

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ANALYSIS AND DESIGN OF BUILDING STRUCTURESDOI 10.22363/1815-5235-2020-16-2-87-94
УДК 624.04

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Вероятностная оценка запаса несущей способности
пространственной стальной рамы при землетрясении

О.В. Мкртычев, С.В. Булушев*

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

*rusergey.bulushev@gmail.com

История статьи:

Поступила в редакцию: 20 ноября 2019 г.

Доработана: 14 января 2020 г.

Принята к публикации: 24 января 2020 г.

Аннотация

Актуальность. По своей природе сейсмическое воздействие, представленное акселерограммой, является ярко выраженным многомерным случайным процессом, в общем случае содержащим шесть компонентов. Расчет в детерминированной постановке не всегда позволяет адекватно оценить реакцию системы, в то время как расчет в вероятностной постановке более адекватно отражает работу системы и позволяет оценить ее сейсмостойкость с заданной обеспеченностью. **Целью** работы является оценка действительного запаса несущей способности и принимаемого при проектировании коэффициента K_1 , учитывающего допускаемые повреждения зданий и сооружений для стальной пространственной рамы при расчете на сейсмическое воздействие. **Методы.** В процессе исследования был произведен расчет стальной пространственной рамы на два набора акселерограмм с доминантными частотами, близкими к основным частотам собственных колебаний рамы. Каждый набор синтезировался как семейство реализаций нестационарного случайного сейсмического воздействия. Расчет производился на двухкомпонентное сейсмическое воздействие в нелинейной динамической постановке в программном комплексе LS-DYNA. Предварительно рама была запроецирована в соответствии с СП 14.13330.2014. «Строительство в сейсмических районах» на сейсмическое воздействие уровня ПЗ в ПК ЛИРА 10.8. По разработанной вероятностной методике для каждого набора были получены действительные коэффициенты запаса несущей способности K_2 и произведена оценка коэффициентов K_1 . **Результаты.** Анализ результатов показывает, что рассматриваемая стальная рама имеет достаточно большой запас несущей способности, а коэффициент K_1 принимается в нормах чрезмерно консервативно. Разработанная методика позволяет скорректировать значение принимаемого коэффициента K_1 для зданий и сооружений определенных конструктивных схем, что в свою очередь позволит повысить экономическую эффективность строительства в сейсмических районах и обеспечить надежность проектируемых зданий и сооружений.

Ключевые слова: сейсмостойкость, нелинейный динамический метод расчета, акселерограмма, случайный процесс, явный метод интегрирования, LS-DYNA, ПК ЛИРА, теория надежности строительных конструкций, вероятностные методы, метод статистических испытаний

Для цитирования

Мкртычев О.В., Булушев С.В. Вероятностная оценка запаса несущей способности пространственной стальной рамы при землетрясении // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 2. С. 87–94. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-87-94>

Введение

Последствия сильных землетрясений показывают, что здания и сооружения, запроектированные по

Мкртычев Олег Вартанович, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов; eLIBRARY SPIN-код: 9676-4986, Scopus Author ID: 56449249100.

Булушев Сергей Валерьевич, инженер научно-исследовательского центра «Надежность и сейсмостойкость сооружений»; eLIBRARY SPIN-код: 9165-7831, Scopus Author ID: 57195232344, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7239-4668>.

© Мкртычев О.В., Булушев С.В., 2020

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

нормах сейсмостойкого строительства, могут иметь дефицит несущей способности [1–3]. Действующие СП [19] еще не проходили проверку на реальные землетрясения высокой интенсивности. А предыдущий вариант норм, регламентирующих проектирование в сейсмических районах [20], такую проверку проходил и, к сожалению, не всегда удачно. Последствия произошедших землетрясений свидетельствуют, что разрушались здания и сооружения определенных типов конструктивных схем. Анализ показывает, что зачастую это связано с тем, что приня-

тые в нормах методики не обеспечивают требуемую сейсмостойкость для таких конструктивных схем. При проектировании зданий и сооружений на сильные землетрясения предъявление требований об упругой работе конструкций является экономически нецелесообразным. Известно, что линейно-спектральный метод (ЛСМ) не позволяет учесть нелинейный характер деформирования напрямую. При проектировании вводится коэффициент K_1 , учитывающий допустимые повреждения зданий и сооружений. В настоящее время исследования, обосновывающие значения этого коэффициента, вполне недостаточно. Уточнение значений коэффициента K_1 для зданий и сооружений различных конструктивных схем является актуальной и важной задачей.

1. Цель исследования

Нормативный расчет с помощью ЛСМ предполагает использование проектного спектра отклика, который построен с определенной обеспеченностью. При проектировании используется расчетная акселерограмма, полученная по результатам геофизических исследований в рамках детального сейсмического районирования. Так как сейсмическое воздействие является случайным процессом, расчет в детерминированной постановке не позволяет адекватно оценить реакцию системы. Это возможно только при решении задачи в вероятностной постановке с определением требуемой обеспеченности сейсмостойкости.

Целью исследования является оценка действительного коэффициента запаса несущей способности K_3 и коэффициента K_1 для пространственной стальной рамы в вероятностной постановке.

2. Материалы и методы

При исследовании пространственной стальной рамы использовалась следующая методика оценки коэффициентов K_3 и K_1 для зданий и сооружений.

1. Для рассматриваемого здания или сооружения определяются частоты собственных колебаний.

2. Синтезируются наборы акселерограмм с доминантными частотами, близкими к наиболее значимым собственным частотам колебаний зданий и сооружений в продольном и поперечном направлениях.

3. Акселерограммы синтезируются как реализации случайного процесса сейсмического воздействия с учетом магнитуды землетрясения с определенной максимальной амплитудой ускорений, соответствующей заданной интенсивности, и с заданным математическим ожиданием доминантной частоты. Определенной интенсивности сейсмиче-

ского воздействия соответствует максимальное ускорение акселерограммы [19]: для 7 баллов – 1 м/с^2 , для 8 баллов – 2 м/с^2 , для 9 баллов – 4 м/с^2 . Данная методика моделирования акселерограмм приведена в [4–6].

4. С помощью метода статистических испытаний строится гистограмма и эмпирическая функция плотности распределения коэффициента K_3 . Порядок расчета следующий:

а) для каждой реализации сейсмического воздействия выполняется детерминированный расчет, в котором проверяется выполнение условий особого предельного состояния по критерию необрушения с помощью нелинейного динамического метода, реализованного в LS-DYNA;

б) если условия особого предельного состояния не выполняются, то есть происходит разрушение здания или сооружения, то к интенсивности воздействия соответствующей реализации вводится понижающий коэффициент, а если разрушение не произошло – повышающий;

в) расчет повторяется снова;

г) определяется наибольшее значение коэффициента, при котором выполняются условия необрушения. Таким образом определяется коэффициент действительного запаса несущей способности K_3 для зданий и сооружений при каждой реализации случайного процесса (сейсмического воздействия);

5. Для оценки коэффициента K_1 может быть использовано среднее значение K_3^{cp} , полученное с учетом всех выполненных статистических испытаний путем деления K_1 на K_3^{cp} .

Для апробации описанной выше методики была запроектирована пространственная стальная рама с жесткими сопряжениями колонн и ригелей. Расчетная схема представлена на рис. 1. Рама жестко закреплена в основании.

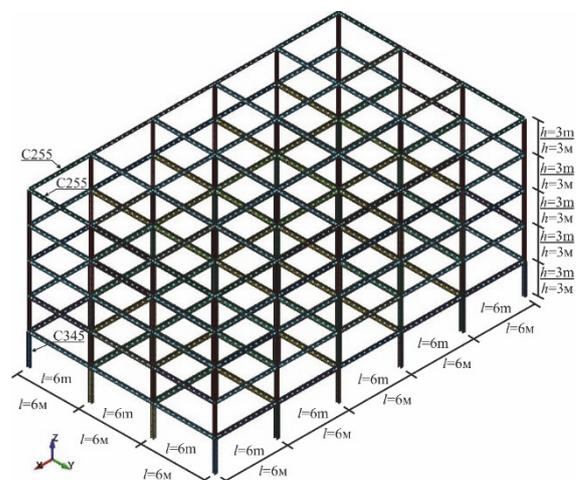


Рис. 1. Расчетная схема
[Figure 1. The calculation scheme]

Сечения колонн были приняты в виде прокатных двутавров из стали марки С345 [21], сечения ригелей – в виде прокатных двутавров из стали марки С255. Подбор сечений осуществлялся в программном комплексе ПК ЛИРА 10.8. Расчет производился на сейсмическое воздействие уровня ПЗ интенсивностью 9 баллов в соответствии с СП [19]. Коэффициент K_1 принимался равным 0,25, $K_0 = 1$. В процессе расчета получены коэффициенты использования несущей способности принятых сечений стальной рамы (рис. 2).

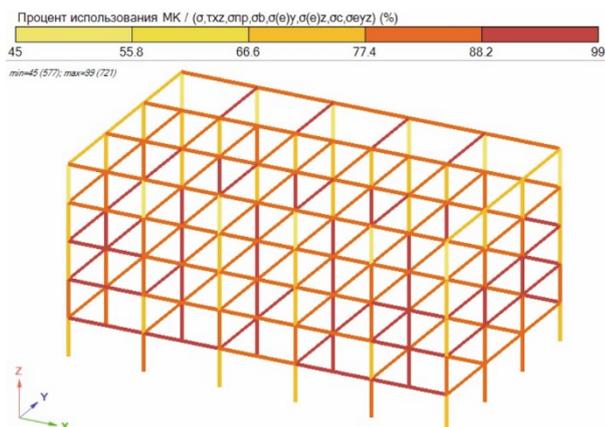


Рис. 2. Процент использования несущей способности
[Figure 2. Percentage of carrying capacity usage]

Наиболее значимые формы собственных колебаний рамы в продольном и поперечном направлениях приведены на рис. 3. Соответствующие частоты равны 0,727 и 0,965 Гц.

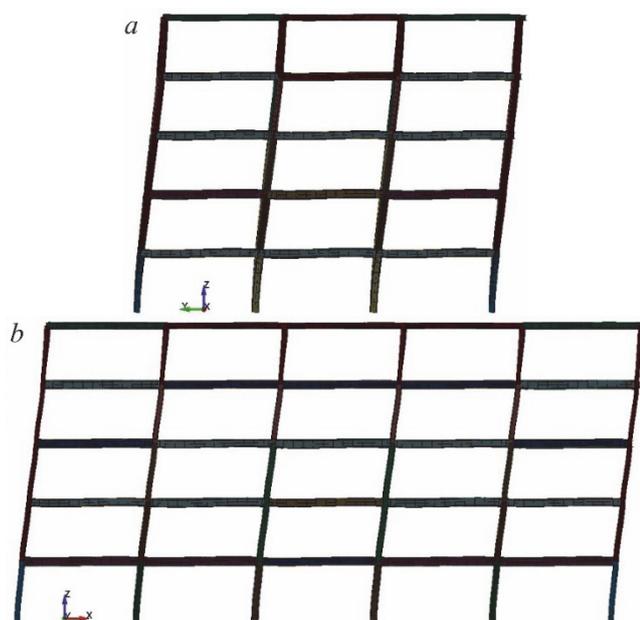


Рис.3. Собственные формы колебаний:
a – в плоскости YOZ; *b* – в плоскости XOZ
[Figure 3. Eigenforms of oscillations:
a – in the XOY plane; *b* – in the XOZ plane]

Для полученных частот были синтезированы два набора по 50 реализаций случайного сейсмического воздействия. Воздействие было принято двухкомпонентным – по X и Y . Вертикальная компонента не учитывалась. Интенсивность воздействия – 9 баллов [19], математическое ожидание доминантной частоты 0,727 и 0,965 Гц соответственно.

На рис. 4 и 5 представлены реализации акселерограмм из обоих рассматриваемых наборов.

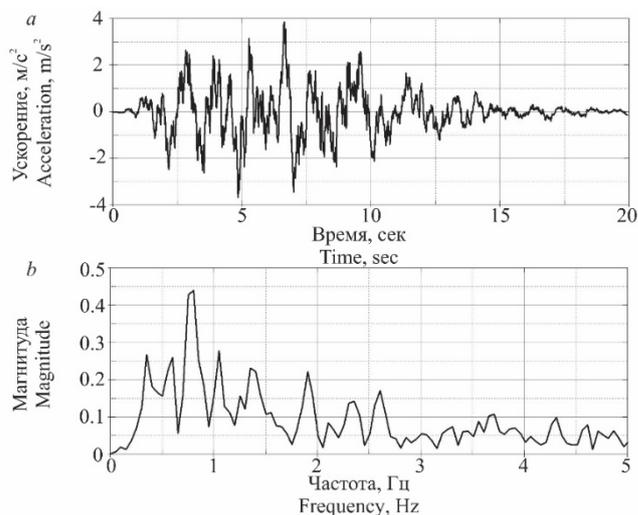


Рис. 4. Реализация сейсмического воздействия с доминантной частотой 0,727 Гц:
a – акселерограмма; *b* – спектральный состав
[Figure 4. The implementation of the seismic action with dominant frequency 0.727 Hz:
a – accelerogram; *b* – spectral composition]

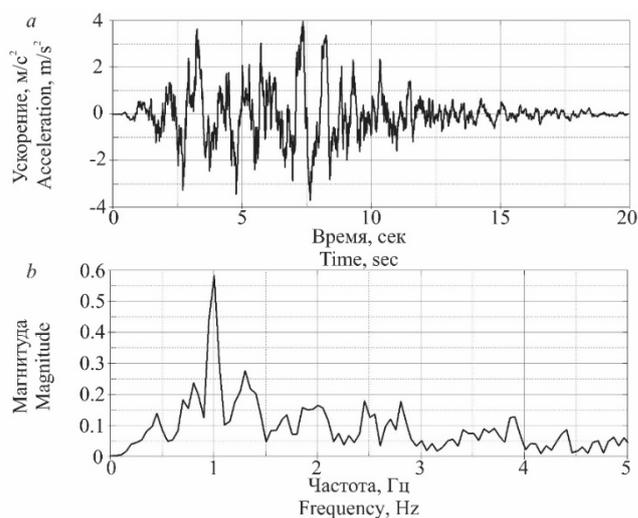


Рис. 5. Реализация сейсмического воздействия с доминантной частотой 0,965 Гц:
a – акселерограмма; *b* – спектральный состав
[Figure 5. The implementation of the seismic action with dominant frequency 0.965 Hz:
a – accelerogram; *b* – spectral composition]

Расчет рассматриваемой рамы производился в нелинейной динамической постановке в программ-

ном комплексе LS-DYNA. Для расчета использовались явные методы интегрирования уравнений движения.

При явном интегрировании применяется метод центральных разностей. Для определения перемещений используется выражение с запаздыванием по времени [7; 8]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{K}\mathbf{u}_t = \mathbf{f}_t^a. \quad (1)$$

Явные методы используют рекуррентные соотношения, которые выражают перемещения, скорости и ускорения на данном шаге через их значения на предыдущих шагах.

Вектор ускорений:

$$\mathbf{a}_t = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{f}_t^{\text{ext}} - \mathbf{f}_t^{\text{int}}), \quad (2)$$

где $\mathbf{f}_t^{\text{ext}}$ – вектор внешних сил; $\mathbf{f}_t^{\text{int}}$ – вектор внутренних сил.

В частном случае:

$$\mathbf{f}_t^{\text{int}} = \sum \left(\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega + \mathbf{f}_t^{\text{cont}} \right), \quad (3)$$

где \mathbf{B} – матрица деформаций – перемещений; $\boldsymbol{\sigma}$ – вектор напряжений; $\mathbf{f}_t^{\text{cont}}$ – вектор контактных сил.

При интегрировании уравнений движения по явной схеме, в данном случае по методу центральных разностей [7], вектор напряжений определяется через перемещения, найденные на предыдущем временном шаге (так как напряжения зависят от деформаций, а деформации от поля перемещений).

Векторы скоростей и перемещений на соответствующем шаге определяются следующим образом:

$$\mathbf{v}_{t+\Delta t/2} = \mathbf{v}_{t-\Delta t/2} + \mathbf{a}_t \Delta t, \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \mathbf{v}_{t+\Delta t/2} \frac{\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t}}{2}. \quad (5)$$

При использовании диагональной матрицы масс есть возможность упростить расчет и уменьшить время одной итерации, вычислив обратную матрицу. Отсюда видно, что явные методы не связаны с решением систем алгебраических уравнений. Наиболее трудоемкой операцией является вычисление вектора внутренних сил $\mathbf{f}_t^{\text{int}}$, в котором учитываются все виды нелинейностей.

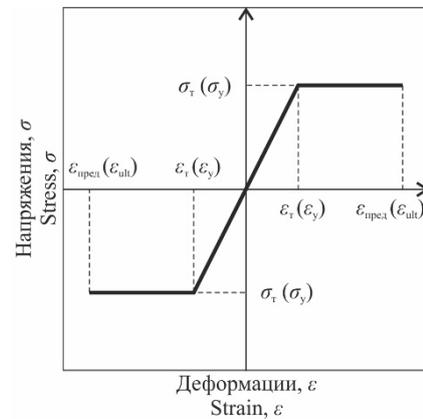


Рис. 6. Общий вид диаграммы деформирования стали
[Figure 6. General view of steel deformation diagram]

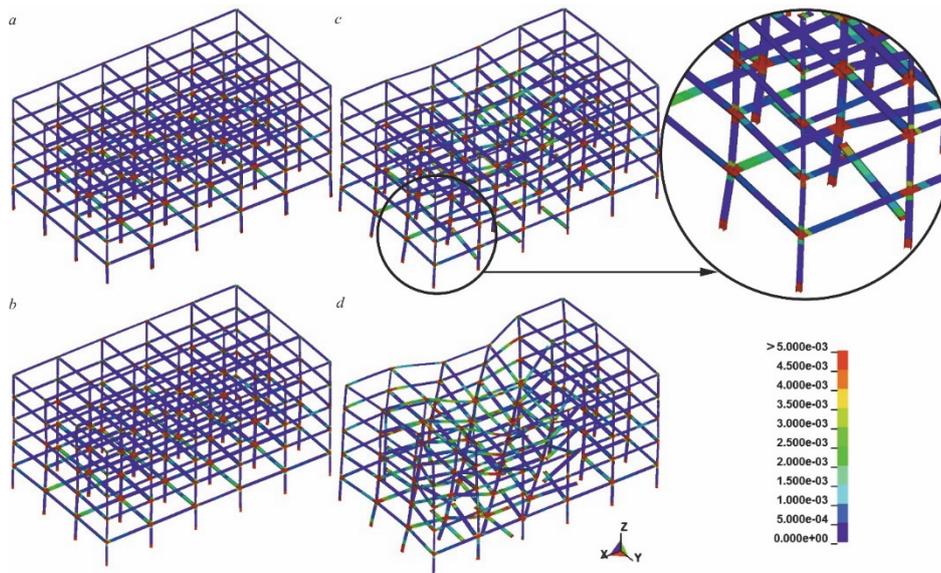


Рис. 7. Картина разрушения с пластическими деформациями в разные моменты времени:
 $a - t = 11$ сек.; $b - t = 12$ сек.; $c - t = 13$ сек.; $d - t = 14$ сек.

[Figure 7. The picture of destruction with the plastic deformations at different time moments:
 $a - t = 11$ sec.; $b - t = 12$ sec.; $c - t = 13$ sec.; $d - t = 14$ sec.]

Рама моделировалась с помощью стержневых конечных элементов. В узлах задавались соответствующие сосредоточенные массы. Параметры материала приняты согласно СП 16.13330.2017 [21]. Принималась идеальная упруго-пластическая модель работы материала с ограничением пластических деформаций $\varepsilon_{пред}$ (в [19] точка E на рис. В.1). Тогда, в соответствии с [19] получаем: для ригелей $\varepsilon_{пред} = 0,168$, для колонн $\varepsilon_{пред} = 0,139$. При достижении этих деформаций, элемент выключается из расчетной модели (удаляется). Общий вид диаграммы деформирования приведен на рис. 6. Параметр затухания для конструкций принят равным $\xi = 0,03$ (3 % от критического).

В соответствии с методикой, описанной выше, при каждом статистическом испытании был определен коэффициент K_3^{CP} . На рис. 7 приведена картина деформирования и разрушения конструкции и фрагмент с элементами, в которых возникли пла-

стические деформации, для одного из статистических испытаний. Красным цветом показаны элементы, в которых значения пластических деформаций больше, чем 0,005.

3. Результаты

Результаты определения действительного коэффициента запаса несущей способности K_3 , представлены в табл. 1 и 2.

На основе полученных значений были построены гистограммы коэффициента K_3 для обоих наборов акселерограмм (рис. 8).

Среднее значение коэффициента запаса для сейсмического воздействия с доминантной частотой 0,727 Гц равно $K_3^{CP} = 1,442$, для сейсмического воздействия с доминантной частотой 0,965 Гц – $K_3^{CP} = 2,160$. Скорректированные значения коэффициентов K_1 равны 0,173 и 0,116 соответственно.

Таблица 1

Действительные коэффициенты запаса несущей способности K_3 для сейсмического воздействия с доминантной частотой 0,727 Гц [Table 1. The actual load-carrying capacity safety margins K_3 for the seismic action with dominant frequency 0.727 Hz]

№ реализации [No. of implementation]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Коэффициент запаса [Safety margin]	1,7	1,5	1,5	1,1	1,1	1,4	1,2	1,6	1,5	2,0
№ реализации [No. of implementation]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Коэффициент запаса [Safety margin]	1,8	1,4	1,6	1,4	1,6	1,2	1,0	1,8	1,8	1,2
№ реализации [No. of implementation]	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Коэффициент запаса [Safety margin]	1,4	1,2	1,3	1,5	1,5	1,6	1,4	1,8	1,5	1,3
№ реализации [No. of implementation]	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Коэффициент запаса [Safety margin]	1,2	1,6	1,2	1,9	1,3	1,2	1,3	1,1	1,3	1,5
№ реализации [No. of implementation]	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Коэффициент запаса [Safety margin]	1,6	1,2	1,6	1,5	1,4	1,6	1,4	1,6	1,4	1,3

Таблица 2

Действительные коэффициенты запаса несущей способности K_3 для сейсмического воздействия с доминантной частотой 0,965 Гц [Table 2. The actual load-carrying capacity safety margins K_3 for the seismic action with dominant frequency 0.965 Hz]

№ реализации [No. of implementation]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Коэффициент запаса [Safety margin]	2,6	2,1	2,0	2,8	2,0	2,8	1,4	2,0	2,5	2,1
№ реализации [No. of implementation]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Коэффициент запаса [Safety margin]	2,7	1,5	2,5	2,4	2,0	2,0	1,9	1,7	2,3	2,0
№ реализации [No. of implementation]	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Коэффициент запаса [Safety margin]	2,2	1,8	2,4	1,9	2,1	2,4	1,5	2,4	2,4	1,4
№ реализации [No. of implementation]	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Коэффициент запаса [Safety margin]	2,8	2,9	2,0	2,4	2,5	2,1	1,7	1,6	2,8	2,2
№ реализации [No. of implementation]	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Коэффициент запаса [Safety margin]	2,7	2,4	1,7	2,8	2,0	1,6	1,8	2,1	2,3	1,8

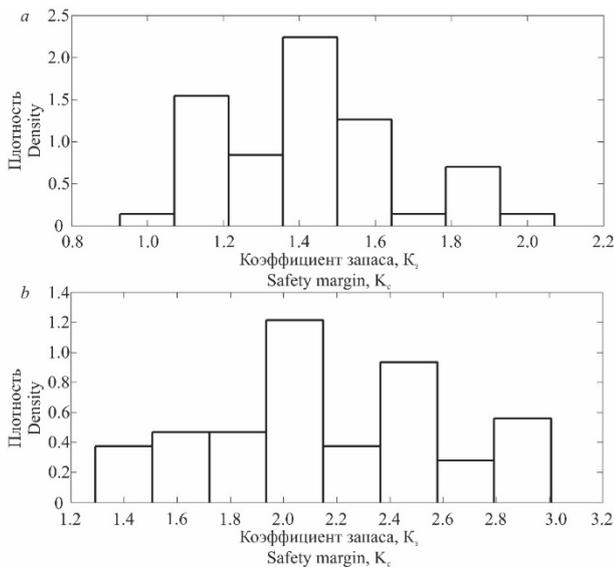


Рис. 8. Гистограмма коэффициента K_s для сейсмического воздействия с доминантной частотой: $a - 0,727$ Гц; $b - 0,965$ Гц

[Figure 8. Histogram of safety margin K_s for the seismic action with dominant frequency: $a - 0.727$ Hz; $b - 0.965$ Hz]

4. Обсуждение

Проблема обоснованности коэффициента K_1 для зданий и сооружений различных конструктивных схем активно обсуждается в научном сообществе [9–14]. Однако исследований в этой области пока недостаточно. В работах [8; 15; 16] приведены результаты нелинейного динамического расчета железобетонных конструкций. Было показано, что коэффициент K_1 для данных конструкций должен иметь большее значение, чем указано в нормах проектирования [19]. То есть имеет место дефицит сейсмостойкости. Аналогичные выводы для исследуемых железобетонных конструкций сделаны в работе [17]. В работах [8; 15] показано, что для стальной пространственной рамы значение коэффициента K_1 , наоборот, завышено. Это говорит о том, что рассматриваемые стальные конструкции имеют запас определенной несущей способности. В работе [18] по описанной выше методике авторами была рассмотрена стальная плоская рама в вероятностной постановке. Результаты также показали, что стальная рама имеет значительный запас несущей способности.

Заключение

Современные программные комплексы позволяют проводить сложные расчеты в нелинейной динамической постановке. Таким образом, используя методы теории надежности строительных конструкций, становится возможным определить несущую способность зданий и сооружений с высокой достоверностью.

В работе была рассчитана стальная пространственная рама, запроектированная по современным нормам по сейсмостойкому строительству [19] на два набора реализаций случайного сейсмического воздействия в соответствии с разработанной методикой. С помощью метода статистических испытаний для каждой реализации был получен действительный коэффициент запаса несущей способности рассматриваемой конструкции. Для сейсмического воздействия с доминантной частотой 0,727 Гц коэффициенты варьируются от 1 до 1,9, для сейсмического воздействия с доминантной частотой 0,965 Гц – от 1,4 до 2,9. Проведенное исследование показало, что стальная рама данной конструктивной схемы имеет запас несущей способности при сейсмическом воздействии. Полученные результаты свидетельствуют, что:

- 1) для адекватного отражения работы зданий и сооружений при землетрясении сейсмическое воздействие необходимо рассматривать в виде нестационарного случайного процесса;
- 2) для зданий и сооружений, как правило, наиболее опасными являются низкочастотные воздействия;
- 3) стальные конструкции имеют запас несущей способности при расчетном сейсмическом воздействии – это связано с существенными резервами пластической работы применяемых при строительстве сталей;
- 4) коэффициент K_1 , используемый при проектировании зданий и сооружений, должен быть уточнен применительно к различным конструктивным схемам – это позволит обеспечить требуемую надежность и безопасность, а также экономическую эффективность проектируемых зданий и сооружений.

Список литературы

1. Мкртычев О.В., Булушев С.В. Актуальные проблемы сейсмостойкого строительства // Сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения профессора, автора методики расчета железобетонных конструкций по стадии разрушения, основоположника советской научной школы теории железобетона, основателя и первого заведующего кафедрой железобетонных конструкций Московского инженерно-строительного института (МИСИ) А.Ф. Лейтца / под ред. А.Г. Тамразяна. М.: МГСУ, 2018. С. 270–278.
2. Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А. Оценка работы зданий и сооружений за пределами упругости при сейсмических воздействиях // Theoretical Foundation of Civil Engineering: XXI Russian-Slovak-Polish Seminar. Moscow – Archangelsk, July 3–6, 2012. 2012. Pp. 177–186.
3. Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А., Дзержинский Р.И. Философия многоуровневого проектирования в свете обеспечения сейсмостойкости сооружений // Геология и геофизика Юга России. 2016. № 1. С. 71–81.

4. Мкртычев О.В., Решетов А.А. Методика моделирования наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясений // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 24–26.
5. Мкртычев О.В., Решетов А.А. Методика определения исходных характеристик наиболее неблагоприятных акселерограмм для линейных систем с конечным числом степеней свободы // Вестник МГСУ. 2015. № 8. С. 80–91.
6. Мкртычев О.В., Решетов А.А. Представительный набор акселерограмм землетрясений для расчета зданий и сооружений на сейсмические воздействия // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 7 (106). С. 754–760.
7. Hallquist J.O. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), LS-DYNA Theory Manual, 2006.
8. Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). М.: МГСУ, 2012. 192 с.
9. Булушев 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.
10. Джинчвелашвили Г.А. Нелинейные динамические методы расчета зданий и сооружений с заданной обеспеченностью сейсмостойкости: автореферат дис. ... д-ра техн. наук. М.: МГСУ, 2015. 46 с.
11. Джинчвелашвили Г.А., Булушев С.В. Оценка точности нелинейного статического метода анализа сейсмостойкости сооружений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 2. С. 41–48.
12. Джинчвелашвили Г.А., Булушев С.В. Расчетное обоснование заданного уровня сейсмостойкости сооружений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. № 1. С. 70–79.
13. Джинчвелашвили Г.А., Булушев С.В., Колесников А.В. Нелинейный статический метод анализа сейсмостойкости зданий и сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016. № 5. С. 39–47.
14. Соснин А.В. Об особенностях методологии нелинейного статического анализа и его согласованности с базовой нормативной методикой расчета зданий и сооружений на действие сейсмических сил // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Т. 16. № 1. С. 12–19.
15. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Busalova M.S. Normative approaches to structural design calculations in a non-linear framework // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 86. 01018.
16. Мкртычев О.В., Бунов А.А., Дорожнинский В.Б. Сравнение линейно-спектрального и нелинейного динамического методов расчета на примере здания рамно-связевой конструктивной схемы при землетрясении // Вестник МГСУ. 2016. № 1. С. 57–67.
17. Соснин А.В. Об уточнении коэффициента допускаемых повреждений K_1 и его согласованности с концепцией редукции сейсмических сил в постановке спектрального метода (в порядке обсуждения) // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1 (60). С. 92–116.
18. Mkrtychev O.V., Bulushev S.V. Probabilistic Estimation Seismic Resistance of Plain Steel Frame // XXVIII R-P-S Seminar 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 661. 012016. IOP Publishing.
19. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. М., 2014.
20. СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах. М., 2000.
21. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М., 2017.

RESEARCH PAPER

Probabilistic estimation seismic resistance of spatial steel frame under earthquake

Oleg V. Mkrtychev, Sergey V. Bulushev*

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation
*sergey.bulushev@gmail.com

Article history:

Received: November 20, 2019

Revised: January 14, 2020

Accepted: January 24, 2020

Abstract

Relevance. By its nature, seismic action is represented by the accelerogram a pronounced multidimensional random process, generally containing six components. The calculation in the deterministic formulation does not always allow to adequately assess the reaction of the system. While the calculation in the probabilistic formulation more adequately reflects the work of the system and makes it possible to evaluate its seismic resistance with a given security. **The aim of the work** is to assess the actual load-carrying capacity safety margin and the taken when designing coefficient K_1 , taking into account the permissible damage to buildings and structures for the steel spatial frame when calculating on the seismic action. **Methods.** In the article, the steel spatial frame was calculated for two sets of accelerograms, with dominant frequencies close to the main frequencies of the frame's natural vibrations. Each set was synthesized as a family of unsteady random seismic

Oleg V. Mkrtychev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Strength of Materials Department; eLIBRARY SPIN-code: 9676-4986, Scopus Author ID: 56449249100.

Sergey V. Bulushev, engineer of the research center "Reliability and Seismic Stability of Structures"; eLIBRARY SPIN-code: 9165-7831, Scopus Author ID: 57195232344, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7239-4668>.

For citation

Mkrtychev O.V., Bulushev S.V. Probabilistic estimation seismic resistance of spatial steel frame under earthquake. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(2):87–94. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-87-94>. (In Russ.)

impact implementations. The calculation was carried out on two-component seismic action in nonlinear dynamic formulation in the software complex LS-DYNA. Previously, the frame was designed in accordance with national standard SP 14.13330.2014 “Construction in seismic areas on the seismic action” of the design earthquake level in the software complex PC LIRA 10.8. According to the developed probabilistic method for each set the actual load-carrying capacity safety margins were obtained and the coefficients K_1 were estimated. **Results.** An analysis of the results shows that the steel frame under consideration has a sufficiently large margin of load-carrying capacity, and the coefficient K_1 is taken in norms excessively conservatively. The developed technique allows to correct the value of the accepted coefficient K_1 for buildings and structures of certain structural schemes. That in its turn will increase the economic efficiency of construction in seismic areas and ensure the reliability of the designed buildings and structures.

Keywords: seismic stability, nonlinear dynamic calculation method, accelerogram, random process, explicit integration method, LS-DYNA, PC LIRA, theory of reliability of construction structures, probabilistic methods, method of statistical tests

References

1. Mkrtychev O.V., Bulushev S.V. Actual problems of earthquake engineering. “*Loleyt readings – 150*”. *Modern methods of calculation of reinforced concrete and stone structures by limit states (Moscow, November 30, 2018)*. 2018: 270–278. (In Russ.)
2. Mkrtychev O.V., Dzinchvelashvili G.A. Assessment of buildings and structures beyond the elastic limit at the seismic influences. *Theoretical Foundation of Civil Engineering: XXI Russian-Slovak-Polish Seminar (Moscow – Archangelsk, July 3–6, 2012)*. 2012:177–186. (In Russ.)
3. Mkrtychev O.V., Dzinchvelashvili G.A., Dzerzhinskij R.I. The philosophy of multi-level design in light of the provision of seismic stability of buildings. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2016;(1):71–81. (In Russ.)
4. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. Methods of modeling the most unfavorable earthquake accelerograms. *Industrial and Civil Engineering*. 2013;(9):24–26. (In Russ.)
5. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. Method for determining initial characteristics of the most unfavorable accelerograms for linear systems with finite number of degrees of freedom. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2015;(8):80–91. (In Russ.)
6. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. Representative set of earthquake accelerograms for structural engineering of buildings and structures during earthquake effects. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2017;12(7): 754–760. (In Russ.)
7. Hallquist J.O. *Livermore Software Technology Corporation (LSTC), LS-DYNA Theory Manual*. 2006.
8. Mkrtychev O.V., Dzinchvelashvili G.A. *Problemy ucheta nelineynostey v teorii seystoystoykosti (gipotezy i zabluzhdeniya) [Accounting problems of nonlinear seismic stability in the theory (hypothesis and error)]*. Moscow, MGSU Publ.; 2012. (In Russ.)
9. 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):39–47. (In Russ.)
10. Dzinchvelashvili G.A. *Nelineinye dinamicheskie metody rascheta zdaniy i sooruzheniy s zadannoy obespechenost'yu seystoystoykosti [Nonlinear dynamic methods of calculation of buildings and structures with a given security seismic stability]* (Dr. Dissertation Abstract). Moscow, MGSU Publ.; 2015. (In Russ.)
11. Dzinchvelashvili G.A., Bulushev S.V. Accuracy evaluation of the nonlinear static analysis method of the structures seismic resistance. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2017;13(2):41–48. (In Russ.)
12. Dzinchvelashvili G.A., Bulushev S.V. Feasibility evaluation for a predefined seismic resistance of structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018;14(1):70–79. (In Russ.)
13. Dzinchvelashvili G.A., Bulushev S.V., Kolesnikov A.V. Nonlinear static method of analysis of seismic resistance of buildings and structures. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2016;(5):39–47. (In Russ.)
14. Sosnin A.V. On the peculiarities of the methodology of nonlinear static analysis and its consistency with the basic normative methodology for calculating buildings and structures for the action of seismic forces. *Bulletin of the South Ural University. Series: Construction Engineering and Architecture*. 2016;16(1):12–19. (In Russ.)
15. Mkrtychev O.V., Dzinchvelashvili G.A., Busalova M.S. Normative approaches to structural design calculations in a non-linear framework. *MATEC Web of Conferences*. 2016;86:01018.
16. Mkrtychev O.V., Bunov A.A., Dorozhinskiy V.B. Comparison of linear spectral and nonlinear dynamic calculation method for tie frame building structure in case of earthquakes. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2016;(1):57–67. (In Russ.)
17. Sosnin A.V. About refinement of the seismic-force-reduction factor (K_1) and its coherence with the concept of seismic response modification in formulation of the spectrum method (in order of discussion). *Bulletin of Civil Engineers*. 2017;60(1):92–116. (In Russ.)
18. Mkrtychev O.V., Bulushev S.V. Probabilistic Estimation Seismic Resistance of Plain Steel Frame. *XXVIII R-P-S Seminar 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019;661:012016.
19. SP 14.13330.2014. *Construction in seismic regions*. The updated edition of SNiP II-7-81*. Moscow, 2014.
20. SNiP II-7-81*. *Construction in seismic regions*. Moscow, 2000.
21. SP 16.13330.2011. *Steel structures*. The updated edition of SNiP II-23–81*. Moscow, 2011.