

DOI 10.15826/rjst.2025.2.002

УДК 624.04:624.074:624.031

Цзясинь Ли ¹, Н. И. Фомин ², Шотин Сяо ³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: ¹ li.tsziasin2@urfu.me, ² ni.fomin@urfu.ru, ³ shotin.siao@urfu.me

ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАРКАСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Землетрясения, являясь одной из основных природных угроз для жизни и имущества человека, способствуют развитию технологий сейсмостойкого строительства. Железобетонные (ЖБ) рамные конструкции получили широкое распространение благодаря удобству возведения и экономичности. Однако ограничения традиционного сейсмического проектирования при воздействии сильных землетрясений стимулируют развитие новых технологий повышения сейсмостойкости. В данной статье основное внимание уделено двум ключевым технологиям: противоизгибным демпферам (BRB) и резиновым изолирующим опорам. Рассмотрены их принципы действия, область применения и направления оптимизации. BRB обеспечивают двустороннее пластическое энергопоглощение за счёт предотвращения потери устойчивости сердцевины, что значительно повышает пластичность и эффективность рассеивания энергии конструкции. Изолирующие опоры снижают передачу сейсмической энергии, уменьшая отклик надстройки. Исследования показывают, что использование BRB может снизить затраты на ремонт при редких, но мощных землетрясениях, а изолирующие опоры значительно сокращают сейсмическое воздействие на надстройку. Тем не менее, BRB сталкиваются с проблемами адаптации узлов соединения в железобетонных конструкциях, а долговечность изолирующих опор остаётся важной задачей.

Ключевые слова: каркасная конструкция из железобетона, распорка с защитой от прогиба, резиновая изолирующая опора, технология сейсмостойкости, рассеивание энергии

Для цитирования: Ли Цзясинь, Фомин Н. И., Сяо Шотин. Технология повышения сейсмостойкости железобетонных каркасных конструкций // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2025. – Т. 11. – № 2. – 1102002. – DOI 10.15826/rjst.2025.2.002.

Jiaxin Li ¹, N. I. Fomin ², Shuoting Xiao ³

^{1,2,3} Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

e-mail: ¹ li.tsziasin2@urfu.me, ² ni.fomin@urfu.ru, ³ shotin.siao@urfu.me

SEISMIC STRENGTHENING TECHNIQUES FOR REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES

Abstract. Earthquakes, as one of the main natural disasters that threaten human life and property safety, are driving the development of building seismic technology. Reinforced concrete (RC) frame structures are widely used due to their ease of construction and economy, but the limitations of their traditional seismic design under strong earthquakes have prompted the development of new seismic enhancement technologies. This paper focuses on two key technologies, buckling-restrained braces (BRBs) and rubber isolation bearings, and systematically

reviews their principles, applications, and optimization directions. BRBs suppress the buckling of core steel and achieve bidirectional plastic energy dissipation in tension and compression, significantly improving the ductility and energy dissipation efficiency of the structure; isolation bearings reduce the response of the superstructure by isolating seismic energy transmission. Studies have shown that BRBs can reduce maintenance costs under certain rare earthquakes, and isolation bearings can reduce more seismic forces in the superstructure. However, the adaptability of the connection structure of BRBs in concrete structures and the durability of isolation bearings are still facing challenges.

Key words: reinforced concrete frame structure, buckling restrained brace, rubber isolation bearing, seismic technology, energy dissipation

For citation: Li Jiaxin, Fomin N. I., Xiao Shuoting (2025) Seismic strengthening techniques for reinforced concrete frame structures. Russian Journal of Construction Science and Technology. 11(2). 1102002. (In Russ.) DOI 10.15826/rjct.2025.2.002.

1. Введение

Ускорение урбанизации в сейсмоактивных регионах мира делает обеспечение сейсмобезопасности зданий ключевой задачей в области инженерного строительства. Железобетонные (ЖБ) рамные конструкции благодаря гибкой планировке и отлаженной технологии возведения стали основным типом конструкций для зданий средней и большой этажности. Однако традиционное сейсмическое проектирование, основанное на способности конструкции к пластическому энергопоглощению, хотя и позволяет предотвратить обрушение, не может исключить серьёзные повреждения и экономические потери. Например, во время землетрясения в Вэньчуане в 2008 году множество незадемпфированных ЖБ-рамных зданий устояли, но потребовали значительных затрат на восстановление и долгое время оставались нефункциональными [1]. Эта реальность стимулировала переход сейсмостойких технологий от концепции «предотвращения обрушения» к обеспечению «восстанавливаемости функциональности». В этом контексте противоизгибные демпферы (BRB) и изолирующие опоры становятся объектами активных исследований.

Технология BRB предусматривает ограничение потери устойчивости сердцевины элемента, что обеспечивает ста-

бильное энергопоглощение при циклическом растяжении и сжатии, сочетая жёсткость и пластичность. С момента появления прототипа, предложенного японскими исследователями в 1970-х годах, BRB нашли широкое применение в усилении стальных конструкций и постепенно начали внедряться в железобетонные рамы [2]. Изолирующие опоры создают гибкий интерфейс между основанием и надстройкой, удлиняя собственный период колебаний здания и снижая поступление сейсмической энергии. Разработка свинцовых резино-металлических опор (LRB) и высокодемпфирующих резиновых опор (HDRB) существенно повысила способности системы к энергопоглощению и самовосстановлению [3].

В данной статье внимание сосредоточено на применении BRB и изолирующих опор в железобетонных рамках. Проведен систематический обзор технических принципов, прогресса исследований и инженерных вызовов. Путём анализа экспериментальных данных и результатов численного моделирования раскрыты механические характеристики и направления оптимизации указанных технологий, что может служить ориентиром для проектирования сейсмостойких зданий в зонах высокой сейсмической опасности.

Целями исследования являются:

1. Раскрытие основных механизмов

работы BRB и изолирующих опор.

2. Сравнительный анализ их сейсмостойкости и экономической эффективности.

3. Определение перспектив интеграции технологий и инноваций в материалах.

2. Обзор и анализ литературы

2.1. Ограничения традиционного сейсмического проектирования

Традиционные железобетонные (ЖБ) рамные конструкции полагаются на развитие пластических шарниров в узлах балок и колонн для рассеивания сейсмической энергии. Однако такой подход имеет два существенных недостатка: во-первых, концентрация напряжений в зонах узлов может вызывать хрупкие разрушения; во-вторых, остаточные деформации после сильного землетрясения затрудняют восстановление конструкции [4]. Например, во время землетрясения в Крайстчерче (Новая Зеландия) в 2011 году, несмотря на то что незадемпфированные рамы соответствовали критерию «не обрушиться», около 70% зданий были снесены из-за

чрезмерных затрат на восстановление [5].

2.2. Современное развитие технологии противоизгибных демпферов (BRB)

Противоизгибные демпферы (BRB) решают проблему потери устойчивости традиционных сжимаемых связей за счёт трёхкомпонентной конструкции: ограничивающий элемент – сердцевина – антикоррозионный (несвязующий) слой (рис. 1). Сердцевина изготавливается из низкопределельной стали и сохраняет устойчивость под сжатием благодаря наружному ограничителю, обеспечивая симметричную гистерезисную характеристику и эффективное энергопоглощение [6]. Экспериментальные данные показывают, что эквивалентное демпфирование BRB может достигать 0,4–0,5, что в 3–5 раз выше, чем у традиционных связей [7]. В железобетонных рамах BRB, как правило, монтируются с помощью последующего анкерования, однако разрушение бетона в узловых зонах и скольжение анкеров остаются основными инженерными проблемами [8].

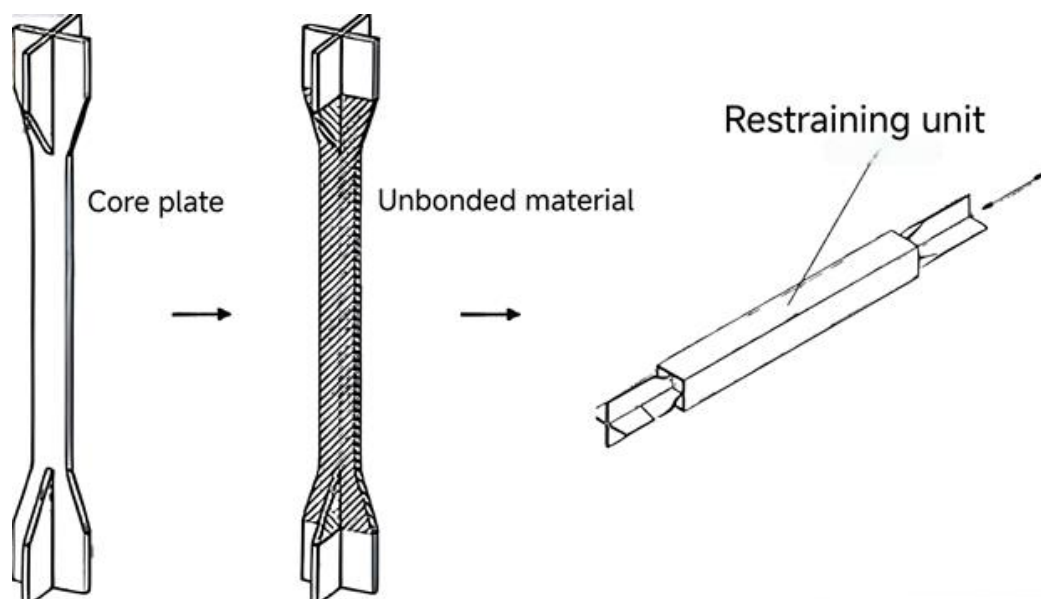


Рис. 1. Противоизгибных демпферов (BRB)

2.3. Эволюция технологии изолирующих опор

Развитие систем сейсмической изоляции прошло три этапа:

1. Этап использования натуральных резиновых опор (LNR), в которых сейсмическая энергия изолировалась за счёт сдвиговой деформации резины.

2. Этап применения свинцовых резинометаллических опор (LRB), где за счёт пластической деформации свинцового сердечника повышалась способность к энергопоглощению.

3. Этап использования высокодемпфирующих резиновых опор (HDRB), в которых применяются модифицированные резиновые материалы с повышенными демпфирующими и экологичными свойствами [9]. Испытания на вибростендах показали, что HDRB способны снижать ускорения в надстройке на 60–70 %, при этом отсутствует риск загрязнения свинцом [10].

2.4. Сравнительный анализ и потенциал интеграции технологий

BRB и изолирующие опоры демонстрируют взаимодополняющие механизмы сейсмозащиты: BRB обеспечивают локальное энергопоглощение, защищая основные конструктивные элементы, тогда как изолирующие опоры снижают общее поступление сейсмической энергии в здание. В последние годы активно исследуются комбинированные системы, например, установка BRB над уровнем изоляционного слоя, что позволяет одновременно контролировать как перемещения, так и повреждения конструкции [11]. Такой многоуровневый подход открывает новые перспективы для проектирования зданий в зонах с высокой сейсмической активностью.

3. Технология Buckling Restraint Brace (BRB)

3.1. Конструкция и принцип работы

Типичный противоигибаемый демпфер (BRB) состоит из трёх основных компонентов:

1. Сердцевина – основной элемент, воспринимающий осевые нагрузки, обычно выполняется из стали с низкой точкой текучести LYP100;

2. Ограничивающий элемент – как правило, представляет собой стальную трубу, заполненную бетоном, обеспечивающую поперечную устойчивость сердцевины.

3. Несвязующий слой – полиэтиленовая плёнка или силиконовое покрытие, предназначенные для снижения трения между сердцевиной и ограничителем [6]. При сейсмическом воздействии сердцевина входит в пластическое состояние как при растяжении, так и при сжатии, поглощая энергию за счёт гистерезисной деформации, тогда как ограничивающий элемент предотвращает потерю устойчивости.

3.2. Механические характеристики и оптимизация проектирования

Механическое поведение BRB может быть описано билинейной моделью: начальная жёсткость K_1 определяется площадью поперечного сечения сердцевины. При проектировании необходимо обеспечить коэффициент накопленной пластической деформации сердцевины ($\mu_p \geq 200$), соответствующий требованиям китайского стандарта JGJ/T 101-2015.

Основные направления оптимизации включают:

1. Инновационные формы сердцевины (например, волнообразное сечение для повышения пластичности).

2. Снижение массы ограничивающего элемента (например, замена бетонного наполнителя на стеклопластик

– GFRP).

3. Повышение точности узловых соединений (например, использование косынок для снижения концентрации напряжений) [12].

3.3. Проблемы применения в железобетонных рамах

Основные проблемы внедрения BRB в железобетонные конструкции связаны с различием материалов:

1. Высокая жёсткость бетонных узлов вызывает концентрацию изгибающих моментов на концах BRB.

2. Ползучесть анкеров вызывает их ослабление с течением времени.

3. Отсутствуют стандартизированные проектные рекомендации, адаптированные под ЖБ-структуры.

Для решения этих проблем Национальный центр исследований землетрясений Тайваня (NCREE) предложил соединение типа «химические анкеры с распиранием + косынки» на основе полноразмерных испытаний, что позволило увеличить способность к рассеиванию энергии в 5 раз, однако требуется

дальнейшая проверка его долговечности [8].

3.4. Инженерные примеры и экономическая эффективность

В одном из проектов по усилению 8-этажного офисного здания в Токио (Япония), выполненного с использованием BRB, относительный угол междуэтажного сдвига при редких землетрясениях снизился с 1/50 до 1/200, а затраты на восстановление уменьшились на 34 % [13]. Экономический анализ показал, что начальная стоимость BRB на 20 % выше по сравнению с традиционными связями, однако совокупные затраты на протяжении всего жизненного цикла снижаются на 40 %.

4. Технология сейсмоизоляционных подшипников

4.1. Сравнение типов и производительности

Существует три основных типа сейсмоизолирующих опор (таблица 1):

Таблица 1

Основные категории сейсмоизолирующих опор

Тип	Основные материалы	Коэффициент затухания, %	Функции
LNR	Натуральный каучук	5–8	Низкое демпфирование, требуется дополнительный демпфер
LRB	Натуральный каучук + свинцовый сердечник	15–25	Высокое потребление энергии, риск загрязнения свинцом
HDRB	Высокоамортизирующая резина	12–30	Экологически чистая, устойчива к широкому диапазону температур

4.2. Инновации в материалах и технологии изготовления HDRB

Высокодемпфирующие резиновые опоры (HDRB) достигают повышения демпфирующих свойств за счёт модификации резины. Наиболее распространённые методы включают:

1. Добавление технического углерода в качестве усиливающего наполнителя.
2. Сополимеризацию бутилкаучука с натуральным каучуком;
3. Оптимизацию процесса вулканизации, например, поэтапную высокотемпературную вулканизацию.

Испытания показывают, что HDRB обеспечивают эквивалентное демпфирование до 25 % при 20 % сдвиговой деформации и сохраняют стабильные характеристики в температурном диапазоне от -30°C до $+60^{\circ}\text{C}$ [14].

4.3 Проблемы долговечности и технического обслуживания

Старение резины является одной из основных проблем эксплуатации изолирующих опор. Согласно ускоренным испытаниям старения, модуль сдвига HDRB снижается на 15 % после 50 лет службы, что требует регулярного контроля и замены. Кроме того, воздействие вертикальных компонент землетрясения может вызвать отрыв опоры от основания, что требует применения ограничительных устройств или использования комбинированных систем сейсмоизоляции, например, в сочетании с фрикционно-маятниковыми опорами [15].

5. Обсуждать

5.1. Сравнение технической применимости

BRB и сейсмоизоляционные опоры имеют свои преимущества и недостатки (таблица 2):

Таблица 2

Сравнение BRB и сейсмоизоляционных подшипников

Индикаторы	BRB	Изолирующий подшипник
Применимые здания	Средне- и многоэтажные здания, усиление существующих зданий	Малозэтажные, новые важные здания
Антисейсмический механизм	Местное потребление энергии	Глобальная изоляция
Экономичный	Начальная стоимость от средней до высокой	Высокая первоначальная стоимость
Требования к техническому обслуживанию	Низкий (сменный)	Высокий (регулярное тестирование)

5.2. Путь сотрудничества с использованием множества технологий

Будущее сейсмическое проектирование может исследовать следующие синергетические режимы:

1. Двойная система «BRB + изоля-

ция»: слой изоляции снижает подводимую энергию, а BRB контролирует остаточную деформацию.

2. «Самовосстанавливающийся BRB + интеллектуальный амортизатор»: сплав с эффектом памяти формы (SMA) используется для улучшения способно-

сти к самовосстановлению [16].

3. «3D-печатная опора + оптимизированная по топологии BRB»: индивидуальные сейсмические компоненты изготавливаются с помощью аддитивного производства.

5.3. Тенденции развития материалов и интеллектуализации

Новые материалы, такие как резина, армированная углеродными нанотрубками, и сверхэластичное металлическое стекло, могут дополнительно улучшить эксплуатационные характеристики BRB и опоры. Кроме того, встроенные датчики и алгоритмы искусственного интеллекта могут осуществлять управление в реальном времени во время землетрясений, например, регулировать жесткость сейсмической изоляции с помощью магнитореологических демпферов [11].

6. Результаты

Сейсмическая эффективность BRB. Противоизгибные демпферы (BRB) способны снижать межэтажный угол сдвига в железобетонных (ЖБ) рамах на 60–80 %. При воздействии редких сильных землетрясений основные повреждения концентрируются в заменяемых

элементах BRB, тогда как основная несущая структура остаётся в упруго-деформируемом состоянии [17].

Экономическая эффективность изолирующих опор. Несмотря на увеличение первоначальных затрат на 20–30 %, общая стоимость жизненного цикла зданий с HDRB оказывается на 40 % ниже по сравнению с традиционными конструкциями. Это преимущество обусловлено значительным снижением расходов на восстановление и убытков от простоя [10].

Потенциал комплексного проектирования. Предварительные испытания показывают, что комбинированная система «BRB + сейсмоизоляция» позволяет одновременно снижать ускорение на 50 % и перемещения на 70 %. Однако для успешной реализации требуется решение задачи динамической связи между опорами и демпферами [11].

Технологические ограничения. Ключевыми вызовами, требующими дальнейших исследований, остаются: обеспечение надёжности анкеровки BRB, скорость старения резины в опорах и влияние вертикальных составляющих землетрясения.

References

1. Yang, W., Wang, D., & Chen, G. (2011). Reconstruction strategies after the Wenchuan Earthquake in Sichuan, China. *Tourism Management*, 32(4), 949–956.
2. Yoshino, T., Kano, Y., Kuwahara, T., Tomita, I., & YoshiSada, M. (1971). Experimental study on shear wall with braces: Part 2. Retrieved February 9, 2025, from https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Experimental%20study%20on%20shear%20wall%20with%20braces%20&publication_year=1971&author=T.%20Yoshino&author=Y.%20Kano&author=T.%20Kuwahara&author=I.%20Tomita&author=M.%20YoshiSada
3. Robinson, J. (1982). Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10(4), 511–520. doi:10.1002/eqe.4290100408
4. Xu, G., et al. (2024). Seismic resilience enhancement for building structures: A comprehensive review and outlook. *Structures*, 59, 105738.
5. Takagi, J., & Wada, A. (2019). Recent earthquakes and the need for a new philosophy for earthquake-resistant design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 499–507.
6. Zhou, Y., et al. (2021). Application of buckling-restrained braces to earthquake-resistant design of buildings: A review. *Engineering Structures*, 246, 112991.
7. Kimura, K., Yoshizaki, K., & Takeda, T. (1976). Tests on braces encased by mortar in-filled steel tubes. Retrieved February 9, 2025, from https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Tests%20on%20braces%20encased%20by%20mortar%20in-

- filled%20steel%20tubes&publication_year=1976&author=K.%20Kimura&author=K.%20Yoshizaki
&author=T.%20Takeda
8. Mahrenholtz, C., et al. (2015). Retrofit of reinforced concrete frames with buckling-restrained braces. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(1), 59–78.
 9. Wang, Z., Zhang, X., Sun, Q., Guo, Y., Zhao, H., Zhu, H., ... Huang, Y. (2021). An experimental study on the mechanical properties of a high damping rubber bearing with low shape factor. *Applied Sciences*, 11(21), 10059. doi:10.3390/app112110059
 10. Sato, N., et al. (2002). Shaking table tests on failure characteristics of base isolation system for a DFBR plant. *Nuclear Engineering and Design*, 212(1), 293–305.
 11. Wei, W., et al. (2019). Experimental and analytical investigation of the influence of compressive load on rate-dependent high-damping rubber bearings. *Construction and Building Materials*, 200, 26–35.
 12. Cao, Y., et al. (2024). Experimental and numerical study of buckling-restrained braces configured with out-of-plane eccentricity under cyclic loading. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 23(4), 957–971.
 13. Chou, C.-C., Hon, J.-F., & Bai, B.-Y. (2024). Development of a compression-only self-centering brace with buckling-restrained bars for energy dissipation. *Journal of Structural Engineering*, 150(9), 04024124.
 14. Oh, J., Kim, J. H., & Han, S. C. (2017). An experimental study on the shear property dependency of high-damping rubber bearings: 8. *Journal of Vibroengineering*, 19(8), 6208–6221.
 15. Xiang, N., & Li, J. (2017). Experimental and numerical study on seismic sliding mechanism of laminated-rubber bearings. *Engineering Structures*, 141, 159–174.
 16. Abualreesh, A. M., et al. (2022). Reliability-based optimization of shear walls in RC shear wall-frame buildings subjected to earthquake loading. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00978.
 17. Bai, J., et al. (2019). Assessing and quantifying the earthquake response of reinforced concrete buckling-restrained brace frame structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(7), 3847–3871.

Получено: 07.11.25
Прошла рецензирование: 01.12.25
Принята к публикации: 10.12.25
Доступно он-лайн: 29.12.25

Received: 07.11.25
Revised: 01.12.25
Accepted: 10.12.25
Available on-line: 29.12.25