



УДК 699.841

DOI: 10.22227/2949-1622.2024.1.57-67

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Обеспечение сейсмостойкости железобетонных зданий

О.В. Мкртычев^{1*}, А.А. Решетов¹

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация*

*elm97@mail.ru

Ключевые слова: сейсмическое воздействие, моделирование акселерограмм, накопление повреждений, сейсмостойкость сооружений, нелинейно-деформируемое основание, PML-слой, SSI-интерфейс, явные методы интегрирования уравнений движения, высокопроизводительные вычисления, нелинейная динамика

История статьи

Поступила в редакцию: 10.01.2024

Доработана: 30.01.2024

Принята к публикации: 01.02.2024

Для цитирования

Мкртычев О.В., Решетов А.А. Обеспечение сейсмостойкости железобетонных зданий // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 5. № 1. С. 57–67.

Аннотация. В большинстве современных исследований, как правило, не учитывается случайный характер сейсмического воздействия, которое является ярко выраженным нестационарным случайным процессом. Адекватная оценка сейсмостойкости зданий и сооружений возможна только на основе методик, позволяющих учесть большую изменчивость параметров сейсмического воздействия. В статье представлена вероятностная методика расчета многоэтажных железобетонных зданий, проектируемых в сейсмически районах с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейности, а также взаимодействия сооружения с нелинейно-деформируемым основанием. Разработанная методика позволяет обеспечить требуемый уровень сейсмостойкости для проектируемых зданий на основе критерия необрушения. В качестве примера рассматривается расчет многоэтажного железобетонного здания. Внешнее сейсмическое воздействие рассматривается в виде нестационарного случайного процесса, который получен посредством умножения стационарного случайного процесса на детерминированную огибающую функцию. Для моделирования нелинейной работы железобетонных конструкций используется модель бетона с функцией накопления повреждений при циклических нагрузках, а также учитывающая деградацию прочности и жесткости материала при интенсивном землетрясении. Расчет проводился с использованием явных методов интегрирования уравнений движения на вычислительном кластере с применением технологии параллельных вычислений. Представленная методика позволяет исследовать характер разрушения железобетонных конструкций при интенсивных землетрясениях и выявлять зоны с дефицитом несущей способности. Предлагаемый вероятностный подход к моделированию сейсмического воздействия как реализации нестационарного случайного процесса с заданными параметрами совместно с учетом нелинейного деформирования железобетонных конструкций здания и основания позволяет управлять уровнем надежности и проектировать здания с заданной обеспеченностью сейсмостойкости.

Мкртычев Олег Вартанович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сопrotивление материалов», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 9676-4986, Scopus: 56449249100, ResearcherID: Q-2370-2017, ORCID: 0000-0002-2828-3693, e-mail: mkrtychev@yandex.ru.

Решетов Андрей Александрович, кандидат технических наук, научный сотрудник НИЦ НИСС НИУ МГСУ, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 57197187290, ORCID: 0000-0002-8267-2665, e-mail: andrew331@bk.ru.

© Мкртычев О.В., Решетов А.А., 2024



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

Ensuring Seismic Resistance of Reinforced Concrete Buildings

Oleg V. Mkrtychev^{1*}, Andrey A. Reshetov¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

*elm97@mail.ru

Keywords: seismic impact, accelerogram modeling, damage accumulation, seismic resistance of structures, nonlinear deformable foundation, PML layer, SSI interface, explicit methods for integrating equations of motion, high-performance computing, nonlinear dynamics

Article history

Received: 10.01.2024

Revised: 30.01.2024

Accepted: 01.02.2024

For citation

Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. Ensuring Seismic Resistance of Reinforced Concrete Buildings. *Reinforced concrete structures*. 2024; 1(5):57-67.

Abstract. There are a large number of works on a comprehensive assessment of the seismic resistance of buildings and structures. However, these studies, as a rule, do not take into account the random nature of the seismic impact, which is a pronounced non-stationary random process. An adequate assessment of the seismic resistance of buildings and structures is possible only on the basis of methods that allow taking into account the large variability of seismic impact parameters. The article presents a probabilistic method for calculating multi-storey reinforced concrete buildings designed in seismic regions, taking into account the interaction of a building with a non-linearly deformable foundation. The developed technique makes it possible to provide the required level of seismic resistance for the designed buildings based on the non-collapse criterion. As an example, the calculation of a multi-storey reinforced concrete building is considered. External seismic action is represented as a non-stationary random process. The external seismic action is considered as a non-stationary random process, which is obtained by multiplying the stationary random process by a deterministic envelope function. The parameters necessary for constructing the envelope and the stationary random process were obtained from the results of processing the available database of intense earthquakes. The stationary random process was generated by the shaping filter method. The impact parameters are based on the results of processing the available database of intense earthquakes. When modeling reinforced concrete structures, a concrete model is used with the function of damage accumulation under cyclic loads, as well as taking into account the degradation of the strength and stiffness of the material during an intense earthquake. Accounting for the interaction of the building with the soil base is implemented using the SSI interface (Soil Structure Interaction). To prevent the influence of waves reflected from the boundaries of a limited ground massif, a PML layer (Perfectly Matched Layer) is used. The calculation was carried out using explicit methods for integrating the equations of motion on a computing cluster using parallel computing technology. The presented technique makes it possible to investigate the nature of the destruction of reinforced concrete structures during intense earthquakes and to identify zones with a deficiency in bearing capacity. The proposed probabilistic approach to modeling seismic impact as an implementation of a non-stationary random process with given parameters, together with taking into account the nonlinear deformation of the reinforced concrete structures of the building and foundation, allows you to control the level of reliability and design buildings with a given seismic resistance.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при расчете зданий, проектируемых в сейсмических районах, имеет место тенденция постоянного повышения уровня детализации моделей при учете физической, геометрической и конструктивной нелинейностей. Например, при выполнении численных расчетов многоэтажных железобетонных конструкций используются объемные конечные элементы для бетона и непосредственное армирование в виде стержневых элементов.

Mkrtychev Oleg Vartanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Strength of Materials, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9676-4986, Scopus: 56449249100, ResearcherID: Q-2370-2017, ORCID: 0000-0002-2828-3693, e-mail: mkrtychev@yandex.ru.

Reshetov Andrey Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, researcher at the Research Center NISS National Research University MGSU, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 57197187290, ORCID: 0000-0002-8267-2665, e-mail: andrew331@bk.ru.

При этом в большинстве случаев игнорируется тот факт, что сейсмическое воздействие является ярко выраженным случайным процессом. Получение адекватных результатов возможно только с учетом большой изменчивости параметров сейсмического воздействия. При этом параметры используемых расчетных акселерограмм должны быть получены на основе обработки имеющихся инструментальных записей акселерограмм землетрясений. При расчетах на сейсмическое воздействие приходится учитывать взаимодействие сооружения с нелинейно деформируемым основанием. Также необходимо использовать современные модели материалов, позволяющие учесть нелинейный характер деформирования при циклических нагрузках. Решение задачи проектирования сейсмостойких железобетонных зданий с учетом всех указанных выше аспектов требует разработки соответствующих комплексных методик расчета на землетрясение.

Расчет многоэтажных железобетонных зданий на интенсивные сейсмические воздействия по критерию необрушения наиболее эффективно производить с использованием явных методов прямого интегрирования уравнений движения. При решении должны в полной мере использоваться возможности методов параллельных/распределенных вычислений [1–4].

Целью данной работы является разработка комплексной вероятностной (в части моделирования расчетного сейсмического воздействия) методики оценки сейсмостойкости, позволяющей проектировать железобетонные здания и сооружения с заданным уровнем надежности. Изложение разработанной методики производится на примере расчета многоэтажного железобетонного здания. В условиях постоянного увеличения сложности архитектурных и инженерных решений и в условиях, когда сейсмическая активность становится все более значимой угрозой для многих регионов, необходимость в более точном и адекватном моделировании поведения зданий и сооружений под воздействием сейсмических нагрузок становится все более важной задачей.

Предложенная в данном исследовании методика представляет собой комплексный подход, который учитывает нелинейную деформацию основания, детальное моделирование бетона и арматуры, накопление повреждений при циклических нагрузках, использование синтезированных акселерограмм землетрясений с частотно-временными характеристиками, полученными на основе обработки множества инструментальных акселерограмм, что обычно игнорируется или упрощается в стандартных подходах.

МЕТОД

Рассмотрим пятиэтажное железобетонное здание, расположенное на нелинейно-деформируемом грунтовом основании (рис. 1).

Несущие элементы здания (колонны, ригели и плиты перекрытия) заданы объемными конечными элементами, а арматура — стержневыми конечными элементами.

Основные характеристики конструкции: размер здания в плане $26,0 \times 13,2$ м, высота этажа 3,3 м. Толщина фундаментной плиты — 30 см, сечение балок — 40×40 см, сечение колонн — 40×40 см, толщина плиты покрытия — 20 см. Бетон класса В25 задавался при помощи нелинейной модели бетона Continuous Surface Cap Model (CSCM) [5–9].

Для рассматриваемого здания учитывалось фактическое армирование (рис. 2). Продольная арматура класса А400, поперечная — А240, диаграмма работы материала арматуры принята идеально упругопластической (диаграмма Прандтля) с ограничением пластических деформаций. Объемные элементы бетона связывались со стержневыми элементами арматуры с помощью методики Лагранжево-Эйлерового взаимодействия.

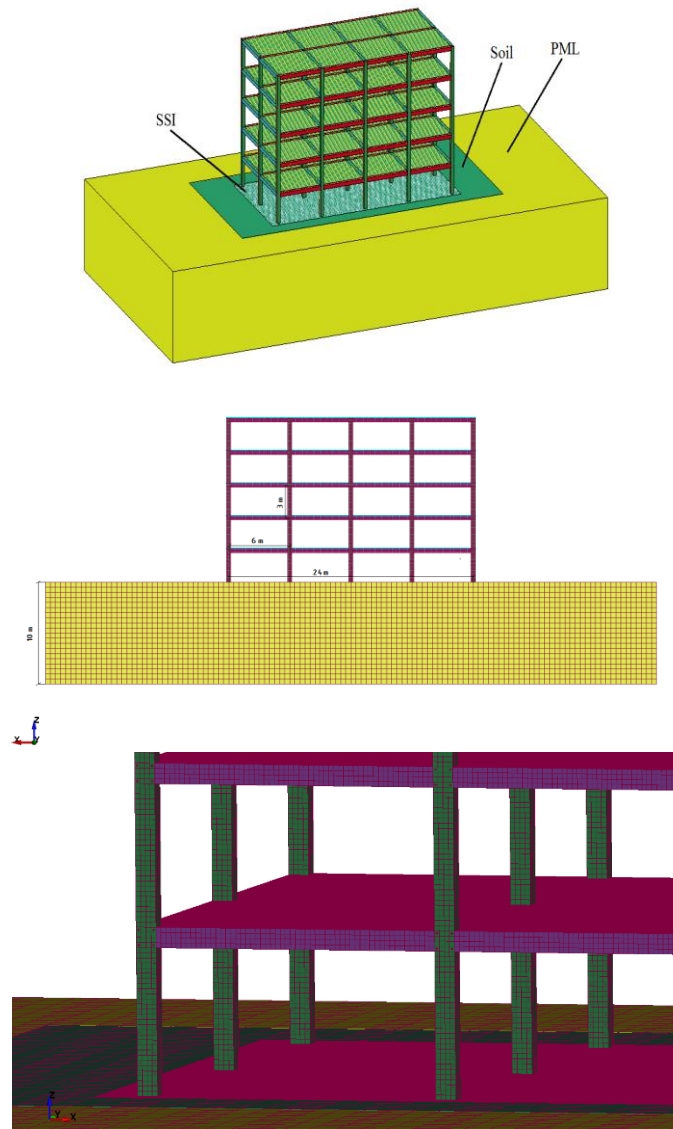


Рис. 1. Расчетная схема
Figure 1. Calculation scheme

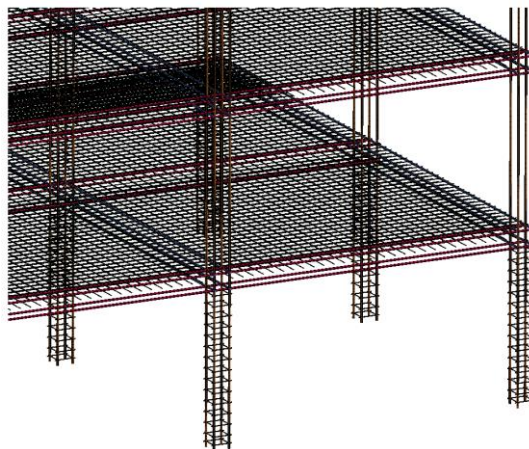


Рис. 2. Арматурный каркас
Figure 2. Reinforcement frame

Основные характеристики грунта принимались в соответствии с моделью Мора-Кулона со следующими параметрами: плотность $\rho = 2,710 \text{ г/см}^3$, модуль деформации $E = 12 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$, удельное сцепление $c_0 = 0,039 \text{ МПа}$, угол внутреннего трения $\varphi = 24^\circ$.

В исследовании использовалась методика SSI. Для моделирования неотражающих границ грунтового основания применялся PML-слой [8].

Моделирование расчетной акселерограммы

Расчетное сейсмическое воздействие задавалось в виде трехкомпонентной синтезированной акселерограммы, все компоненты которой нормировались на максимальное ускорение 4 м/с^2 .

Акселерограмма рассматривалась в виде нестационарного случайного процесса, для которого было получено семейство реализаций [10–13]. Каждая компонента акселерограммы представляется в виде произведения огибающей $A(t)$ на реализацию стационарного случайного процесса $y(t)$, полученную с помощью метода формирующего фильтра:

$$a(t) = A(t) \cdot y(t). \quad (1)$$

На рис. 3 показаны 3 компоненты полученной по предлагаемой методике исходной расчетной акселерограммы землетрясения.

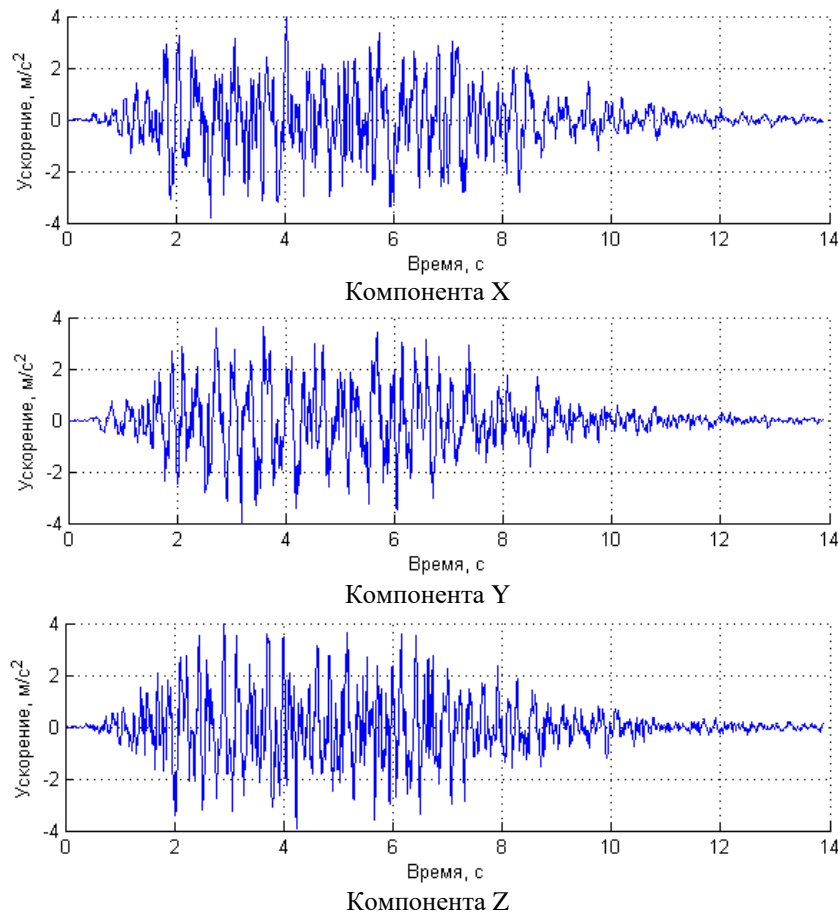


Рис. 3. Расчетная акселерограмма
Figure 3. Computational accelerogram

Моделирование совместной работы сооружения с основанием Soil Structure Interaction (SSI)

Рассмотрим работу сооружения с основанием с использованием метода, основанного на SSI-интерфейсе (рис. 4).

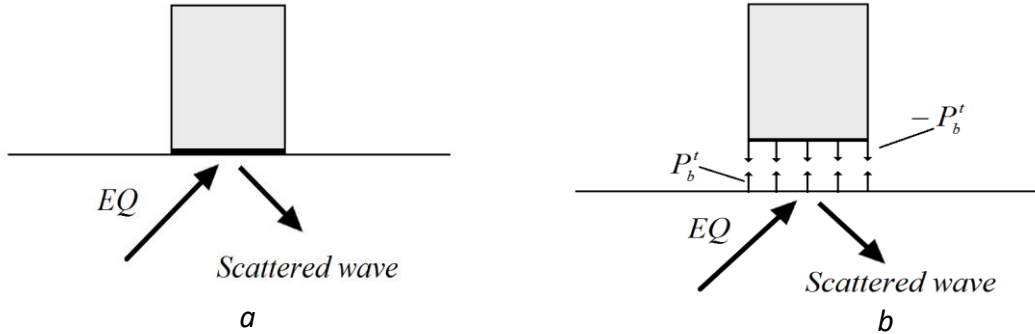


Рис. 4. Взаимодействие грунта с основанием
Figure 4. Soil-base interaction

Общее уравнение метода можно записать следующим образом [12]:

$$\begin{bmatrix} m_{ss} & m_{sb} & 0 \\ m_{bs} & m_{bb} + m_{ff} & m_{fe} \\ 0 & m_{ef} & m_{ee} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{u}_s^t \\ \ddot{u}_b^t \\ \ddot{u}_e^t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{ss} & k_{sb} & 0 \\ k_{bs} & k_{bb} + k_{ff} & k_{fe} \\ 0 & k_{ef} & k_{ee} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_s^t \\ u_b^t \\ u_e^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ m_{ff} \\ m_{ef} \end{bmatrix} \ddot{u}_f^0 + \begin{bmatrix} 0 \\ k_{ff} \\ k_{ef} \end{bmatrix} u_f^0, \quad (2)$$

где:

$\{u_s^t, u_b^t, u_f^t, u_e^t\}$ образует поле абсолютных перемещений для системы основания с сооружением.

Из уравнения (18) видим, что неизвестными являются поле абсолютных перемещений для сооружения u_s^t, u_b^t и добавочное поле перемещений для грунта u_e^t .

Таким образом в данном методе сейсмическое воздействие задается в виде акселерограммы и соответствующей ей сейсмограммы, полученных для свободной поверхности земли.

Для учета начальной деформации основания под собственным весом перед основным динамическим расчетом проводится статический расчет.

Идеально поглощающий слой Perfectly Matched Layer (PML)

В общем случае для корректного учета взаимодействия сооружения с основанием следует рассматривать достаточно большой массив грунтового основания. С целью сокращения размеров грунтового массива можно использовать неотражающие границы или поглощающий

волны слой. Применение метода SSI позволяет организовать неотражающие границы или поглощающий слой (PML) на боковых и нижних поверхностях рассматриваемого ограниченного грунтового массива (рис. 5, *b*) [12].

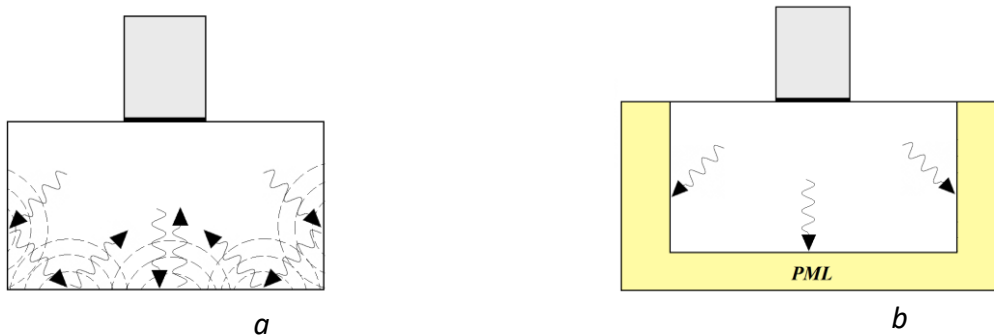


Рис. 5. Схема модели:
a — без PML-слоя; *b* — с PML-слоем
Figure 5. Model diagram:
a — without PML layer; *b* — with PML layer

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6–8 показаны изополя эффективных пластических деформаций. На рис. 9, 10 изображена деформированная схема с повреждениями сооружения в различные моменты времени.

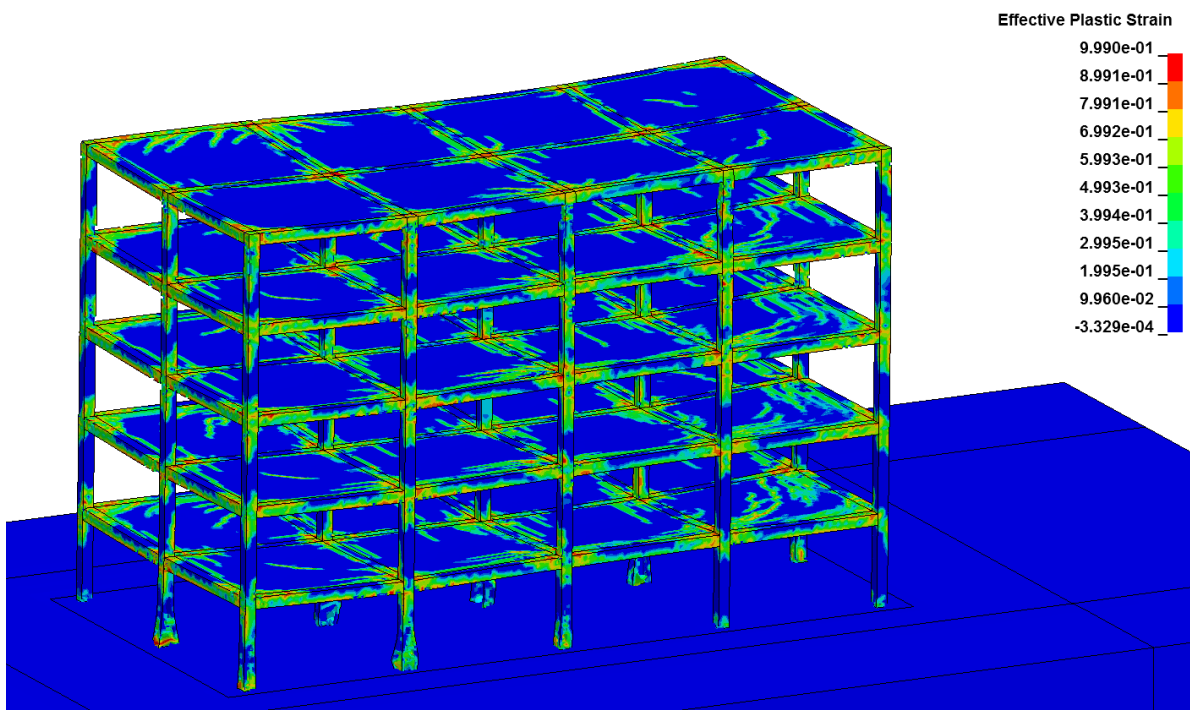


Рис. 6. Изополя эффективных пластических деформаций в момент времени $t = 4$ с
Figure 6. Isofields of effective plastic strain at time $t = 4$ s

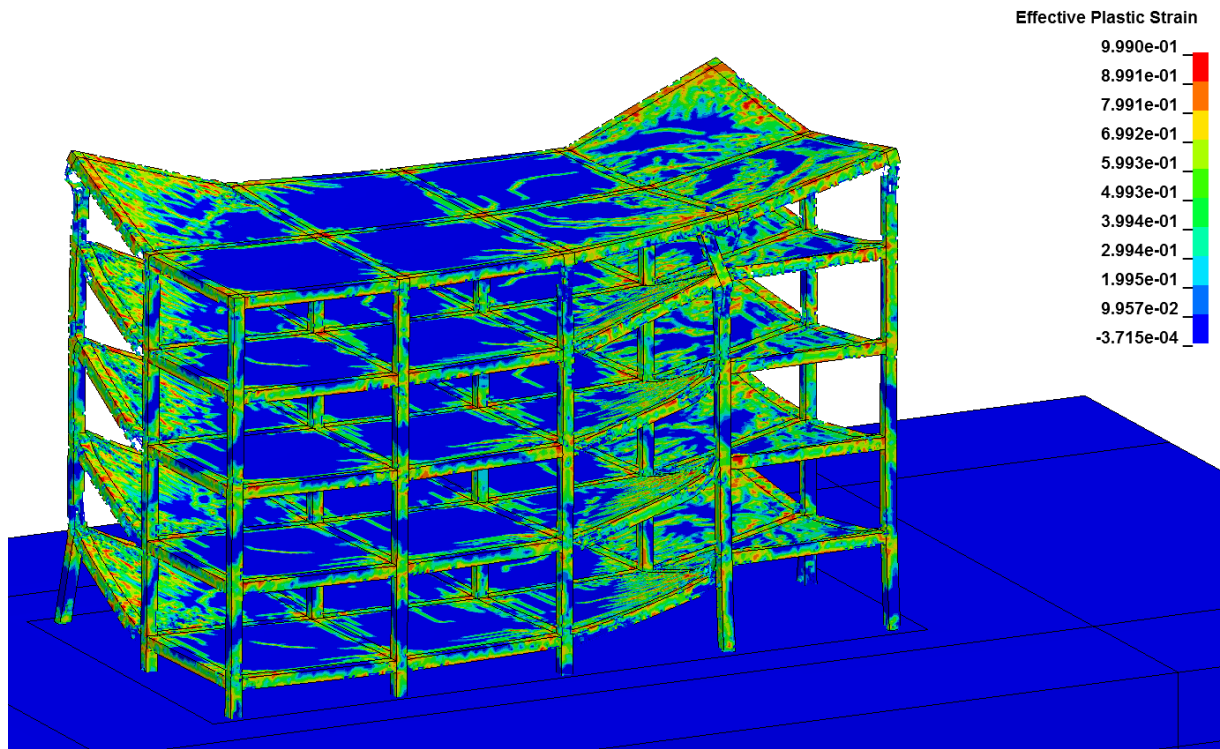


Рис. 7. Изополю эффективных пластических деформаций в момент времени $t = 4,7$ с
Figure 7. Deformed scheme with damage to the structure at time $t = 4.7$ s

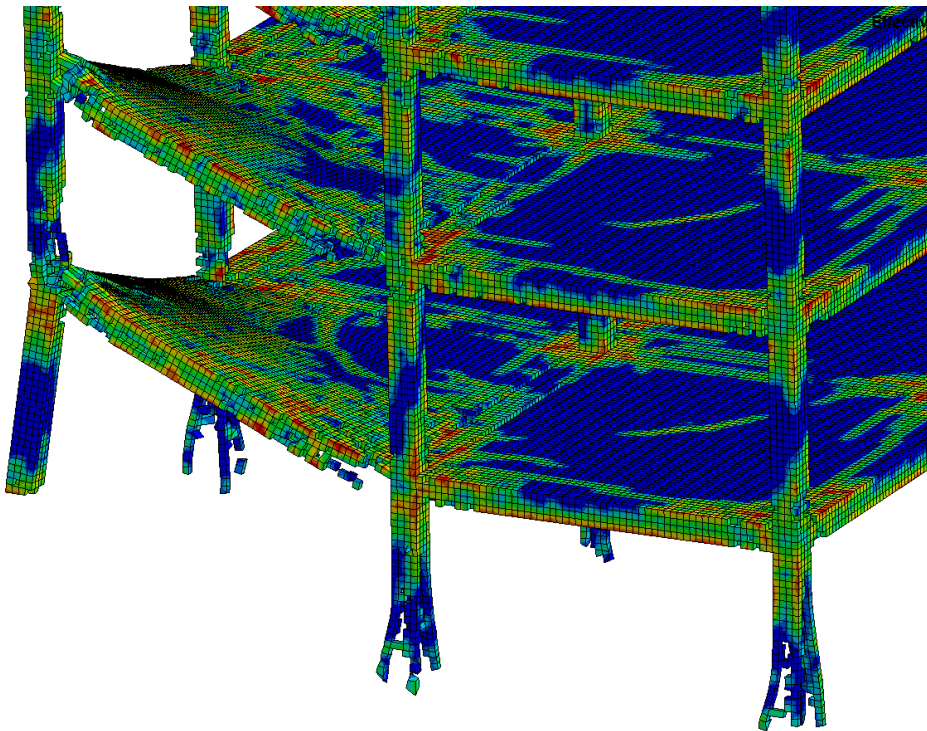


Рис. 8. Характер разрушений (увеличенный фрагмент)
Figure 8. Deformed scheme with damage to the structure (enlarged fragment)

На рис. 9 показаны напряжения Фон Мизеса для арматурного каркаса. Также виден характер разрушения арматурного каркаса.

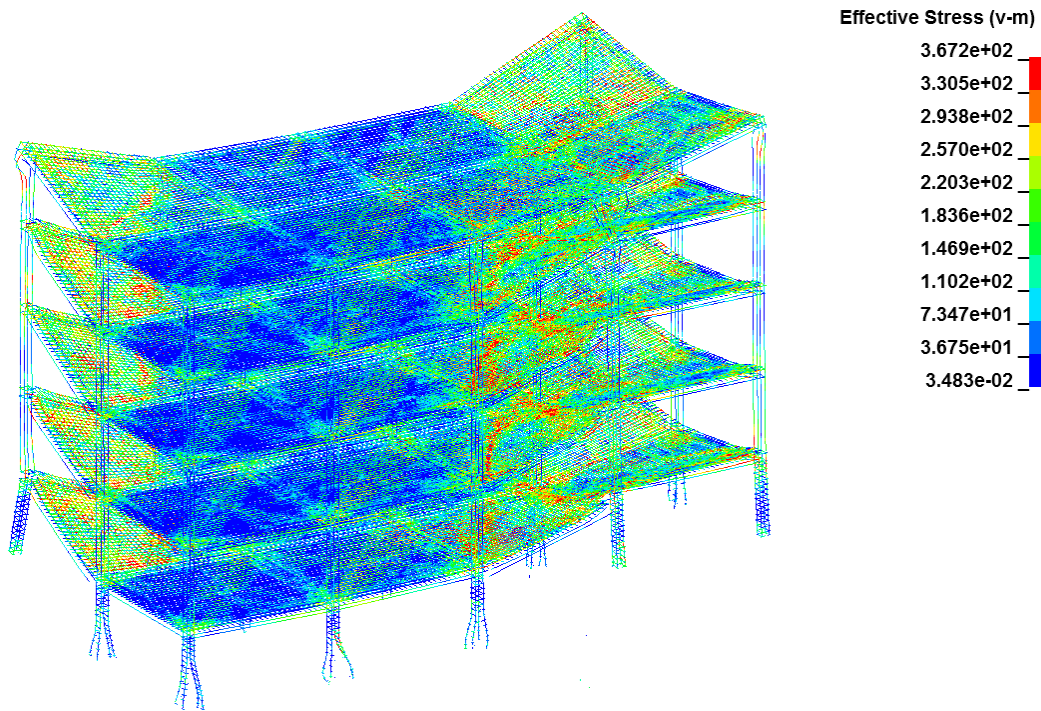


Рис. 9. Изополя напряжений Фон Мизеса
Figure 9. Von Mises stress field for the reinforcement framework

На рис. 10 показаны изополя эффективных пластических деформаций в грунтовом основании.

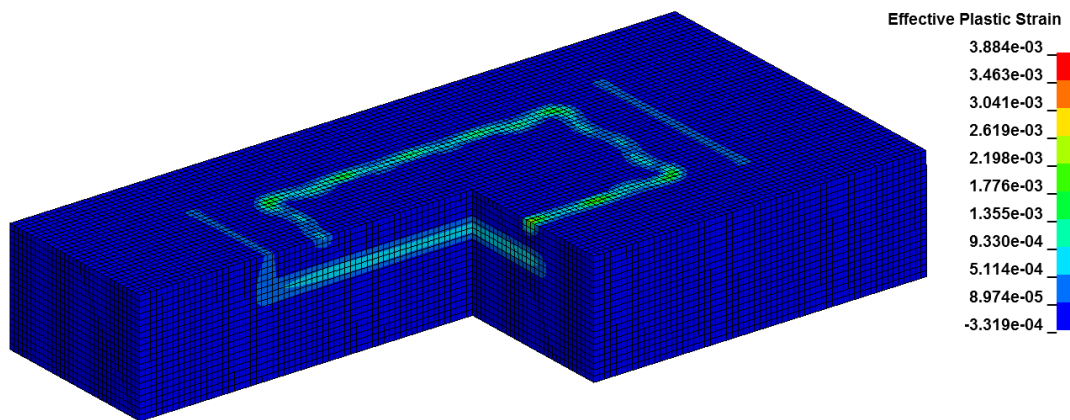


Рис. 10. Изополя эффективных пластических деформаций основания в момент времени $t = 4$ с
Figure 10. Isofields of effective plastic soil deformations at time $t = 4$ s

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана комплексная вероятностная методика оценки сейсмостойкости, позволяющая проектировать железобетонные здания с заданным уровнем надежности при использовании критерия необрушения. Предложенная методика рассматривается на примере расчета многоэтажного железобетонного здания.

Анализ результатов показывает, что моделирование и получение достоверных результатов за приемлемое время при расчете многоэлементных железобетонных зданий возможно при использовании высокопроизводительных систем и распределенных вычислений. При этом ско-

рость расчета существенно зависит от способа декомпозиции задачи и реализации программного кода расчетного комплекса, который должен поддерживать эффективное распараллеливание.

Результаты исследования показали, что для многоэтажного железобетонного здания имеет место трансформация сейсмического воздействия, заданного на свободной поверхности, что также может быть учтено с помощью предлагаемого подхода к расчету железобетонных зданий на интенсивные сейсмические воздействия.

Предлагаемый подход к моделированию сейсмического воздействия может быть использован для генерирования наиболее неблагоприятного воздействия для рассматриваемой динамической системы «сооружение – основание».

Таким образом, представленный подход к проектированию железобетонных зданий и сооружений в сейсмических районах позволяет учесть случайность сейсмического воздействия, существенно нелинейный характер деформирования конструкций, корректное взаимодействие сооружения с основанием при землетрясении, что позволяет обеспечить требуемый уровень сейсмостойкости и надежности проектируемых железобетонных зданий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2023-0004 «Система территориальной сейсмической защиты критически важных объектов инфраструктуры на основе гранулированных метаматериалов, обладающих свойствами широкодиапазонных фононных кристаллов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wolf J.P. Dynamic Soil-Structure Interaction // Englewood Cliffs. NJ : Prentice-Hall, 1985. 481 p.
2. Basu U. Explicit finite element perfectly matched layer for transient three-dimensional elastic waves // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2009. No. 77 (2). Pp. 151–176.
3. Tamrazyan A.G. Reduce the Impact of Dynamic Strength of Concrete Under Fire Conditions on Bearing Capacity of Reinforced Concrete Columns // Applied Mechanics and Materials Collection of papers from 2nd ICSMIM, November 16–17, 2013, Guangzhou, China ed. Yun-Hae Kim and Prasad Yarlagadda. Vol. 1. Pp 475–476.
4. Cun H., Haixiao L. Implicit and explicit integration schemes in the anisotropic bounding surface plasticity model for cyclic behaviours of saturated clay // Computers and Geotechnics. 2014. Vol. 55. Pp. 27–41.
5. Krysl P., Bittnar Z. Parallel explicit finite element solid dynamics with domain decomposition and message passing: dual partitioning scalability // Computers & Structures. 2001. Vol. 79. Issue 3. Pp. 345–360.
6. Paris J., Colominas I., Navarrina F., Casteleiro M. Parallel computing in topology optimization of structures with stress constraints // Computers & Structures. 2013. Vol. 125. Pp. 62–73.
7. Jin H., Jespersen D., Mehrotra P., Biswas R., Huang L., Chapman B. High performance computing using MPI and OpenMP on multi-core parallel systems // Parallel Computing. 2011. Vol. 37. Issue 9. Pp. 562–575.
8. Basu U., Chopra A.K. Perfectly matched layers for transient elastodynamics of unbounded domains // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2004. No. 59 (8). Pp. 1039–1074.
9. Murray Y.D. User's Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159. McLean. Report No. FHWA-HRT-05-062. Federal Highway Administration, 2007. 77 p.
10. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. Modeling Worst-case Earthquake Accelerograms for Buildings and Structures // Advances in Engineering Research. 2016. Vol. 72. Pp. 89–94.
11. Мкртычев О.В., Решетов А.А. Синтезирование наиболее неблагоприятных акселерограмм для линейной системы с конечным числом степеней свободы // International Journal of Computer and Communication System Engineering. 2015. Vol. 11. Issue 3. Pp. 101–115.
12. Мкртычев О.В., Решетов А.А. Представительный набор акселерограмм для расчета на сейсмические воздействия // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 9. С. 43–50. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.09.43-50
13. Reshetov A.A., Likhova E.M. Assessment of the influence of the rotational components of seismic action on the SSS of a multistorey reinforced concrete building (assessment of the influence of the rotational components of seismic action on the SS of a multistorey reinforced concrete building // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18. Issue 1. Pp. 82–91.

REFERENCES

1. Wolf J.P. Dynamic Soil-Structure Interaction. *Englewood Cliffs*. NJ, Prentice-Hall, 1985. 481.
2. Basu U. Explicit finite element perfectly matched layer for transient three-dimensional elastic waves. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2009; 77(2):151-176.
3. Tamrazyan A.G. Reduce the Impact of Dynamic Strength of Concrete Under Fire Conditions on Bearing Capacity of Reinforced Concrete Columns. *Applied Mechanics and Materials. Collection of papers from 2nd ICSMIM, November 16-17, 2013, Guangzhou, China ed. Yun-Hae Kim and Prasad Yarlagadda*. 1:475-4767.
4. Cun H., Haixiao L. Implicit and explicit integration schemes in the anisotropic bounding surface plasticity model for cyclic behaviours of saturated clay. *Computers and Geotechnics*. 2014; 55:27-41.
5. Krysl P., Bittnar Z. Parallel explicit finite element solid dynamics with domain decomposition and message passing: dual partitioning scalability. *Computers & Structures*. 2001; 79(3):345-360.
6. Paris J., Colominas I., Navarrina F., Casteleiro M. Parallel computing in topology optimization of structures with stress constraints. *Computers & Structures*. 2013; 125: 62-73.
7. Jin H., Jespersen D., Mehrotra P., Biswas R., Huang L., Chapman B. High performance computing using MPI and OpenMP on multi-core parallel systems. *Parallel Computing*. 2011; 37(9):562-575.
8. Basu U., Chopra A.K. Perfectly matched layers for transient elastodynamics of unbounded domains. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2004; 59(8):1039-1074.
9. Murray Y.D. *Users Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159*. McLean. Report No. FHWA-HRT-05-062. Federal Highway Administration, 2007; 77.
10. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. Modeling Worst-case Earthquake Accelerograms for Buildings and Structures. *Advances in Engineering Research*. 2016; 72:89-94.
11. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. Synthesis of the most unfavorable accelerograms for a linear system with a finite number of degrees of freedom. *International Journal of Computer and Communication System Engineering*. 2015; 11(3):101-115.
12. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. A representative set of accelerograms for calculating seismic impacts. *Industrial and Civil Construction*. 2023; 9:43-50. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.09.43-5014
13. Reshetov A.A., Likhova E.M. Assessment of the influence of the rotational components of seismic action on the SSS of a multistorey reinforced concrete building (assessment of the influence of the rotational components of seismic action on the SS of a multistorey reinforced concrete building. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022; 18(1):82-91.