

## МАЯТНИКОВЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЗДАНИЯХ

## PENDULUM ISOLATORS FOR USE IN BUILDINGS

## ИМАРАТТАРГА КОЛДОНУУЧУ МАЯТНИК ИЗОЛЯТОРЛОРУ

S. Infanti<sup>(1)</sup>, M.G. Castellano<sup>(2)</sup><sup>(1)</sup>FIP, Padova, Italy - [samuele.infanti@fipmec.it](mailto:samuele.infanti@fipmec.it)<sup>(2)</sup>FIP Padova Italy - [maria.gabriella.castellano@fipmec.it](mailto:maria.gabriella.castellano@fipmec.it)**1. ПРЕДИСЛОВИЕ**

Пассивный контроль реакции сооружения за счет систем изоляции и / или рассеивания энергии стал общепринятой методикой снижения воздействия землетрясений на сооружения в качестве альтернативы обычному методу сейсмической инженерии на основе capacity design (проектирование с учетом образования пластических шарниров.)

Техника сейсмической изоляции основана на введении сейсмо-изоляторов. В зданиях изоляторы устанавливаются обычно между фундаментом и первым этажом, в мостах - на вершине опор и на устоях.

Благодаря своей низкой горизонтальной жесткости, изоляторы отделяют движение сооружения от движения земли: динамические характеристики сооружения модифицируются так, чтобы **перенести период сооружения (увеличивая его) в поле периодов, далеких от тех, которые соответствуют землетрясению.** Другими словами, метод сейсмической изоляции **уменьшает энергию**, которую землетрясение передает в сооружение. В зданиях также **значительно уменьшаются амплификации** на этажах, а также смещения между этажами, поскольку здание ведет себя как жесткое тело над плоскостью где находятся изоляторы.

Таким образом, поведение несущих элементов может оставаться в поле упругости даже во время высокоинтенсивных землетрясений (что привело бы к значительному повреждению в обычных сооружениях, спроектированных с целью избежать коллапса, но не с целью избежать повреждений на предельное состояние - ULS). Кроме того, **функциональность изолированных сооружений, полностью гарантирована благодаря полному отсутствию повреждения не - несущих элементов и коммуникаций.**

Сейсмо-изоляция является незаменимой технологией для сооружений, которые должны оставаться совершенно неповрежденными и функционировать даже после сильного землетрясения, таких как больницы, центры гражданской защиты и т. д.

Смещения, которые возникают, особенно для некоторых типов грунтов или в районах с очень высокой сейсмичностью, возможно уменьшить путем увеличения рассеивания энергии.

Современные применения сейсмической изоляции начались в семидесятые годы. Одно из первых применений в мире было в Италии, в виадуке Сомплаго на автомагистрали Удине-Карния, с устройствами производства компании FIR. Один из двух направлений виадука был уже завершен, когда землетрясение Фриули произошло в 1976 г.

**Отличное поведение сооружения, несмотря на близость к эпицентру,** привело в Италии к существенному продвижению исследования и применения антисейсмических изделий.

В прошлом, наиболее применяемые сейсмические изоляторы в мире это были эластомерные изоляторы, такие как изоляторы с высокогасительной резиной и/или изоляторы со свинцовым сердечником.

Совсем недавно маятниковые изоляторы со сферическими поверхностями, стали применяться чаще эластомерных изоляторов, как в зданиях, так и в других сооружениях, таких как мосты, виадуки, резервуары и т. д.

С 2009 по 2017 год, **компания FIR изготовила более 15 000 шт. маятниковых изоляторов,** установленных в различных типах сооружений (здания, мосты, резервуары и т. д.) в 14 разных странах. Некоторые применения приведены в [1], [2], [3], [4], [5], [6].

## **2- МАЯТНИКОВЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ СО СФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ**

Изоляторы маятникового типа изготавливаются двух основных типов, с одной или с двумя главными поверхностями скольжения, схема работы которых приведена на рисунках 1 и 2. Для обоих типов, закон поведения относится к простому маятнику, в котором период колебания не зависит от массы, а от длины маятника. Аналогично, период изолированного сооружения зависит не от массы самого сооружения, а от радиуса кривизны поверхности скольжения, по формуле:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{X}\right)}} \quad (1)$$

где R - радиус кривизны, X - максимальное смещение, а  $\mu$ - коэффициент трения поверхностей скольжения. Пара скольжения состоит из подходящего высокопрочного термопластичного материала на обеих выпуклых поверхностях центрального

балансира, и из зеркально полированной нержавеющей стали на вогнутой поверхности верхнего и нижнего балансира.

Основное различие между изоляторами с одной и с двумя сферическими поверхностями - общие габариты: каждая поверхность скольжения рассчитана на обеспечение половины общего горизонтального перемещения, что позволяет значительно уменьшить габариты в плане.

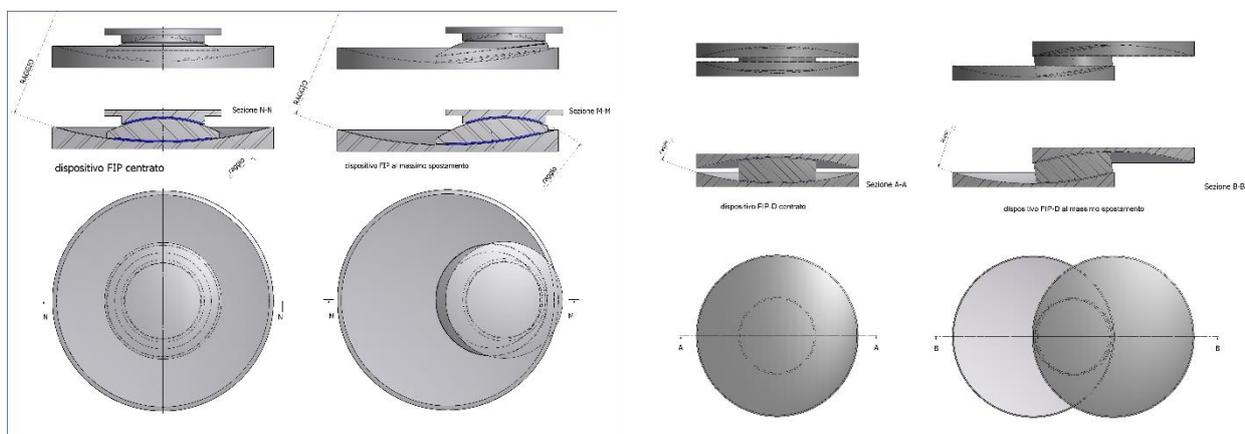


Рисунок 1 – Тип с одной главной поверхностью скольжения

Рисунок 2 - Тип с двумя главными поверхностями скольжения

На рисунке 3 показана типичная теоретическая петля силы-смещение: комбинация реакции от маятникового движения и силы трения, создаваемой материалом скольжения. Данную петлю возможно схематизировать как билинейную. Перехват по оси ординат представляет силу трения  $F_0 = \mu V$ , разработанную изолятором, где  $V$  - действующая вертикальная нагрузка. Жесткость  $K = V/R$  зависит как от вертикальной действующей нагрузки  $V$ , так и от радиуса кривизны  $R$  главной поверхности скольжения.

Теоретическая петля типично билинейна, поэтому для моделирования сооружения с этими изоляторами, обычно предпочтительнее выполнять нелинейное моделирование. Однако, особенно когда трение не очень велико, и поэтому демпфирование умеренное, возможно выполнить линейное моделирование, в том числе и итерационное моделирование. При применении эквивалентной линейной модели, оценка эквивалентной жесткости  $K_e$  и эквивалентного вязкого демпфирования  $\xi_e$  как функция максимального расчетного смещения  $X$ , выполняется следующими формулами:

$$K_e = V \cdot \left( \frac{1}{R} + \frac{\mu}{X} \right) \quad (2)$$

$$\zeta_e = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{X}{\mu R} + 1} \quad (3)$$

где:

R радиус кривизны

$\mu$  коэффициент трения

V действующая вертикальная нагрузка

X максимальное расчетное смещение

Данные изоляторы обеспечивают эквивалентный коэффициент вязкого демпфирования  $\zeta_e$  от 15 до 30% в зависимости от коэффициента трения используемого материала, радиуса кривизны и максимального расчетного смещения

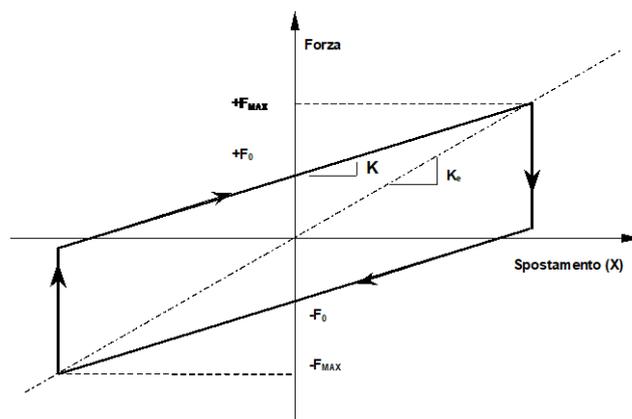


Рисунок 3 - теоретическая петля силы-смещение маятникового изолятора .

### 3. ТРЕХМЕРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ В УНИВЕРСИТЕТЕ SAN DIEGO В КАЛИФОРНИИ

Теоретическая петля силы-смещения, используемая на этапе проектирования, всегда проверяется с помощью экспериментальных испытаний с целью проверки качества изоляторов и их соответствия исходным требованиям. Обычно это - испытания на квалификацию и/или принятие, осуществляемые путем приложения горизонтального перемещения в одно направление и поддержания неизменной вертикальной нагрузки.

**Компания FIR провела десятки испытаний такого типа, как в собственной лаборатории, одной из крупнейших в мире, так и в других лабораториях в Италии и во всем мире.**

В дополнение двумерным испытаниям, с целью проверки поведения маятниковых изоляторов при динамическом всестороннем горизонтальном перемещении, с 2009 года FIR также проводит испытания в Лаборатории Университета Сан Диего в Калифорнии (Рис 4 и 5), позволяющей прикладывать в дополнение к

вертикальной нагрузке, одновременное горизонтальное синусоидальное перемещение по двум основным осям (двунаправленная «клеверо-образная» траектория - рис. 6), а также временная запись перемещения, воспроизводящая эффект реального землетрясения.

Проводились все испытания, по европейским нормативам на антисейсмические изделия EN 15129, но с добавкой многонаправленных испытаний.

На рисунке 7 - типичный гистерезисный цикл, во время прикладывания максимальной вертикальной нагрузки и максимального расчетного синусоидального смещения. Более подробная информация о результатах этих испытаний приведена в [1].

Результаты всех испытаний, проведенных в лаборатории Сан-Диего, подтвердили надежность изоляторов как с точки зрения соответствия требуемым параметрам, так и с точки зрения прочности.



Рисунок 4 – Изолятор во время расположения в стенд в Лаборатории в г. Сан Диего, Калифорнии, США



Рисунок 5 - Изолятор во время испытания в Лаборатории в г. Сан Диего, Калифорнии, США

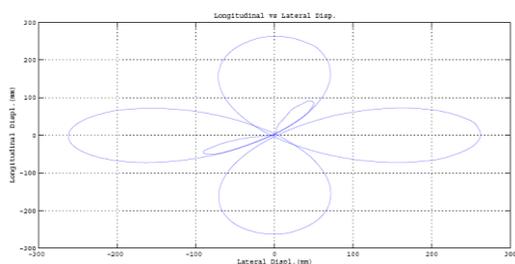


Рисунок 6 – двунаправленная «клеверо-образная» траектория

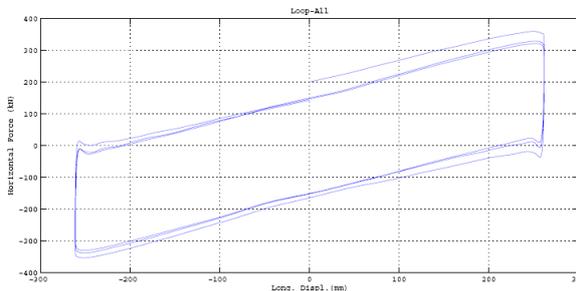


Рисунок 7 – Типичная гистерезисная петля при максимальной нагрузке и перемещении.

## ПРИМЕРЫ ЗДАНИЙ, ИЗОЛИРОВАННЫХ МАЯТНИКОВЫМИ ИЗОЛЯТОРАМИ

Маятниковые изоляторы компании FIP были установлены в зданиях всех типов, от маленьких коттеджей до крупных больниц. Например, несколько больниц в Турции: больница в городе Van (Рисунок 8), Kahramanmaras Elbistan Hospital, Manisa Merkez Efendi Hospital, Tokat Erbaa Hospital, Mugla Bodrum Hospital.

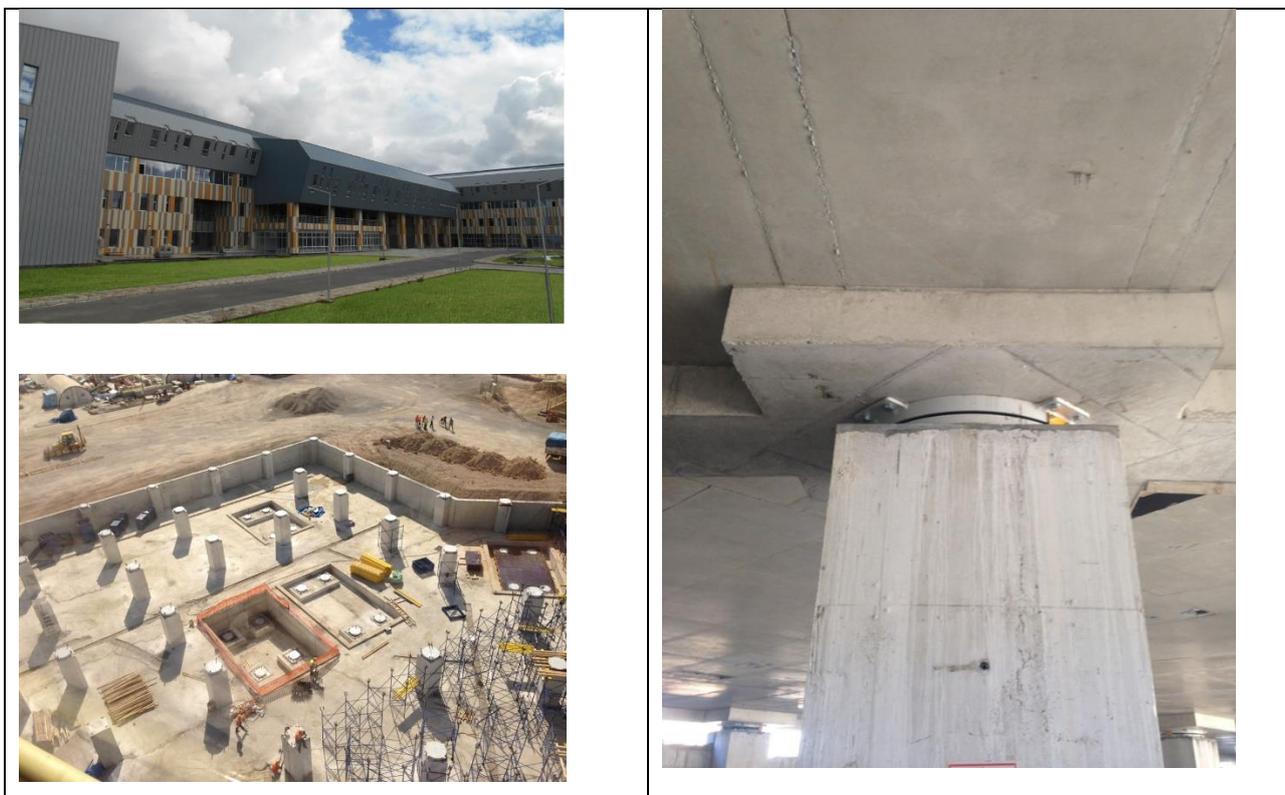


Рисунок 8 – Больница в городе Ван, в Турции.

## БИБЛИОГРАФИЯ

[1] **Castellano, M.G., Infanti S.** [2010] “Seismic isolation of buildings in Italy with double concave curved surface sliders” *Proceedings of 14th European Conference on Earthquake Engineering Ohrid, 30 August – 3 September.*

[2] **Castellano, M.G., Colato, G.P., Infanti, S., Borella, R.** [2012] “Seismic isolation of continuous bridges through curved surface sliders combined with shock transmission units”, *Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE 2012), Lisbon, Portugal, September 24-28.*

[3] **Matildi, G., Isani, S., Cammarota, G., Tomaselli, F., Castellano, M.G.** [2014] “Seismic isolation of highway viaducts through pendulum isolators”, *Proceedings of Istanbul Bridge Conference, Istanbul, Turkey, August 11-13.*

[4] **Lucà Trombetta, P., Castellano, M.G., Cocchio, D.,** “Retrofit of buildings in Italy through seismic isolation”, *Proceedings of 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (2ECEES), Istanbul, August 25-29, 2014.*

[5] **Castellano, M.G., Marcolin, L.** [2017] “Seismic isolation of an ammonia tank in Turkey through pendulum isolators”, *Proceedings of 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017, Santiago, Chile, January 9-13.*

[6] **Breschi, L. Bielefeldt, J., Castellano, M.G.** [2017] “Use of pendulum isolators in Santiago, Chile: two practical examples”, *Proceedings of 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017, Santiago, Chile, January 9-13.*