная постановка этой проблемы и четкая концепция ее решения отсутствуют. Вопрос об этом поднимался специалистами Петербургского

университета путей сообщения как в научной [1], так и в учебной [2] литературе.

В СССР проблеме сейсмостойкости транспортных сооружений уделялось достаточное внимание, но после распада страны, когда начались процессы децентрализации и приватизации транспортных объектов, в области сейсмической безопасности транспортных сетей, как и во многих других, прекратилось государственное регулирование и остановились научные исследования. Если до 1995 г. транспортная наука в нашей стране была одной из самых развитых в мире, то в настоящее время она уступает науке многих развитых стран, и прежде всего в разработке и реализации систем сейсмозащиты. Современные сейсмозащитные устройства поставляются в нашу страну ведущими западными фирмами Maurer Soehnes [3] и FIP Industriale [4]. При этом фирмы заинтересованы скорее в продаже своей продукции, чем в обеспечении безопасности дорожной сети. Инженерный же состав российских проектных организаций не имеет необходимой квалификации для качественной проверки эффективности систем сейсмозащиты.

В сложившейся ситуации особый интерес представляет проект сейсмозащиты железнодорожных мостов, реализованный при строительстве новых линий в зоне г. Сочи в 2008–2012 гг. Здесь впервые за последние 20 лет были применены новые российские технологии сейсмозащиты, имеющие преимущества перед разработками ведущих мировых фирм.

Сейсмостойкость плюс высокие эксплуатационные качества

Отметим, что в настоящее время основным способом сейсмозащиты мостов считается сейсмоизоляция опор за счет устройства податливых сейсмоизолирующих опорных частей, причем в мировой практике применяются резиновые или шаровые сегментные металлические опорные части. Эти устройства детально описаны в литературе [3–6] и широко используются в практике строительства, но, как правило, для автодорожных мостов.

Сейсмоизоляция железнодорожных мостов носит пока опытный характер — применяется на единичных мостах [3; 4]. Это связано с ее негативным влиянием на работу железнодорожного пути: при эксплуатационных нагрузках (торможение и боковые удары подвижного состава) в рельсах возникают значительные усилия, приводящие к расстройству пути. По этой причине ОАО «РЖД» негативно относится к сейсмоизоляции железнодорожных мостов. В мировой практике пока нет никаких рекомендаций по проектированию систем такой сейсмоизоляции.

Однако в Сочи большинство мостов строится на площадках с сейсмичностью 9 и более баллов. Соответственно, от проектировщиков потребовалось решить комплексную задачу: обеспечить сейсмостойкость моста и нормальную его эксплуатацию.

Относительно условий эксплуатации ОАО «РЖД» выдвинуло весьма жесткие требования: вертикальное смещение пролетного строения под нагрузкой не должно превышать 1 мм, а горизонтальные смещения при проектном землетрясении (ПЗ) и эксплуатационных нагрузках не должны быть выше нормативной величины $U_{lim} = 0,5\sqrt{L}$, где L — величина пролета моста. При этом пришлось учесть, что известные сейсмоизолирующие опорные части не обеспечивали ограничения вертикальных смещений, а ограничение по жесткости не позволяло реализовать традиционные подходы к сейсмоизоляции.

Проектирование с заданными параметрами предельных состояний

Задача была решена силами ОАО «Трансмост», Петербургского университета путей сообщения и Группы компаний «Стройкомплекс-5».

ПГУПС по заданию ОАО «Трансмост» подготовил рекомендации по проекти-

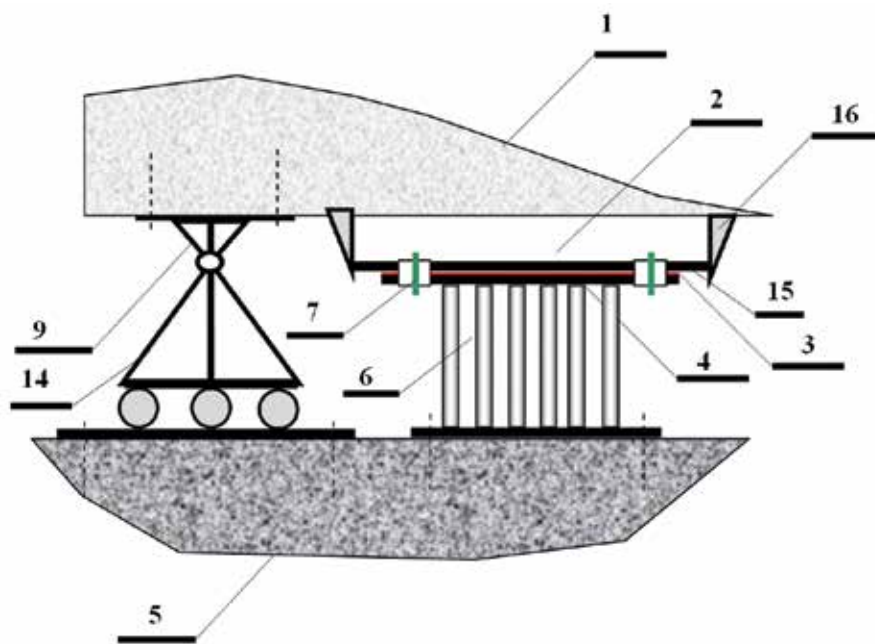


Рис. 1. Схема устройства сейсмоизоляции на железнодорожных мостах в г. Сочи

рованию мостов в сейсмически опасных районах. Они соответствовали требованиям «Еврокода-8», регламентировали расчеты на действие ПЗ и максимального расчетного землетрясения (МРЗ), а также содержали требования к подбору параметров сейсмозащитных устройств.

Одно из существенных требований в рекомендациях — проектирование сценария накопления повреждений. Этот подход, принятый в последнее время мировой научной общественностью [7; 8 и др.], в России был предложен в середине 1970-х гг. Я. М. Айзенбергом и Л. Ш. Килимником [9] и получил название «проектирование сооружений с заданными параметрами предельных состояний». За рубежом данный подход именуется PBD (performance based designing), и его авторами считаются новозеландские специалисты Дж. Порк [10] и Д. Доврик [11].

До сих пор в большинстве стран, в том числе в России, исходным для проектирования являлась нагрузка, в данном случае — сейсмическая, задаваемая с той или иной вероятностью превышения. Далее проверялась возможность возникновения предельного состояния. В рамках современного подхода к проектированию, реализованного в разработанных рекомендациях, исходным считается предельное состояние с заданной вероятностью ϵ его появления. Нагрузка подбиралась по вероятности ее превышения, равной ϵ , и уже для этой нагрузки подбирались параметры

конструкции, обеспечивающие возникновение заданного предельного состояния.

Конструктивные особенности устройства

С использованием разработанных рекомендаций было предложено новое опорное сейсмоизолирующее устройство (рис. 1), которое имеет четыре принципиальные особенности.

- Вертикальная и горизонтальная нагрузки передаются на разные элементы единого узла опирания, причем элемент, воспринимающий горизонтальные эксплуатационные нагрузки, одновременно выполняет функции сейсмоизолирующего. Опорный элемент выполнен в виде обычной подвижной опорной части, жесткой в вертикальном направлении. Это исключает вертикальные смещения пролетного строения под нагрузкой.

- Сейсмоизолирующий элемент выполнен составным в виде упругого столика из стальных стержней (стержневого амортизатора) и пакета стальных листов, объединенных фрикционно-подвижными соединениями (ФПС) [12; 13].

- Жесткость столика C подбирается таким образом, чтобы горизонтальные смещения от силы H торможения, центробежной силы и боковых ударов не превосходили указанную ниже нормативную величину U_{lim}

$$U = \frac{H}{C} \leq U_{lim} = 0,5\sqrt{L}.$$

• ФПС включается в работу, когда горизонтальные усилия от сейсмических воздействий превышают величину SU_{lim} , причем сила трения в ФПС не превосходит разрушающей нагрузки на опору.

Для снижения сейсмических нагрузок на опоры и относительных смещений пролетных строений на опорах дополнительно устанавливались демпферы — гидравлические вязкоупругие фирмы «Вибросейсм», детально описанные в [12].

Между пролетным строением (1) и опорой (5) параллельно податливому сейсмоизолирующему элементу (6) устанавливается опорный элемент (14), представляющий собой обычную подвижную опорную часть (катковую с шарнирным балансиrom (9) или шаровую сегментную). Верхний лист податливого элемента (4) через антифрикционное покрытие (3) соединен с дополнительным листом (15) с помощью высокопрочных болтов (7), формируя таким образом ФПС, являющееся верхним скользящим элементом. На пролетное строение (1) устанавливаются упоры (16), контактирующие с дополнительным листом (15) и имеющие свободу вертикальных перемещений относительно листа (15). При этом между податливым элементом со скользящим элементом и пролетным строением имеется зазор (2). Это исключает передачу на податливый элемент вертикальной нагрузки от пролетного строения, которая полностью воспринимается подвижной опорной частью. При эксплуатационных нагрузках (торможение подвижного состава, поперечные удары транспортных средств), а также при действии ПЗ горизонтальные нагрузки передаются от пролетного строения (1) на опору (5) через упоры (16) и податливый элемент (6). При этом динамические нагрузки на опору снижаются за счет амортизирующего действия податливого элемента. При МРЗ происходит подвижка в ФПС и пиковые нагрузки на опору ограничиваются силой трения в ФПС. Таким образом, происходит снижение расчетных нагрузок как при действии ПЗ, так и при действии МРЗ.

Накопление повреждений

Рис. 2 иллюстрирует работу устройства при МРЗ. На нем представлены расчетные зависимости ускорений и

Таблица. Пример сценария накопления повреждений (роста подвижек) для одной из эстакад железнодорожной линии Адлер — Сочи

Сила землетрясения (балл)	5–6	7	8	9
Ориентировочная повторяемость, годы	20	200	500	1000
Ускорение (м/с ²)	0.35	1.09	1.61	2.398
Подвижка (см)	0,1	1,6	6,3	12,5
Число подвижек за время землетрясения	2	23	35	38

смещений элементов моста при землетрясении от времени.

В качестве исходной для рассматриваемого расчета принята акселерограмма, имеющая ускорения около 2,2 м/с². По своим энергетическим характеристикам и пиковым ускорениям в диапазоне частот около 1 с акселерограмма описывает 9-балльное землетрясение. При этом смещение пролетного строения составило более 12 см, однако верх опор сместился менее чем на 1 см.

Интерес представляет диаграмма чередования состояний системы. При значении на диаграмме 1 ФПС не включается в работу, и система работает упруго. При значении на диаграмме 0 ФПС включается в работу (проскальзывает), и пролетное строение скользит относительно опоры. В рассмотренном примере проскальзывание возникает

практически сразу за началом воздействия, а максимальные сдвиги достигают 11 см. На этом же рисунке выделено полное (упругое и пластическое) смещение пролетного строения. Хорошо видно, что при МРЗ пластические смещения в ФПС превалируют над упругими за счет деформации столика.

Нижняя диаграмма отражает усилия в демпфере. Пиковые значения усилий достигают 180 кН, что составляет примерно 15 % от сейсмической нагрузки.

По нашему мнению, на части мостов следовало бы установить более мощные демпферы, но и с принятым демпфированием показатели колебаний всех мостов свидетельствуют о приемлемой картине накопления повреждений при землетрясениях.

В качестве примера в таблице приведен сценарий накопления повреждений на одной из эстакад железнодо-

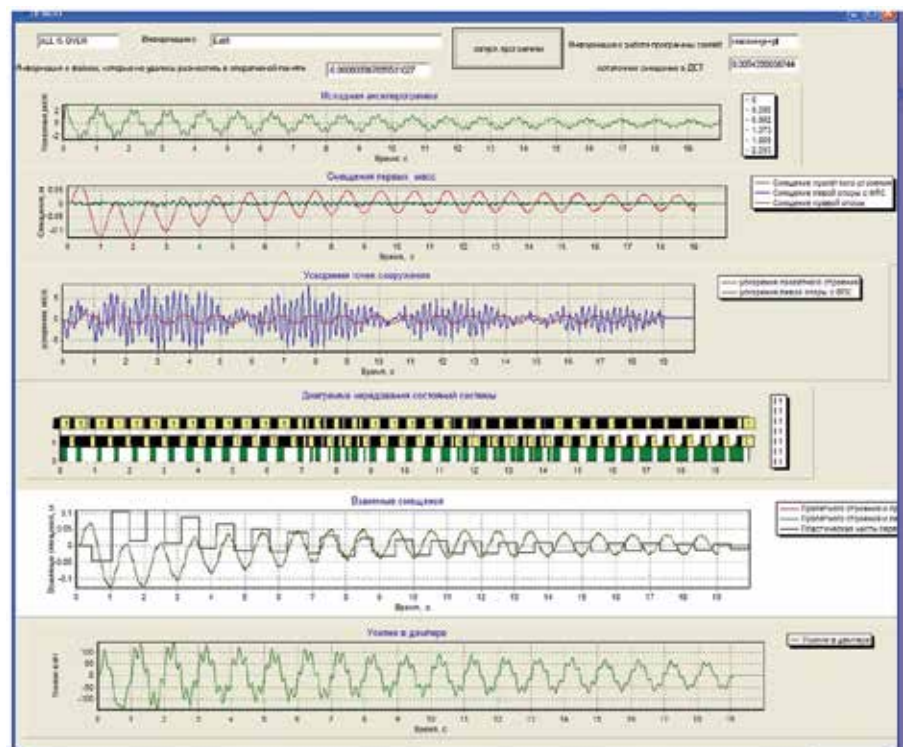


Рис. 2. Результаты расчета сейсмоизолированного моста на действие МРЗ

рожной линии Адлер — Сочи. К таблице следует дать следующее пояснение. Принятая концепция проектирования обеспечивает сохранность опор и отсутствие сброса пролетного строения при любых расчетных землетрясениях. Конструкция опорных устройств допускает один вид повреждений — подвижки в ФПС, соединяющих опору с пролетным строением. Именно сценарий накопления повреждений (роста подвижек) представлен в таблице.

Практическая реализация

По предлагаемой методике и с использованием предлагаемых технических решений сейсмозащитных устройств в Сочи построено более 100 мостовых опор (рис. 3–6).

Применение опорных сейсмоизолирующих устройств позволило снизить расчетную нагрузку на опоры на 40–70 % и обеспечить в случае разрушительных редких землетрясений прогнозируемость повреждений и ремонтпригодность мостов.

Все стержневые амортизаторы и ФПС для эстакад и двухпутного моста через р. Мзымту (всего более 100 изделий) были изготовлены силами Группы компаний «Стройкомплекс-5». Необходимо отметить, что такая же система установлена на внеклассном железнодорожном мосту через р. Или в Казахстане. Для этого объекта Группой компаний «Стройкомплекс-5» были изготовлены и сейсмозащитные устройства описанной выше конструкции, и шаровые сегментные опорные части.

Таким образом, представленная разработка свидетельствует о том, что российские инженеры и ученые имеют достаточный потенциал, позволивший, в частности, разработать и внедрить новую систему сейсмозащиты железнодорожных мостов, не имеющую пока аналогов в мировой практике сейсмостойкого строительства.

Предлагаемые и уже примененные на практике устройства обеспечивают сейсмозащиту моста как при проектных, так и при максимальных расчетных землетрясениях. При этом прогнозируется характер накопления повреждений в конструкции (в данном случае смещений в ФПС) и гарантируется ремонтпригодность моста после разрушительных землетрясений. Это пока единственная в мире система сейсмозащиты, которая обеспечивает нормальную эксплуатацию моста, не



Рис. 3. Стержневой амортизатор, установленный на одном из съездов железнодорожной линии Адлер – Сочи



Рис. 4. Вязкий демпфер фирмы «Вибросейсм», установленный на железнодорожной эстакаде в г. Сочи



Рис. 5. Демпфирующие устройства на одной из железнодорожных эстакад в г. Сочи



Рис. 6. Стержневые амортизаторы на одной из железнодорожных эстакад в г. Сочи



Рис. 7. Внешний вид одной из эстакад с предлагаемыми сейсмозащитными устройствами

приводя к расстройству пути при эксплуатационных нагрузках и проектных землетрясениях.

Необходимо также отметить, что данное техническое решение может быть эффективно использовано не только при строительстве новых объектов, но и при ремонте и реконструкции мостов, когда требуется с минимальными затратами повысить класс сейсмостойкости сооружения. ■

Литература

1. Воронец В. В., Ефименко Ю. И., Красковский А. Е., Уздин А. М. Проблемы обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте в сейсмически

опасных районах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2003. № 5. С. 55–57.

2. Белаш Т. А., Уздин А. М. Железнодорожные здания для районов с особыми природно-климатическими условиями и техногенными воздействиями. Учебник. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2007. 372 с.
3. Huber P. Realized projects of Isolation Systems for Railway Bridges in Spain, Hungary and Greece / P. Huber // PROCEEDINGS OF WORKSHOP “Bridges seismic isolation and large-scale modeling”. Saint Petersburg 29.06–03.07.2010. P. 37–50.

4. Infanti S. The Behavior of Rion – Antirion Bridge Seismic Protection System During the Earthquake of “Achaia-Ilia” on June 8, 2008 / S. Infanti, Papanikolas Panayotis // PROCEEDINGS OF WORKSHOP “Bridges seismic isolation and large-scale modeling”. Saint Petersburg. 29.06–03.07.2010. P. 7–15.
5. Белаш Т. А., Беляев В. С., Уздин А. М., Ермошин А. А., Кузнецова И. О. Сейсмоизоляция. Современное состояние // Избранные статьи профессора О. А. Савинова и ключевые доклады, представленные на IV Савиновских чтениях. Сб. ст. СПб.: ЗАО «Ленинградский Промстройпроект», 2004. С. 95–128.
6. Skiner R. I., Robinson W. H., McVerry G. H. An introduction to seismic isolation. New Zealand, John Wiley & Sons. 1993. 353 p.
7. Barr J. M. The seismic safety of bridges: a view from the design office. Proc. of 12th European Conference on Earthquake Engineering. Oxford, UK. 2002. Paper Reference 840.
8. Fardis M. N. Code developments in earthquake engineering. Published by Elsevier Science Ltd. 12th European Conference on Earthquake Engineering. 2002. Paper Reference 845.
9. Айзенберг Я. М., Килимник Л. Ш. О критериях предельных состояний и диаграммах «восстанавливающая сила – перемещение» при расчетах на сейсмические воздействия // Сейсмостойкость зданий и инженерных сооружений. Сб. ст. М.: Стройиздат, 1972. С. 46–61.
10. Park R., Paulay T. Reinforced Concrete Structures. New York, John Wiley & Sons. 1975.
11. Dowric D. J. Earthquake resistant Design for Engineers and architects. New York, John Wiley & Sons. 1977.
12. Кузнецова И. О., Ван Хайбинь, Уздин А. М., Шульман С. А. Сейсмоизоляция – способ проектирования сооружений с заданными параметрами предельных состояний и сценариев накопления повреждений // Избранные статьи профессора О. А. Савинова и ключевые доклады, представленные на VI Савиновских чтениях. СПб., 2010. С. 105–120.
13. Елисеев О. Н., Кузнецова И. О., Никитин А. А., Павлов В. Е., Симкин А. Ю., Уздин А. М. Элементы теории трения, расчет и технология применения фрикционно-подвижных соединений. СПб.: ВИТУ, 2001. 75 с.