

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1704-1712

Исследование влияния этажности железобетонных каркасов на деградацию собственных частот и характер разрушения при землетрясении

Олег Вартанович Мкртычев, Роман Александрович Зайцев

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования — изучение влияния деградации частотных параметров железобетонных зданий при действии сейсмической нагрузки и оценка характера разрушения в зависимости от этажности здания с помощью численных экспериментов в программном комплексе LS-DYNA. Для получения собственных частот и форм в определенные моменты времени в задаче, решаемой явной схемой интегрирования, ищется решение с использованием неявной схемы.

Материалы и методы. Рассмотрены пять сооружений разной этажности. В расчетных схемах зданий используется непосредственное армирование несущих элементов. Для моделирования бетона применяется модель материала Continuous Surface Cap Model (CSCM). Данный материал позволяет учитывать накопление повреждений. Моделирование арматуры осуществляется с помощью идеально упругопластической модели Прандтля. Арматура моделировалась стержнями и была непосредственно погружена в бетон. Для этого использовалась лагранжево-эйлерова связь. Расчет производился на жестком основании с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейностей. Сейсмическое воздействие задавалось в виде двухкомпонентных акселерограммы, нормированных на 8 баллов по шкале MSK-64.

Результаты. Получены кривые изменения и деградации собственных частот для каркасов разной этажности, а также кривые накопления повреждения для всего каркаса.

Выводы. Анализ полученных результатов показывает, что при землетрясении интенсивностью 8 баллов имеет место существенное (до 30 %) снижение частот собственных колебаний рассмотренных каркасов. Наибольшее количество повреждений возникает на стадии активной фазы сейсмического воздействия. С увеличением этажности интенсивность деградации собственных частот растет, скорость накопления и объем повреждений возрастают.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деградация свойств, накопление повреждений, снижение собственных частот, характер разрушения, железобетон, сейсмическое воздействие, прямой динамический метод, железобетонный каркас, сейсмостойкость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мкртычев О.В., Зайцев Р.А. Исследование влияния этажности железобетонных каркасов на деградацию собственных частот и характер разрушения при землетрясении // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1704–1712. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1704-1712

Автор, ответственный за переписку: Роман Александрович Зайцев, yanamid123@gmail.com.

Studies of the influence of the number of storeys of reinforced concrete frames on the degradation of natural frequencies and character of earthquake damage

Oleg V. Mkrtychev, Roman A. Zaitsev

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The objectives of this work are to study the influence of degradation of the frequency parameters of reinforced concrete buildings under the action of seismic loading and to evaluate the nature of destruction depending on the number of storeys of the building itself, using numerical experiments in the LS-DYNA software package. To obtain natural frequencies and forms at certain times in a problem solved by an explicit integration scheme, solutions are sought using an implicit scheme.

Materials and methods. Five structures of different storeys are considered. The design schemes of the buildings use direct reinforcement of load-bearing elements. The Continuous Surface Cap Model (CSCM) is used to model the concrete. This material allows the accumulation of damage to be taken into account. The ideal elastic-plastic Prandtl model is used to model reinforcement. The reinforcement was modelled with rods and was directly immersed in concrete. To implement this, the Euler-Lagrange equation was used. The calculation was carried out on a rigid base, taking into account physical, geometric and structural non-linearities. The seismic impact was specified in the form of 2-component accelerograms normalized to 8 points on the MSK-64 scale.

Results. Various results of the study were obtained. Curves of change and degradation of natural frequencies for frames of different number of storeys are obtained. Damage accumulation curves for the entire framework were also obtained.

Conclusions. The analysis of the obtained results shows that during an earthquake with an intensity of 8 points, there is a significant (up to 30 %) reduction of frequencies of natural oscillations of the considered frames. The greatest amount of damage occurs at the stage of active phase of seismic impact. With the increase in the number of storeys, the intensity of degradation of natural frequencies increases, the rate of accumulation and the amount of damage increase.

KEYWORDS: degradation of properties, accumulation of damages, reduction of natural frequencies, nature of destruction, reinforced concrete, seismic impact, direct dynamic method, reinforced concrete frame, seismic resistance

FOR CITATION: Mkrtychev O.V., Zaitsev R.A. Studies of the influence of the number of storeys of reinforced concrete frames on the degradation of natural frequencies and character of earthquake damage. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1704-1712. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1704-1712 (rus.).

Corresponding author: Roman A. Zaitsev, yanamid123@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

С середины XX в. в нашей стране началось строительство высотных домов, в связи с этим появилось большое количество исследований, посвященных изучению вибрационных процессов в зданиях. В последнее время активно развиваются различные динамические методы обследования зданий и сооружений, которые определяют собственные частоты, помогающие оценить состояние здания или конструкции, обнаружить дефекты в несущих конструкциях [1]. Эти методы построены на натурных экспериментальных исследованиях, в том числе с применением конечных элементов (КЭ) программных комплексов (ПК) [2].

Основным инструментом этих исследований служит модальный анализ. В результате расчетов должны быть получены собственные формы и частоты, обобщенные массы и декременты собственных тонов колебаний, которые являются исходными данными при решении широкого круга задач динамики механических систем.

Цель настоящей статьи — изучение влияния деградации частотных параметров железобетонных зданий при действии сейсмической нагрузки и оценка характера разрушения в зависимости от этажности здания с помощью численных экспериментов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В процессе проведения данного исследования использовался конечно-элементный ПК LS-DYNA, в котором реализованы нелинейные динамические методы.

Для решения нелинейных динамических задач целесообразно применять методы, основанные на явной схеме интегрирования уравнений движения системы. Явные методы используют рекуррентные соотношения, выражающие перемещения,

скорости и ускорения на данном шаге через их значения на предыдущих шагах. В ПК LS-DYNA используется один из явных методов интегрирования, а именно метод центральных разностей. В этом случае применяется выражение с запаздыванием по времени [3]:

$$M\ddot{u}_i + C\dot{u}_i + Ku_i = f_i^a. \quad (1)$$

В LS-DYNA¹ разработана методика расчета на сейсмические воздействия явными методами с периодическим вычислением собственных значений неявными методами в определенные моменты времени. Такой подход дает возможность оценить техническое состояние зданий и деградацию частотных параметров в процессе землетрясения.

В расчетной схеме зданий используется непосредственное армирование несущих элементов. В LS-DYNA реализована функция¹, которая позволяет учитывать непосредственное армирование бетона арматурой с помощью объемных (для бетона) и стержневых (для арматуры) КЭ [4].

Для моделирования бетона используется модель Continuous Surface Cap Model (CSCM)², применяемая для объемных КЭ. Модель бетона представляет собой сар-модель, т.е. с гладким непрерывным сопряжением между поверхностью разрушения и упрочняющим «колпачком». Общая форма поверхности текучести в пространстве главных напряжений показана на рис. 1. Данная модель материала верифицирована во многих исследованиях [4–8] и использовалась в работах [9–16].

¹ Livermore Software Technology Corporation (LSTC), LS-DYNA. Keyword user's manual, R11. 2018. Vol. I.

² Evaluation of LS-DYNA Concrete. Material Model 159. US Department of Transportation. Federal Highway Administration. McLean. Publication No. FHWA-HRT-05-063. 2007. 190 p.

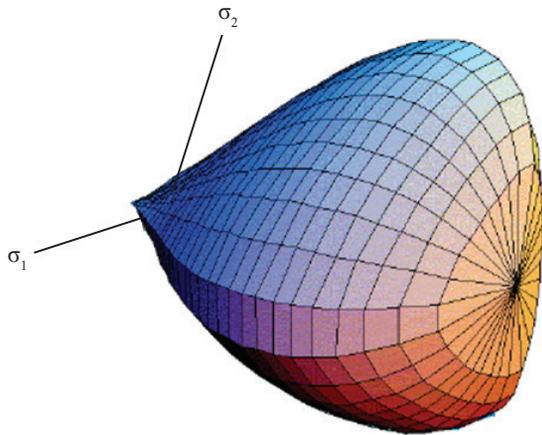


Рис 1. Общая форма поверхности текучести модели бетона в пространстве главных напряжений

Fig. 1. General shape of the flow surface of the concrete model in the main stress space

Предложена формула для функции повреждения³:

$$\sigma_{ij}^d = (1-d)\sigma_{ij}^{vp}, \quad (2)$$

где d — скалярный параметр повреждения, который преобразует тензор напряжения без повреждения, обозначенный σ^{vp} , в тензор напряжения с повреждением, обозначенный σ^d . Параметр урона d варьируется от нуля (без повреждений) до 1 (полное повреждение).

Для моделирования арматуры применяется идеально упругопластическая модель Прандтля с начальным модулем упругости $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, предел текучести принят равным $\sigma_T = 245$ МПа, предельные пластические деформации $\epsilon_{pl} = 0,1$.

Объектами исследования являются однопролетные здания разной этажности (от одного до пяти этажей) рамной конструктивной схемы. На рис. 2 приведена расчетная схема типового этажа

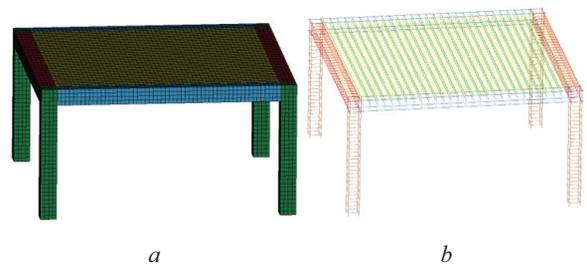


Рис. 2. Расчетная схема типового этажа: a — бетон; b — арматура

Fig. 2. Design scheme of a typical storey: a — concrete; b — reinforcement

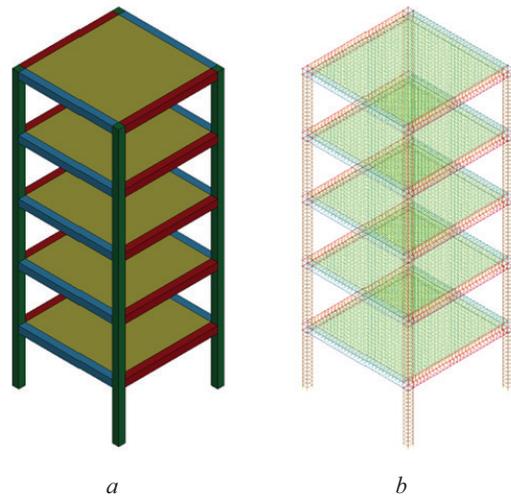


Рис. 3. Расчетная схема пятиэтажного здания: a — бетон; b — арматура

Fig. 3. Design scheme of a five-storey building: a — concrete; b — reinforcement

жа, на рис. 3 — схема пятиэтажного здания. Габаритные размеры типового этажа в плане составляют $6 \times 6 \times 3,3$ (h) м. Перекрытия — балочные монолитные железобетонные. Толщина плит 20 см, ригели и колонны сечением 40×40 см.

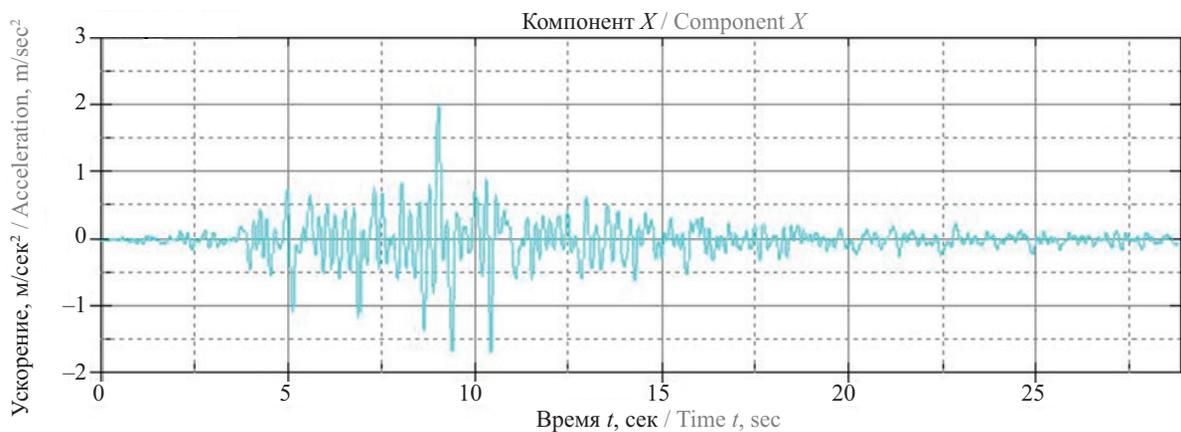


Рис. 4. Акселерограммы (компоненты X и Y), нормированные на 8 баллов

Fig. 4. Accelerograms (components X and Y), normalized by 8 points

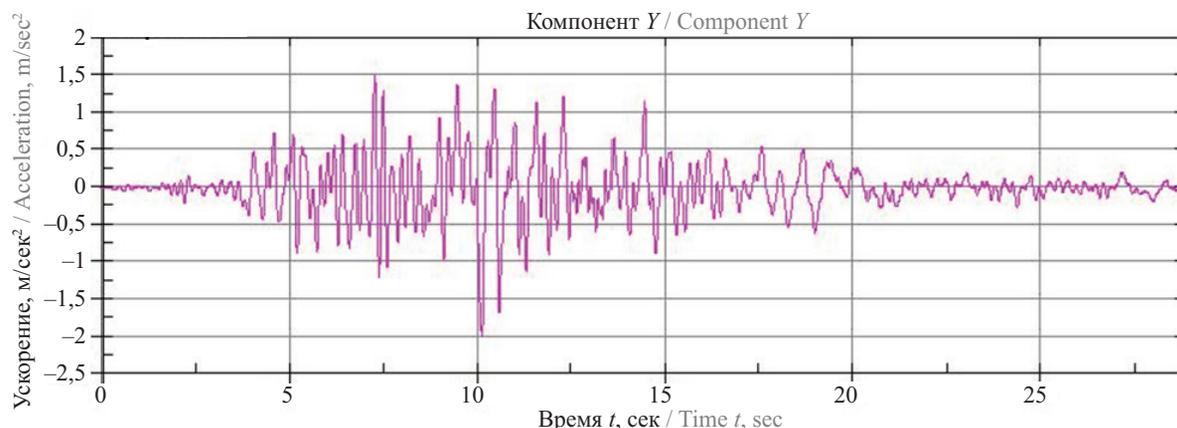


Рис. 4. Акселерограммы (компоненты X и Y), нормированные на 8 баллов (окончание)

Fig. 4. Accelerograms (components X and Y), normalized by 8 points (ending)

Продольная арматура ригелей и колонн $d = 28$ мм, поперечная арматура в колоннах и ригелях $d = 10$ мм. Продольная арматура плиты $d = 10$ мм, поперечная арматура плиты $d = 10$ мм.

Бетон соответствует классу⁴ В45 с пределом прочности на сжатие $f_{cm} = 43$ МПа [17].

Расчет выполнялся на жестком основании с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейностей. Сейсмическое воздействие задавалось в виде двухкомпонентных акселерограмм, нормированных на 8 баллов по шкале MSK-64 [18–20]. Акселерограмма представлена на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 5–8 показаны результаты расчета в ПК LS-DYNA. На рис. 7 представлен график первой ча-

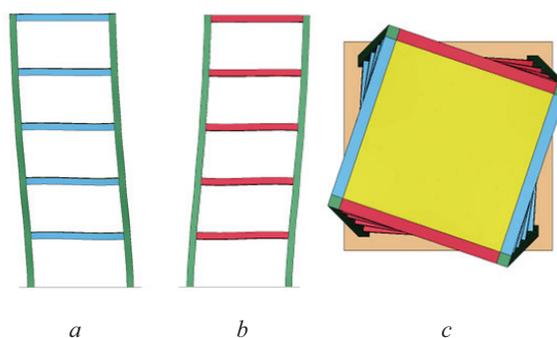


Рис. 5. Формы собственных колебаний пятиэтажного здания: a — 1-я; b — 2-я; c — 3-я (соответствующие частоты: 1,28; 1,62; 2,13 Гц)

Fig. 5. Forms of natural oscillations of a five-storey building: a — 1; b — 2; c — 3 (corresponding frequencies: 1.28; 1.62; 2.13 Hz)

⁴ СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

сты каждого здания форм собственных колебаний в заданные моменты времени, которые определя-

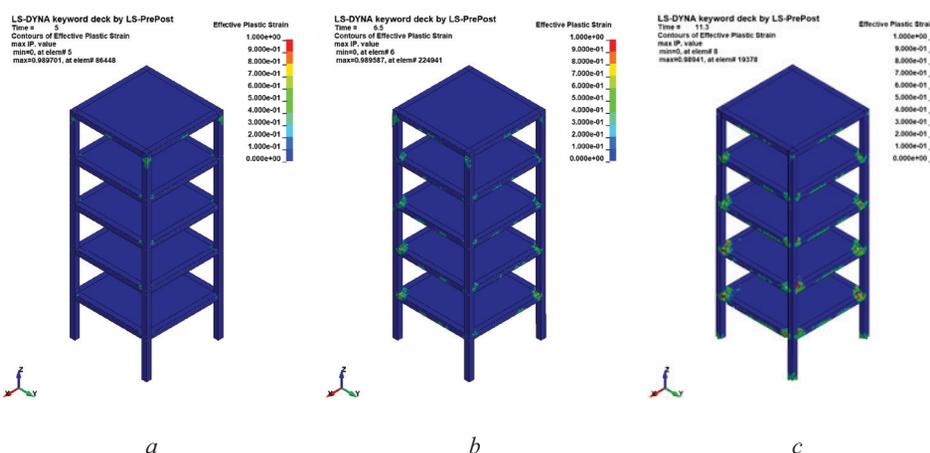


Рис. 6. Накопление повреждений в разные моменты времени (a — 5 с; b — 6,5 с; c — 11,3 с) для пятиэтажного здания (1 на шкале соответствует полному исчерпанию несущей способности элемента)

Fig. 6. Damage accumulation at different points in time (a — 5 s; b — 6.5 s; c — 11.3 s) for a five-storey building (1 on the scale corresponds to complete exhaustion of the bearing capacity of the element)

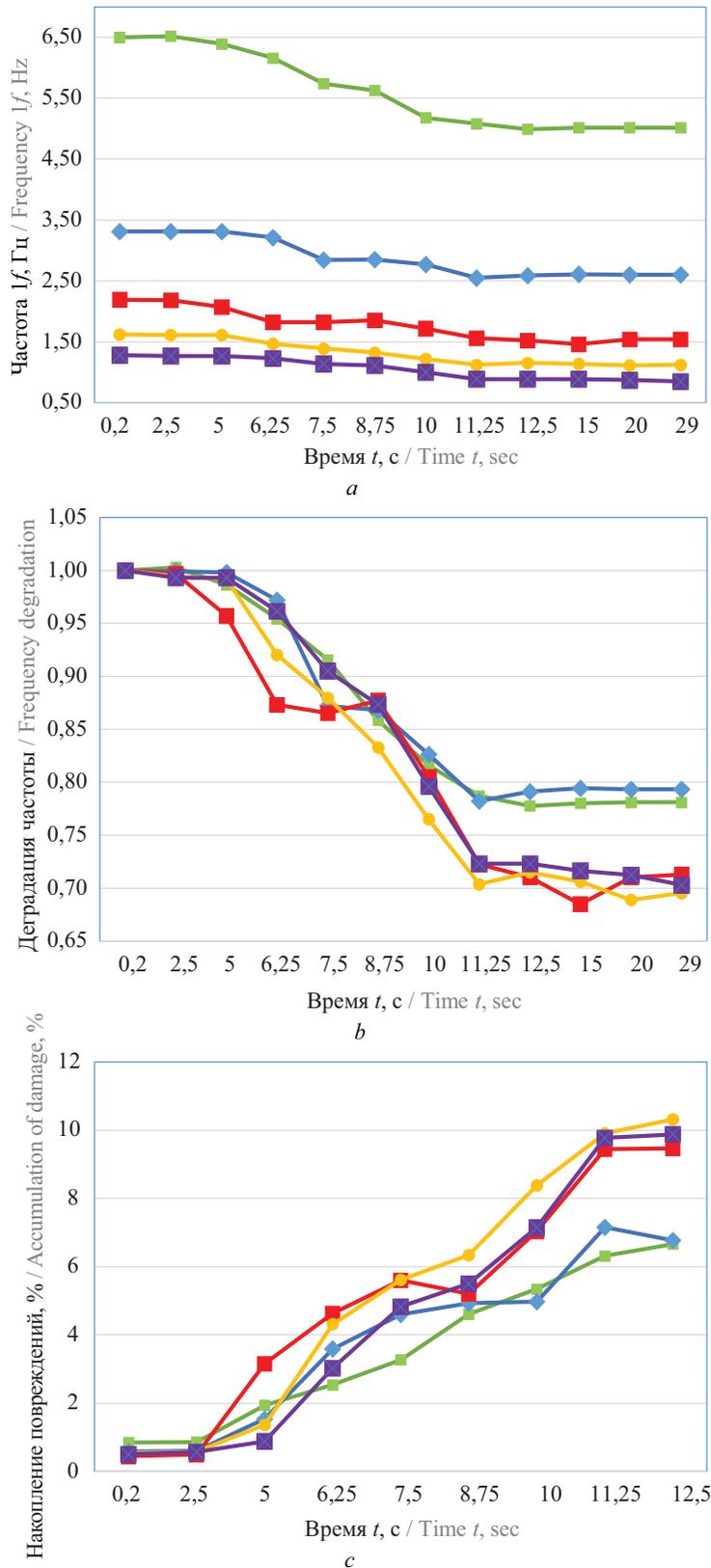


Рис. 7. Графики изменения первой частоты собственных колебаний (а), деградации первой частоты собственных колебаний (b) и накопления повреждений конструкции (с), %, в процессе 8-бального землетрясения в зависимости от этажности: — одноэтажное здание; — двухэтажное здание; — трехэтажное здание; — четырехэтажное здание; — пятиэтажное здание

Fig. 7. Graphs change of the first frequency of natural oscillations (a), degradation of the first frequency of natural oscillations (b) and accumulation of structural damage (c), %, in the process of an 8-magnitude earthquake, depending on the number of storeys: — one story building; — two storey building; — three-storey building; — four-storey building; — five-storey building

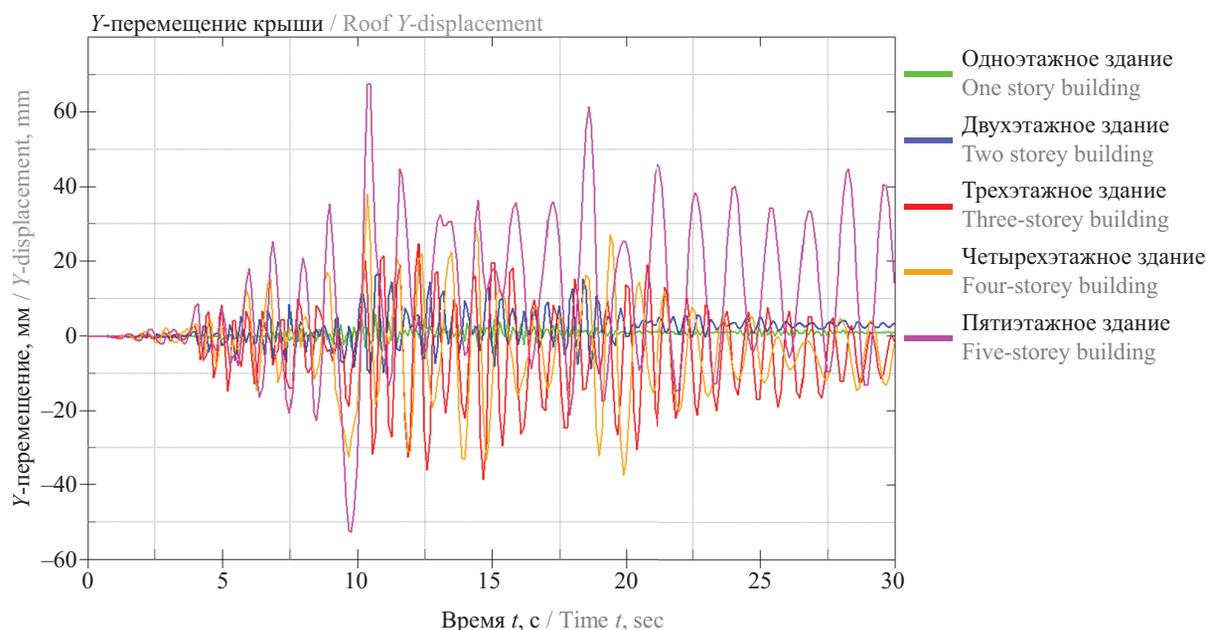


Рис. 8. График перемещения верха каждого здания по Y в процессе 8-балльного землетрясения

Fig. 8. Graph of Y displacement of the roof of each building during the 8-magnitude earthquake

лись в процессе и после землетрясения; приведена деградация первой собственной частоты для каждого исследуемого здания.

Анализ результатов показывает, что при землетрясении интенсивностью 8 баллов имеет место существенное (до 30 %) снижение частот собственных колебаний (рис. 7). Также значительное влияние на деградацию собственных частот оказывает количество этажей. Происходит разрушение бетона в основании колонн и в узлах сопряжения колонн с ригелями (рис. 6). В основании колонн наблюдается рост накопления повреждений и отказ продольной арматуры. На рис. 7 показан график роста количества отказавших элементов в процентах во времени. На рис. 8 представлены графики перемещения верха зданий.

Анализ результатов показывает, что при интенсивном землетрясении в несущих элементах здания возникают существенные повреждения, которые могут быть оценены с помощью проведения численных или натуральных исследований. С увеличением этажности интенсивность деградации собственных частот растет, скорость накопления и объем повреждений возрастают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При землетрясении интенсивностью 8 баллов наблюдается существенное (до 30 %) снижение частот собственных колебаний (деградация динамических параметров), что обуславливается значительными повреждениями несущих элементов.

Снижение первых трех частот собственных колебаний происходит равномерно.

Наибольшее количество повреждений возникает на стадии активной фазы сейсмического воздействия.

Для рассмотренных конструктивных систем число отказавших КЭ составляет 10,3 %.

С увеличением этажности отмечается увеличение горизонтальных перемещений в процессе землетрясения.

Разработанная в представленной работе методика позволяет исследовать влияние локальных повреждений несущих конструкций на динамические характеристики в процессе землетрясения с учетом непосредственного армирования бетона арматурными стержнями и может быть использована при проведении научных исследований, расчетов и проектировании несущих железобетонных элементов зданий и сооружений в нелинейной динамической постановке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tosti F., Ferrante C. Using ground penetrating radar methods to investigate reinforced concrete structures // *Surveys in Geophysics*. 2020. Vol. 41. Issue 3. Pp. 485–530. DOI: 10.1007/s10712-019-09565-5

2. Esfandiari A., Rahai A., Sanayei M., Bakhtiari-Nejad F. Model updating of a concrete beam with extensive distributed damage using experimental frequency response function // *Journal of Bridge Engineering*.

2016. Vol. 21. Issue 4. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000855

3. *Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Busalova M.S.* Calculation of a multi-storey monolithic concrete building on the earthquake in nonlinear dynamic formulation // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 111. Pp. 545–549. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.039

4. *Andreev M.I., Bulushev S.V., Dudareva M.* Verification of the eccentrically compressed reinforced concrete column calculation model based on the results of a full-scale experimental study // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. P. 04013. DOI: 10.1051/mateconf/201825104013

5. *Mkrtychev O.V., Busalova M.S., Dorozhinskiy V.B.* Verification of the spar model of a reinforced concrete beam // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 117. P. 00124. DOI: 10.1051/mateconf/201711700124

6. *Syed Z.I., Hejah E.S., Mohamed O.A.* Modeling of dapped-end beams under dynamic loading // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2017. Pp. 242–247. DOI: 10.18178/ijmerr.6.3.242-247

7. *Lee J., Zi G., Lee I., Jeong Y., Kim K., Kim W.* Numerical simulation on concrete median barrier for reducing concrete fragment under harsh impact loading of a 25-ton truck // *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2017. Vol. 139. Issue 2. DOI: 10.1115/1.4035766

8. *Novozhilov Y.V., Dmitriev A.N., Mikhaluk D.S.* Precise calibration of the continuous surface cap model for concrete simulation // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 5. P. 636. DOI: 10.3390/buildings12050636

9. *Герцик С.М., Новожилов Ю.В., Михалюк Д.С.* Численное моделирование динамики и прочности железобетонной плиты под воздействием воздушной ударной волны // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2020. Т. 13. № 3. С. 298–310. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.3.24. EDN OPARMR.

10. *Chen H.* An Introduction to *CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID // *FEA Information Engineering Journal*. 2017. No. Q1(6). Pp. 14–18.

11. *Jiang H., Zhao J.* Calibration of the continuous surface cap model for concrete // *Finite Elements in Analysis and Design*. 2015. Vol. 97. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.finel.2014.12.002

12. *Sharath R., Arumugam D., Dhanasekaran B., Subash T.R.* Numerical modeling of concrete response to high strain rate loadings // 11th European LS-DYNA Conference. 2017.

13. *Pachocki L., Wilde K.* Numerical simulation of the influence of the selected factors on the performance of a concrete road barrier H2/W5/B // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 231. P. 01014. DOI: 10.1051/mateconf/201823101014

14. *Bulushev S.V., Dudareva M.S.* Nonlinear models of reinforced concrete beam elements with the actual reinforcement // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. Issue 3. P. 032040. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032040

15. *Xu S., Wu P., Liu Z., Wu C.* Calibration of CSCM model for numerical modeling of UHPCFTWST columns against monotonic lateral loading // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 240. P. 112396. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112396

16. *Yin X., Li Q., Xu X., Chen B., Guo K., Xu S.* Investigation of continuous surface cap model (CSCM) for numerical simulation of strain-hardening fibre-reinforced cementitious composites against low-velocity impacts // *Composite Structures*. 2023. Vol. 304. P. 116424. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116424

17. *Mkrtychev O.V., Sidorov D.S., Bulushev S.V.* Comparative analysis of results from experimental and numerical studies on concrete strength // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 117. P. 00123. DOI: 10.1051/mateconf/201711700123

18. *Дурновцева С.А.* Метод синтеза сейсмических колебаний, соответствующих заданному семейству спектров ответа // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2013. № 2. С. 112–120.

19. *Будушев С.В.* Сравнение результатов расчета сооружений на заданные акселерограммы нелинейным статическим и нелинейным динамическим методами // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2018. Т. 14. № 5. С. 369–378. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-369-378. EDN YQJUZN.

20. *Рауаби А., Урожаев А.В.* Исследование нестационарных динамических процессов при помощи вейвлет-анализа // *Строительство: Наука и образование*. 2012. № 4. С. 2.

Поступила в редакцию 21 апреля 2023 г.

Принята в доработанном виде 30 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 15 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Олег Вартанович Мкртычев** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов, директор НИЦ «Надежность и сейсмостойкость сооружений»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 386561, Scopus: 56449249100, ResearcherID: Q-2370-2017, ORCID: 0000-0002-2828-3693; mkrtychev@yandex.ru;

Роман Александрович Зайцев — аспирант, инженер НИЦ «Надежность и сейсмостойкость сооружений»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3163-9522; yanamid123@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tosti F., Ferrante C. Using ground penetrating radar methods to investigate reinforced concrete structures. *Surveys in Geophysics*. 2020; 41(3):485-530. DOI: 10.1007/s10712-019-09565-5
2. Esfandiari A., Rahai A., Sanayei M., Bakhtiari-Nejad F. Model updating of a concrete beam with extensive distributed damage using experimental frequency response function. *Journal of Bridge Engineering*. 2016; 21(4). DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000855
3. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Busalova M.S. Calculation of a multi-storey monolithic concrete building on the earthquake in nonlinear dynamic formulation. *Procedia Engineering*. 2015 ; 111:545549. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.039
4. Andreev M.I., Bulushev S.V., Dudareva M. Verification of the eccentrically compressed reinforced concrete column calculation model based on the results of a full-scale experimental study. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:04013. DOI: 10.1051/mateconf/201825104013
5. Mkrtychev O.V., Busalova M.S., Dorozhinskiy V.B. Verification of the spar model of a reinforced concrete beam. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00124. DOI: 10.1051/mateconf/201711700124
6. Syed Z.I., Hejah E.S., Mohamed O.A. Modelling of dapped-end beams under dynamic loading. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2017; 242-247. DOI: 10.18178/ijmerr.6.3.242-247
7. Lee J., Zi G., Lee I., Jeong Y., Kim K., Kim W. Numerical simulation on concrete median barrier for reducing concrete fragment under harsh impact loading of a 25-ton truck. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2017; 139(2). DOI: 10.1115/1.4035766
8. Novozhilov Y.V., Dmitriev A.N., Mikhaluk D.S. Precise calibration of the continuous surface cap model for concrete simulation. *Buildings*. 2022; 12(5):636. DOI: 10.3390/buildings12050636
9. Gertsik S.M., Novozhilov Yu.V., Mikhaluk D.S. Numerical simulation of the dynamics of a reinforced concrete slab under an air shock wave. *Computational Continuum Mechanics*. 2020; 13(3):298-310. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.3.24. EDN OPARMR. (rus.).
10. Chen H. An introduction to *CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID. *FEA Information Engineering Journal*. 2017; Q1(6):14-18.
11. Jiang H., Zhao J. Calibration of the continuous surface cap model for concrete. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2015; 97:1-19. DOI: 10.1016/j.finel.2014.12.002
12. Sharath R., Arumugam D., Dhanasekaran B., Subash T.R. Numerical modeling of concrete response to high strain rate loadings. *11th European LS-DYNA Conference*. 2017.
13. Pachocki L., Wilde K. Numerical simulation of the influence of the selected factors on the performance of a concrete road barrier H2/W5/B. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 231:01014. DOI: 10.1051/mateconf/201823101014
14. Bulushev S.V., Dudareva M.S. Nonlinear models of reinforced concrete beam elements with the actual reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753(3):032040. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032040
15. Xu S., Wu P., Liu Z., Wu C. Calibration of CSCM model for numerical modeling of UHPCFTWST columns against monotonic lateral loading. *Engineering Structures*. 2021; 240:112396. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112396
16. Yin X., Li Q., Xu X., Chen B., Guo K., Xu S. Investigation of continuous surface cap model (CSCM) for numerical simulation of strain-hardening fibre-reinforced cementitious composites against low-velocity impacts. *Composite Structures*. 2023; 304:116424. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116424
17. Mkrtychev O.V., Sidorov D.S., Bulushev S.V. Comparative analysis of results from experimental and numerical studies on concrete strength. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00123. DOI: 10.1051/mateconf/201711700123
18. Durnovceva S.A. The synthesis method of seismic vibrations corresponding to a given family of response spectra. *Bulletin of St. Petersburg University. Applied Mathematics. Computer science. Management processes*. 2013; 2:112-120. (rus.).
19. Bulushev S.V. Comparison of the calculation results of structures for specified accelerograms by nonlinear static and nonlinear dynamic methods. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018; 14(5):369-378. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-369-378. EDN YQJUZN. (rus.).
20. Rouabhi A., Urozhaev A.V. Research of non-stationary dynamic processes using wavelet analysis. *Construction: Science and Education*. 2012; 4:2. (rus.).

Received April 21, 2023.

Adopted in revised form on May 30, 2023.

Approved for publication on July 15, 2023.

BIODOTES: **Oleg V. Mkrtychev** — Doctor of Technical sciences, Professor, Head of the Department of Strength of Materials, Director of the Research Center “Reliability and Seismic Resistance of Structures”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 386561, Scopus: 56449249100, ResearcherID: Q-2370-2017, ORCID: 0000-0002-2828-3693; mkrtychev@yandex.ru;

Roman A. Zaitsev — postgraduate student, engineer of the Research Center “Reliability and Seismic Resistance of Structures”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3163-9522; yanamid123@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.