СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМОИЗОЛЯЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ФРИКЦИОННО-МАЯТНИКОВЫХ И СВИНЦОВО-РЕЗИНОВЫХ ОПОР

Юсупходжаев С.А.
Нигматжонов Д.Г.
E-mail: nigmatzonovdier@gmail.com

Аннотация. *Выполнено сравнение систем сейсмоизоляции на основе свинцово-резиновых опор, фрикционно-маятниковых опор и их совместного применения. В ETABS 22 исследована пятиэтажная железобетонная модель при семи наборах сейсмических воздействий. Сопоставлены период колебаний, ускорения этажей, поперечная сила, межэтажные относительные перемещения и стоимость жизненного цикла. Фрикционно-маятниковые опоры обеспечивают наибольшее снижение откликов, свинцово-резиновые опоры — минимальную стоимость, а гибридная схема формирует промежуточное решение по техническим и экономическим показателям.*

Ключевые слова: *сейсмоизоляция, фрикционно-маятниковые опоры, свинцово-резиновые опоры, ETABS, акселерограмма, межэтажный сдвиг, стоимость жизненного цикла.*

Annotatsiya. *ETABS 22 dasturida besh qavatli temirbeton bino uchun qo‘rg‘oshin-rezina tayanchlari, ishqalanishli mayatnik tayanchlari va ularning gibrid seysmik izolyatsiya tizimi taqqoslandi. Xususiy tebranish davri, qavat tezlanishlari, asosdagi kesuvchi kuch, qavatlararo nisbiy siljish hamda hayotiy sikl qiymati baholandi. Ishqalanishli mayatnik tayanchlari eng yuqori seysmik himoya samaradorligini, qo‘rg‘oshin-rezina tayanchlari esa eng past xarajatni ko‘rsatdi. Gibrid tizim texnik samaradorlik va iqtisodiy maqsadga muvofiqlik o‘rtasida muvozanatli yechim sifatida namoyon bo‘ldi.*

Kalit so‘zlar: *seysmik izolyatsiya, ishqalanishli mayatnik tayanchlari, qo‘rg‘oshin-rezina tayanchlari, ETABS, akselerogramma, qavatlararo siljish, hayotiy sikl qiymati.*

Abstract. *Lead-rubber bearing, friction-pendulum bearing, and hybrid seismic isolation systems were compared using a five-story reinforced-concrete building model*

in ETABS 22. The assessment included the fundamental period, floor acceleration, base story shear, interstory drift ratio, and simplified life-cycle cost. Friction-pendulum bearings produced the greatest reduction in seismic response, while lead-rubber bearings had the lowest cost. The hybrid scheme provided intermediate technical and economic performance and can be considered a balanced solution for projects where seismic efficiency and cost are both important.

Keywords: *seismic isolation, friction-pendulum bearing, lead-rubber bearing, ETABS, ground motion, interstory drift, life-cycle cost.*

Введение

Современная сейсмозащита зданий ориентирована не только на предотвращение обрушения, но и на уменьшение повреждаемости конструкций, инженерных систем и оборудования. Одним из эффективных пассивных методов является устройство сейсмоизоляционного слоя между фундаментом и надземной частью. Снижение горизонтальной жесткости опор увеличивает основной период колебаний, уменьшает передачу инерционных сил и концентрирует значительную часть горизонтальных перемещений в уровне изоляции [1, 2].

Свинцово-резиновые опоры обладают начальной горизонтальной жесткостью и развитой гистерезисной диссипацией за счет пластического деформирования свинцового сердечника. Их недостатками являются температурная зависимость свойств и возможная деградация характеристик при циклическом нагружении [3]. Фрикционно-маятниковые опоры работают за счет скольжения по сферической поверхности, обеспечивают рецентрирование и управляемое увеличение периода, однако характеризуются более высокой стоимостью [4]. Поэтому представляет интерес гибридная схема, в которой два типа устройств работают совместно.

Методика исследования

Объектом исследования является пятиэтажное железобетонное жилое здание в районе Дунчуань города Куньмин. План здания — 18,0×17,4 м; высота первого этажа — 4,8 м, типовых этажей — 3,6 м. Колонны приняты сечением 400×800 мм, главные балки — 200×600 мм, второстепенные — 200×500 мм. Для балок и колонн использован бетон C40; толщина плит перекрытий составляет 100 мм, покрытия — 120 мм.

Пространственная модель сформирована в ETABS 22. Для динамического анализа использованы пять натуральных и две искусственные акселерограммы,

масштабированные до соответствия целевому нормативному спектру. Рассмотрены четыре расчетные схемы: жесткое закрепление в основании; полная изоляция свинцово-резиновыми опорами; полная изоляция фрикционно-маятниковыми опорами; гибридная система, в которой фрикционно-маятниковые опоры установлены под наружными колоннами, а свинцово-резиновые — под внутренними. Всего предусмотрено 24 опорные позиции; в гибридном варианте применено 16 фрикционно-маятниковых и 8 свинцово-резиновых опор.

Для свинцово-резиновой опоры типа S 600/150-130 в модели приняты расчетная несущая способность 1500 кН, эквивалентное демпфирование 26 %, эффективная горизонтальная жесткость 1280 кН/м и сила текучести 148 кН. Для фрикционно-маятниковой опоры типа DCSS-M3-T5-02500-0400 приняты несущая способность 2500 кН, коэффициент трения 0,03–0,05, расчетное перемещение ±400 мм, эффективная жесткость 800 кН/м и радиус кривизны 5810 мм.

Результаты

Основной период жестко закрепленной модели составляет 1,726 с. Для свинцово-резиновых опор он увеличивается до 1,746 с (+1,16 %), для фрикционно-маятниковых — до 2,008 с (+16,34 %), для гибридной схемы — до 1,895 с (+9,79 %). Следовательно, фрикционно-маятниковые опоры наиболее эффективно смещают отклик конструкции в длиннопериодную область, а гибридная схема сохраняет значительную часть этого эффекта.

Пиковое ускорение верхнего этажа в жесткой схеме составляет 7593,74 мм/с² по X и 4223,31 мм/с² по Y. Свинцово-резиновые опоры снижают эти значения на 50,41 и 4,52 %, фрикционно-маятниковые — на 61,35 и 26,90 %, гибридная схема — на 52,36 и 20,65 %. Особенно заметно преимущество гибридной системы над системой свинцово-резиновых опор по направлению Y.

Поперечная сила на уровне основания для жесткой модели составляет 6589,71 кН по X и 3439,03 кН по Y. Для свинцово-резиновых опор снижение равно 34,05 и 1,81 %, для фрикционно-маятниковых — 45,91 и 18,95 %, для гибридной схемы — 33,89 и 16,28 %. Аналогичная тенденция получена по межэтажным относительным перемещениям: фрикционно-маятниковые опоры уменьшают их на 61,40 и 26,42 %, гибридная система — на 52,57 и 20,39 %, свинцово-резиновые опоры — на 50,00 и 4,08 %.

Таблица 1 — Сравнение основных результатов

Схема	Период, с	Снижение ускорения X/Y, %	Снижение drift X/Y, %
Жесткая	1,726	0 / 0	0 / 0
Свинцово-резиновые	1,746	50,41 / 4,52	50,00 / 4,08
Фрикционно-маятниковые	2,008	61,35 / 26,90	61,40 / 26,42
Гибридная система	1,895	52,36 / 20,65	52,57 / 20,39

Экономическая оценка

Для относительного сравнения принята упрощенная 50-летняя стоимость жизненного цикла. Первоначальная стоимость 24 свинцово-резиновых опор составляет 16 680 USD, 24 фрикционно-маятниковых опор — 42 264 USD, гибридного варианта — 33 736 USD. С учетом принятых расходов на обслуживание полная стоимость составляет соответственно 17 329, 51 958 и 40 415 USD. Таким образом, гибридная система примерно на 22,22 % дешевле полной схемы с фрикционно-маятниковыми опорами, сохраняя при этом значительную часть ее сейсмоизоляционного эффекта.

Полученные результаты показывают, что выбор решения зависит от приоритетов проекта. Свинцово-резиновые опоры обеспечивают минимальные затраты, но обладают выраженной направленной чувствительностью. Фрикционно-маятниковые опоры обеспечивают максимальное снижение ускорений, поперечных сил и межэтажных деформаций, однако имеют наибольшую стоимость. Гибридная система занимает промежуточное положение и представляет практический интерес для объектов, где требуется сочетание повышенной сейсмозащиты с ограничением бюджета.

Выводы

1. Фрикционно-маятниковые опоры обеспечивают наибольшее увеличение основного периода — до 2,008 с, что на 16,34 % выше жестко закрепленной схемы.

2. Максимальное снижение пиковых ускорений, поперечной силы и межэтажных относительных перемещений получено для системы, полностью оснащенной фрикционно-маятниковыми опорами.

3. Система свинцово-резиновых опор имеет минимальную стоимость, однако в направлении Y эффективность снижения сейсмического отклика существенно ниже.

4. Гибридная система фрикционно-маятниковых и свинцово-резиновых опор снижает ускорения на 52,36 и 20,65 %, а межэтажные относительные перемещения — на 52,57 и 20,39 % по направлениям X и Y соответственно.

5. Стоимость жизненного цикла гибридной схемы составляет 40 415 USD, что на 22,22 % ниже системы, полностью оснащенной фрикционно-маятниковыми опорами. Поэтому совместное применение фрикционно-маятниковых и свинцово-резиновых опор может рассматриваться как сбалансированный инженерный вариант.

Литература

1. Warn G. P., Ryan K. L. A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs // Buildings. 2012. Vol. 2. P. 300–325. DOI: 10.3390/buildings2030300.

2. Zordan T., Liu T., Briseghella B., Zhang Q. Improved equivalent viscous damping model for base-isolated structures with lead rubber bearings // Engineering Structures. 2014. Vol. 75. P. 340–352. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.05.044.

3. Xue B., Lu W., Ren X., Wen W. Temperature dependency of yield stress degradation of lead core in lead-rubber bearings // Structures. 2025. Vol. 80. Art. 109648. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.109648.

4. Mokha A., Constantinou M. C., Reinhorn A. M., Zayas V. A. Experimental Study of Friction-Pendulum Isolation System // Journal of Structural Engineering. 1991. Vol. 117, No. 4. P. 1201–1217. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:4(1201).

5. Standard for Seismic Design of Buildings: GB/T 50011–2010. 2024 edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024.

6. Castaldo P., Palazzo B., Della Vecchia P. Life-cycle cost and seismic reliability analysis of 3D systems equipped with FPS for different isolation degrees // Engineering Structures. 2016. Vol. 125. P. 349–363. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.06.056.