

## СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ СООРУЖЕНИЙ SEISMIC RESISTENCE

DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-1-57-72  
УДК 699.841  
EDN: YAWTGR

Научная статья / Research article

### Оценка сейсмостойкости многоэтажного жилого здания с фрикционно-маятниковыми опорами на примере Индонезии

З.К. Абаев<sup>1</sup> , Ф. Султан<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Владикавказский научный центр Российской академии наук, Владикавказ, Россия

<sup>2</sup> Министерство общественных работ и жилищного строительства, Джакарта, Индонезия

✉ abaich@yandex.ru

#### История статьи

Поступила в редакцию: 1 октября 2023 г.  
Доработана: 27 декабря 2023 г.  
Принята к публикации: 13 января 2024 г.

#### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** Рассмотрена методика оценки сейсмостойкости жилого здания в Индонезии с применением сейсмоизоляции. В качестве объекта исследования выбрано 8-этажное жилое железобетонное здание рамно-связевой конструктивной схемы. Для анализа отклика сооружения использовались нелинейные методы расчета на сейсмическое воздействие: нелинейный статический (*Pushover*) и нелинейный динамический анализ во временной области (*Nonlinear Time History Analysis, NLTHA*). Расчет производится в свободно распространяемой программе *STERA 3D*. Динамический расчет осуществлялся на семь пар горизонтальных компонент акселерограмм, выбранных в соответствии с параметрами возможных землетрясений для рассматриваемой площадки строительства (г. Бандунг). Выбранные записи землетрясений изменялись с помощью процедуры спектрального соответствия (*spectral matching*) нормативному спектру ускорений. В качестве сейсмоизолирующих опор были использованы фрикционно-маятниковые опоры, разработанные японской корпорацией *Nippon Steel*. Результаты нелинейного временного анализа (*NLTHA*) показывают, что поверхностные землетрясения (*shallow*) приводят к большим разрушениям по сравнению с мегаземлетрясениями (*megathrust*), причем в обоих сценариях обеспечивается уровень безопасности жизнедеятельности (*Life Safety*). Применение сейсмоизоляции позволяет снизить сейсмические нагрузки, о чем свидетельствует уменьшение ускорений на верхнем уровне и сдвигающих усилий в основании здания.

**Ключевые слова:** сейсмоизоляция, нелинейный динамический анализ, определение уровней работоспособности

Абаев Заурбек Камболатович, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник, Владикавказский научный центр Российской академии наук, Владикавказ, Россия; ORCID: 0000-0002-6932-2740; E-mail: zaurbek\_a@yahoo.com

Султан Фаиз, инженер группы внедрения строительных материалов и конструкций, Министерство общественных работ и жилищного строительства, Министерство общественных работ и жилищного строительства, Джакарта, Индонезия; ORCID: 0000-0002-7792-0337; E-mail: faiz.sulthan@pu.go.id

© Абаев З.К., Султан Ф., 2024

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

**Благодарности**

Авторы выражают признательность Японско-Российскому центру молодежных обменов за их поддержку в рамках программы стипендий (*JREX*), которая предоставила ценные возможности для сотрудничества и обмена знаниями. Авторы выражают признательность Японскому агентству международного сотрудничества (*JICA*) и Международному институту сейсмологии и сейсмостойкого строительства *IISEE* (город Цукуба, Япония) за их неизменную приверженность развитию международного сотрудничества и созданию благоприятной среды для академических и исследовательских начинаний. Их поддержка сыграла ключевую роль в успехе этого проекта.

**Для цитирования**

Абаев З.К., Султан Ф. Оценка сейсмостойкости многоэтажного жилого здания с фрикционно-маятниковыми опорами на примере Индонезии // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2024. Т. 20. № 1. С. 57–72. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-1-57-72>

## Seismic Performance Evaluation of Multi-Storey Residential Building with Friction Pendulum Bearings: Indonesia case study

Zaurbek K. Abaev<sup>1</sup> , Faiz Sulthan<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, *Vladikavkaz, Russia*

<sup>2</sup> Ministry of Public Works and Housing, *Jakarta, Indonesia*

✉ [abaich@yandex.ru](mailto:abaich@yandex.ru)

**Article history**

Received: October 1, 2023

Revised: December 27, 2023

Accepted: September 13, 2024

**Conflicts of interest**

The authors declare that there is no conflict of interest.

**Authors' contribution**

Undivided co-authorship.

**Abstract.** The methodology for seismic performance evaluation of a residential building in Indonesia with the use of seismic isolation is considered. An 8-storey reinforced concrete frame residential building with shear wall structural system was selected as a case study. Nonlinear methods of seismic response analysis were used to calculate the response of the structure: nonlinear static (Pushover) and Nonlinear-Time History Analysis, NLTHA. The analysis is performed in STERA 3D freeware. The nonlinear time history analysis was performed for seven pairs of horizontal components of earthquake ground motions, selected according to the parameters of possible earthquakes for the considered site (Bandung city). The selected earthquake records were modified using the spectral matching procedure for design spectrum. Friction-pendulum bearings developed by Nippon Steel Corporation of Japan were used as seismic isolation. The results of nonlinear time history analysis show that shallow earthquakes result in greater damage compared to megathrust earthquakes, with both scenarios providing a life safety (LS) performance level. The use of seismic isolation can reduce seismic loads, as evidenced by the reduction in top-level accelerations and shear forces at the base.

**Keywords:** seismic isolation, nonlinear dynamic analysis, determination of performance levels

**Acknowledgements**

The authors express their gratitude to the Japanese-Russian Youth Exchange Center for their support within the framework of the fellowship program (*JREX*), which provided valuable opportunities for cooperation and knowledge exchange. The authors express their gratitude to the Japan International Cooperation Agency (*JICA*) and the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, *IISEE* (Tsukuba, Japan) for their continued commitment to the development of international cooperation and the creation of a favorable environment for academic and research endeavors. Their support played a key role in the success of this project.

**For citation**

Abaev Z.K., Sulthan F. Seismic performance evaluation of multi-storey residential building with friction pendulum bearings: Indonesia case study. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024;20(1):57–72. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-1-57-72>

**Zaurbek K. Abaev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Researcher, Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences. ORCID: 0000-0002-6932-2740; E-mail: [zaurbek\\_a@yahoo.com](mailto:zaurbek_a@yahoo.com)

**Faiz Sulthan**, M. Eng, Engineer, Implementation Unit for Building Materials and Structures, Directorate General of Human Settlements, Ministry of Public Works and Housing, Jakarta, Indonesia; ORCID: 0000-0002-7792-0337; E-mail: [faiz.sulthan@pu.go.id](mailto:faiz.sulthan@pu.go.id)

## 1. Введение

Сейсмическая уязвимость многоэтажных жилых зданий требует постоянного совершенствования конструктивных решений и стратегий снижения рисков [1]. Данная работа посвящена оценке сейсмостойкости многоэтажных жилых зданий, оборудованных системами сейсмоизоляции, и подчеркивает ее актуальность и потенциальный вклад в отечественное сейсмостойкое строительство. Несмотря на то, что территория России охватывает различные сейсмические зоны, в исследовании для обогащения российской практики сейсмостойкого проектирования рассмотрены методики и подходы, применяемые в индонезийской практике [2]. В дополнение к практическим выводам, полученным в ходе исследования, необходимо отметить продолжающиеся исследования в области сейсмоизоляции, что еще больше увеличивает потенциальное влияние на отечественную практику сейсмостойкого строительства [3; 4].

Современные исследования в области сейсмоизоляции посвящены изучению инновационных материалов, передовых аналитических методов и систем динамического управления, направленных на повышение эффективности и адаптивности систем сейсмоизоляции [5]. За последние несколько десятилетий было проведено множество экспериментальных и теоретических исследований по оценке влияния сейсмоизоляции на устойчивость конструкций к землетрясениям. Результаты этих исследований показывают, что сейсмоизоляция приводит к уменьшению сейсмических сил в основании, общей деформации сооружения, числа пластических шарниров и смещений этажей при одновременном увеличении периода колебаний конструкций [6–10].

Учет результатов этих исследований может оказать существенное влияние на развитие практики сейсмостойкого проектирования в России. Динамичный характер исследований в области сейсмостойкого строительства, обусловленный появлением новых технологий и междисциплинарным сотрудничеством, обеспечивает постоянную эволюцию методов расчета и проектирования зданий на сейсмические воздействия [11]. Данное исследование в сочетании с более широким спектром проводимых исследований призвано внести вклад в динамичную дискуссию о сейсмостойкости многоэтажных домов [5; 12], способствуя формированию комплексного понимания, не только применимого к условиям Индонезии, но и переносимого в сейсмоопасные регионы России.

*Целями настоящего исследования являлись:*

- исследование методов и подходов к проектированию зданий с применением сейсмоизоляции;
- оценка сейсмостойкости многоэтажного сейсмоизолированного жилого здания (на примере Индонезии).

## 2. Методы и материалы

Параметры объекта исследования (рис. 1) представлены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Параметры объекта исследования / Parameters of target building

Параметр / Parameter	Значение / Value
Место положения / Location	Бандунг, Индонезия / Bandung, Indonesia
Назначение / Occupancy	Жилое / Residential
Конструктивная схема / Structural system	Рамно-связевой каркас с диафрагмами жесткости / RC Frame — Shear wall
Количество этажей / Number of stories	8
Категория площадки / Site class*	SD
Полная высота, м / Total height, m	27.4
Категория риска / Risk category*	II (апартаменты) / II (apartment)
Коэффициент ответственности / Seismic importance factor*	1.0
Сейсмические нормы / Building codes	SNI 1726:2019
Размеры в плане, м / Plan dimensions, m	60 × 14.8
Год постройки / Construction year	2021
Прочность бетона, МПа / Concrete Strength, MPa	30 — для балок и плиты, 35 — для колонн и стен / 30 — for Beam and slab, 35 — for Column and Shear wall
Предел текучести арматуры, МПа / Yield strength of rebar, MPa	420
Отношение предельной прочности арматуры к пределу текучести / Ultimate and yield ratio	1.25

\*Примечание: в соответствии с нормами Индонезии SNI 1726:2019 /

\* Note: in accordance with Indonesian Seismic code SNI 1726:2019



**Рис. 1.** Объект исследования (фасад, план)

Источник: выполнено авторами

**Figure 1.** Target building (elevation & plan)

Source: made by the authors

В здании применяется шесть типов ригелей ( $h \times b$  мм):  $600 \times 400$ ,  $600 \times 350$ ;  $600 \times 300$ ,  $400 \times 250$ ,  $400 \times 200$ ,  $300 \times 150$ . Продольная арматура ригелей (мм): d22 (для  $h = 600$ ), d19 (для  $h = 400$ ), d16 (для  $h = 300$ ). Поперечная арматура (мм): d10, шаг 100 — на приопорных участках; шаг 150 — в середине пролета.

Плита перекрытия толщиной 130 мм, арматура плиты d10, шаг 150 мм.

Колонны ( $h \times b$  мм):  $600 \times 400$ . Арматура: продольная — 18d22, поперечная — d13, шаг 150 мм.

Железобетонные диафрагмы жесткости толщиной 200 мм. Торцевые колонны диафрагм размерами  $500 \times 200$  мм армируются продольными стержнями 16d22, тело стены армируется d10, шаг 150 мм; поперечная арматура d13, шаг 150 мм.

**Определение нагрузок.** Постоянные нагрузки на перекрытие (*Dead Load, DL*) —  $10.25 \text{ кН/м}^2$  (собственный вес элементов).

Дополнительная постоянная нагрузка (*Super Imposed Dead Load, SIDL*) —  $1.5 \text{ кН/м}^2$  (потолок, пол, инженерные коммуникации).

Временные нагрузки (*Live Load, LL*) —  $2.0 \text{ кН/м}^2$ .

Полная нагрузка:  $1.0 DL + 1.0 SIDL + 0.25 LL = 12.25 \text{ кН/м}^2$ .

**Нормативный спектр ускорений (Design Response Spectrum).** Параметры нормативного спектра ускорений определяются для площадки строительства в соответствии с SNI 1726:2019. Требуемые параметры могут быть определены с помощью специального онлайн-сервиса [13]. Спектр ускорений для рассматриваемой площадки строительства представлен на рис. 2. Как видно из рисунка, построенный спектр находится между 8 и 9 баллами (MSK 8 и MSK 9 на графике) отечественной шкалы MSK-64 и имеет большую протяженность площадки максимальных ускорений для коротких периодов.

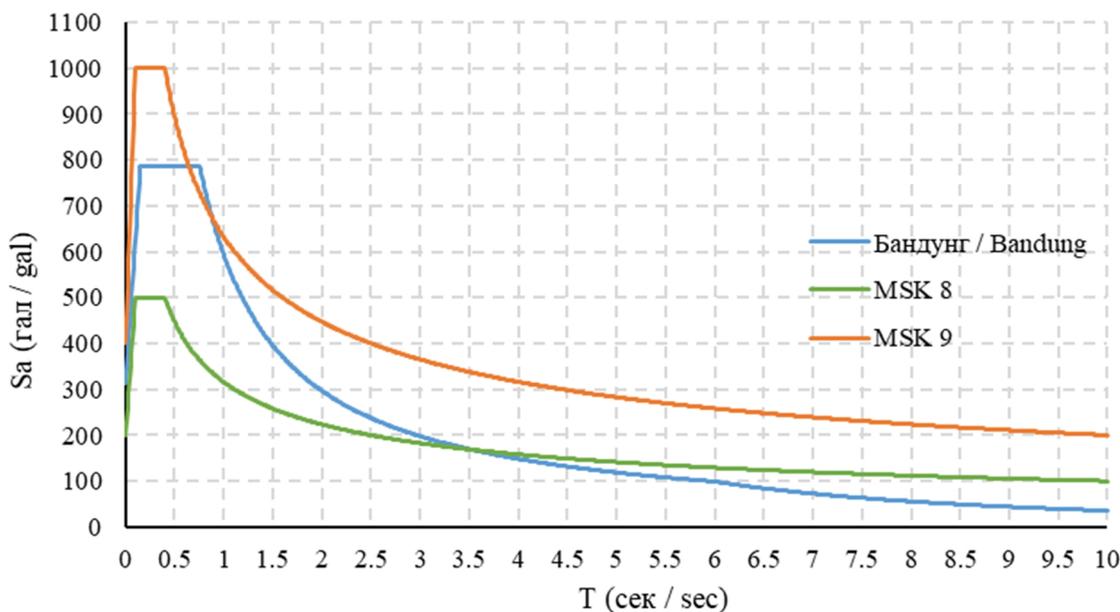


Рис. 2. Нормативный спектр ускорений для г. Бандунг  
Источник: выполнено авторами

Figure 2. Design Response Spectrum for Bandung  
Source: made by the authors

**Нелинейный анализ отклика сооружения.** Для анализа отклика сооружения используются нелинейные методы расчета на сейсмическое воздействие: нелинейный статический (*Pushover*) и нелинейный динамический во временной области (*Nonlinear-Time History Analysis, NLTHA*). Расчет производится в свободно распространяемой программе *STERA 3D*. Дистрибутив программы, а также детальное техническое руководство доступны пользователям всех стран на сайте программы. Автором настоящей работы был выполнен перевод руководства пользователя на русский язык, который также доступен на сайте программы [14].

Программа *STERA 3D* предназначена для выполнения нелинейных расчетов на динамические воздействия зданий и сооружений. В основе программы лежат модели, состоящие из линейных (упругих) элементов с нелинейными пружинами — концентрированная нелинейность. Жесткость нелинейных пружин характеризуется зависимостями сила-деформация для каждого элемента. Для описания нелинейного поведения пружин используются конститутивные модели, такие как билинейные или трилинейные модели. Более подробная информация о канонических уравнениях каждого элемента, принципах формирования матриц жесткости и работы программы читатель может найти в техническом руководстве программы [14].

Сейсмическое воздействие в *STERA 3D* задается тремя компонентами акселерограмм  $\ddot{X}_0$ ,  $\ddot{Y}_0$  и  $\ddot{Z}_0$  в направлениях  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  соответственно. Уравнение движения для системы элементов записывается как  $[M]\{a\} + [C]\{v\} + [K]\{d\} = \{p\}$ , где  $[M]$ ,  $[C]$  и  $[K]$  — матрицы масс, демпфирования и жесткости.  $\{d\}$ ,  $\{v\}$ ,  $\{a\}$  и  $\{p\}$  — векторы перемещений, скорости, ускорений и внешних сил соответственно. Для интегрирования уравнения движения используется модифицированный Ньюмарк- $\beta$  метод с инкрементальной

формулировкой, использующей пошаговую матрицу жесткости. В настоящем примере использовалось демпфирование, пропорциональное жесткости  $[C] = a_1 [K]$ , с коэффициентом демпфирования  $h = 0.05$ , коэффициент пропорциональности  $a_1 = 2h/\omega_1$ , где  $\omega_1$  — частота первой формы колебаний. В качестве модели гистерезиса в работе используется модель Такеды [15].

Для нелинейного динамического анализа использовалось семь пар горизонтальных компонент записей ускорений грунта, выбранных в соответствии с магнитудой, эпицентральной радиусом и механизмом возникновения рассматриваемой площадки строительства. Спектральное преобразование (*spectral matching*) выбранных записей ускорений грунта производится обратным преобразованием Фурье для нормативного спектра ускорений с использованием программы *STERA WAVE 1.0*. Расчет ведется в соответствии с сейсмическими нормами Индонезии SNI 1726:2019.

**Выбор записей землетрясений.** При проведении нелинейного динамического анализа должны быть использованы наборы записей ускорений грунта для проектного и максимального рассматриваемого землетрясения, состоящие минимум из семи пар горизонтальных компонент акселерограмм, выбранных и масштабированных исходя из параметров магнитуды, эпицентрального расстояния и механизма землетрясения, соответствующих рассматриваемой строительной площадке [14; 15]. В случае отсутствия требуемого набора записей ускорений грунта возможно использовать синтетические пары акселерограмм. При использовании нелинейного динамического анализа как основания для проектирования систем сейсмоизоляции расчетные перемещения и силы в элементах здания рассчитываются для среднего значения семи пар акселерограмм.

Для территории Индонезии необходимо рассматривать три механизма возникновения землетрясений (рис. 3)<sup>1</sup>:

- 1) мегаземлетрясение (*Megathrust, M*);
- 2) бениоф (*Benioff, B*);
- 3) поверхностное (*Shallow Crustal, SC*) и поверхностное фоновое (*Shallow Background, SB*).

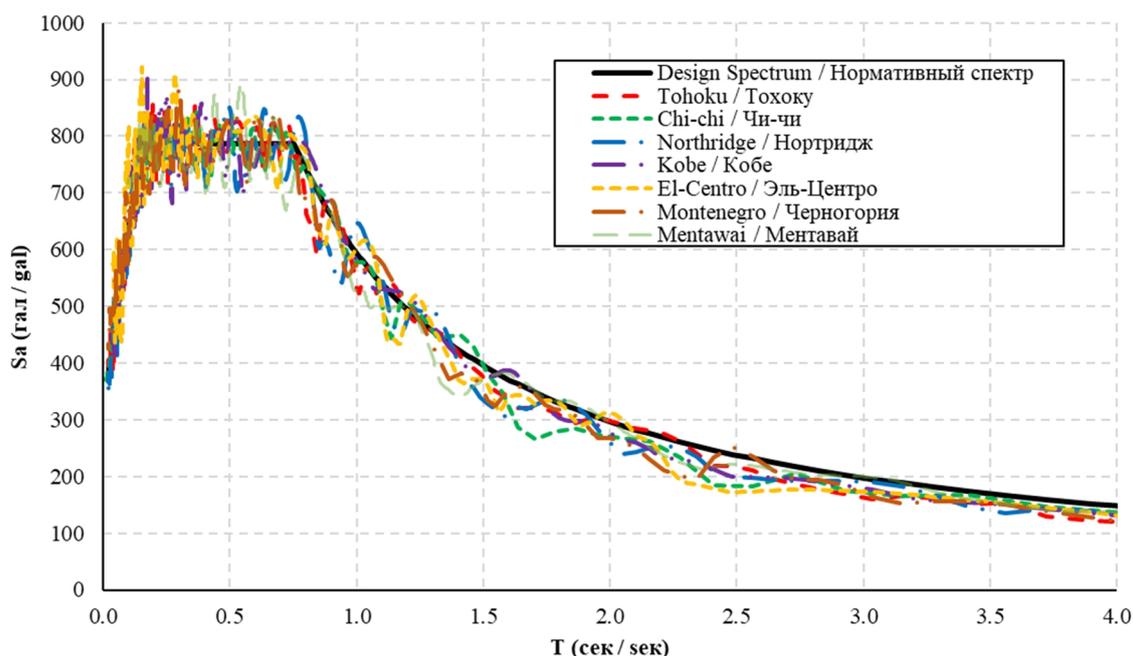


Рис. 3. Результаты процедуры спектрального соответствия для компонентов «E-W»

Источник: выполнено авторами

Figure 3. Spectral Matching of the E-W components

Source: made by the authors

<sup>1</sup> National Center for Earthquake Studies. Report. Indonesian deaggregation maps for design and evaluation of seismic resistance infrastructure. 2022. (In Indonesian).

Записи землетрясений были получены из открытых баз данных:

- Центр инженерных данных о сильных движениях, США (CESMD)<sup>2</sup>.
- Тихоокеанский исследовательский центр сейсмостойкого строительства, США (PEER)<sup>3</sup>.
- Сети сейсмографов сильных движений *K-Net*, Япония<sup>4</sup>.

Очевидно, что для эффективного внедрения нелинейного динамического метода в отечественную практику необходима серьезная модернизация существующих нормативных документов, включая разработку рекомендаций и критериев по выбору записей землетрясений, аналогичных отмеченным выше.

*Спектральное соответствие (spectral matching) записей землетрясений*

Выбранные записи землетрясений изменялись с помощью процедуры спектрального соответствия (*spectral matching*). Процедура спектрального соответствия заключается в корректировке спектра ускорений в соответствии с заданным спектром отклика. Процесс включает в себя, прежде всего, масштабирование амплитудного спектра Фурье для согласования амплитуд и корректировку фазового спектра для временного согласования [20; 21]. Учет неопределенностей с помощью вероятностных методов позволяет получить надежные результаты. Валидация по эмпирическим данным и анализ чувствительности завершают процедуру, в результате которой получают скорректированные в соответствии с сейсмичностью площадки записи землетрясений.

Процесс сейсмического соответствия выбранных записей землетрясений выполнялся в программе *STERA WAVE 1.0*. Результаты спектрального соответствия представлены на рис. 3. Параметры записей землетрясений, включая ускорения поверхности грунта ( $PGA_{max}$ ) до и после проведения процедуры спектрального соответствия, представлены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Параметры записей землетрясений / Ground motion parameters

№	Землетрясение / Earthquake	Направление / Direction	Механизм / Mechanism	Магнитуда / Magnitude	$PGA_{max}$ , гал / gal	$PGA'_{max}$ , гал / gal*	Время, сек / Duration, sec	Источник / Source	
1	Тохоку 2011 / Tohoku 2011	EW	M	9	293.5	305.7	300	K-Net	
		NS			372.2	364.0			
		UD			287.2	249.2			
2	Чи-Чи 1999 / Chi-Chi 1999	EW		7.62	9	17.3	357.4	60	CESMD
		NS				25.1	371.1		
		UD				9.8	554.3		
3	Ментавай 2007 / Mentawai 2007	EW		7.9	9	124.0	319.2	108	CESMD
		NS				114.0	303.3		
		UD				42.0	373.5		
4	Эль Центро 1940 / El Centro 1940	EW	SC	6.9	210.1	346.9	15	STERA 3D	
		NS			341.7	343.9			
		UD			206.3	511.0			
5	Нортридж 1994 / Northridge 1994	EW		6.53	6.53	172.0	327.0	40	PEER
		NS				245.0	289.8		
		UD				15.1	278.6		
6	Кобе 1995 / Kobe 1995	EW	SB	6.9	617.1	413.5	20	STERA 3D	
		NS			817.8	407.7			
		UD			332.2	615.3			
7	Черногория 1979 / Montenegro 1979	EW	B	7.35	175.5	395.2	30	PEER	
		NS			265.1	361.5			
		UD			47.19	318.2			

\*Примечание:  $PGA'_{max}$  — максимальное ускорение поверхности грунта после процедуры спектрального соответствия /

\*Note:  $PGA'_{max}$  — peak ground acceleration after spectral matching

<sup>2</sup> Center for Engineering Strong Motion Data USGS. URL: <https://www.strongmotioncenter.org>. (accessed: 19.11.2023).

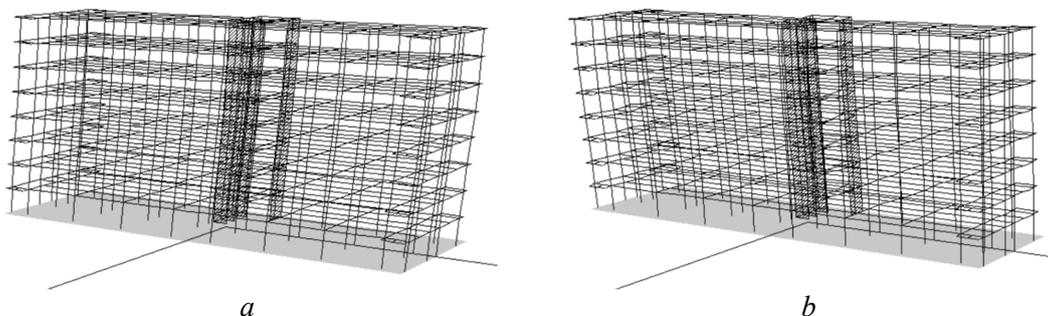
<sup>3</sup> Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). URL: <https://ngawest2.berkeley.edu>. (accessed: 19.11.2023).

<sup>4</sup> Strong-motion Seismograph Networks (K-NET, KiK-net). URL: <https://www.kyoshin.bosai.go.jp>. (accessed: 19.11.2023).

### 3. Результаты и обсуждение

**Результаты модального анализа.** Формы колебаний (рис. 4):

- первая:  $T_1 = 0.997$  сек, коэффициент модальных масс  $M_x = 0.792$ ,  $M_y = 0.003$ .
- вторая:  $T_2 = 0.833$  сек, коэффициент модальных масс  $M_x = 0.009$ ,  $M_y = 0.025$ .
- третья:  $T_3 = 0.751$  сек, коэффициент модальных масс  $M_x = 0.002$ ,  $M_y = 0.769$ .



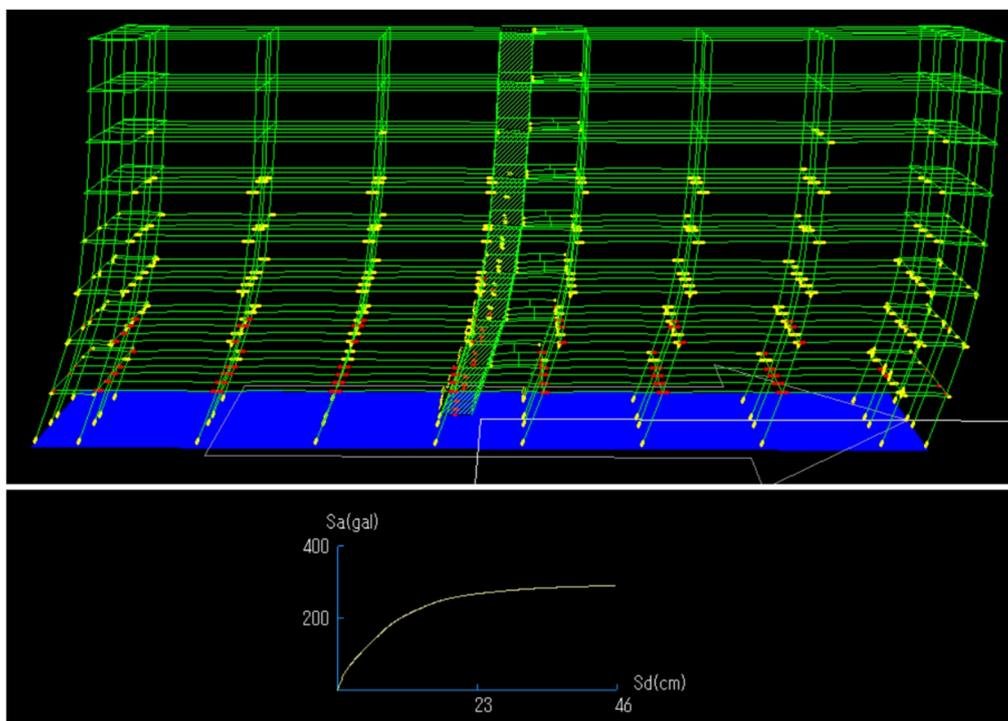
**Рис. 4.** Формы колебаний: *a* — первая,  $T_1 = 0.997$  сек; *b* — третья,  $T_3 = 0.751$  сек

Источник: выполнено авторами с использованием программы STERA 3D

**Figure 4.** Mode shapes: *a* — first,  $T_1 = 0.997$  sec; *b* — third,  $T_3 = 0.751$  sec

Source: made by authors using the STERA 3D program

**Нелинейный статический (Pushover) анализ.** На рис. 5 представлена деформированная схема и кривая несущей способности здания вдоль оси *X*. Элементы, выделенные желтым цветом, идентифицируют умеренные повреждения, а красные — критические. На рис. 6 представлены кривая несущей способности и нормативный спектр ускорений в преобразованных координатах спектрального ускорения ( $S_a$ ) и спектрального перемещения ( $S_d$ ).



**Рис. 5.** Нелинейный статический (*Pushover*) анализ

Источник: выполнено авторами с использованием программы STERA 3D

**Figure 5.** Nonlinear static (*Pushover*) analysis

Source: made by the authors using the STERA 3D program

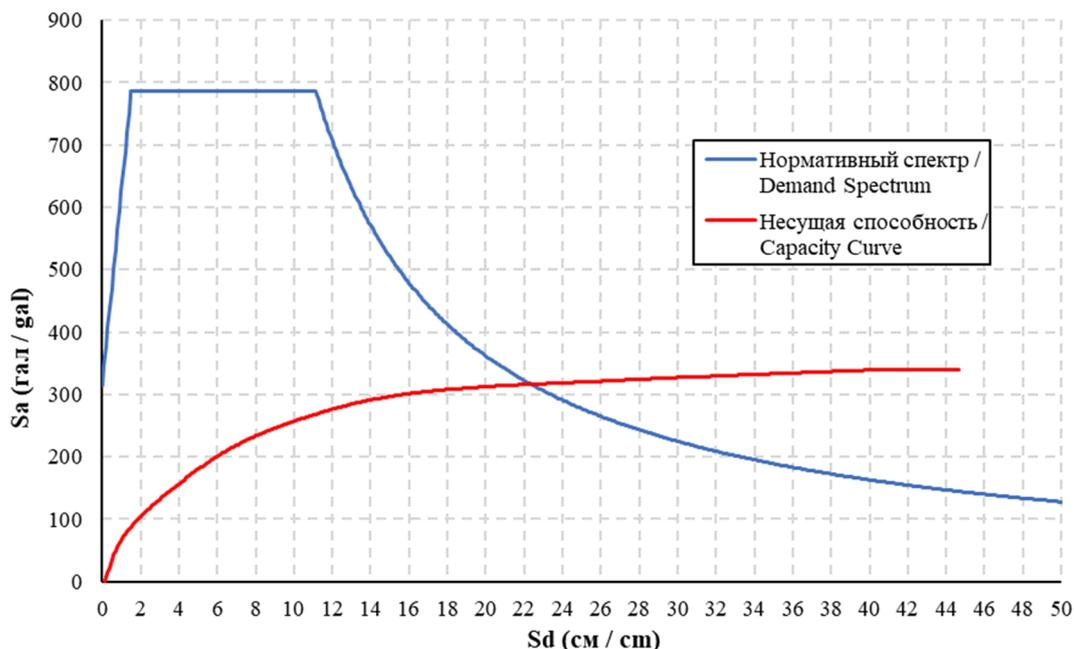


Рис. 6. Кривая несущей способности и нормативный спектр

Источник: выполнено авторами

Figure 6. Capacity Curve and Demand Spectrum

Source: made by the authors

**Определение уровней работоспособности (Performance levels).** В сейсмостойком строительстве уровни работоспособности (эффективности) зданий и сооружений имеют решающее значение для определения ожидаемого поведения конструкций при сейсмических воздействиях. Обычно в строительных нормах и правилах рассматриваются три интенсивности землетрясений (уровни сейсмической опасности) и четыре уровня работоспособности, включающие эксплуатационный (*operational*), непосредственного пребывания людей (*immediate occupancy, IO*), безопасности жизнедеятельности (*life safety, LS*) и предотвращения обрушения (*collapse prevention, CP*)<sup>5</sup>.

**Относительный междуэтажный перекос (inter story drift ratio)** является одним из важнейших параметров, тесно связанным с уровнем эксплуатационных характеристик. Исследования показали четкую корреляцию между междуэтажным перекосом и уровнем работоспособности, причем различные уровни междуэтажного перекоса соответствуют определенным критериям работоспособности. В настоящем исследовании используются значения относительного междуэтажного перекоса (рис. 7) и соответствующие им уровни работоспособности, рекомендованные американскими нормами «Руководство по испытанию железобетонных элементов конструкций при медленно действующих симулированных сейсмических воздействиях»<sup>6</sup>.

Необходимо отметить, что значения междуэтажных перекосов тесно связаны с определением *индекса повреждаемости (damage index)* — важнейшего критерия, используемого для количественной оценки степени повреждения конструкции. Он обеспечивает единое определение повреждений, не зависящее от материала, из которого изготовлена конструкция [20; 21]. В настоящем исследовании используется индекс повреждаемости Парка — Энга (*Park — Ang*), предложенный в [22]. В основе индекса лежит комбинированная мера сейсмического ущерба, которая обеспечивает основу для оценки безопасности конструкций в постмэйншоковый период. Индекс оценивает ущерб как линейную комбинацию максимальной деформации и гистеретической энергии, что позволяет учитывать накопление и распределение повреждений в элементах. В настоящей работе применяются соотношения индекса повреждаемости, междуэтажного перекоса и уровней работоспособности, предложенные в [23].

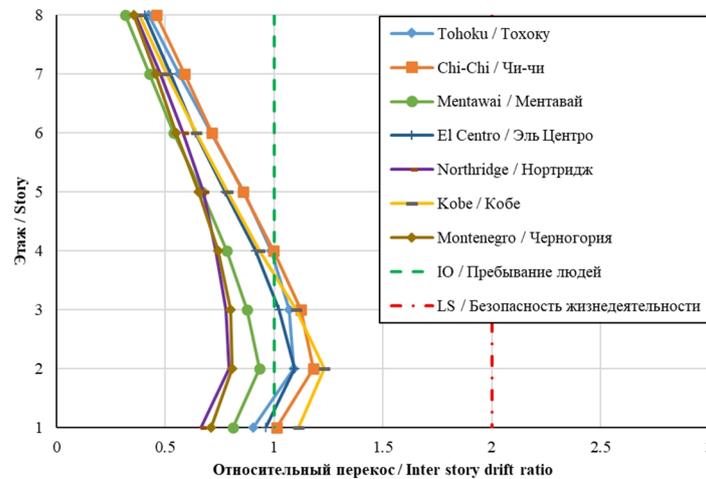
<sup>5</sup> FEMA 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings.

<sup>6</sup> ACI 374.2R-13 Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads.

**Взаимосвязь между индексом повреждаемости Парка и Энга  $D_{PA}$  и уровнем работоспособности [22] /  
Relation between Park and Ang damage index  $D_{PA}$  and performance levels [22]**

Индекс Парка и Энга / Park and Ang index $D_{PA}$	Предельный перекося / Drift limits	Степень повреждений / Damage state	Уровень работоспособности / Performance level
0.1–0.2	< 0.5%	Незначительные / Minor	Эксплуатационный / Operational
0.2–0.5	0.5–1.5 %	Умеренные / Moderate	Безопасность жизнедеятельности / Life safety
0.5–1.0	1.5% – 2.5%	Существенные / Severe	Предобрушение / Near collapse
> 1.0	> 2.5%	Обрушение / Collapse	Полное обрушение / Total collapse

На рис. 7 представлены относительные перекося этажей для неизолированного здания (жесткое основание). Максимальные перекося для всех записей землетрясений локализованы в уровне 2-го этажа и находятся в уровнях *IO* и *LS*. Соответствующие индексы повреждаемости для каждого этажа представлены на рис. 8 и также свидетельствуют об удовлетворительной сейсмостойкости объекта исследования.

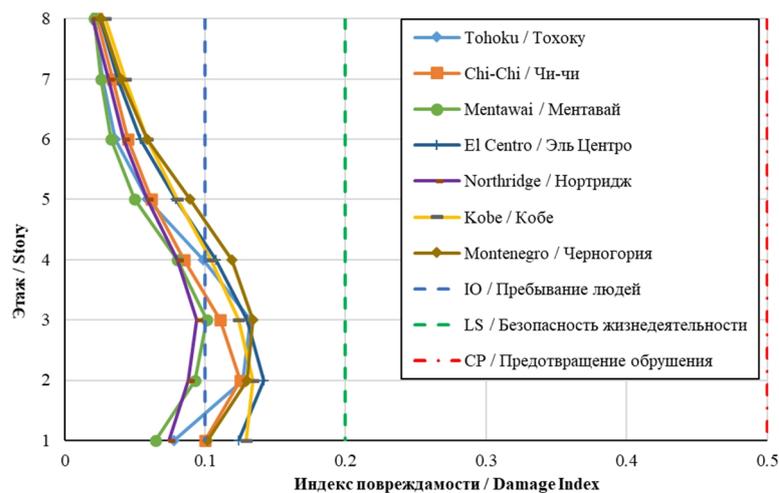


**Рис. 7.** Относительные междуэтажные перекося (жесткое основание) в направлении X

Источник: выполнено авторами

**Figure 7.** Inter-storey drift ratio (fixed base) in X direction

Source: made by authors



**Рис. 8.** Индекс повреждаемости этажей (жесткое основание)

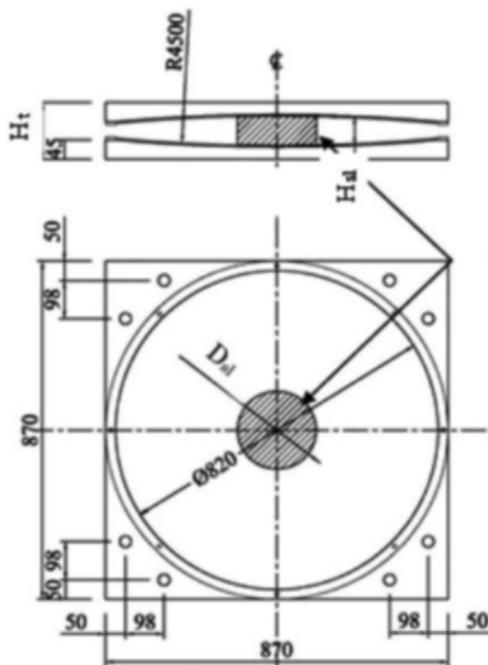
Источник: выполнено авторами

**Figure 8.** Story damage index (fixed base)

Source: made by authors

**Описание принятых элементов сейсмоизоляции.** В настоящем исследовании используются фрикционно-маятниковые опоры. Данные опоры показали свою высокую эффективность и активно применяются в качестве сейсмоизоляции во всем мире [26; 27]. Параметры опор представлены на рис. 9.

Как видно из рис. 10–11, применение сейсмоизоляции позволяет существенно снизить значения междуэтажных перекосов и индекс повреждаемости (для всех записей уровень работоспособности *IO*).



**Параметры / Parameters**

Эффективная жесткость, кН/м — 32722 /  
Effective stiffness, kN/m — 32722

Коэффициент трения — 0,043 / Friction coefficient — 0.043

Радиус, мм — 4500 / Radius, mm — 4500

Высота, мм — 45 / Height, mm — 45

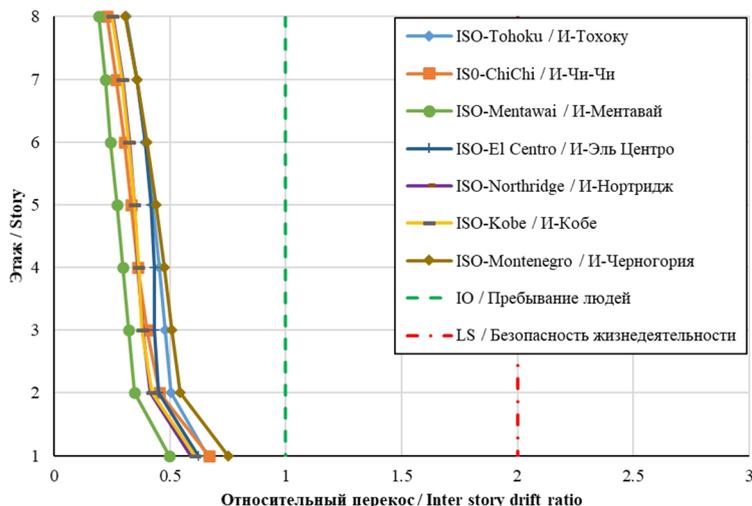
Максимальное перемещение, мм — 600 /  
Displacement capacity, mm — 600

Номинальная вертикальная нагрузка, кН — 2945 /  
Nominal vertical load, kN — 2945

Максимальная нагрузка на сооружение, кН — 2749 /  
Maximum axial load on structure — 2749 kN

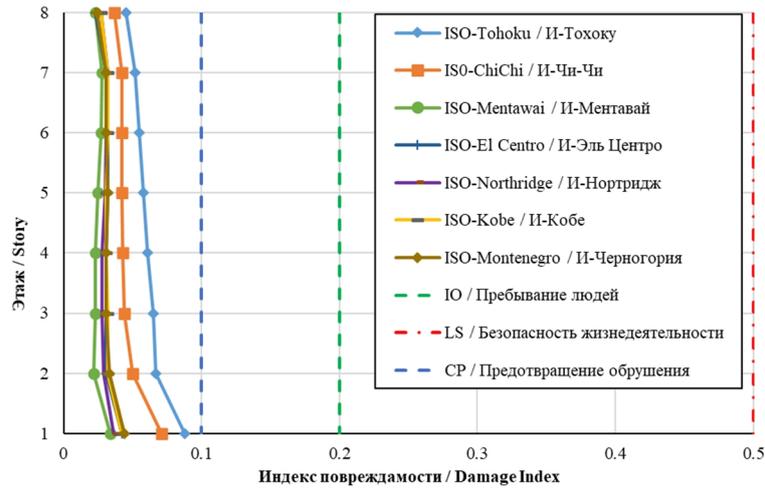
**Рис. 9.** Параметры фрикционно-маятниковой опоры  
Источник: Nippon Steel & Sumitomo Metal. 2017 [26]

**Figure 9.** Friction pendulum properties  
Source: Nippon Steel & Sumitomo Metal. 2017 [26]



**Рис. 10.** Относительные междуэтажные перекосы (изолированное основание) в направлении X  
Источник: выполнено авторами

**Figure 10.** Inter-storey drift ratio (isolated base) in X direction  
Source: made by the authors



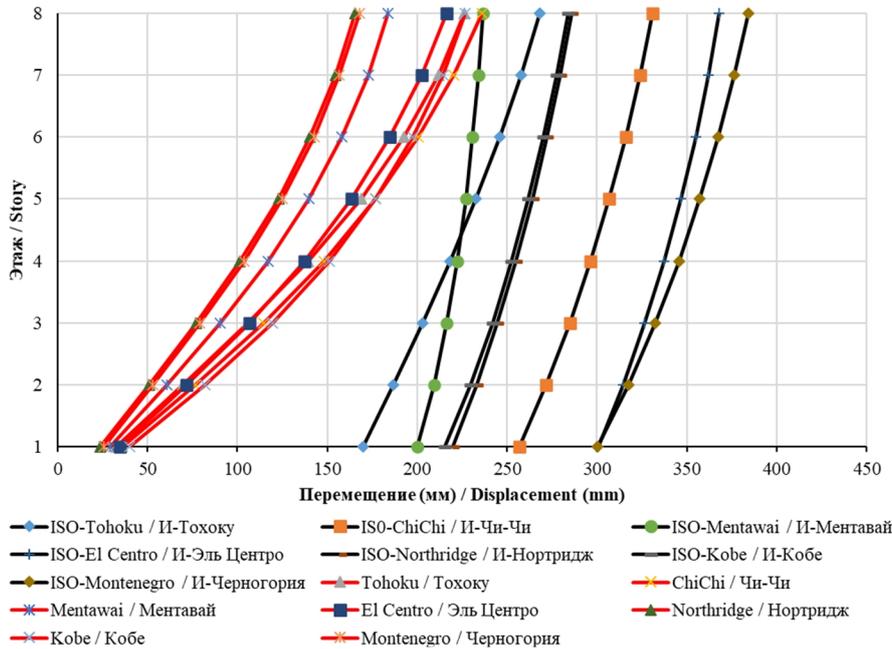
**Рис. 11.** Индекс повреждаемости этажей (изолированное основание)

Источник: выполнено авторами

**Figure 11.** Storey damage index (isolated base)

Source: made by the authors

На рис. 12 представлено сравнение максимальных перемещений для жесткого и изолированного основания. Наблюдается значительное уменьшение деформаций самого сооружения (в 1,9 раза для записи Нортридж и 7 раз для записи Чи-Чи).



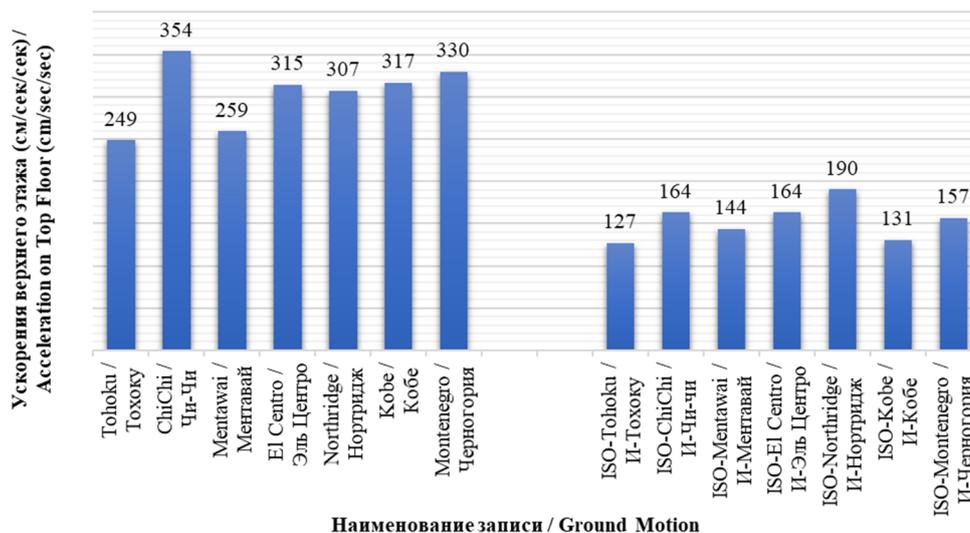
**Рис. 12.** Перемещения по этажам для жесткого и изолированного (ISO) оснований

Источник: выполнено авторами

**Figure 12.** Displacements for fixed and isolated (ISO) base structures

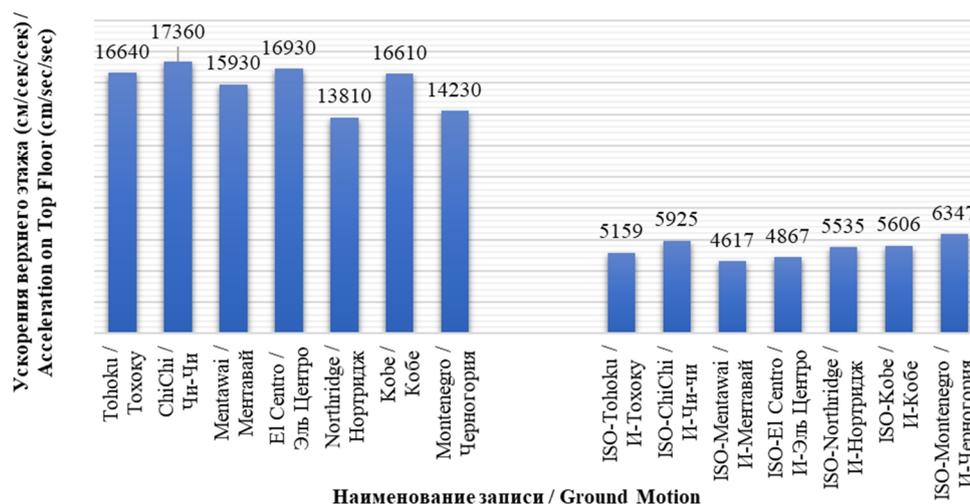
Source: made by the authors

На рис. 13, 14 представлены сравнения ускорений и сил в основании для жесткого и изолированного здания. Для изолированного здания значения ускорений уменьшены в среднем в 2 раза, а значения сил в основании здания — в 3 раза.



**Рис. 13.** Ускорения на верхнем этаже в направлении X  
Источник: выполнено авторами

**Figure 13.** Acceleration on Top Floor in X-direction  
Source: made by the authors

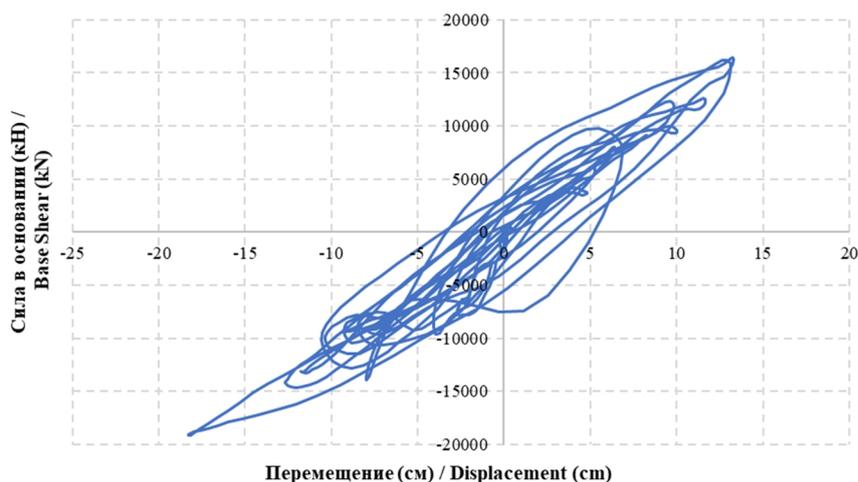


**Рис. 14.** Сила в основании здания в направлении X  
Источник: выполнено авторами

**Figure 14.** Base Shear in X direction  
Source: made by the authors

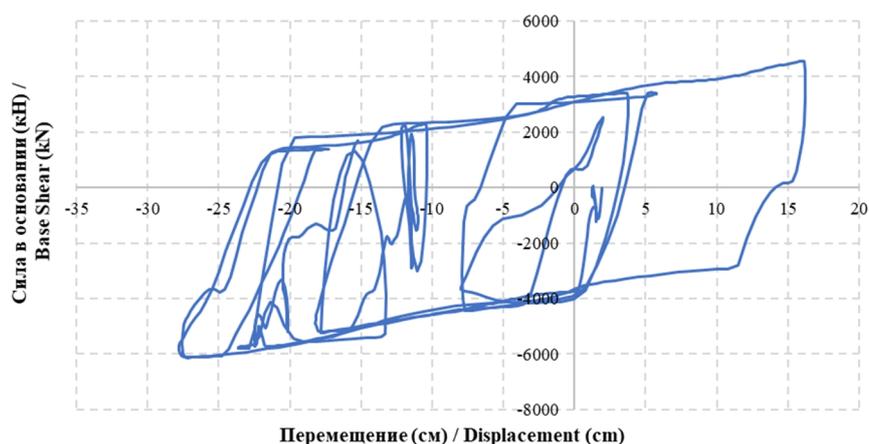
На рис. 15, 16 представлены кривые гистерезиса (сила в основании — перемещение верха здания) для записи Эль Центро, 1940. Изолированное здание характеризуется более высокой степенью рассеяния энергии (площадь петли гистерезиса) и существенным снижением силы в основании (16 430 кН для жесткого основания против 4563 кН — для изолированного).

В настоящей работе исследовалась сейсмостойкость 8-этажного жилого железобетонного здания рамно-связевой конструктивной схемы. Объект исследования рассчитывался на семь пар горизонтальных компонент акселерограмм, выбранных в соответствии с параметрами возможных землетрясений для рассматриваемой площадки строительства (г. Бандунг). Выбранные записи землетрясений изменялись с помощью процедуры спектрального соответствия (*spectral matching*) нормативному спектру ускорений. В качестве сейсмоизолирующих опор были использованы фрикционно-маятниковые опоры.



**Рис. 15.** Кривая гистерезиса для записи Эль Центро (жесткое основание)  
Источник: выполнено авторами

**Figure 15.** Hysteretic curve for El Centro (fixed base Y)  
Source: made by the authors



**Рис. 16.** Кривая гистерезиса для записи Эль Центро (изолированное основание)  
Источник: выполнено авторами

**Figure 16.** Hysteretic curve for El Centro (isolated base Y)  
Source: made by the authors

#### 4. Заключение

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

1. В целом анализ показал, что здание соответствует уровню непосредственного пребывания людей (IO).
2. Выводы, полученные в результате нелинейного динамического анализа во временной области (NLTHA), показывают, что поверхностные землетрясения (*shallow*) приводят к большим разрушениям по сравнению с мегаземлетрясениями (*megathrust*), причем в обоих сценариях обеспечивается уровень безопасности жизнедеятельности (LS).
3. Землетрясения, характеризующиеся длинными периодами, вызывают повышенные деформации и повреждения в изолированных конструкциях основания.
4. Применение сейсмоизоляции, в частности использование фрикционно-маятниковых опор, позволяет снизить сейсмические нагрузки, о чем свидетельствует уменьшение ускорений на верхнем уровне и

сдвигающих усилий в основании. Соответственно, снижается индекс повреждаемости конструкции, достигая состояния отсутствия повреждений, и повышается уровень эксплуатационных характеристик до уровня непосредственного пребывания людей (IO).

5. В целом использование изолированных конструкций демонстрирует значительную эффективность в повышении уровня эксплуатационных характеристик, особенно для зданий с повышенными требованиями к сейсмической безопасности (например, больницы и госпитали).

### Список литературы / References

1. Abaev Z., Valiev A., Kodzaev M. Development of recommendations for the implementation of seismic risk mitigation policy in the Russian Federation based on world experience. *Earthquake Engineering Construction Safety*. 2023;3:48–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-48-72>

Абаев З.К., Валиев А.Д., Кодзаев М.Ю. Разработка рекомендаций по реализации политики снижения сейсмического риска в Российской Федерации на основе мирового опыта // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2023. № 3. С. 48–72. <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-48-72>

2. Sulthan F., Gumilang S.A.A., Rusli M., Seki M. Seismic evaluation of existing building structure using United States (ASCE 41-17) and Japanese (JBDPA) standard: Case study office building in Indonesia. *E3S Web of Conferences*. 2023;429:05001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342905001>

3. Ozer E., Inel M., Cayci B.T. Seismic Performance Comparison of Fixed and Base-Isolated Models. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2023;47(2):1007–1023. <https://doi.org/10.12989/smm.2023.10.3.243>

4. Sulthan F., Seki M. Seismic fragility analysis of base isolation reinforced concrete structure building considering performance-a case study for Indonesia. *Structural Monitoring and Maintenance*. 2023;10(3):243–360. <https://doi.org/10.12989/smm.2023.10.3.243>

5. Belbachir A., Benanane A., Ouazir A., Harrat Z.R, Hadzima-Nyarko M., Radu D., et al. Enhancing the Seismic Response of Residential RC Buildings with an Innovative Base Isolation Technique. *Sustainability*. 2023;15(15):11624. <https://doi.org/10.3390/su151511624>

6. Ghasemi M., Talaeitaba S.B. On the effect of seismic base isolation on seismic design requirements of RC structures. *Structures*. 2020;28:2244–2259. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.063>

7. Lou X., Huang Y., Lv Y., Huang Q. Seismic performance of the series seismic isolation systems designed by the procedures of GB50011-2010 and ASCE/SEI 7-16. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;17:e01184. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01184>

8. Giuseppe B., Guidi L.G., Camarda G., Sorrentino P., De Luca A. Hybrid strategy for the seismic retrofitting of existing buildings through Base Isolation System. *Procedia Structural Integrity*. 2023;44:1292–1299. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.166>

9. Pant D.R., Wijeyewickrema AC. Structural performance of a base-isolated reinforced concrete building subjected to seismic pounding. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2012;41(12):1709–1716. <https://doi.org/10.1002/eqe.2158>

10. Sattar S. Evaluating the consistency between prescriptive and performance-based seismic design approaches for reinforced concrete moment frame buildings. *Engineering Structures*. 2018;174(4):919–931. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.080>

11. Avinash A.R, Krishnamoorthy A, Kamath K, Chaithra M. Sliding Isolation Systems: Historical Review, Modeling Techniques, and the Contemporary Trends. *Buildings*. 2022 Nov 16;12(11):1997. <https://doi.org/10.3390/buildings12111997>

12. Abaev Z.K., Kodzaev M.Yu., Bigulaev A.A. Earthquake resistance analysis of structural systems of multi-storey civil buildings. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(1):76–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-1-76-82>

Абаев З.К., Кодзаев М.Ю., Бигулаев А.А. Анализ сейсмостойкости конструктивных систем многоэтажных гражданских зданий // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 1. С. 76–82. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-1-76-82>

13. Partono W., Irsyam M., Nazir R., Asrurifak M., Sari U.C. Site Coefficient and Design Spectral Acceleration Evaluation of New Indonesian 2019 Website Response Spectra. *International Journal of Technology*. 2022;13(1):115–124. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i1.4132>

14. Earthquake Disaster Engineering Research Laboratory. Software STERA 3D. Available from: <https://rc.ace.tut.ac.jp/saito/software-e.html> (accessed: 11.19.2023).

15. Takeda T., Sozen M.A., Nielsen N.N. Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes. *Journal of the Structural Division*. 1970;96(12):2557–2573. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002765>

16. Li C., Kunnath S.K., Zhao Y. A new framework for ground motion selection for structural seismic assessment. *Engineering Structures*. 2023;285:116055. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116055>

17. Dereje A.J., Kim J. An enhanced ground motion selection algorithm for seismic safety assessment of structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023;165:107709. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107709>

18. Jin C., Hu J. A new ground-motion simulation procedure based on feature extraction matching multiple intensity measures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023;168:107856. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107856>
19. Manfredi V., Masi A., Özcebe A.G., Paolucci R., Smerzini C. Selection and spectral matching of recorded ground motions for seismic fragility analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2022;20(10):4961–4987. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01393-0>
20. Colombo A., Negro P. A damage index of generalised applicability. *Engineering Structures*. 2005. Jul;27(8):1164–1174. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.02.014>
21. Wang Y., Liu Z., Guo J., Zhong D. Research on Damage Mechanism and Performance-Based Design Process of Reinforced Concrete Column Members. *Applied Sciences*. 2023;13(3):1452. <https://doi.org/10.3390/app13031452>
22. Park Y., Ang A.H.-S. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete. *Journal of Structural Engineering*. 1985;111(4):722–739. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(722\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(722))
23. Komeili M., Milani A.S., Tesfamariam S. Performance-based earthquake engineering design of reinforced concrete structures using black-box optimisation. *International Journal of Materials and Structural Integrity*. 2012;6(1):1. <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2012.046184>
24. Zhang L., Guo M., Li Z., Zhu L., Meng Y. Optimal design and seismic performance of base-isolated storage tanks using friction pendulum inerter systems. *Structures*. 2022;43:234–248. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.06.044>
25. Shang J., Tan P., Zhang Y., Han J., Qin J. Experimental and analytical investigation of variable friction pendulum isolator. *Engineering Structures*. 2021;243:112575. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112575>
26. Nishimoto K., Wakita N., Nakamura H. Development of Spherical Sliding Bearing. *Technical report. Nippon Steel & Sumitomo Metal*. 2017.