

DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-4-297-306
 УДК 24.012.045


НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Деформирование железобетонных каркасов многоэтажных зданий в запредельных состояниях при особых воздействиях

В.И. Колчунов^{1,2} , О.Б. Бушова¹  

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

²Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация

 bushova96@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 21 марта 2022 г.

Доработана: 14 июля 2022 г.

Принята к публикации: 20 июля 2022 г.

Для цитирования

Колчунов В.И., Бушова О.Б. Деформирование железобетонных каркасов многоэтажных зданий в запредельных состояниях при особых воздействиях // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 4. С. 297–306. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-4-297-306>

Аннотация. С целью повышения пластичности при разрушении по наклонным сечениям и защиты от прогрессирующего обрушения железобетонных каркасов многоэтажных зданий предложен вариант перекрестного армирования ригелей в таких каркасах. Приведены результаты численного исследования железобетонного каркаса многоэтажного здания при особом воздействии в виде внезапного гипотетического удаления из работы одной из колонн. Моделирование деформирования каркаса выполнено в трех вариантах: каркас всего здания в стержневой постановке, фрагмент здания в зоне удаления колонны и фрагмент зоны возможного локального разрушения, примыкающей к удаляемой колонне с применением объемных конечных элементов. Полученные результаты показали эффективность предложенного варианта перекрестного армирования ригелей для защиты многоэтажного каркасного здания от прогрессирующего обрушения, а также эффективность использования предложенного варианта уровневых моделей для расчета параметров статико-динамического деформирования каркасов многоэтажных зданий при рассматриваемых особых воздействиях.

Ключевые слова: железобетонный каркас, здание, прогрессирующее обрушение, армирование, наклонные стержни

Колчунов Виталий Иванович, действительный член Российской академии архитектуры и строительных наук, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой уникальных зданий и сооружений, факультет строительства и архитектуры, Юго-Западный государственный университет, Российская Федерация, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0001-5290-3429, Scopus Author ID: 57219004839, eLIBRARY SPIN-код: 4512-6499; asiorel@mail.ru

Бушова Олеся Борисовна, аспирант, кафедра железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID 0000-0001-8748-5933, eLIBRARY SPIN-код: 4054-3941; bushova96@mail.ru

© Колчунов В.И., Бушова О.Б., 2022




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

Deformation of reinforced concrete frames of multi-storey buildings in extreme conditions under special influences

Vitaly I. Kolchunov^{1,2} , Olesya B. Bushova¹  

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

²Southwest State University, Kursk, Russian Federation

 bushova96@mail.ru

Article history

Received: March 21, 2022

Revised: July 14, 2022

Accepted: July 20, 2022

For citation

Kolchunov V.I., Bushova O.B. Deformation of reinforced concrete frames of multi-storey buildings in extreme conditions under special influences. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(4):297–306. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-4-297-306>

Abstract. In order to increase plasticity during destruction along inclined sections and to protect against progressive collapse of reinforced concrete frames of multi-storey buildings, a variant of cross reinforcement of crossbars in such frames is proposed. The results of a numerical study of the reinforced concrete frame of a multi-storey building with a special impact in the form of an extraordinary hypothetical removal from the work of one of the columns are presented. The modeling of the deformation of the frame is carried out in three versions: the frame of the entire building in the rod setting, a fragment of the building in the column removal zone and a fragment of crossbars adjacent to the column being removed using volumetric finite elements. The obtained results showed the effectiveness of the proposed variant of cross-reinforcement of crossbars to protect a multi-storey frame building from progressive collapse, as well as the effectiveness of using the proposed variant of three-level models for calculating the parameters of static-dynamic deformation of the carcasses of multi-storey buildings under the considered special impacts.

Keywords: reinforced concrete frame, building, progressive collapse, reinforcement, inclined rods

Введение

Несмотря на значительное в последние годы улучшение конструктивных систем каркасов зданий и сооружений их катастрофические структурные отказы в условиях постоянно возрастающих видов природных и техногенных воздействий остаются печальной реальностью [1–4]. Постоянно увеличивающиеся виды и интенсивность таких воздействий требуют совершенствования конструктивных решений, обеспечивающих защиту от них.

Внезапное изменение конструктивной системы зданий вследствие разрушения несущей опоры (колонны) ведет к прогрессирующему обрушению здания и, как результату, аварии и даже потери человеческих жизней. Данная проблема, судя по все увеличивающемуся потоку публикаций, до сих пор имеет острый характер.

На основе новых теоретических и экспериментальных отечественных [1–9] и зарубежных [10–15] научных исследований в настоящее время предложены различные способы защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения при внезапном выключении из работы одной из несущих конструкций. Известны решения, в которых предлагается: увеличить сечения конструктивных элементов несущих систем каркасов зданий [1; 16]; установить в ригелях непрерывное двойное верхнее и нижнее рабочее армирование [1; 16]; использовать дополнительно косвенное армирование элементов [4]; устанавливать предварительно напряженную арматуру, расположенную в двух уровнях [5; 17]; обеспечить надежную, с учетом перераспределения силовых потоков, анкеровку арматуры в узлах соединения ригелей с колоннами [18] и др. Однако способы защиты железобетонных каркасов зданий от прогрессирующего обруше-

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; Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5290-3429, Scopus Author ID: 57219004839; eLIBRARY SPIN-code: 4512-6499; asiorel@mail.ru

Olesya B. Bushova, postgraduate student, Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID 0000-0001-8748-5933, eLIBRARY SPIN-code: 4054-3941; bushova96@mail.ru

ния по наклонным сечениям, остаются недостаточно изученными. В то же время разрушение по наклонным сечениям носит хрупкий характер, что создает дополнительную опасность при внезапном изменении силовых потоков в сооружении.

В связи с этим целями работы стали: 1) исследование статико-динамического деформирования железобетонных каркасов многоэтажных зданий с разрушением по наклонным сечениям ригелей; 2) разработка предложений по их защите от прогрессирующего обрушения. В соответствии с данными целями были сформулированы и решены следующие задачи:

- предложен вариант армирования приопорных зон ригелей многоэтажной рамы, повышающий их пластичность при разрушении по наклонным сечениям;
- разработан алгоритм расчета с уровневými расчетными схемами для исследования статико-динамического деформирования рассматриваемых конструктивных систем;
- проведены численные исследования и выполнена оценка эффективности перекрестного армирования приопорных зон ригелей для повышения защиты каркасов многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения.

Материалы и методы

В [19] на простейшей модели железобетонной рамы показана целесообразность перекрестного армирования приопорных зон ригелей по отношению к традиционно используемой схеме армирования поперечными стержнями. Предложенный вариант перекрестного армирования существенно повышает силовое сопротивление ригелей рамы при внезапном запроектом воздействии в виде выключения одной из несущих колонн, когда происходит перераспределение усилий, меняется знак внутренних усилий на отдельных участках ригелей и принятый на основании проектного расчета традиционный вариант армирования в виде поперечных или односторонних наклонных стержней становится неэффективным. В связи с этим в работе предложен вариант схемы армирования приопорных зон ригелей железобетонных каркасов многоэтажных зданий, который позволяет в конструктивно нелинейных системах при изменении силовых потоков обеспечивать их защиту от прогрессирующего обрушения. Представлен вариант схемы перекрестного армирования приопорных зон таких конструктивных систем и проведены численные исследования по оценке эффективности данного варианта схемы армирования.

Предлагаемая схема конструктивного решения монолитного железобетонного каркаса и схема армирования приопорной зоны показаны на рис. 1 и 2. Перекрытия выполнены в виде монолитных ребристых плит, опертых по контуру на монолитные железобетонные ригели. Продольное армирование ригелей принято двойной арматурой в верхней и нижней зонах сечения. Поперечное армирование выполнено двусторонними перекрестными наклонными стержнями (рис. 2).

В соответствии с требованиями действующих российских и американских норм¹ в качестве особого запроектом воздействия рассмотрен случай удаления из конструктивной системы здания крайней колонны первого этажа (см. удаляемый элемент на рис. 1, б). Рассмотрено три варианта моделирования каркаса многоэтажного здания.

В первом варианте расчета моделирование каркаса всего здания выполнялось стержневыми конечными элементами, армирование задавалось с помощью назначения типов заданного армирования. Суммарная равномерно распределенная нагрузка на диск перекрытия составляла 8 кН/м^2 .

Во втором варианте производился расчет подконструкции в виде фрагмента первого каркаса здания с использованием для этого фрагмента объемных конечных элементов с детальной прорисовкой армирования конструктивных элементов. К рассматриваемой подконструкции дополнительно прикладывались усилия, полученные по первому варианту расчета каркаса всего здания, и соответствующим способом моделировались граничные условия.

В третьем варианте расчет производился аналогично, с использованием подконструкции в виде одноэтажного фрагмента из объемных элементов, но размеры этой подконструкции определялись установленными нормами² – в рассматриваемом случае пролетами, примыкающими к удаляемой колонне. Соответственно моделировалось на контуре подконструкции действие усилий, полученных из расчета всего каркаса здания, и граничные условия.

¹ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. М.: Стандартинформ, 2018; GSA. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance. Washington, 2016. 203 p.

² СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. М.: Стандартинформ, 2018.

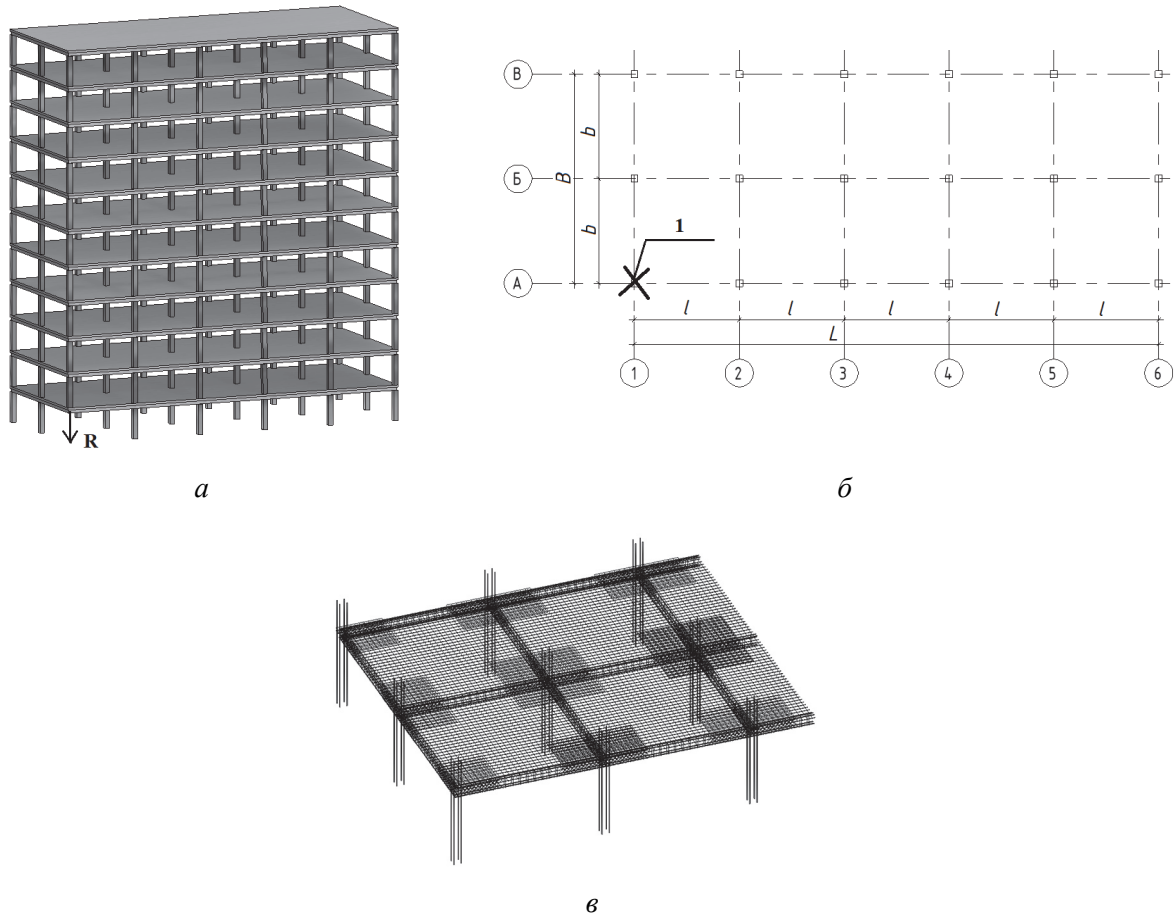


Рис. 1. Конструктивная схема здания:

a – общий вид каркаса; *б* – план здания с удаляемой колонной 1; *в* – схема армирования перекрытия

Figure 1. Structural scheme of the building:

a – general view of the frame; *б* – building plan with column 1 to be removed; *в* – floor reinforcement scheme

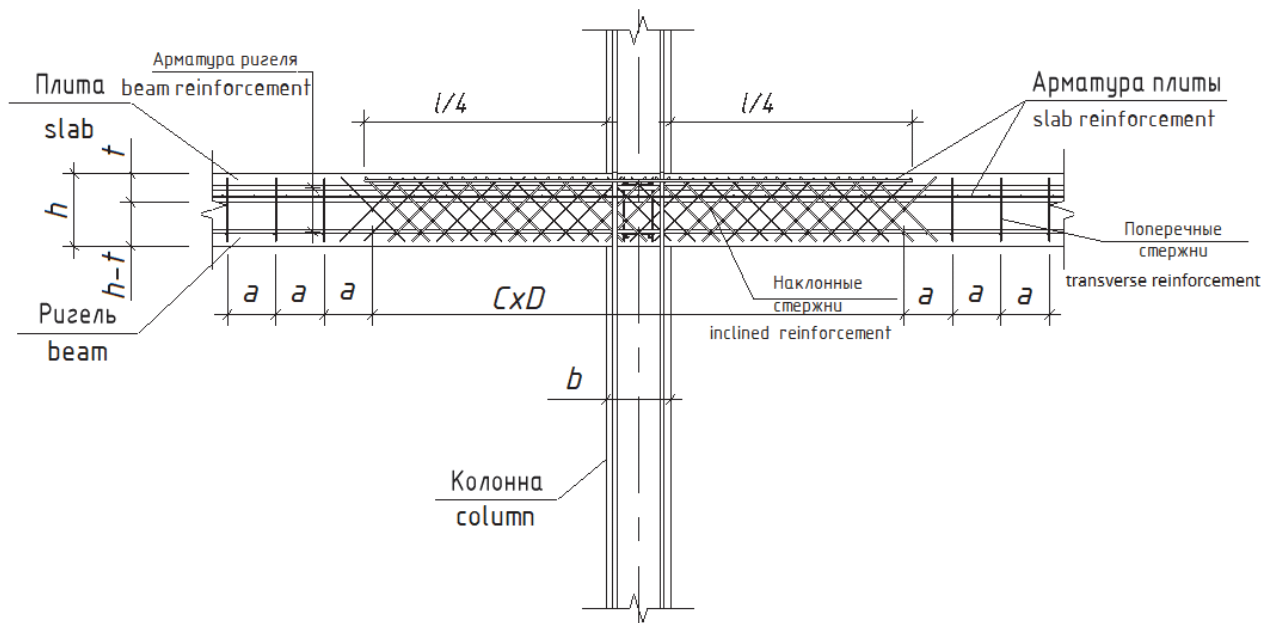


Рис. 2. Схема армирования приопорной зоны ригеля двухсторонними перекрестными наклонными арматурными стержнями
Figure 2. Scheme of reinforcement of the support area of the crossbar with double-sided cross inclined reinforcing rods

Все три варианта расчета проводились в два этапа. На первом этапе в ПК ЛИРА производился расчет конструктивной системы здания на заданную эксплуатационную нагрузку и определялось напряженно-деформированное состояние в элементах всей конструктивной системы по так называемой первичной схеме расчета³ (до выключения колонны). На втором этапе производился расчет по вторичной расчетной схеме – при приложении эксплуатационной нагрузки и особого воздействия в виде внезапного удаления из каркаса здания крайней правой стойки первого этажа.

Результаты и обсуждение

По результатам расчета получены характерные картины перемещений по первичной и вторичной расчетным схемам (табл. 1 и рис. 3).

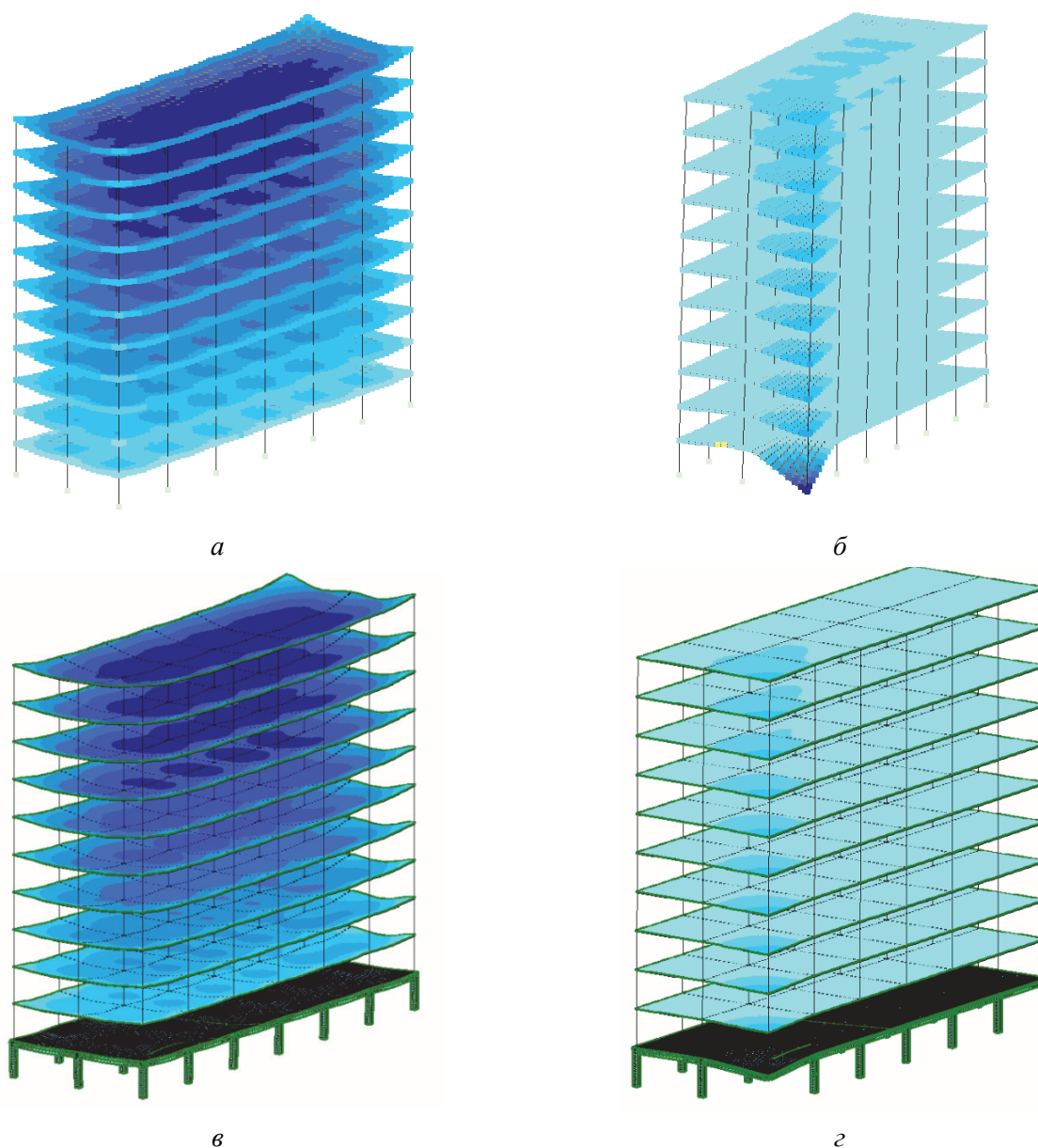


Рис. 3. Мозаика перемещения элементов каркаса здания при расчете по первому (*а, б*) и второму (*в, г*) вариантам моделирования каркаса здания до (*а, в*) и после (*б, г*) выключения опоры
Figure 3. Mosaic of moving elements of the building frame when calculating the first (*а, б*) and second (*в, г*) variations of modeling the building frame before (*а, в*) and after (*б, г*) turning off the support

³ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. М.: Стандартинформ, 2018.

Таблица 1

Прогибы по первому, второму и третьему варианту расчета

Вариант расчета и расчетная схема		Максимальные прогибы центра ригеля, примыкающего к удаляемой колонне, мм	Прогиб ригеля над удаляемой колонной, мм
Первый вариант расчета	Первичная расчетная схема	3,33	86,1
	Вторичная расчетная схема		
Второй вариант расчета	Первичная расчетная схема	3,39	87,6
	Вторичная расчетная схема		
Третий вариант расчета	Первичная расчетная схема	3,37	86,7
	Вторичная расчетная схема		

Table 1

Deflections according to the first, second and third calculation options

Calculation option and calculation scheme		Maximum deflections of the center of the crossbar adjacent to the removed column, mm	Deflection of the crossbar over the column to be removed, mm
The first calculation option	Primary settlement scheme	3.33	86.1
	Secondary settlement scheme		
The second calculation option	Primary settlement scheme	3.39	87.6
	Secondary settlement scheme		
The third calculation option	Primary settlement scheme	3.37	86.7
	Secondary settlement scheme		

Из приведенных в табл. 1 максимальных значений перемещений перекрытия над первым этажом, полученным при расчете по первому (a , b) и второму (e , z) вариантам моделирования каркаса здания до и после особого воздействия, следует, что предложенный вариант моделирования всего здания стержневыми конечными элементами, с использованием объемных конечных элементов и детальной прорисовкой армирования конструктивных элементов только для подконструкции в виде одноэтажного фрагмента каркаса здания, включающего и зону возможного локального разрушения, практически не снижает точность определения перемещений в зоне, примыкающей к удаляемой колонне. Отсюда можно сделать вывод о возможности и эффективности комбинированного моделирования нелинейно деформируемых железобетонных каркасов многоэтажных и высотных зданий при их расчете на живучесть методом конечных элементов с использованием подконструкций, позволяющих значительно снизить время и объем вычислений.

Расчет по третьему варианту моделирования подконструкции каркаса здания с использованием подконструкции в виде одноэтажного фрагмента из объемных элементов, но с размерами этой подконструкции в плане ограниченной пролетами, примыкающими к удаляемой колонне, позволило детализировать напряженно-деформированное состояние в бетоне, продольной и поперечной арматуре ригелей каркаса в зоне возможного локального разрушения (зоне примыкающей к удаляемой колонне). Приведены характерные картины распределения перемещений (рис. 4) продольных напряжений в сжатом бетоне при опорных зон ригеля, картины трещин (рис. 5), напряжения в наиболее напряженных продольных и наклонных стержнях ригеля нижнего этажа каркаса здания (рис. 6). Количественные значения результатов этого расчета даны в табл. 2.

Из анализа полученных продольных напряжений в наиболее напряженных зонах ригеля фрагмента можно видеть, что после особого воздействия качественно меняется картина напряженного состояния в рассматриваемой зоне.

Особый интерес представляют картины напряженного состояния в продольной и поперечной арматуре в наиболее напряженной приопорной зоне ригеля фрагмента конструктивной системы в плане ограниченной пролетами, примыкающими к удаляемой колонне. Как видно из рис. 6, после особого воздействия и изменения знака момента в рассматриваемом конструктивном элементе напряженное состояние в продольной и поперечной арматуре качественно меняется. В то же время предложенный вариант поперечного армирования двусторонними перекрестными наклонными стержнями обеспечивает деформационные критерии особого предельного состояния, установленные⁴ и для прогибов, и для предельных деформаций бетона и арматуры (см. табл. 2).

⁴ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. М.: Стандартинформ, 2018.

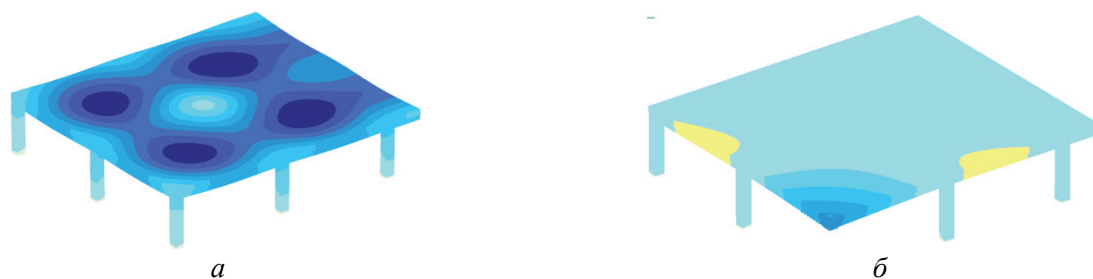


Рис. 4. Мозаика перемещения здания по третьему варианту расчета:
a – первичная схема нагружения; *б* – вторичная схема нагружения
Figure 4. Mosaic of building movement according to the third calculation option:
a – primary loading scheme; *б* – secondary loading scheme

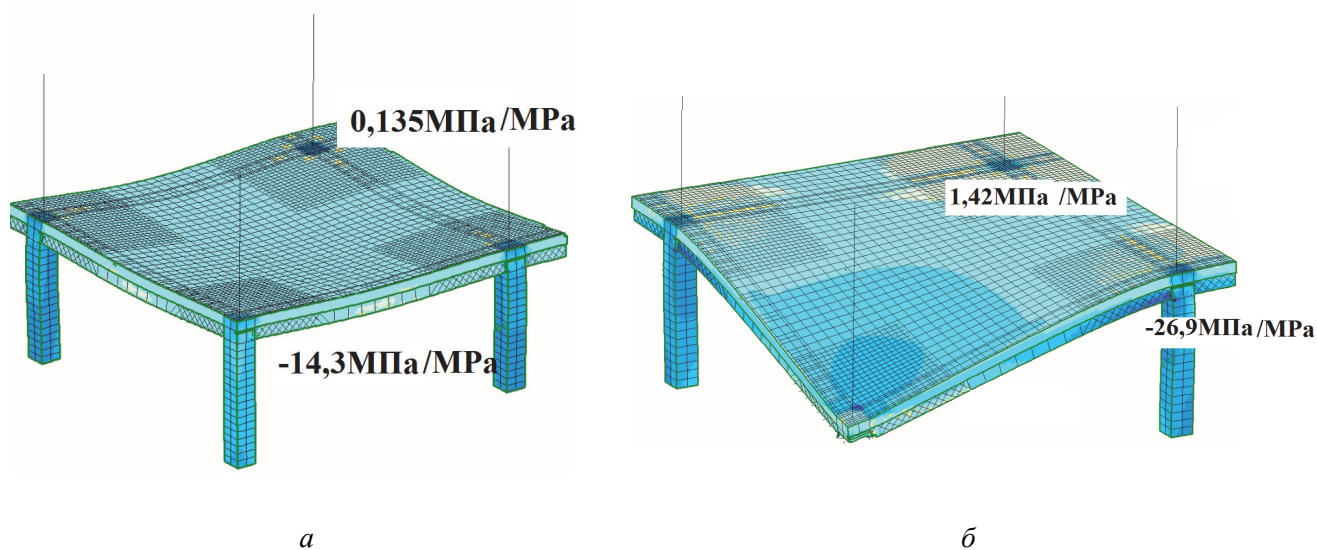


Рис. 5. Картина напряженного состояния в бетоне в приопорных узлах при расчете:
a – по первичной схеме нагружения; *б* – по вторичной схеме нагружений
Figure 5. The picture of the stress state in concrete in the supporting nodes when calculating according to:
a – the primary loading scheme; *б* – the secondary loading scheme

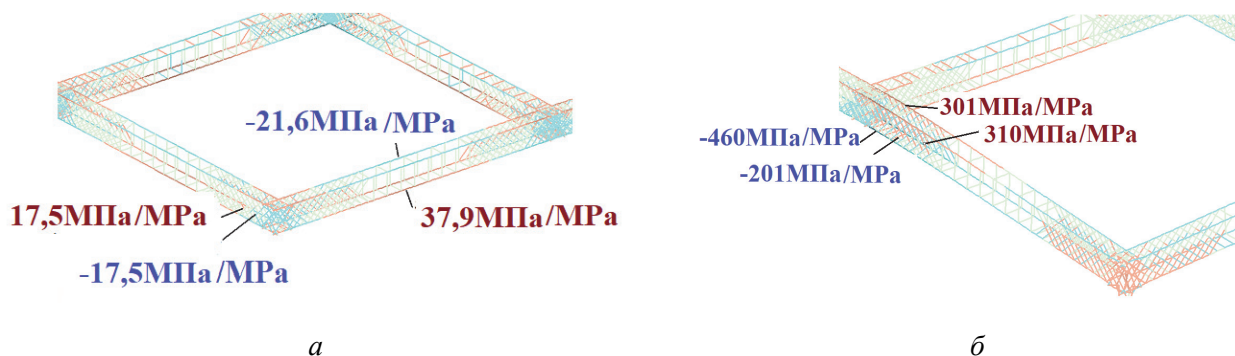


Рис. 6. Напряжения в наиболее напряженных поперечных и продольных арматурных стержнях ригеля нижнего этажа каркаса здания при расчете:
a – по первичной схеме; *б* – по вторичной схеме
Figure 6. Stresses in the most stressed transverse and longitudinal reinforcing bars of the crossbar of the lower floor of the building frame when calculated according to:
a – the primary scheme; *б* – the secondary scheme

Таблица 2

**Максимальные прогибы, напряжения и деформации в бетоне и арматуре ригеля
до и после удаления угловой колонны**

Наименование	Комбинированная расчетная модель (вариант 3)	
	Первичная расчетная схема	Вторичная расчетная схема
Максимальные прогибы, мм	3,37	86,7
Максимальные напряжения в сжатом бетоне, МПа	-14,3	-26,6
Максимальные напряжения в наклонных стержнях, МПа	17,5	-110
	-17,5	470
Относительные деформации в наклонных стержнях	0,0001	0,00055
	0,0001	0,00235
Максимальные напряжения в продольных стержнях, МПа	Верхняя арматура -37,9	Верхняя арматура -183
	Нижняя арматура -21,6	Нижняя арматура -273
Относительные деформации в продольных стержнях	0,00019	0,001
	0,0001	0,00136

Table 2

**Maximum deflections, stresses and deformations in concrete and crossbar reinforcement
before and after removal of the corner column**

Designation	Combined calculation model (option 3)	
	Primary settlement scheme	Secondary settlement scheme
Maximum deflections, mm	3.37	86.7
Maximum stresses in compressed concrete, MPa	-14.3	-26.6
Maximum stresses in inclined reinforcement, MPa	17.5	-110
	-17.5	470
Relative deformations in inclined reinforcement	0.0001	0.00055
	0.0001	0.00235
Maximum stresses in longitudinal reinforcement, MPa	Upper reinforcement -37.9	Upper reinforcement -183
	Lower reinforcement -21.6	Lower reinforcement -273
Relative deformations in longitudinal reinforcement	0.00019	0.001
	0.0001	0.00136

Заключение

Предложена схема перекрестного армирования ригелей железобетонных каркасов многоэтажных зданий, обеспечивающая сопротивление конструктивной системы железобетонного каркаса многоэтажного здания при особом воздействии, вызванным удалением одной из несущих конструкций первого этажа.

На основе проведенного численного анализа деформирования железобетонных рамных систем многоэтажного каркаса здания по трем различным вариантам расчетных схем установлена возможность и эффективность комбинированного моделирования нелинейно деформируемых каркасов при их расчете на живучесть методом конечных элементов с использованием подконструкций, позволяющих значительно снизить время и объем вычислений.

Численным анализом деформирования железобетонных рамных систем многоэтажного каркаса здания с предложенной схемой армирования приопорных зон ригелей показана целесообразность использования такой схемы армирования для защиты от прогрессирующего обрушения при особых и аварийных воздействиях.

Список литературы

1. Алмазов В.О., Као Зуи Кхой. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов. М.: Изд-во АСВ, 2013. 128 с.
2. Fialkoa S.Yu., Kabantsevb O.V., Perelmuter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // Magazine of Civil Engineering. 2021. Vol. 102. No. 2. Article 10214. <https://doi.org/10.34910/MCE.102.14>

3. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Чесноков Д.А. Защита многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С. 8–13.
4. Федорова Н.В., Фан Д.К., Нгуен Т.Ч. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием // Строительство и реконструкция. 2020. № 1 (87). С. 92–100. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-87-1-92-100>
5. Ильющенко Т.А., Колчунов В.И., Федоров С.С. Трещиностойкость преднапряженных железобетонных рамно-стержневых конструкций при особых воздействиях // Строительство и реконструкция. 2021. № 1 (93). С. 74–84. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-93-1-74-84>
6. Федорова Н.В., Кореньков П.А., Ву Н.Т. Методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зданий при аварийных воздействиях // Строительство и реконструкция. 2018. № 4 (78). С. 42–52.
7. 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.
8. 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. Vol. 753. Article 032037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032037>
9. 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>
10. 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. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.082>
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. Deng X.-F., Liang S.-L., Fu F., Qian K. Effects of high-strength concrete on progressive collapse resistance of reinforced concrete frame // Journal of Structural Engineering. 2020. Vol. 146. Issue 6. Article 04020078. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002628](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002628)
13. 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. Article 2354931. <https://doi.org/10.1155/2019/2354931>
14. Alogla K., Weekes L., Augustus-Nelson L. Theoretical assessment of progressive collapse capacity of reinforced concrete structures // Magazine of Concrete Research. 2017. Vol. 69. No. 3. Pp. 145–162.
15. Shan S., Li Sh., Xu Sh., 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>
16. Ву Нгок Туен. Исследование живучести железобетонной конструктивно нелинейной рамно-стержневой системы каркаса многоэтажного здания в динамической постановке // Строительство и реконструкция. 2020. Т. 90. № 4. С. 73–84.
17. Федорова Н.В., Халина Т.А. Исследование динамических догрузений в железобетонных конструктивных системах при внезапных структурных перестройках // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 8. С. 32–36.
18. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: Изд-во АСВ, 2004. 472 с.
19. Колчунов В.И., Бушова О.Б., Кореньков П.А. Деформирование и разрушение железобетонных рам с ригелями, армированными наклонными стержнями, при особых воздействиях // Строительство и реконструкция. 2022. № 1. С. 18–28.

References

1. Almazov V.O., Kao Zui Khoi. *Dynamics of progressive destruction of monolithic multi-storey frames*. Moscow: ASV Publ.; 2013. (In Russ.)
2. Fialkoa S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Civil Engineering Journal*. 2021;102(2):10214. <https://doi.org/10.34910/MCE.102.14>
3. Kodysh E.N., Trekin N.N., Chesnokov D.A. Protection of multi-storey buildings from progressive collapse. *Industrial and Civil Construction*. 2016;(6):8–13. (In Russ.)
4. Fedorova N.V., Fan D.K., Nguyen T.Ch. Experimental studies of the survivability of reinforced concrete frames with rigs reinforced with indirect reinforcement. *Construction and Reconstruction*. 2020;(1):92–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-87-1-92-100>
5. Ilyushenko T.A., Kolchunov V.I., Fedorov S.S. Crack resistance of prestressed reinforced concrete frame-rod structures under special influences. *Construction and Reconstruction*. 2021;(1):74–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-93-1-74-84>
6. Fedorova N.V., Korenkov P.A., Wu N.T. Methodology of experimental studies of deformation of monolithic reinforced concrete frames of buildings under emergency impacts. *Construction and Reconstruction*. 2018;(4):42–52. (In Russ.)

7. Kodysh E.N. Designing the protection of buildings and structures from progressive collapse, taking into account the occurrence of a special limit condition. *Industrial and Civil Construction*. 2018;(10):95–101. (In Russ.)
8. Kolkunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and destruction of a monolithic reinforced concrete frame under accidental impacts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;753:032037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032037>
9. Fedorova N.V., Ngok V.T. Deformation and destruction of monolithic reinforced concrete frames under special impacts. *Physical Journal: A Series of Conferences*. 2019:1425:012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012033>
10. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu H. Research and practice of progressive destruction and strength of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*. 2018;173:122–149. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.082>
11. Yu. J., Tan K.Kh. Experimental and numerical research resistance to gradual destruction of nodes of reinforced concrete beam columns. *Engineering Structures*. 2013;55:90–106.
12. Deng H.-F., Liang S.-L., Fu F., Qian K. The influence of high-strength concrete on the stability of a reinforced concrete frame to gradual destruction. *Journal of Construction Engineering*. 2020;146(6):04020078. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002628](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002628)
13. Xuan W., Wang L., Liu K., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical studies of resistance to gradual destruction of a square steel tubular column filled with concrete and a steel beam frame under the scenario of destruction of the middle column. *Shock and Vibration*. 2019;2019:2354931. <https://doi.org/10.1155/2019/2354931>
14. Alogla K., Weeks L., Augustus-Nelson L. Theoretical assessment of the ability of reinforced concrete structures to progressive destruction. *Journal of Concrete Research*. 2017;69(3):145–162.
15. Shan S., Li Sh., Xu Sh., Xie L. Experimental study of the characteristics of progressive destruction of RC frames with filling walls. *Engineering Structures*. 2016;111:80–92. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.010>
16. Wu Ngoc Tuen. Study of the survivability of a structurally nonlinear reinforced concrete frame-rod frame system of a multi-storey building in a dynamic formulation. *Construction and Reconstruction*. 2020; 90(4):73–84. (In Russ.)
17. Fedorova N.V., Khalina T.A. Investigation of dynamic overloads in reinforced concrete structural systems during emergency structural alterations. *Industrial and Civil Construction*. 2017;(8):32–36. (In Russ.)
18. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. *Computational models of the strength resistance of reinforced concrete*. Moscow: ASV Publ.; 2004. (In Russ.)
19. Kolchunov V.I., Bushova O.B., Korenkov P.A. Deformation and destruction of reinforced concrete frames with crossbars reinforced with inclined rods, under special influences. *Construction and Reconstruction*. 2022;(1):18–28. (In Russ.)