

В.И. КОЛЧУНОВ^{1,2,3}, О.Б. БУШОВА², П.А. КОРЕНЬКОВ^{1,4}

¹ФГБУ "Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук", г. Москва, Россия

²ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

³ФГБОУ ВО "Юго-Западный государственный университет" (ЮЗГУ), г. Курск, Россия

⁴ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь, Россия

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМ С РИГЕЛЯМИ, АРМИРОВАННЫМИ НАКЛОННЫМИ СТЕРЖНЯМИ, ПРИ ОСОБЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аннотация. Приведена методика экспериментальных и численных исследований железобетонных рамных конструкций с ригелями, армированными наклонными стержнями, при особых воздействиях. Основной задачей этих исследований являлось определение характера деформирования, трещинообразования и разрушения таких конструкций при особом воздействии, вызванном внезапным удалением одной из конструкций и, как следствие, перераспределением силовых потоков в них. Для повышения живучести и защиты исследуемой конструктивной системы от прогрессирующего обрушения, при количественном и качественном изменении усилий в ее элементах, предложено на приопорных участках конструкций ригелей рамной системы устанавливать поперечное армирование из наклонных арматурных стержней в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Параметры такого армирования и параметры заложенные в расчетную модель конструкции рамы при рассматриваемых статическом нагружении на первом этапе и динамическом догружении на втором этапе, определены численным моделированием, с использованием программного комплекса Ansys. На этой основе выполнено обоснование принятых конструктивных решений конструкций рам для разработки программы проведения экспериментальных исследований таких конструкций при особых воздействиях.

Ключевые слова: методика, экспериментальное исследование, расчетная схема, железобетонная рама, поперечное армирование, прогрессирующее обрушение.

V.I. KOLCHUNOV^{1,2,3}, O.B. BUSHOVA², P.A. KORENKOV^{1,4}

¹Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia

²Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

³South-West State University, Kursk, Russia

⁴V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

METHODS OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE FRAMES OF MULTI-STOREY BUILDINGS UNDER SPECIAL INFLUENCES

Abstract. The method of experimental and numerical studies of reinforced concrete frame structures with crossbars reinforced with inclined rods under special influences is given. The main objective of these studies was to determine the nature of deformation, cracking and destruction of such structures under special impact caused by the sudden removal of one of the structures and, as a consequence, the redistribution of force flows in them. To increase the survivability and protection of the studied structural system from progressive collapse, with a quantitative and qualitative change in the forces in its elements, it is proposed to install transverse reinforcement from inclined reinforcing rods in two mutually perpendicular directions on the supporting sections of the frame system crossbars.

© Колчунов В.И., Бушова О.Б., Кореньков П.А., 2022

The parameters of such reinforcement and the parameters embedded in the design model of the frame structure under consideration for static loading at the first stage and dynamic loading at the second stage are determined by numerical modeling using the Ansys software package. On this basis, the justification of the adopted design decisions of frame structures for the development of a program for conducting experimental studies of such structures under special influences was carried out.

Keywords: methodology, experimental study, design scheme, reinforced concrete frame, transverse reinforcement, progressive collapse.

1. Введение

В последние два десятилетия вопрос защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения привлекает все больше внимание ученых строительной отрасли. Так, на основе новых теоретических и экспериментальных исследований в отечественных [1-9] и зарубежных [10-15] научных публикациях предложены различные способы защиты железобетонных каркасов зданий от прогрессирующего обрушения при особых воздействиях. Например, предлагается увеличить сечения конструктивных элементов несущих каркасов зданий [1, 16], установить в ригелях непрерывное двойное верхнее и нижнее рабочее армирование [1, 16], установить косвенное армирование [4], использовать предварительное напряжение арматуры в двух уровнях [5, 17], обеспечить надежную анкеровку арматуры в узлах соединения ригелей с колоннами [18] и другие конструктивные решения. Однако, вопросы, связанные с обеспечением защиты железобетонных каркасов зданий от прогрессирующего обрушения по наклонным сечениям, для рассматриваемых конструктивных систем, остаются практически мало изученными. В то же время, в ряде недавних исследований показано, что исчерпание несущей способности железобетонных элементов по наклонным сечениям при особых воздействиях возможно, и такие исследования актуальны [19, 20]. При этом установлено [21], что разрушение конструкций ригелей многоэтажных рам в зонах их сопряжения с колонной по наклонным сечениям может быть хрупким и, соответственно, более опасным при прогрессирующем обрушении. Отсюда следует, что существует необходимость в развитии этих исследований для создания способов защиты конструктивных систем от внезапного изменения силовых потоков при рассматриваемых воздействиях.

Поэтому целью работы явилось изучение особенностей деформирования и разрушения железобетонных рам с ригелями, армированными наклонными стержнями, для разработки способа усиления приопорных зон ригелей железобетонных каркасов многоэтажных зданий, разработка алгоритма и проведение численных исследований для оценки эффективности предложенного способа, а также методики и программы его экспериментальной проверки на физических моделях. В соответствии с этой целью были сформулированы и решены следующие задачи:

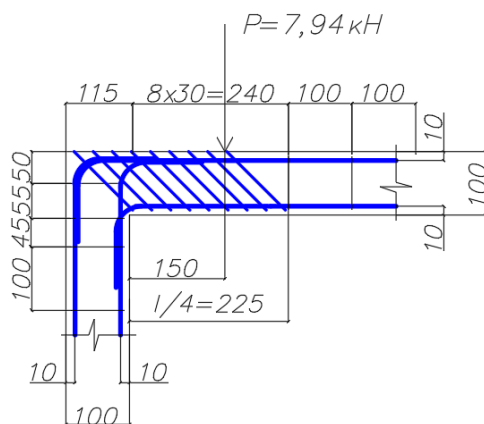
- предложена схема армирования приопорных зон ригелей многоэтажной рамы, повышающая их силовое сопротивление при внезапных изменениях силовых потоков;
- разработан алгоритм, построена расчетная схема и выполнен расчет в программном комплексе Ansys опытных конструкций железобетонных рам с принятыми схемами армирования при особом воздействии;
- разработана методика испытаний и запроектированы опытные конструкции железобетонных рам для физического моделирования фрагмента каркаса многоэтажного здания при рассматриваемых воздействиях.

2. Конструктивные решения и алгоритм расчета.

Внезапные изменения структуры конструкции при запроектных воздействиях являются важнейшим фактором, влияющим на картину ее напряженно-деформированного состояния и характер выключения связей и отдельных элементов, а также на картину возможного локального и прогрессирующего разрушения конструктивной системы в целом [22, 17]. Иными словами, при выключении связи в конструктивной системе изменяется степень ее статической неопределимости и, соответственно, перераспределяются силовые потоки между оставшимися конструктивными элементами. При этом в конструктивных элементах могут изменяться не только количественные, но и качественные значения внутренних усилий. В этом случае, например, если приопорная зона ригеля армирована наклонными стержнями одного направления, то при изменении знака поперечной силы эта арматура становится не работающей. Следовательно, применение традиционной схемы армирования ригелей железобетонных рам конструктивных систем наклонными стержнями (отгибами) одного направления (рисунок 1, а) при особых воздействиях не обеспечивает их силовое сопротивление и критерии предельных состояний. Например, при внезапном запроектном воздействии в виде выключения одной из несущих колонн рамы, происходит перераспределение усилий и может измениться знак внутренних усилий на отдельных участках ригелей и принятое на основании проектного решения армирование становится либо недостаточным, либо не эффективным при таком воздействии. Отсюда следует, что традиционная схема армирования ригелей каркасов зданий не обеспечивает защиту конструкции рамы от прогрессирующего обрушения

В связи с этим, в рассматриваемой работе предложена вариант схемы армирования приопорных зон ригелей железобетонных каркасов многоэтажных зданий, который позволяет в конструктивно нелинейных системах при изменении силовых потоков, вызванных структурным изменением системы обеспечивать их защиту от прогрессирующего обрушения. В соответствии с этой схемой поперечное армирование выполняется наклонными стержнями в двух ортогональных направлениях (рисунок 1,б). Таким образом, традиционные решения рам с наклонными стержнями одного направления (так называемыми односторонними связями [23]) превращаются в систему с двусторонними связями. Данный способ позволяет повысить сопротивляемость конструктивно нелинейного рамного каркаса прогрессирующему обрушению.

а)



б)

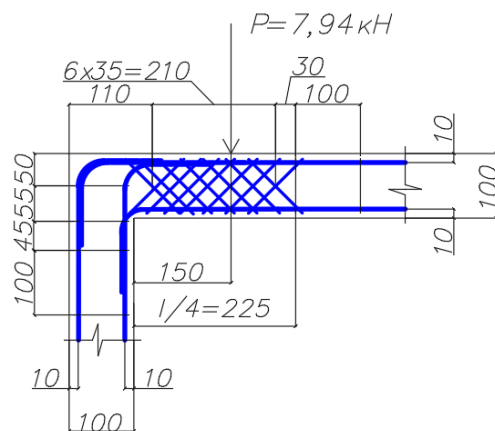


Рисунок 1 - Узел сопряжения верхнего ригеля рамы с крайней левой колонной:

а – с армированием односторонними наклонными стержнями, б – с армированием наклонными стержнями в двух ортогональных направлениях

Было проведено численное исследование двухпролетной железобетонной рамы, армированной односторонними наклонными стержнями и наклонными стержнями, расположенными в двух ортогональных направлениях. В качестве запроектного воздействия рассмотрен случай удаления крайней колонны первого этажа из конструктивной системы рамы (см. удаляемый элемент на рисунке 2).

Тело бетона рамы моделировалось объемными конечными элементами SOLID 185, а арматурные стержни – элементами Reinf 264. При моделировании были использованы характеристики материалов с коэффициентами надежности по нагрузке и по материалу рамными 1. Для моделирования бетона была использована модель Druker-Prager Concrete, учитывающая пластичность, образование и развитие трещин при растяжении, сжатии и срезе.

Сечение колонн и ригелей рассчитываемой рамы принято 50x100 мм. Продольное армирование выполнено из арматуры класса А500 диаметром 8 мм, поперечное армирование – в виде наклонных стержней из проволоки диаметром 2 мм, шагом 30 мм.

Эксплуатационная нагрузка к конструкции рамы прикладывалась попарно к каждому ригелю симметрично на расстоянии 150 мм от стоек в каждом пролете в виде двух сосредоточенных сил (рисунок 2).

Алгоритм проведения расчетного анализа включал следующие этапы:

1. На первом этапе в ПК Ansys производился расчет конструктивной системы всей рамы на заданную эксплуатационную нагрузку и определялось напряженно-деформированное состояние в элементах всей конструктивной системы по первичной схеме расчета (см. рисунок 2,а);

2. На втором этапе производился расчет по вторичной расчетной схеме – при приложении эксплуатационной нагрузки и особом воздействии в виде внезапного удаления из рамы крайней правой стойки первого этажа. Усилие в этой стойке, вычисленное из расчета по первичной схеме, прикладывалось к раме во вторичной схеме с обратным знаком.

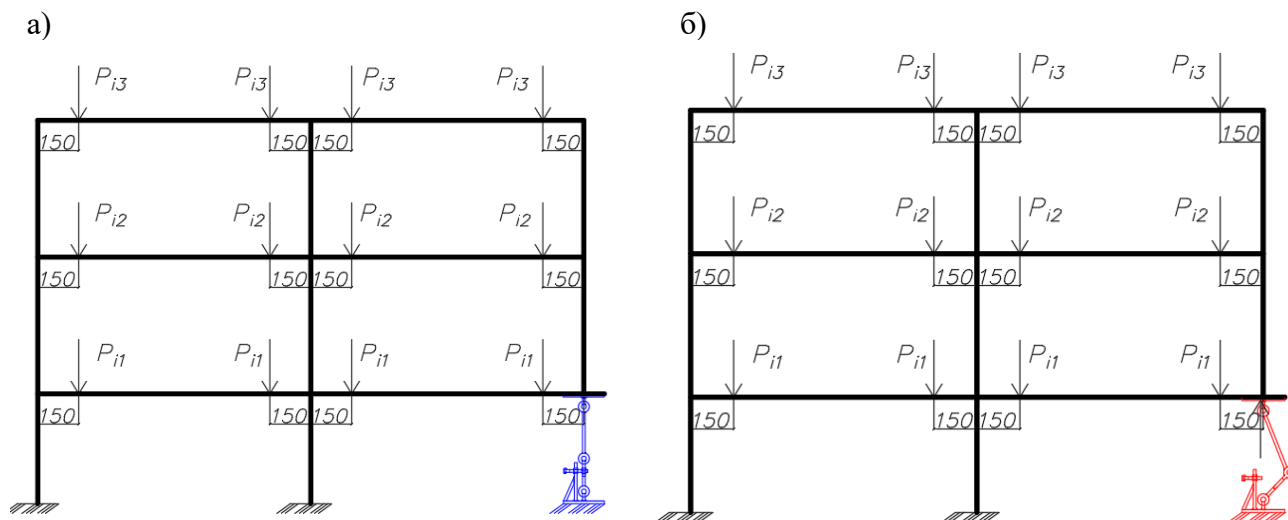


Рисунок 2 – Схема нагружения: а – первичная схема, б – вторичная схема

3. Результаты численного исследования и их анализ

По результатам расчета были получены характерные эпюры распределения продольных напряжений в сжатом и растянутом бетоне приопорной зоны ригеля над удаляемой колонной, картины трещинообразования и напряжения в продольных и наклонных стержнях в приопорной зоне ригелей.

Из анализа картины полученных продольных напряжений в приопорной зоне ригеля (рисунок 3) можно видеть, что после особого воздействия качественно меняется картина напряженного состояния в рассматриваемой зоне. Растягивающие, и тем более главные растягивающие, напряжения превышают прочность бетона на растяжение и в приопорной зоне ригеля образуются наклонные трещины от главных растягивающих напряжений.

Особый интерес в рамках рассматриваемой задачи представляют картины напряженного состояния в продольной и поперечной арматуре в наиболее напряженный приопорной зоне ригеля при разных схемах армирования (рисунок 4). В случае армирования наклонными стержнями одного направления после особого воздействия и изменения знака момента в рассматриваемом узле напряженное состояние в продольной и поперечной арматуре качественно меняется, и судя по фактически полученным диаграммам деформирования для продольных и поперечных стержней (см. рисунок 4,д), в продольных стержнях напряжения в сжатом стержне близки к пределу прочности при сжатии, а в растянутом стержне напряжения не превышают предела упругости.

В наклонном стержне растягивающие напряжения близки к пределу текучести арматурной проволоки и это свидетельствует о разрушении рамы по наклонному сечению.

При изменении схемы армирования приопорной зоны ригеля, до приложения особого воздействия, напряженное состояние в поперечной и продольной арматуре изменилось незначительно (см. рисунок 4 а,в). После запроектного воздействия напряженное состояние в сжатых наклонных стержнях уменьшилось более чем в два раза, а в растянутых стержнях другого направления близки к пределу текучести (см. рисунок 4,г).

Перерасчет рамы с увеличением диаметра наклонных стержней с двух до трех мм, критерии особого предельного состояния нормируемые в [20] будут обеспечены.

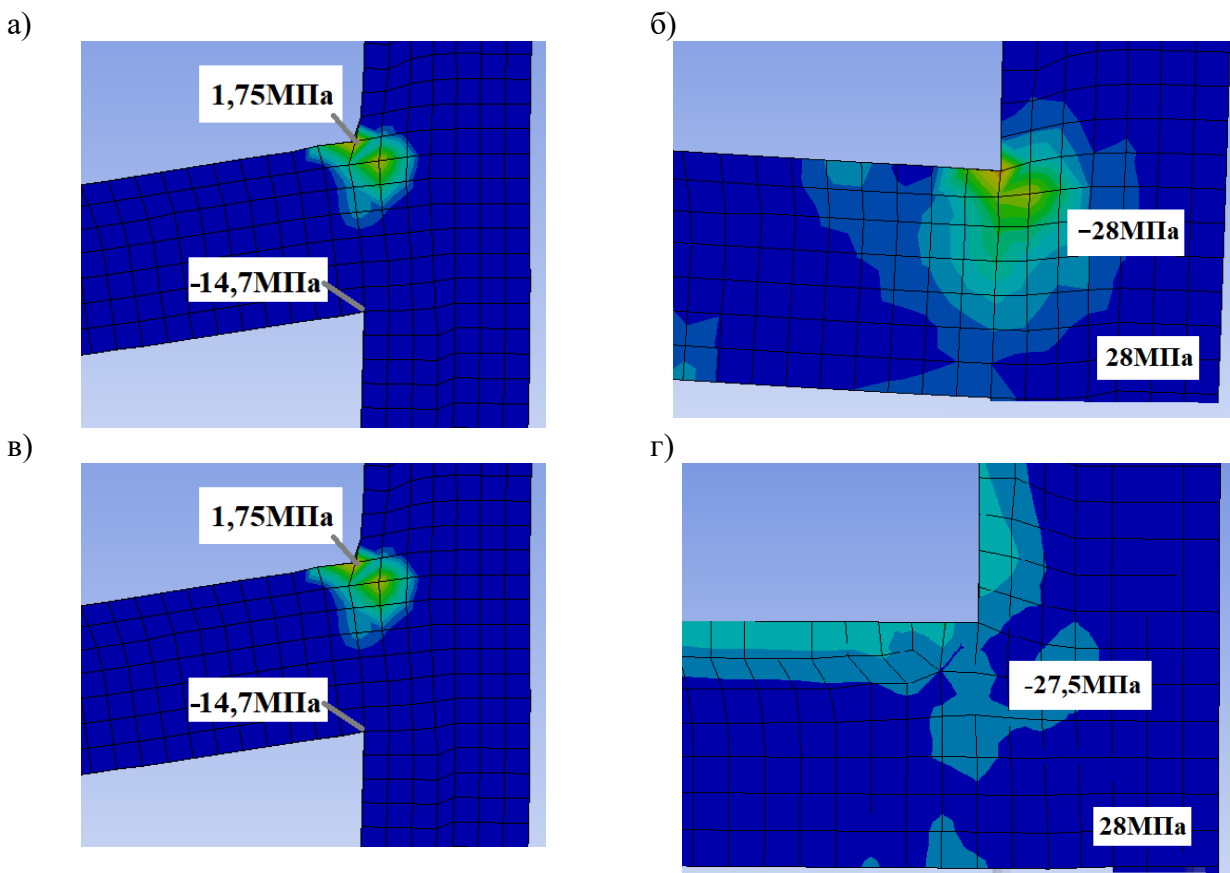


Рисунок 3 – Картина напряженного состояния в бетоне в приопорных узлах:

*а, в – при расчете по первичной схеме нагружения, б, г – при расчете по вторичной схеме нагружений;
а, б – при установке односторонних наклонных стержней, в, г – при установке наклонных стержней в двух
ортогональных направлениях*

Результаты расчета приопорных участков рам с наклонными стержнями одного и двух направлений по первичной и вторичной расчетным схемам приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Перемещения, напряжения и деформации в бетоне и арматуре приопорной зоны ригеля над удаляемой колонной

Наименование	Армирование односторонними наклонными стержнями		Армирование наклонными стержнями, расположенными в двух ортогональных направлениях	
	Первичная расчетная схема	Вторичная расчетная схема	Первичная расчетная схема	Вторичная расчетная схема
Прогибы, мм	0,576 мм	21,3 мм	0,575 мм	21,2 мм
Максимальные напряжения в сжатом бетоне, МПа	14,7 МПа	39 МПа	14,8 МПа	27,46 МПа
Прогибы, мм	0,576 мм	21,3 мм	0,575 мм	21,2 мм
Максимальные напряжения в сжатом бетоне, МПа	14,7 МПа	28 МПа	14,8 МПа	27,46 МПа
Максимальные напряжения в наклонном стержне, МПа	110 МПа	-923 МПа	92 МПа -45 МПа	-458 МПа 335 МПа
Относительные деформации в наклонном стержне при одностороннем расположении	0,00055	Разрыв стержня		
Относительные деформации в наклонных стержнях при взаимно ортогональном их расположении			0,00046	Разрыв стержня
			0,00023	0,072 (<[0,015])
Максимальные напряжения в продольном стержне, МПа	Верхняя 90 МПа Нижняя -37 МПа	Верхняя -480 МПа Нижняя 217 МПа	Верхняя 90 МПа Нижняя -37 МПа	Верхняя -480 МПа Нижняя 217 МПа
Относительные деформации в продольном стержне	Верхняя 0,00045 Нижняя 0,00019	Верхняя 0,0063 Нижняя 0,0011	Верхняя 0,00045 Нижняя 0,00019	Верхняя 0,0063 Нижняя 0,0011
Ширина раскрытия трещины	0,08	Разрушение	0,08	Разрушение

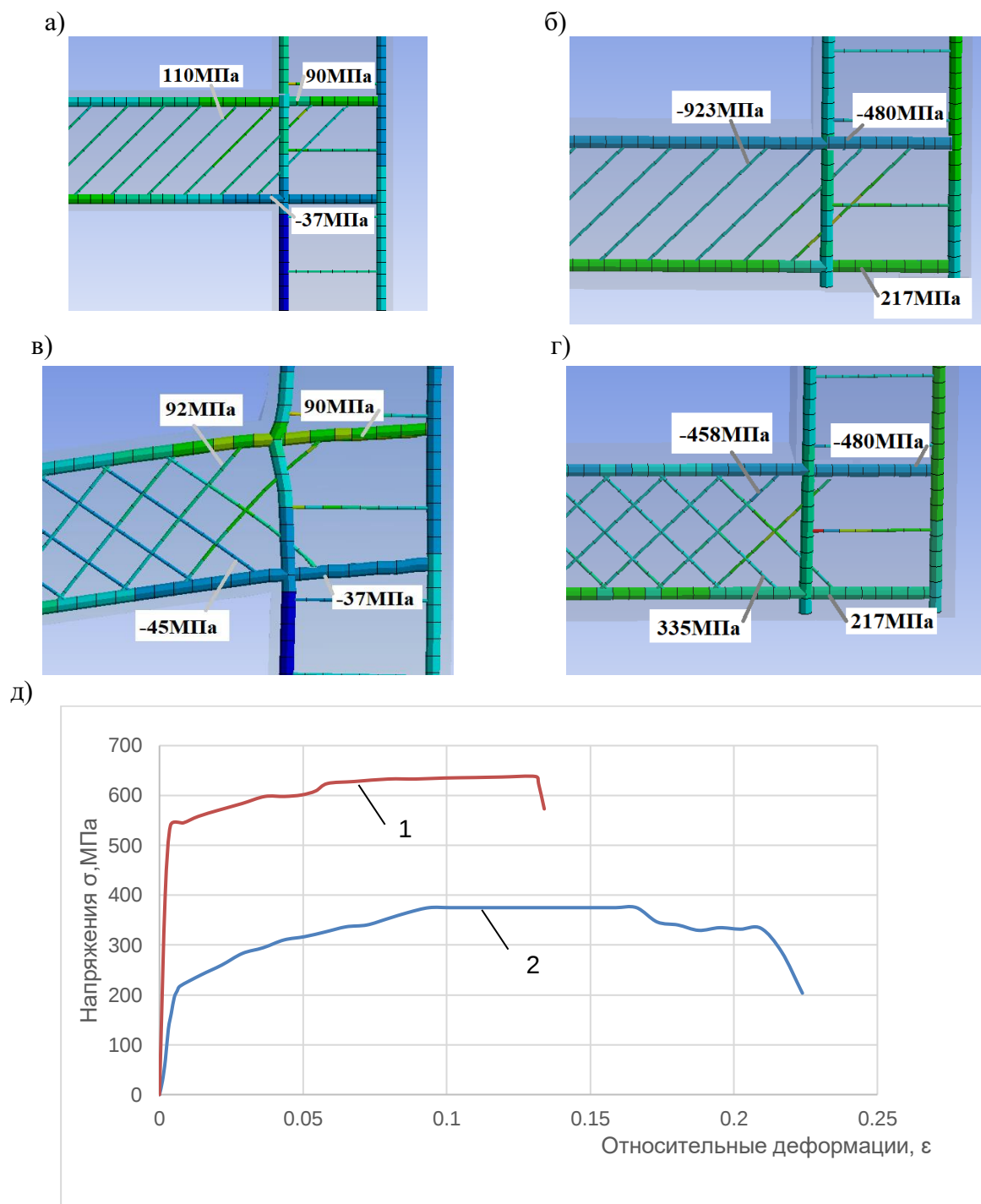


Рисунок 4 – Напряжения в арматуре ригеля в зоне стыка крайней колонны нижнего этажа рамы с ригелем:
 а, в – при расчете по первичной схеме нагружения, б, г – при расчете по вторичной схеме нагружений;
 а, б – при установке односторонних наклонных стержней, в, г – при установке наклонных стержней в двух
 ортогональных направлениях; д – опытная диаграмма деформирования продольных (1) и
 поперечных (2) арматурных стержней

Анализируя данные таблицы, можно прийти к выводу о том, что предложенная схема армирования приопорных зон ригелей железобетонных рам каркасов многоэтажных зданий является одним из эффективных способов защиты от прогрессирующего обрушения.

По результатам проведенного расчетного анализа разработана методика испытаний рассматриваемой двухпролетной железобетонной рамы. Армирование рамы (рисунок 5) запроектировано таким образом, чтобы после особого воздействия было обеспечено

восприятие изменяющихся в каркасе силовых потоков, вызванных особым воздействием внезапным - удалением одной из несущих колонн и не произошло локального (в зоне удаляемой колонны) и тем более прогрессирующего обрушения.

Опытные конструкции запроектированы из бетона класса В30. Сечение ригелей и колонн принято 50x100 мм. Армирование ригелей, также как и в расчетной модели, принято симметричным с продольной рабочей арматурой в верхней и нижней зоне сечения диаметром 8 мм класса А500С. Поперечная арматура в виде наклонных стержней принята из арматурной проволоки диаметром 2 мм, с физико-механическими характеристиками, приведенными на диаграмме (см. рисунок 4,д). Шаг поперечного армирования, расположенного в пролете принят 100 мм, а в приопорных сечениях устанавливаются наклонные двусторонние поперечные стержни шагом 35 мм.

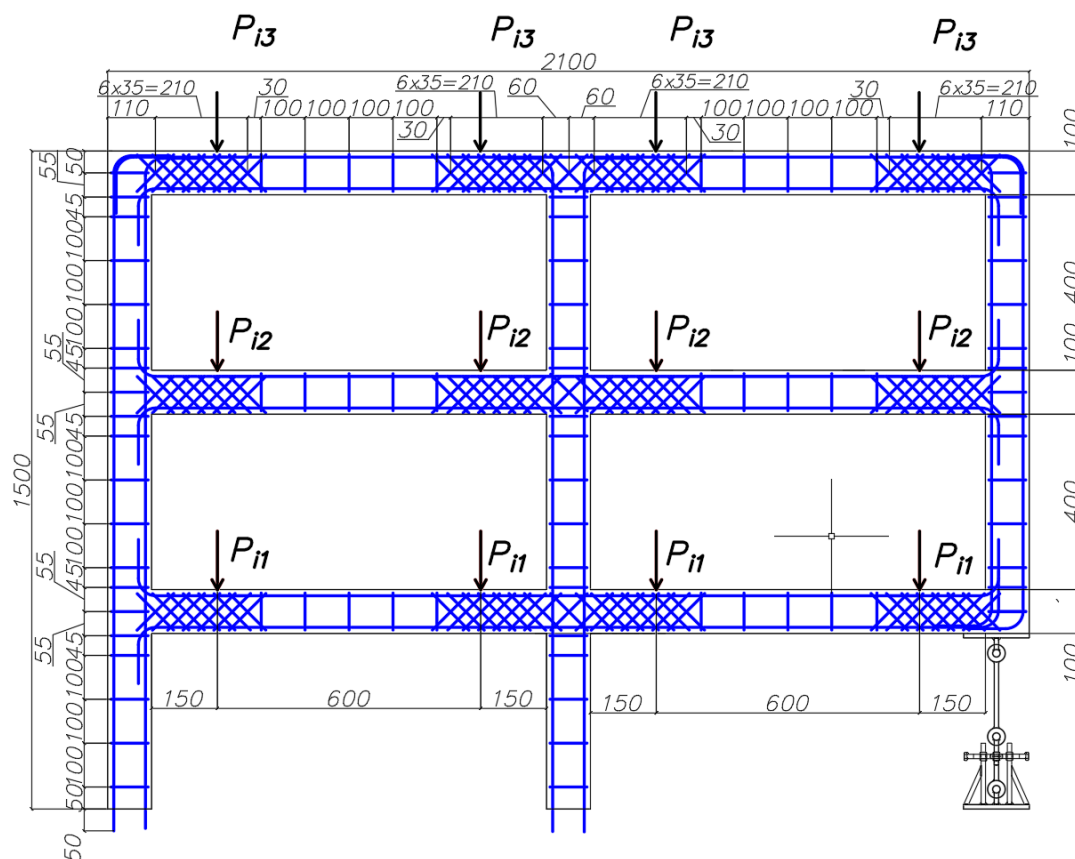


Рисунок 5 - Схема армирования и нагружения опытной конструкции рамы:

- 1 – продольные стержни А500 диаметром 8 мм, 2 – поперечные стержни из проволоки диаметром 2 мм,
3 – наклонные стержни, расположенные в двух ортогональных направлениях диаметром 2 мм;
 P_{i1} – нагрузка на нижний ригель, P_{i2} – нагрузка на средний ригель, P_{i3} – нагрузка на верхний ригель

4. Выводы

1. Предложена схема армирования приопорных зон ригелей железобетонных каркасов многоэтажных зданий, обеспечивающая силовое сопротивление ригелей при качественных изменениях силовых потоков в этих элементах рамы от удаления одной из колонн первого этажа;

2. Построена первичная и вторичная расчетные схемы и выполнен расчет опытных конструкций с принятыми схемами армирования на особое воздействие в виде внезапного удаления одной из несущих колонн первого этажа. По результатам расчета установлено, что предложенная схема армирования наклонными стержнями, расположенными в двух взаимно ортогональных направлениях, обеспечивает защиту таких конструкций от локального и прогрессирующего обрушения при рассматриваемом особом воздействии;

3. На основе проведенного численного анализа деформирования и разрушения конструкций рам разработана методика их испытаний и запроектированы опытные образцы железобетонных рам с принятыми схемами армирования для физического моделирования фрагмента каркаса многоэтажного здания при рассматриваемых воздействиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алмазов В.О., Као Зуй Кхой. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов. М.: АСВ, 2013. 128 с.
2. S.Yu. Fialkoa, O.V. Kabantsevb, A.V. Perelmuter Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // Magazine of Civil Engineering. 2021. 102(2). Article No. 10214
3. Кодыш Э.Н. Защита многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения / Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Чесноков Д.А. // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С.8–13.
4. Федорова Н.В., Фан Динь Гуок, Нгуен Тхи Чанг. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием // Строительство и реконструкция. 2020. № 1. С. 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. С. 74–84.
6. Федорова Н.В. Методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зданий при аварийных воздействиях / Федорова Н.В., Кореньков П.А., Бу Н.Т. // Строительство и реконструкция. 2018. Т. 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. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions / Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. T. 753. C.032037.
9. Fedorova N.V. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions / Fedorova N.V., Ngoc V.T. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. T. 1425. C.012033.
10. Adam J.M. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century / Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. // Engineering Structures. 2018. T. 173. C.122–149.
11. Yu J. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages / Yu J., Tan K.H. // Engineering Structures. 2013. T. 55. C.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. P. 04020078. DOI: 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. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2019/2354931
14. Alogla K. Theoretical assessment of progressive collapse capacity of reinforced concrete structures / Alogla K., Weekes L., Augustus-Nelson L. // Magazine of Concrete Research. 2017. T. 69. № 3. C.145–162.
15. Shan S. et al. Experimental study on the progressive collapse performance of RC frames with infill walls // Eng. Struct. 2016. Vol. 111. Pp. 80–92.
16. Бу Нгок Туен Исследование живучести железобетонной конструктивно нелинейной рамно-стержневой системы каркаса многоэтажного здания в динамической постановке / Бу Нгок Туен // 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. Расчетные модели силового сопротивления железобетона / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов. М.: АСВ, 2004. 472 с.
19. Бондаренко В.М., Ключева Н.В. К расчёту сооружений, меняющих расчетную схему в следствии коррозионных изменений // Известия вузов. 2008. №1. С. 4–12.
20. СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения.
21. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 (с Изменением N 1). Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019 г.
22. Гениев Г.А. Об оценке динамических эффектов в стержневых системах из хрупких материалов// Бетон и железобетон. 1992 №9. С. 25–27.

23. Шапиро Г.И. Некоторые вопросы расчета при сопряжении сборных конструкций // Строительство и реконструкция. 2022. №1. С. 54-58.

REFERENCES

1. Almazov V.O., Kao Zui Khoi. Dynamics of progressive destruction of monolithic multi-storey frames. Moscow: DIA, 2013. 128 p.
2. Fialkoa S.Yu., Kabantsevb O.V., Perelmutter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // Magazine of Civil Engineering. 2021. 102(2). Article No. 10214
3. Kodysh E.N. Protection of multi-storey buildings from progressive collapse / Kodysh E.N., Trekin N.N., Chesnokov D.A. // Industrial and civil construction. 2016. No. 6. P. 8-13.
4. Fedorova N.V., Fan Dinh Guok, Nguyen Thi Chang. Experimental studies of the survivability of reinforced concrete frames with crossbars reinforced with indirect reinforcement // Construction and reconstruction. 2020. No. 1. Pp. 92-100.
5. Ilyushchenko T.A., Kolchunov V.I., Fedorov S.S. Crack resistance of prestressed reinforced concrete frame-rod structures under special influences. Construction and reconstruction. 2021. No (1). 74-84
6. Fedorova N. In. Methods of experimental studies of the deformation of monolithic reinforced concrete frame of a building during emergency effects / Fedorova N. In., Koren'kov, P. A., Wu N. T. // Construction and reconstruction of the 2018. Vol. 4. No. 78. Pp. 42-52.
7. Kodish E.N. The protection design of buildings and structures against progressive collapse, given the emergence of limit state // Industrial and civil construction. 2018. No. 10. Pp. 95-101.
8. Kolcunov V.I. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions / Kolcunov V.I., Tuyen N.V., Korenkov P.A. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. T. 753. S. 032037.
9. Fedorova N.V. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions / Fedorova N.V., Ngoc T.V. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. T. 1425. P. 012033.
10. Adam J. M. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century / Adam J. M., Parisi F., Sagaseta, J., Lu X. // Engineering Structures. 2018. Vol. 173. S. 122-149.
11. Yu J. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages / Yu J., Tan K. H. // Engineering Structures. 2013. T. 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. P. 04020078. DOI: 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. Pp. 1-12. DOI: 10.1155/2019/2354931
14. Alogla K. Theoretical assessment of progressive collapse capacity of reinforced concrete structures / Alogla K., Weekes L., Augustus-Nelson L. // Magazine of Concrete Research. 2017. Vol. 69. No. 3. Pp. 145-162.
15. Shan S. et al. Experimental study on the progressive collapse performance of RC frames with infill walls // Eng. Struct. 2016. Vol. 111. Pp. 80-92.
16. Wu Ngoc Tuen Study of the survivability of a structurally nonlinear reinforced concrete frame-rod system of a multi-storey building frame in a dynamic formulation / Vu Ngoc Tuen // Construction and reconstruction. 2020.- Vol. 90. No. 4. Pp. 73-84.
17. Fedorova N.V., Khalina T.A. Investigation of dynamic reloading in reinforced concrete structural systems during sudden structural rearrangements // Industrial and civil construction. 2017. No. 8. Pp. 32-36.
18. Bondarenko V.M. Computational models of the force resistance of reinforced concrete / V.M. Bondarenko, V.I. Kolchunov. M.: DIA, 2004. 472 p.
19. Bondarenko V.M., Klyueva N. V. On the calculation of structures that change the design scheme as a result of corrosion changes // Izvestiya vuzov. 2008. No. 1. P. 4-12.
20. SP 385. 1325800.2018 Protection of buildings and structures from progressive collapse.
21. SP 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. SNiP 52-01-2003 (with Change N 1). Official publication. Moscow: Standartinform, 2019.
22. Geniev G.A. On the evaluation of dynamic effects in rod systems made of brittle materials// Concrete and reinforced concrete. 1992. No. 9. Pp.25-27.
23. Shapiro G.I. Some calculation issues in the coupling of prefabricated structures// Construction and reconstruction. 2022. No.1. Pp.54-58.

Информация об авторах:

Колчунов Виталий Иванович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,

доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и
строительных наук», г. Москва, Россия,

главный научный сотрудник.

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,

заведующий кафедрой уникальных зданий и сооружений.

E-mail: asiorel@mail.ru

Бушова Олеся Борисовна

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

аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ.

E-mail: bushova96@mail.ru

Кореньков Павел Анатольевич

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций.

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и
строительных наук», г. Москва, Россия,

старший научный сотрудник.

E-mail: kpa_gbk@mail.ru

Information about authors:

Kolchunov Vitaly I.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia,
doctor of Technical Sciences, professor of the department of reinforced concrete and stone structures.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Moscow, Russia,

chief researcher.

South-West State University, Kursk, Russia,

head of the department of Unique Buildings and Structures.

E-mail: asiorel@mail.ru

Bushova Olesya B.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MSUCE), Moscow, Russia,
postgraduate student of the department of Reinforced Concrete and Stone Structures, NRU MSUCE.

E-mail: bushova96@mail.ru

Korenkov Pavel An.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia,

candidate of technical science, docent, associate professor of the building structures,

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Moscow, Russia,

senior researcher.

E-mail: kpa_gbk@mail.ru