



РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ANALYSIS AND DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-3-195-203
 УДК 624.07

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Живучесть железобетонных каркасов многоэтажных зданий со сложнапряженными элементами

В.И. Колчунов^{1,2} , В.С. Московцева¹  

¹Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Российская Федерация

✉ lyavetka1@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 10 марта 2022 г.

Доработана: 30 мая 2022 г.

Принята к публикации: 9 июня 2022 г.

Для цитирования

Колчунов В.И., Московцева В.С. Живучесть железобетонных каркасов многоэтажных зданий со сложнапряженными элементами // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 3. С. 195–203. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-3-195-203>

Аннотация. Экспериментальное определение параметров силового сопротивления железобетонных конструкций, направленное на их защиту от аварийных запроектных воздействий, является важным направлением в повышении механической безопасности зданий и сооружений в условиях современных вызовов. В связи с этим целью исследования стала экспериментальная оценка параметров деформирования в сложнапряженных элементах железобетонных рам при особых аварийных воздействиях, вызванных внезапным удалением одного из несущих элементов. Экспериментальные исследования выполнены для двух железобетонных рам, одна из которых испытана при мгновенном удалении средней колонны, а вторая – при удалении крайней. Конструкции рам запроектированы двухпролетными с тремя этажами по высоте и с использованием пространственных арматурных каркасов, обеспечивающих сопротивление кручению с изгибом. Приведены результаты экспериментально-теоретических исследований конструкций железобетонных рам в запредельных состояниях при особых воздействиях и проведена оценка перемещений, трещинообразования и разрушения рассматриваемых сложнапряженных элементов конструкций при таких воздействиях. Установлено, что вид напряженного состояния, картина образования, раскрытие и развитие трещин существенно влияют на параметры деформирования и диссипативные свойства элементов конструктивной системы.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, сложнапряженный железобетон, особые воздействия, живучесть, защита, прогрессирующее обрушение

Колчунов Виталий Иванович, доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии архитектуры и строительных наук, заведующий кафедрой уникальных зданий и сооружений, факультет строительства и архитектуры, Юго-Западный государственный университет, Российская Федерация, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; ORCID: 0000-0001-5290-3429, Scopus Author ID: 57219004839, eLIBRARY SPIN-код: 4512-6499; asiorel@mail.ru

Московцева Виолетта Сергеевна, инженер кафедры уникальных зданий и сооружений, Юго-Западный государственный университет, Российская Федерация, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; ORCID: 0000-0002-5509-1937, Scopus Author ID: 57220160946, eLIBRARY SPIN-код: 2723-4002; lyavetka1@mail.ru

© Колчунов В.И., Московцева В.С., 2022



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

Survivability of reinforced concrete frames of multi-storey buildings with complex stress elements

Vitaly I. Kolchunov^{1,2} , Violetta S. Moskvotseva¹  

¹Southwest State University, Kursk, Russian Federation

²Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ lyavetka1@mail.ru

Article history

Received: March 10, 2022

Revised: May 29, 2022

Accepted: June 9, 2022

For citation

Kolchunov V.I., Moskvotseva V.S. Survivability of reinforced concrete frames of multi-storey buildings with complex stress elements. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(3):195–203. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-3-195-203>

Abstract. Experimental determination of the parameters of the force resistance of reinforced concrete structures aimed at protecting them from emergency beyond design impacts is an important direction in improving the safety of buildings and structures. In this connection, the purpose of the study was an experimental assessment of the deformation parameters in the complexly stressed elements of reinforced concrete frames under special impact in the form of a sudden column removal. Experimental studies were carried out for two frames, one of which was tested when removing the middle column, the second – when removing the extreme. Experimental two-span structures of reinforced concrete frames are designed with three floors in height, reinforcement was made with spatial reinforcing cages that provide resistance to torsion with bending. The results of experimental and theoretical studies of reinforced concrete frame structures under special influences and an assessment of displacements, cracking and destruction of the considered complex-stressed structural elements under such influences are presented. It is established that the type of stress state, the formation and width of crack opening significantly affect the dissipative properties of the structural system.

Keywords: experimental research, complex-stressed reinforced concrete, special impact, survivability, resistance, progressive collapse

Введение

Вопросы создания методов по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения все более актуальны в связи с постоянным увеличением на них количества и интенсивности воздействий природного и техногенного характера, приводящих к непропорциональному отказу конструкций, а в некоторых случаях к их полному разрушению. В России и ряде зарубежных стран в настоящее время разработаны и введены новые нормативные документы по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения¹ [1]. Для их совершенствования и в развитие этого направления необходимы новые исследования, направленные на изучение силового сопротивления различных типов конструкций при таких воздействиях [2–4]. Анализируя теоретические [5–7] и экспериментальные [8–14] исследования отечественных и зарубежных ученых можно заметить, что в предлагаемых решениях по защите от прогрессирующего обрушения железобетонных рамно-стрешневых конструкций каркасов многоэтажных зданий рассмотрены простейшие напряженные состояния в конструктивных элементах: растяжение – сжатие, изгиб [8; 13], внецентренное сжатие [11; 12; 15; 16] и др. При этом следует отметить, что совместное действие изгибающего и крутящего моментов и поперечных сил относится к достаточно распространенному виду сочетания усилий, и решение задач по защите каркасов многоэтажных зданий со сложнапряженными железобетонными элементами в запредельных состояниях от таких воздействий до настоящего времени не рассматривались. В настоящей работе представлены результаты экспериментально-теоретического исследования монолитных железобетонных рам со сложнапряженными элементами

Vitaly I. Kolchunov, Doctor of Technical Sciences, Professor, full member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Head of the Department of Unique Buildings and Structures, Faculty of Construction and Architecture, Southwest State University, 94 50 let Oktyabrya St, Kursk, 305040, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5290-3429, Scopus Author ID: 57219004839, eLIBRARY SPIN-code: 4512-6499; asiorel@mail.ru
Violetta S. Moskvotseva, engineer of the Department of Unique Buildings and Structures, Southwest State University, 94 50 let Oktyabrya St, Kursk, 305040, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5509-1937, Scopus Author ID: 57220160946, eLIBRARY SPIN-code: 2723-4002; lyavetka1@mail.ru

¹ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. М.: Минстрой России, 2018. 33 с.; UFC 4-023-03. Design of buildings to resist progressive collapse text. Department of Defense USA, 2010. 176 p.; ДБН В.1.2-14-2009. Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений строительных конструкций и оснований. К.: Минрегионстрой Украины, 2009. 43 с.

при особом статико-динамическом воздействии, вызванном внезапным удалением средней и крайней стоек рамы. Целью исследования являлась экспериментальная оценка параметров деформирования в сложно-напряженных элементах железобетонных рам при рассматриваемых воздействиях.

Методика

Для решения поставленных задач разработана методика и проведены экспериментальные исследования живучести конструкций монолитных железобетонных рам двух серий при двух вариантах воздействий: РЖ-1 – рама с внезапным выключением из работы центральной стойки; РЖ-2 – рама с внезапным выключением из работы крайней стойки.

Перед проведением испытаний выполнен расчет напряженно-деформированного состояния опытных конструкций рам. Расчетная схема построена на основе модели деформирования железобетонных конструктивных систем в запредельном состоянии при особых воздействиях [17; 18].

Конечно-элементная модель рамы реализована в программном комплексе ЛИРА-САПР с использованием объемных конечных элементов для двух вариантов расчетных схем. Первичная расчетная схема – при действии симметричной нагрузки в виде сосредоточенных сил P , приложенных к ригелям над первым этажом в третях каждого пролета (на расстоянии 350 мм от опор) с эксцентриситетом 0,4 м из плоскости рамы. Вторичная расчетная схема – при действии тех же сосредоточенных сил и особом воздействии, вызванном внезапным удалением из рамы одной из стоек (центральной или крайней) первого этажа и приложением по месту отброшенной связи реакции с обратным знаком, действовавшей в этой стойке до приложения запроектного воздействия.

Расчет, в соответствии с комбинацией алгоритмов [18; 19], проведен по двухуровневой расчетной схеме. Расчетная схема первого уровня, построенная для фрагмента конструктивной системы здания, представляла собой конечно-элементную модель рамы с использованием объемных конечных элементов (рис. 1). Армирование сложноподвинутого ригеля определено по расчетной схеме второго уровня [20; 21] с использованием физических зависимостей деформационной модели [22; 23]. По результатам расчета запроектирована опытная конструкция рамы, в которой армирование ригелей выполнено замкнутыми пространственными каркасами, работающими на растяжение от изгиба с кручением при учете поперечной силы (рис. 2).

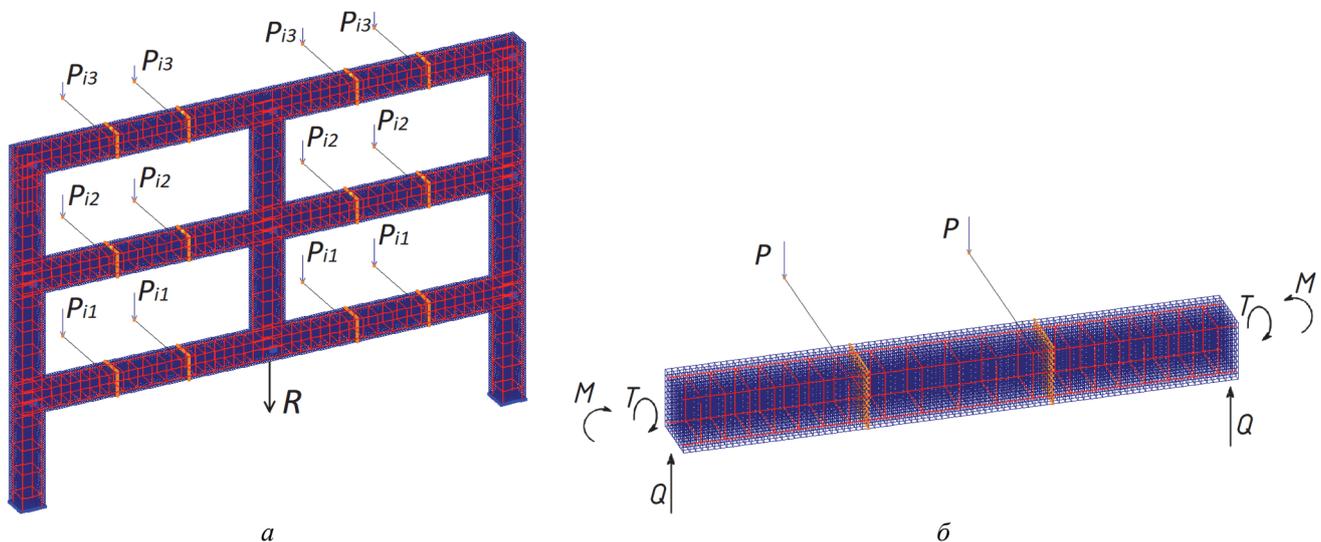


Рис. 1. Конечно-элементная расчетная схема первого (а) и второго (б) уровней
Figure 1. Finite element calculation scheme of the first (а) and second (б) levels

Ригели опытной конструкции рамы армированы симметрично по высоте сечения в сжатой и растянутой зонах четырьмя (2+2) продольными стержнями, объединенными в пространственный каркас поперечной арматурой с шагом 40 мм на приопорных участках и 60 мм в пролете. Колонны армированы четырьмя продольными стержнями диаметром 6 мм с шагом хомутов 100 мм. Такая схема армирования конструкции принята из условия обеспечения силового сопротивления элементов рамы заданным проектным нагрузкам и рассматриваемому особому воздействию.

Стенд для проведения экспериментальных исследований рассматриваемых конструкций рам на особые воздействия включал рычажную установку, передающую нагрузку на раму, нагрузочные устройства, раскрепляющие распорки для обеспечения устойчивости положения рамы в проектном положении, рычаг для создания крутящего момента и другие элементы.

До проектной нагрузки рама нагружалась сосредоточенными силами в каждом пролете ригеля через специальные рычаги-консоли для создания в ригелях над первым этажом сложного напряженного состояния – изгиба с кручением. В опытных конструкциях исследуемых рам отсутствовала одна из колонн первого этажа, а в процессе испытаний она моделировалась специально изготовленной кинематически изменяемой опорой, позволяющей мгновенно выключать из работы колонну в составе рамы.

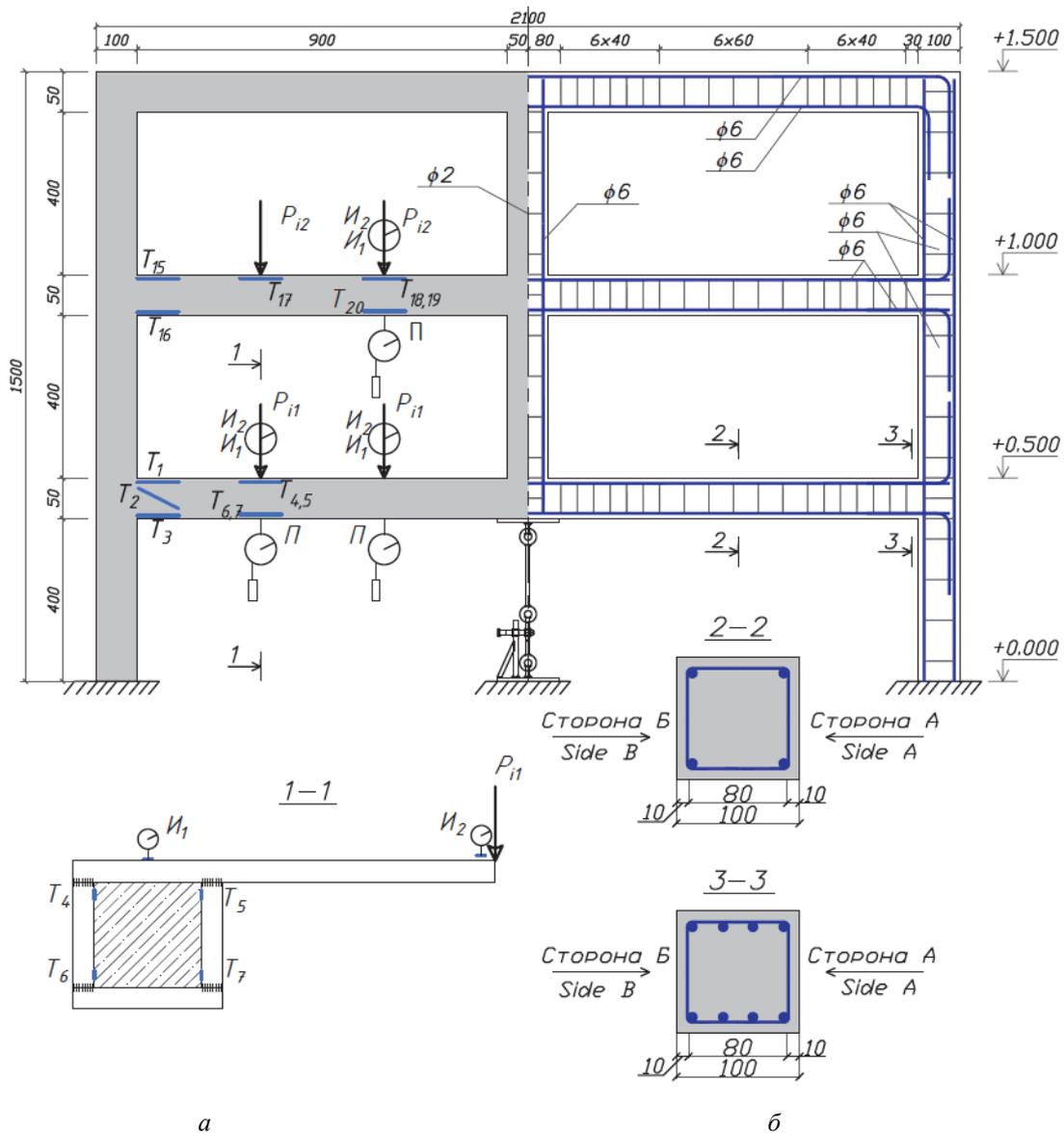


Рис. 2. Конструкция опытной рамы первой серии (РЖ-1):

a – схема установки приборов; *б* – армирование

Figure 2. The design of the experimental frame of the first series:

a – the installation scheme of the devices; *б* – reinforcement

В соответствии с методикой испытаний, с помощью механических приборов и методом электро-тензометрии тензорезисторами T_i измерялись перемещения и деформации бетона на фибровых волокнах поперечных сечений ригелей и в приопорных зонах вдоль оси ригеля и под углом 45° (рис. 2). Микроскопом фиксировалась картина образования и измерялась ширина раскрытия трещин. Учитывая динами-

ческий характер догружения конструкции рамы на втором этапе испытаний при особом воздействии, для фиксации показаний механических приборов в момент динамического догружения конструкции использовались осциллограф, а также цифровые фотокамеры. Общий вид испытаний конструкций рам первой и второй серий показан на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид испытаний рам первой, РЖ-1 (а) и второй, РЖ-2 (б) серий
Figure 3. General view of the tests of the frames of the first (а) and the second (б) series

Результаты и обсуждение

Анализ результатов исследований опытных конструкций рам позволяет отметить следующее. Картина трещин при приложении проектной нагрузки и запроектного воздействия, вызывающих сложное сопротивление в конструкциях ригелей, носила пространственный характер (рис. 4 а, б) и коррелировалась с картиной трещин, полученной при испытаниях отдельных балок на кручение с изгибом в опытах [19]. На втором этапе испытаний, после приложения особого воздействия в виде внезапного удаления средней (рама РЖ-1) или крайней (рама РЖ-2) стойки, качественная картина образования пространственных трещин не изменилась (рис. 4 в, г). При этом предельная ширина раскрытия образовавшихся при проектной нагрузке трещин была превышена и образовались новые пространственные трещины в приопорных участках ригелей. После приложения особого воздействия продольная арматура практически достигает предела текучести, а в поперечной арматуре напряжения превышают временное сопротивление стали.

Значительные различия напряжений в продольной и поперечной арматуре, расположенной с разных сторон ригеля, и характер трещинообразования в конструкции (рис. 4) при проектной нагрузке свидетельствуют о сложном напряженном состоянии в приопорных зонах ригеля, испытывающего изгиб с кручением. После приложения особого воздействия произошло разрушение в наиболее напряженной приопорной зоне ригеля по одной из образовавшихся ранее пространственных трещин.

Сопоставительная оценка ширины раскрытия трещин и перемещений в сложнапряженных ригелях рамы при заданной эксплуатационной нагрузке и после особого воздействия приведены в таблице.

Для сложнапряженных конструкций ригелей выполнена оценка ширины раскрытия пространственных трещин на разных этапах нагружения конструкций (рис. 5). Установлено, что теоретические значения ширины раскрытия трещин, определенные по действующим нормам², более чем на 40 % мень-

² СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М.: Минстрой России, 2018. 152 с.

ше опытных значений. Из этого следует вывод о том, что при рассматриваемом сложном напряженном состоянии расчетные зависимости норм нуждаются в уточнении.

Анализ этих данных показывает, что в обеих опытных конструкциях рам при принятом армировании, испытанных на втором этапе на особое воздействие в виде удаления одной из колонн рамы, ширина раскрытия трещин и, соответственно, предельные деформации арматуры превышают критерии, установленные СП 385.1325800.2018. Значение предельного прогиба (1/84 и 1/35) не превысило нормируемую величину (1/30), установленную для особого воздействия. Следовательно, выполнение деформационных критериев особого предельного состояния для опытных конструкций рам при рассматриваемых воздействиях может быть обеспечено увеличением интенсивности поперечного армирования ригелей.

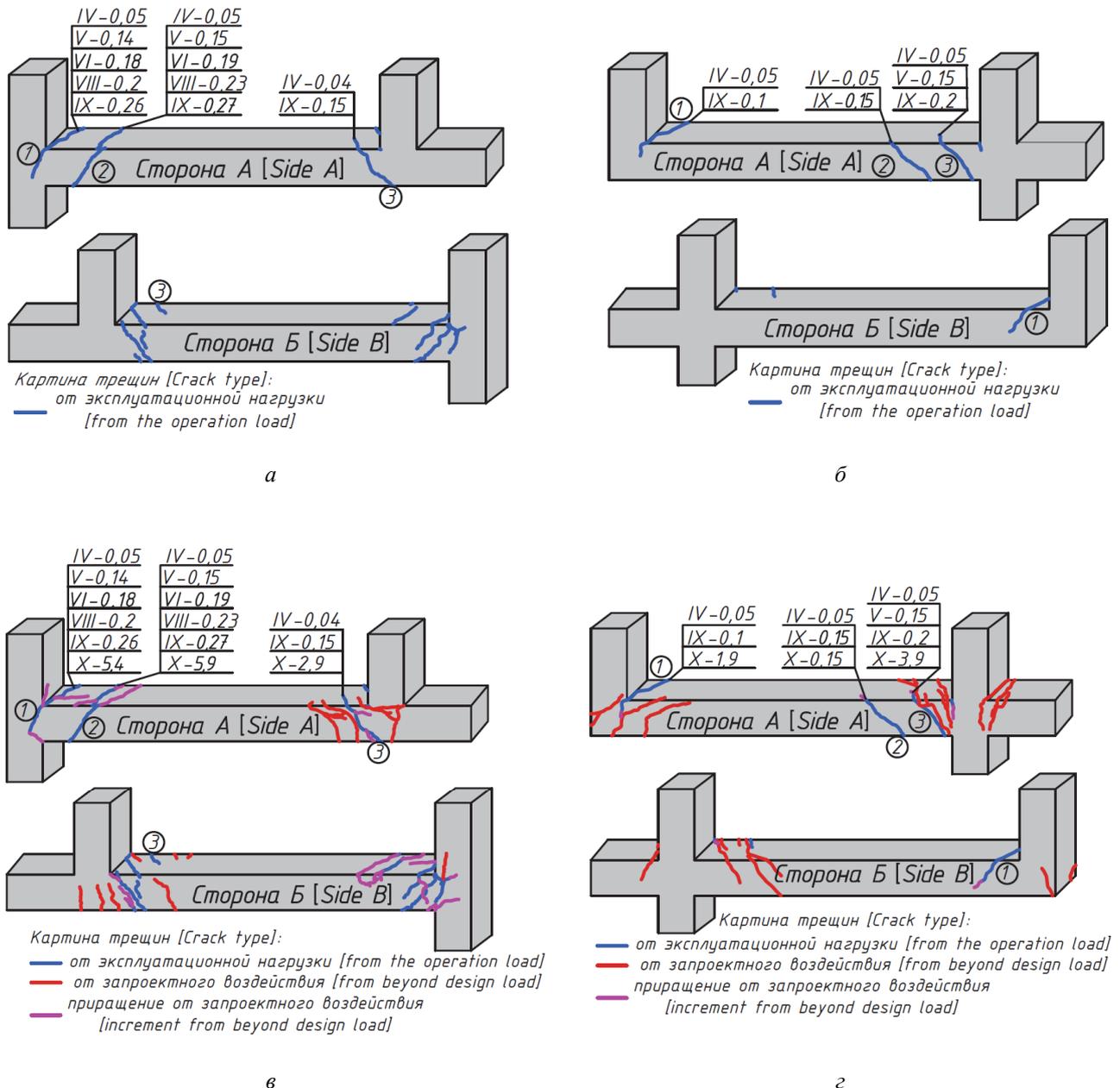


Рис. 4. Схема образования и ширина раскрытия трещин в конструкциях до (а, б) и после (в, з) запроектного воздействия рам первой, РЖ-1 (а, в) и второй, РЖ-2 (б, з) серий

Figure 4. Scheme of formation and width of crack opening in structures before (a, б) and after (в, з) beyond the design impact of the frames of the first (a, в) and the second (б, з) series

Ширина раскрытия трещин и относительные прогибы в сложнапряженных ригелях до и после запроектного воздействия

Серия рамы	Параметры деформирования	До удаления конструктивного элемента	После удаления конструктивного элемента
РЖ-1	Ширина раскрытия трещин, $a_{cr,ст}$, мм	0,19	Превышение критерия особого предельного состояния
	Относительный прогиб, f/l	1/954	1/84
РЖ-2	Ширина раскрытия трещин, $a_{cr,ст}$, мм	0,19	Превышение критерия особого предельного состояния
	Относительный прогиб, f/l	1/755	1/35

Width of crack opening and relative deflections in the complex-stressed crossbars before and after the beyond design impact

Frame series	Deformation parameters	Before removing the column	After removing the column
First	The width of crack opening, $a_{cr,ст}$, mm	0.19	Exceeding the criterion of a special limit state
	Relative deflections, f/l	1/954	1/84
Second	The width of crack opening, $a_{cr,ст}$, mm	0.19	Exceeding the criterion of a special limit state
	Relative deflections, f/l	1/755	1/35

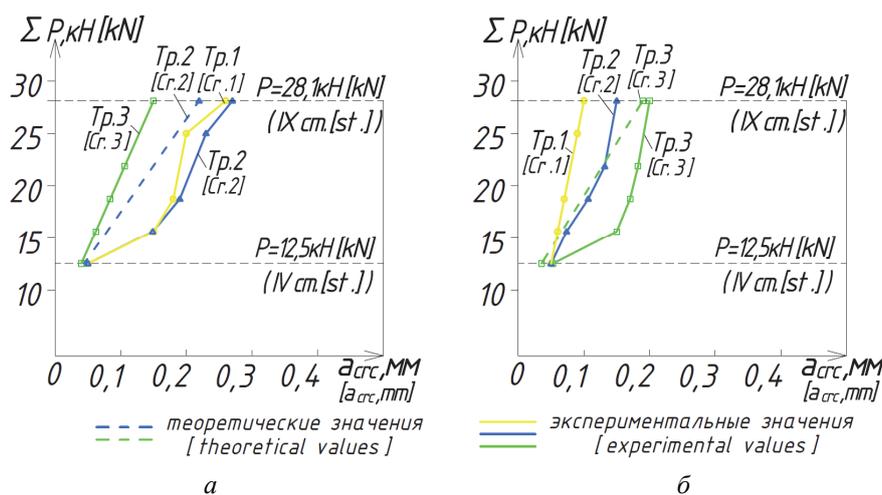


Рис. 5. Ширина раскрытия трещин в сложнапряженных ригелях рам первой, РЖ-1 (а) и второй, РЖ-2 (б) серий
Figure 5. The width of crack opening in the complex-stressed crossbars of the frames of the first (а) and the second (б) series

Заключение

Предложенные физическая модель железобетонной рамы, моделирующей фрагмент каркаса многоэтажного здания, элементы которого испытывают сложное напряженное состояние, а также методика ее испытаний позволили экспериментально определить параметры деформирования и разрушения таких конструкций в запредельных состояниях в условиях статико-динамического деформирования.

Анализом экспериментальных данных деформирования, трещинообразования и разрушения конструкций железобетонных опытных рам в предельных и запредельных состояниях установлены приращения прогибов, изменения картины трещинообразования и раскрытия трещин до и после запроектного воздействия.

Моделирование деформирования, трещинообразования и разрушения железобетонных рам в физически и конструктивно нелинейной постановке выполнено с использованием объемных конечных элементов и уровневых расчетных схем. При этом учитывалось изменение структуры сечений при образовании трещин и пространственный характер трещин в рассматриваемых сложнапряженных конструкциях.

Список литературы

1. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance / General Services Administration. Washington, 2016, 203 p.
2. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Чесноков Д.А. Защита многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С. 8–13.
3. Кодыш Э.Н. Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 95–101.
4. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. Pp. 122–149.
5. Травуш В.И., Федорова Н.В. Расчет параметра живучести рамно-стержневых конструктивных систем // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 1. С. 21–28.
6. Pham A.T., Tana K.H., Yu J. Numerical investigations on static and dynamic responses of reinforced concrete subassemblages under progressive collapse // *Engineering Structures*. 2017. Vol. 149. Pp. 2–20. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.042>
7. Alogla K., Weekes L., Augusthus-Nelson L. Theoretical assessment of progressive collapse capacity of reinforced concrete structures // *Magazine of Concrete Research*. 2017. Vol. 69. No. 3. Pp. 145–162.
8. Федорова Н.В., Кореньков П.А., Ву Н.Т. Методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зданий при аварийных воздействиях // *Строительство и реконструкция*. 2018. Т. 4. № 78. С. 42–52.
9. Kolchunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. Article 032037. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032037>
10. Федорова Н.В., Гуок Ф.Д., Чанг Н.Т. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 1 (87). С. 92–100.
11. Yu J., Tan K.H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages // *Engineering Structures*. 2013. Vol. 55. Pp. 90–106.
12. Xuan W., Wang L., Liu C., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical investigations on progressive collapse resistance of the concrete-filled square steel tubular column and steel beam frame under the middle column failure scenario // *Shock and Vibration*. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–12. <https://doi.org/10.1155/2019/2354931>
13. Lin K., Lu X., Li Y., Guan H. Experimental study of a novel multi-hazard resistant prefabricated concrete frame structure // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019. Vol. 119. Pp. 390–407.
14. Shan S., Li S., Xu S., Xie L. Experimental study on the progressive collapse performance of RC frames with infill walls // *Engineering Structures*. 2016. Vol. 111. Pp. 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.010>
15. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1425. Article 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012033>
16. Weng J., Lee C.K., Tan K.H., Lim N.S. Damage assessment for reinforced concrete frames subject to progressive collapse // *Engineering Structures*. 2017. Vol. 149. Pp. 147–160. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.038>
17. Генцев Г.А., Колчунов В.И., Клюева Н.В., Никулин А.И., Пятикрестовский К.П. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях. М.: АСВ, 2004. 216 с.
18. Колчунов В.И., Клюева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: АСВ, 2014. 208 с.
19. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Demyanov A.I., Bulkin S.A., Moskvotseva V.S. Results of experimental studies of high-strength fiber reinforced concrete beams with round cross-sections under combined bending and torsion // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020. Т. 16. № 4. С. 290–297. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-4-290-297>
20. Alkadi S.A., Fedorova N.V., Osovskiy O.E. Analysis of reinforced concrete space frame deformation with composite sections elements // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. Article 012033. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012033>
21. Демьянов А.И., Алькади С.А. Статико-динамическое деформирование железобетонных элементов пространственной рамы при их сложном сопротивлении // *Известия вузов. Строительство*. 2018. № 11. С. 20–33.
22. Демьянов А.И., Колчунов В.И., Сальников А.С., Михайлов М.М. Расчетные модели статико-динамического деформирования железобетонной конструкции при кручении с изгибом в момент образования пространственной трещины // *Строительство и реконструкция*. 2017. Т. 3. С. 13–22.
23. Демьянов А.И., Наумов Н.В., Колчунов В.И. Методика определения параметров деформирования и трещиностойкости железобетонных составных конструкций, испытывающих кручение с изгибом // *Известия вузов. Строительство*. 2018. № 7. С. 5–16.

References

1. *Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance*. Washington: General Services Administration; 2016. 203 p.
2. Kodysh E.N., Trekin N.N., Chesnokov D.A. Protection of multistory buildings from progressive collapse. *Industrial and Civil Engineering*. 2016;(6):8–13. (In Russ.)
3. Kodysh E.N. Designing the protection of buildings and structures from progressive collapse, taking into account the occurrence of a special limit state. *Industrial and Civil Engineering*. 2018;(10):95–101. (In Russ.)
4. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*. 2018;173:122–149.
5. Travush V.I., Fedorova N.V. Calculation of the parameter of survivability of frame-bar structural systems. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2017;(1):21–28. (In Russ.)
6. Pham A.T., Tana K.H., Yu J. Numerical investigations on static and dynamic responses of reinforced concrete sub-assemblages under progressive collapse. *Engineering Structures*. 2017;149:2–20. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.042>
7. Alogla K., Weekes L., Augustus-Nelson L. Theoretical assessment of progressive collapse capacity of reinforced concrete structures. *Magazine of Concrete Research*. 2017;69(3):145–162.
8. Fedorova N.V., Korenkov P.A., Ngoc V.T. Methodology for experimental studies of the deformation of monolithic reinforced concrete frames of buildings under emergency impacts. *Buildings and Reconstruction*. 2018;4(78):42–52. (In Russ.)
9. Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;753:032037.
10. Fedorova N.V., Guok F.D., Chang N.T. Experimental life studies of reinforced concrete frames with girders reinforced by indirect reinforcement. *Buildings and Reconstruction*. 2020;(1):92–100. (In Russ.)
11. Yu J., Tan K.H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages. *Engineering Structures*. 2013;55:90–106.
12. Xuan W., Wang L., Liu C., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical investigations on progressive collapse resistance of the concrete-filled square steel tubular column and steel beam frame under the middle column failure scenario. *Shock and Vibration*. 2019;2019:1–12. <https://doi.org/10.1155/2019/2354931>
13. Lin K., Lu X., Li Y., Guan H. Experimental study of a novel multi-hazard resistant prefabricated concrete frame structure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019;119:390–407. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.04.011>
14. Shan S., Li S., Xu S., Xie L. Experimental study on the progressive collapse performance of RC frames with infill walls. *Engineering Structures*. 2016;111:80–92. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.010>
15. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1425:012033.
16. Weng J., Lee C.K., Tan K.H., Lim N.S. Damage assessment for reinforced concrete frames subject to progressive collapse. *Engineering Structures*. 2017;149:147–160. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.038>
17. Geniev G.A., Kolchunov V.I., Klyueva N.V. *Strength and deformability of reinforced concrete structures under non-design impacts*. Moscow: ASV Publ.; 2004. (In Russ.)
18. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. *Survivability of buildings and structures under non-design impacts*. Moscow: ASV Publ.; 2014. (In Russ.)
19. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Demyanov A.I., Bulkin S.A., Moskovtseva V.S. Results of experimental studies of high-strength fiber reinforced concrete beams with round cross-sections under combined bending and torsion. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(4):290–297. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-4-290-297>
20. Alkadi S.A., Fedorova N.V., Osovskiy O.E. Analysis of reinforced concrete space frame deformation with composite sections elements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;456:012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012033>
21. Demyanov A.I., Alkadi S.A., Static-dynamic deformation of reinforced concrete elements of the spatial frame with their complex resistance. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2018;(11):20–33. (In Russ.)
22. Demyanov A.I., Kolchunov V.I., Salnikov A.S., Mikhailov M.M. Computational models of static-dynamic deformation of a reinforced concrete structure during torsion with bending at the moment of formation of a spatial crack. *Buildings and Reconstruction*. 2017;3:13–22. (In Russ.)
23. Demyanov A.I., Naumov N.V., Kolchunov V.I. Method for determining the parameters of deformation and crack resistance of reinforced concrete composite structures undergoing torsion with bending. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2018;(7):5–16. (In Russ.)