

Т.А. ИЛЬЮЩЕНКО¹, В.И. КОЛЧУНОВ^{1,2}, С.С. ФЕДОРОВ²

¹Юго-западный государственный университет, г. Курск, Россия

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, Россия

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМНО-СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ОСОБЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аннотация. Приведены результаты экспериментально—теоретических исследований трещиностойкости, развития и раскрытия трещин фрагмента железобетонной рамы многоэтажного каркаса монолитного здания с предварительно напряженными ригелями на особое аварийное воздействие, вызванное внезапным удалением одного из несущих элементов. В качестве аварийного воздействия рассмотрено удаление средней колонны рамы. Анализ картины трещинообразования в рамах с предварительно напряженным ригелем до и после особого воздействия выполнен в сопоставлении с картиной трещинообразования ненапряженной конструкцией рамы. По приращениям ширины раскрытия трещин в ригеле определен коэффициент динамических догрузок в предварительно напряженных конструкциях рам от особого воздействия. Полученные результаты экспериментально-теоретических исследований трещиностойкости конструкций рам при рассматриваемых воздействиях могут быть использованы при разработке способов защиты каркасов монолитных многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения.

Ключевые слова: предварительное напряжение, железобетонный каркас здания, трещиностойкость, экспериментальные исследования, особое воздействие.

T.A. ILIUSHCHENKO¹, V.I. KOLCHUNOV^{1,2}, S.S. FEDOROV²

¹South West State University, Kursk, Russia

²Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

CRACK RESISTANCE OF PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURE SYSTEMS UNDER SPECIAL IMPACT

Abstract. The results of experimental and theoretical researches of crack resistance, development and growth of cracks of a fragment of a reinforced concrete multi-storey frame of a monolithic building with prestressed beams for a special emergency impact caused by a sudden removal of one of the load-bearing elements are presented. Removal of the middle column of the frame was considered as an emergency impact. Analysis of the pattern cracking in the frames with a prestressed beam before and after a special impact is carried out against the pattern cracking in an unstressed frame structure. Based on the increments of cracks width in the beam, the coefficient of dynamic additional loading in prestressed frame structures from a special impact was calculated. The obtained results of experimental and theoretical researches of the crack resistance of frame structures in considered influences can be used in the development of methods for protecting the frames of monolithic multi-storey buildings against progressive collapse.

Keywords: prestressing, reinforced concrete building frame, crack resistance, experimental research, special impact.

Введение

В связи с введением в хозяйственный оборот в отечественной и зарубежной практике нормативной базы нового поколения по защите зданий сооружений от прогрессирующего обрушения [1-4] необходимы исследования по решению задач этой проблемы, направленные на совершенствование и создание новых способов защиты каркасов различных зданий от особых воздействий. Анализ известных научных публикаций по решению таких задач показал, что проведенные в России и за рубежом исследования по этому направлению, в том числе для зданий и сооружений с железобетонным каркасом, относятся в основном к ненапряженным конструктивным системам [5-19]. Работы, посвященные исследованию железобетонным конструктивным системам с преднапряженными конструктивными элементами, практически отсутствуют. Среди зарубежных исследований можно привести публикацию [20], в которой приведены результаты экспериментальных исследований рамно-стержневых систем с преднапряженными ригелями, определен коэффициент динамических догрузений для первых пиковых воздействий на конструкции с преднапряженной и ненапряженной арматурой в ригелях системы и проведено их сравнение.

В то же время, как показали эти исследования и анализ выполненный в публикации [21] использование преднапряжение как одного из способов защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения может стать достаточно эффективным при решении такой задачи. В связи с этим в настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований фрагмента многоэтажного железобетонного каркаса монолитного здания с преднапряженными ригелями на особое воздействие, вызванное внезапным удалением одного из несущих элементов. Были рассмотрены и решены следующие задачи:

- дан анализ методики и получены результаты экспериментальных исследований трещиностойкости, развития и раскрытия трещин рамно-стержневых фрагментов каркаса многоэтажного железобетонного монолитного здания с предварительно напряженными ригелями на особое аварийное воздействие, вызванное внезапным удалением одной из несущих колонн
- проведен анализ картины трещинообразования предварительно напряженной рамы в сопоставлении с ненапряженной рамой после воздействия, вызванного внезапным исключением из работы центральной стойки;
- по экспериментальным значениям приращений ширины раскрытия трещин вычислен коэффициент динамических догрузений в предварительно напряженных конструкциях рам.

Анализ методики исследований. Для решения сформулированных задач была разработана методика и проведены экспериментальные исследования конструкции предварительно напряженных железобетонных рам, моделирующих фрагмент каркаса многоэтажного здания. Испытано две серии рам: РЖ-1 – рама с внезапно выключающейся центральной стойкой; РЖ-2 – рама с внезапно выключающейся крайней стойкой.

Конструкции рам были выполнены из бетона класса В40. Ригели рам армированы в верхней и нижней зонах по высоте сечения рабочей арматурой в виде одного стержня диаметром 8мм класса А500 (рисунок 1). Ригель над первым этажом рамы с целью ее защиты от прогрессирующего обрушения был выполнен предварительно напряженным. Предварительно напряженная арматура устанавливалась в верхней и нижней зонах из стержня диаметром 8 мм класса А600. Поперечная арматура ригелей принята из проволоки диаметром 2мм шагом 50мм и 100мм. Такое армирование назначено по результатам расчета опытных конструкций рам на проектную испытательную нагрузку в виде сосредоточенных сил P_i приложенных попарно к каждому ригелю симметрично на расстоянии 300мм от колонн.

Нагружение сосредоточенными силами производилось до уровня эксплуатационной нагрузки с коэффициентом надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,0$. Особое запроектное

воздействие моделировалось внезапным удалением центральной - для рамы РЖ-1 и крайней колонны - для рамы РЖ-2 первого этажа рамы с помощью рычажно-подвесной системы, выполненной по патенту [22].

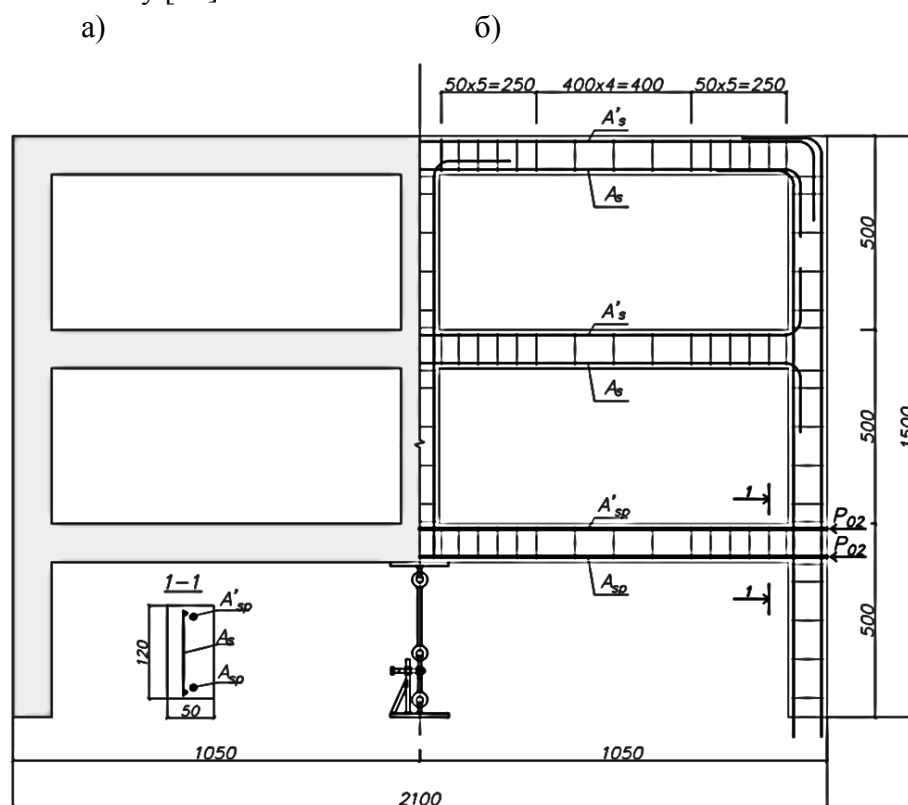


Рисунок 1 - Схема опалубки (а) и армирования (б) конструкции рамы

До начала испытаний был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния опытных конструкций рам. Расчет проводился с использованием программного комплекса ЛИРА САПР по первичной и вторичной расчетным схемам разных уровней. Расчет по первичной расчетной схеме на действие заданной испытательной нагрузки в виде двух сосредоточенных сил в каждом пролете ригеля был выполнен в двух вариантах, с применением стержневых конечных элементов (рисунок 2а) и с применением объемных конечных элементов (рисунок 2б).

Предварительное напряжение в арматурном стержне моделировалось в первом случае приложением к стержневым элементам по концам ригелей продольной сжимающей силы, равной суммарной в верхнем и нижнем арматурном стержнях силе обжатия. Во втором варианте при использовании объемных конечных элементов преднапряжение учитывалось приложением продольной силы обжатия в центре соответствующего объемного конечного элемента, так называемого представительного объема по методике, предложенной в работе [23].

Расчет по вторичной расчетной схеме выполнен на суммарное действие испытательной нагрузки в виде двух сосредоточенных сил в каждом пролете ригеля и особого воздействия, вызванного удалением центральной стойки рамы. Удаление центральной стойки рамы в соответствии с [1] в расчетной схеме моделировалось приложением с обратным знаком реакции в этой стойки, определенной расчетом по первичной расчетной схеме.

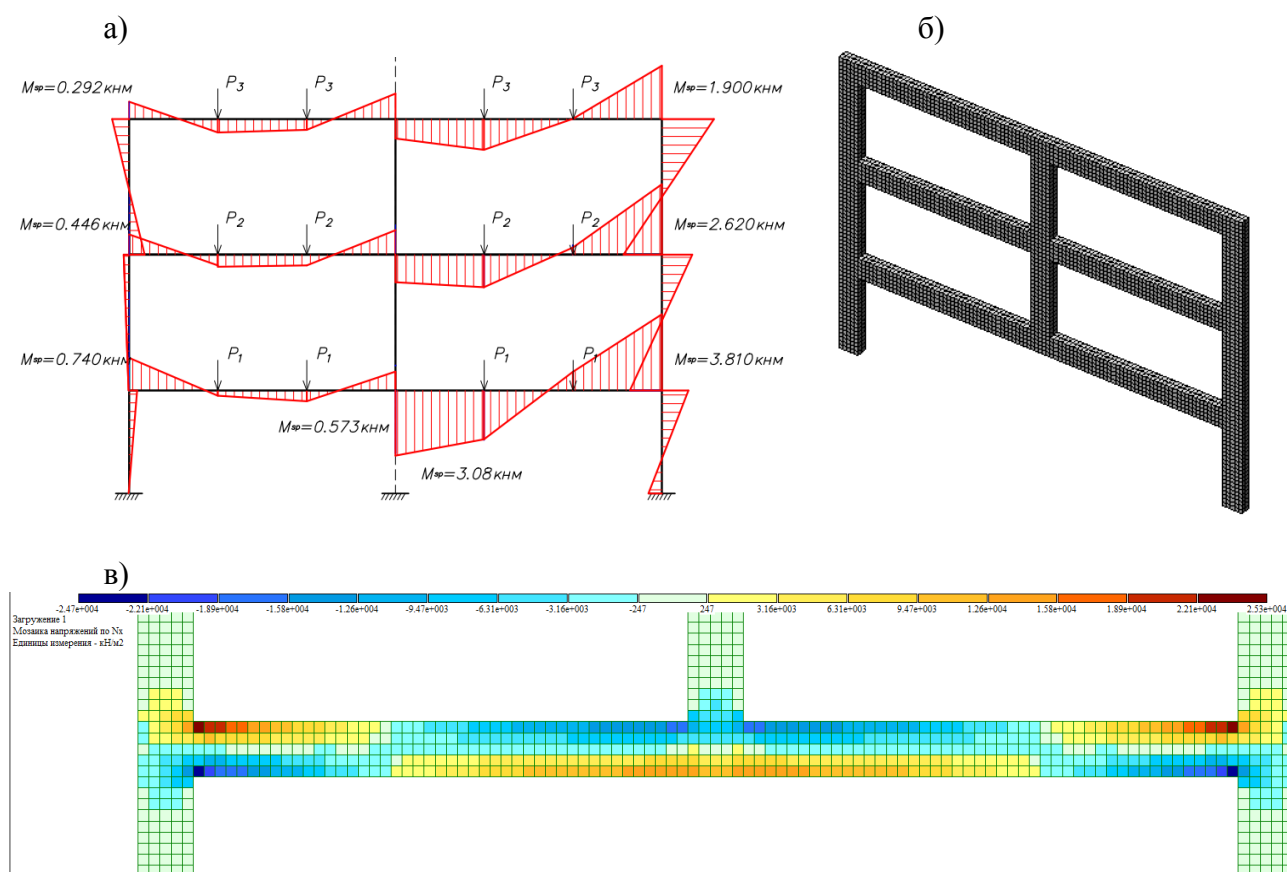


Рисунок 2 - Эпюры моментов для рамы с предварительно напряженным ригелем ($M_{\text{сп}}$): слева - до выключения центральной колонны, справа - после выключения центральной колонны (а); объемная конечно-элементная модель рамы (б), мозаика распределения продольных напряжений (усилий) в предварительно напряженном ригеле над первым этажом рамы (в)

Результаты экспериментальных исследований.

Анализируя полученный в конструкциях рам характер образования, раскрытия и развития трещин можно отметить следующее.

На первом этапе испытаний в преднапряженной конструкции рам РЖ-1 при нагружении суммарной проектной нагрузки $\sum P_{i,\text{max}}$ первые трещины (рисунок 3) были обнаружены в приопорных зонах ригелей второго этажа у центральной колонны при суммарной нагрузке $\sum P_i = 19,96 \text{ кН}$. Соответственно моменты образования этих трещин составили 0,59 и 0,56 кНм. По мере увеличения нагрузки до уровня $\sum P_i = 23,64 \text{ кН}$ появились новые трещины в приопорном сечении ригелей над первым этажом и над вторым этажом у крайних колонны. На этапе нагружения проектной нагрузкой видимые нормальные трещины в ригелях рамы не образовались.

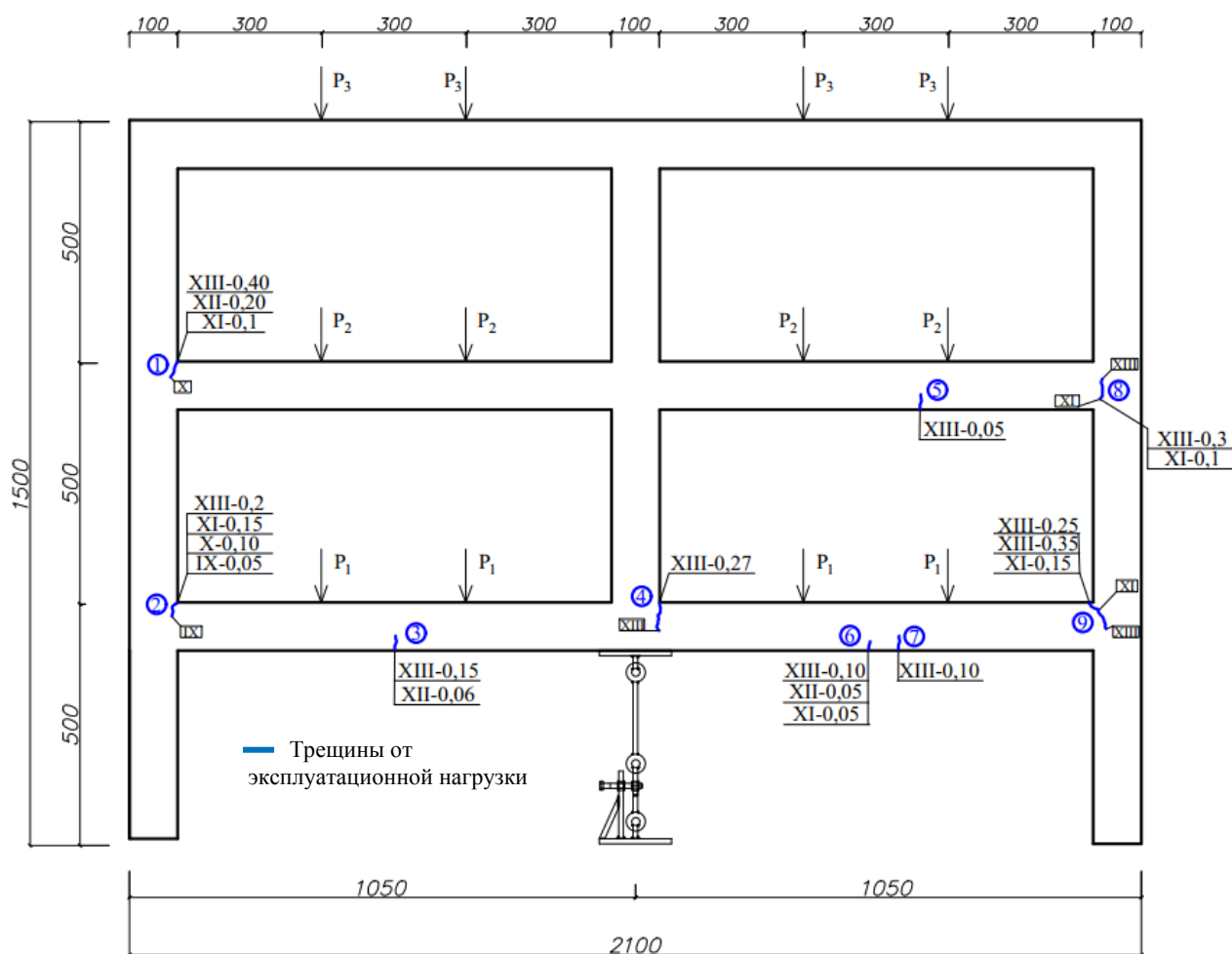


Рисунок 3 - Схема образования и ширина раскрытия трещин всех типов в конструкции рамы РЖ-1 до приложения особой нагрузки

После запроектного воздействия, вызванного внезапным удалением центральной стойки, в раме РЖ-1 из-за структурной перестройки конструктивной системы произошло раскрытие ранее образовавшихся трещин 1-9 (см. рисунок 3), а также их приращение от динамических догрузений элементов конструктивной системы. Образовывались новые трещины в приопорных сечениях ригеля третьего этажа рамы, а также образовались нормальные трещины в ригелях всех этажей рамы. Наибольшая ширина раскрытия трещин после приложения особой нагрузки составила 2,0 и 2,09 мм в приопорных сечениях, но видимых разрушения опытная конструкция рамы не получила (рисунок 4).

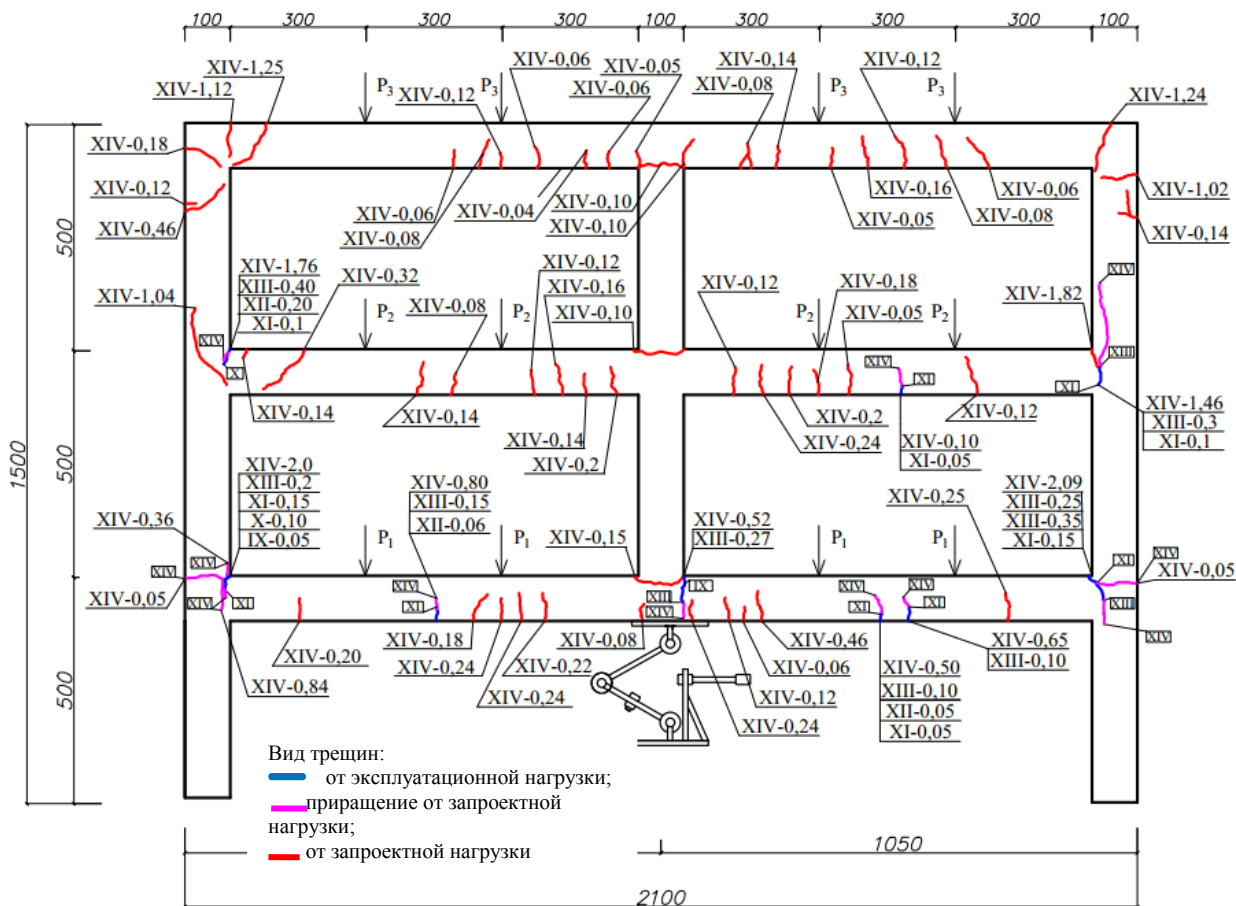


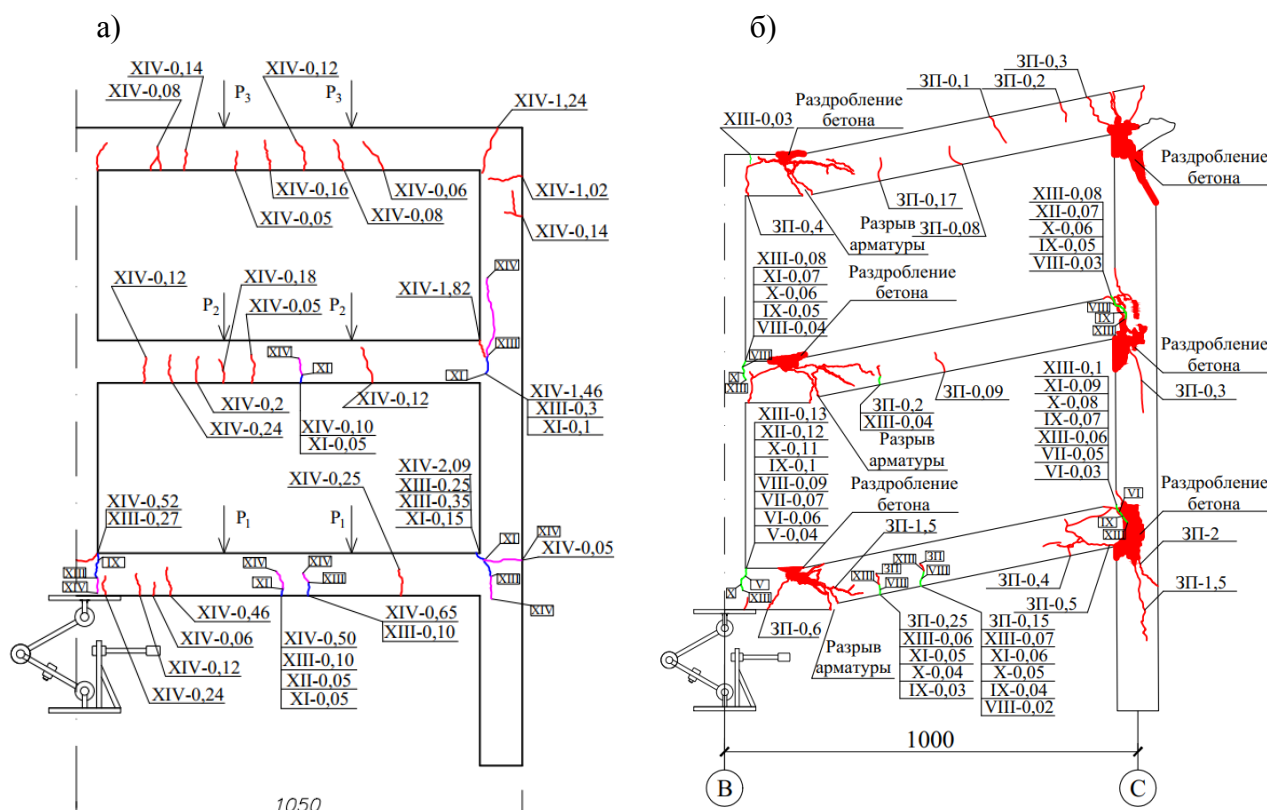
Рисунок 4 - Схема образования и ширина раскрытия трещин всех типов в конструкции рамы РЖ-1 после приложения особой нагрузки

Анализ количественного изменения ширины раскрытия трещин в ригелях рамы при проектной нагрузке и после особого запроектного воздействия (таблица 1) показал, что максимальные приращения получили трещины в зоне примыкания ригеля к крайней колонне (Тр-1, Тр-2, Тр-8, Тр-9). Используя эти данные был вычислен коэффициент динамического догружения сечений ригелей (θ_{ds}) от рассматриваемого запроектного воздействия как отношение максимальной ширины раскрытия трещины до и после запроектного воздействия.

Таблица 1 - Ширина раскрытия трещин всех типов

Стадия нагрузки	Ширина раскрытия трещин всех типов a_{cr} по номеру трещины, мм									Примечание
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Рама серии РЖ-1										
*IX	0.05	-	-	-	-	-		-	-	Момент трещинообразования опытного образца
X	0.10	-	-	-	-	-		-	-	-
XI	0.15	0.15	-	-	0.05	0.05	-	0.10	0.15	-
XII	0.20	0.10	0.06	-	0.05	0.05	-	0.10	0.20	-
XIII	0.40	0.20	0.15	0.27	0.05	0.10	0.10	0.30	0.25	Перед удалением колонны
**XIV	1.76	2.00	0,80	0.52	0.10	0.50	0.65	1.46	2.09	После удаления колонны
Коэффициент динамических догрузений θ_{ds}	4,40	10.00	5,30	1,92	2.00	5,00	6,50	4.70	8,36	-

Сопоставляя картину трещин (рисунок 5) в предварительно напряженной раме с картиной трещин в ненапряженной рамой [24] после запроектного воздействия можно отметить значительное количественное различие значений ширины раскрытия трещин после приложения особого воздействия.



Значения нагрузок на ступенях: VI – 3,00 кН, VII – 3,50 кН, VIII – 4,00 кН, XIX – 4,50 кН, X – 5,00 кН, XI – 5,50 кН, XII – 6,00 кН, XIII – 6,50 кН, XIV (ЗП) – удаление колонны

Рисунок 5 - Картина образования и раскрытия трещин всех типов после выключения центральной стойки для предварительно напряженной рамы (а) и ненапряженной рамы (б)

Так при опорном сечении ригеля и колонны первого, второго и третьего этажей в ненапряженной рамы наблюдалось раздробление бетона и фактически разрушение опорного узла. В предварительно напряженной раме критерии особого предельного состояния [1] не были достигнуты.

Сопоставляя ширину раскрытия трещин в ригелях над первым этажом и над вышележащими, можно отметить, что по мере повышения этажности ширина раскрытия трещин в ригелях существенно уменьшается. Так, максимальная ширина раскрытия трещин над первым при суммарном действии испытательной нагрузки в виде двух сосредоточенных сил в каждом пролете ригеля и особого воздействия, вызванного удалением центральной стойки рамы, составила 2,09 мм, а над третьим этажом 1,24 мм. Из этого можно сделать вывод о том, что установка преднапряженной арматуры в ригелях монолитных рам каркасов зданий над первым этажом может стать эффективным способом их защиты от прогрессирующего обрушения.

Анализ схем трещин рисунка 5 показывает, что при внезапном изменении силовых потоков в рамной конструкции вызванном удалением колонн первого этажа наиболее напряженными являются узлы сопряжения ригеля и колонны. Отсюда следует, что при проектировании защиты от прогрессирующего обрушения узлы сопряжения должны быть

дополнительно усилены отогнутыми арматурными стержнями, заводимыми из ригелей в колонну, или устройством в узлах примыкания ригелей к колоннам вут.

Выводы

1. Экспериментальными исследованиями рамно-стержневых фрагментов каркаса многоэтажного железобетонного монолитного здания с предварительно напряженными ригелями получены параметры трещиностойкости, развития и раскрытия трещин при особых аварийных воздействиях, вызванных внезапным удалением одной из несущих колонн.
2. Анализом опытных и расчетных значений ширины раскрытия трещин в рассматриваемых конструкциях предварительно напряженных железобетонных рам в сопоставлении с ненапряженными конструкциями рам установлено, что при внезапном изменении силовых потоков предварительное напряжение значительно снижает ширину раскрытия трещин и повышает предельную деформативность бетона наиболее напряженных сжатых зон конструктивной системы.
3. Рассчитанное по экспериментальным значениям приращений ширины раскрытия трещин коэффициента динамических догрузений в предварительно напряженных конструкциях рам, вычисленное как отношение ширины раскрытия трещин после запроектного воздействия к ширине раскрытия трещин до запроектного воздействия в пролетных сечениях, составило 6,5 и 5,0. В ненапряженных конструкциях этот коэффициент составил 4,2 и 2,9 соответственно. Это свидетельствует о заметном влиянии предварительного напряжения на демпфирующие свойства рассматриваемых конструкций.
4. Полученные результаты экспериментально-теоретических исследований трещиностойкости предварительно напряженных конструкций рам могут быть использованы при разработке способов защиты каркасов монолитных многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения / 385.1325800.2018. СП – М.: Минстрой России, 2018. 33с.
2. UFC 4-023-03. Unified Facilities Criteria (UFC). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse Text. Department of Defense USA, 2010. - 176 p
3. GSA. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance, Washington, D.C., October, 2016. 203 p.
4. 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
5. Бондаренко В.М., Колчунов В.И., Воробьев Е.Д., Римшин В.И., Осовских Е.В., Доценко В.Н., Творогова М.Н. О расчете сборно-монолитных железобетонных каркасов зданий // Бетон и железобетон в Украине. 2004. №1(19). С.2-7.
6. Демьянов А.И. Алькади С.А. Экспериментально-теоретические исследования статико-динамического деформирования пространственной железобетонной рамы со сложноподпряженными ригелями сплошного и составного сечения // Промышленное и гражданское строительство – 2018. – № 6 – 68–75с
7. Деркач В.Н. Совместная работа каменного заполнения и железобетонного монолитного каркаса // Инженерно-строительный журнал. 2013. №5(40). С. 20–27.
8. Емельянов С.Г., Ключева Н.В., Кореньков П.А. Методика определения параметров живучести железобетонных каркасов многоэтажных зданий. Известия высших учебных заведений // Технология текстильной промышленности. 2016. № 3 (363). С. 252-258.
9. Ключева Н. В., Андросова Н. Б. Живучесть железобетонных рам с односторонними связями // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2007. №. 2-14. С. 50-55.
10. Расторгуев Б. С., Плотников А. И. Расчет несущих конструкций монолитных железобетонных зданий на прогрессирующее разрушение с учетом динамических эффектов // Сб. науч. тр. Института строительства и архитектуры МГСУ. М., 2008. С. 65–72

11. Федорова Н.В., Кореньков П.А. Статико-динамическое деформирование монолитных железобетонных каркасов зданий в предельных и запредельных состояниях // Строительство и реконструкция. 2016. № 6. С. 90-100.
12. Федорова Н.В., Фан Д.К., Нгуен Т.Ч. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием // Строительство и реконструкция. 2020. № 1. С. 92-100.
13. Trekin N.N., Kodysh E.N., Kelasiev N.G., Shmakov S.D., Chaganov A.B., Terehov I.A. The improvement of protection methods from the progressive collapse of one-storey industrial buildings // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. T. 1425. №. 1. C. 012050.
14. Alogla K.D., Alogla L., Weekes L., Augusthus Nelson. Theoretical assessment of progressive collapse capacity of reinforced concrete structures // Mag. Concr. Res. 2017. № 69(3). C. 145–162.
15. Helmy H., Salem H., Mourad S. Progressive collapse assessment of framed reinforced concrete structures according to UFC guidelines for alternative path method // Engineering Structures. 2012. T. 42. P. 127-141.
16. Mohajeri Nav F. Analytical investigation of reinforced concrete frames under middle column removal scenario / F. Mohajeri Nav, U. Nima, R. Abbasnia // Adv. Struct. Eng. 2018. № 21.9. C. 1388–1401.
17. Pham A. T., Tan K. H. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading // Engineering Structures. 2017. T. 139. Pp. 31-45.
18. Rahai A. et al. Progressive collapse assessment of RC structures under instantaneous and gradual removal of columns //Advances in Structural Engineering. 2013. T. 16. №. 10. P. 1671-1682.
19. Tsai M. H., Zhuang W. B. An Analytical Approach for the Flexural Robustness of Seismically Designed RC Building Frames Against Progressive Collapse //International Journal of Civil Engineering. 2020. T. 18. P. 1025-1037.
20. Yang T., Chen W., Han Z. Experimental investigation of progressive collapse of prestressed concrete frames after the loss of middle column //Advances in Civil Engineering. 2020. T. 2020
21. Федорова Н.В., Халина Т.А. Исследование динамических догрузений в железобетонных конструктивных системах при внезапных структурных перестройках // Промышленное и гражданское строительство. 2017. №5. С. 32-36
22. Патент 2642542 Российской Федерации. Устройство для экспериментального определения динамических догрузений в рамно-стержневых конструктивных системах / Н. В. Ключева, П. А. Кореньков; заявитель и патентообладатель КФУ; опубл. 29.01.2018
23. Колчунов В.И., Яковенко И.А., Ключева Н.В. Метод физических моделей сопротивления железобетона //Промышленное и гражданское строительство. 2013. №. 12. С. 51-55
24. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. T. 1425. №. 1. C. 012033.

REFERENCES

1. SP 385.1325800. 2018. Zashchita zdaniy i sooruzhenij ot progressiruyushchego obrusheniya. Pravila proektirovaniya. Osnovnye polozheniya [Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules. The main provisions.]. M.: Standartinform, 2018. S. 19 (rus)
2. UFC 4-023-03. Unified Facilities Criteria (UFC). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse Text. Department of Defense USA, 2010. 176 p.
3. GSA. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance, Washington, D.C., October 2016, 203 p.
4. DBN V.1.2-14-2009. Obshchiye printsipy obespecheniya nadezhnosti i konstruktivnoy bezopasnosti zdaniy, sooruzheniy stroitel'nykh konstruksiy i osnovaniy [General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings, structures of structures and foundations]. Kiev: Minregionstroy Ukrainy, 2009. 43 p. (ukr)
5. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I., Vorob'yev Ye.D., Rimshin V.I., Osovskikh Ye.V., Dotsenko V.N., Tvorogova M.N. O raschete sborno-monolitnykh zhelezobetonnykh karkasov zdaniy [On the calculation of precastmonolithic reinforced concrete building skeletons]. *Beton i zhelezobeton v Ukraine*. 2004. No 1(19). Pp: 2-7. (rus)
6. Dem'yanov A.I. Al'kadi S.A. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya statiko-dinamicheskogo deformirovaniya prostranstvennoj zhelezobetonnoj ramy so slozhnonapryazhennymi rigelyami sploshnogo i sostavnogo secheniya [Experimental and theoretical studies of static-dynamic deformation of a spatial reinforced concrete frame with complexly stressed beams of solid and composite cross-section] // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018. № 6. Pp. 68–75.
7. Derkach V.N. Sovmestnaya rabota kamennogo zapolneniya i zhelezobetonного monolitного karkasa [Joint work of stone filling and ferro-concrete monolithic carcass]. *Magazine of civil engineering*. 2013. No 5(40). Pp: 20–27. (rus)

8. Yemel'yanov S.G., Klyuyeva N.V., Koren'kov P.A. Metodika opredeleniya parametrov zhivuchesti zhelezobetonnykh karkasov mnogoetazhnykh zdaniy. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy [Method for determining the survivability parameters of reinforced concrete skeletons of multi-storey buildings] *Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2016. No 3 (363). Pp: 252-258. (rus)
9. Klyueva N.V., Androsova N.B. ZHivuchest' zhelezobetonnyh ram s odnostoronnnimi svyazyami [Survivability of reinforced concrete frames with one-sided ties] // *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i transport*. 2007. №. 2-14. Pp. 50-55 (rus)
10. Rastorguev B.S., Plotnikov A.I. Raschet nesushchih konstrukcij monolitnyh zhelezobetonnyh zdaniy na progressiruyushchee razrushenie s uchetom dinamicheskikh effektov [Calculation of load-bearing structures of monolithic reinforced concrete buildings for progressive destruction, taking into account dynamic effects] // *Sb. nauch. tr. Instituta stroitel'stva i arhitektury MGSU*. M., 2008. Pp. 65–72 (rus)
11. Fedorova N.V., Koren'kov P.A. Statiko-dinamicheskoe deformirovanie monolitnyh zhelezobetonnyh karkasov zdaniy v predel'nyh i zapredel'nyh sostoyaniyah [Static-dynamic deformation of monolithic reinforced concrete frames of buildings in limiting and transcendental states] // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. №. 6. Pp. 90-100 (rus)
12. Fedorova N.V., Fan D.K., Nguen T.CH. Eksperimental'nye issledovaniya zhivuchesti zhelezobetonnyh ram s rigelyami, usilennymi kosvennym armirovaniem [Experimental studies of the survivability of reinforced concrete frames with crossbars reinforced with indirect reinforcement] // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2020. №. 1. C. 92-100 (rus)
13. Trekin N.N., Kodysh E.N., Kelasiev N.G., Shmakov S.D., Chaganov A.B., Terehov I.A. The improvement of protection methods from the progressive collapse of one-storey industrial buildings // *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2019. T. 1425. №. 1. C. 012050
14. K. D. Alogla, L. Weekes, L. Augusthus Nelson. Theoretical assessment of progressive collapse capacity of reinforced concrete structures // *Mag. Concr. Res*. 2017. № 69(3) C. 145–162.
15. Helmy H., Salem H., Mourad S. Progressive collapse assessment of framed reinforced concrete structures according to UFC guidelines for alternative path method // *Engineering Structures*. 2012. T. 42. P. 127-141.
16. F. Mohajeri Nav, U. Nima, R. Abbasnia. Analytical investigation of reinforced concrete frames under middle column removal scenario // *Adv. Struct. Eng*. 2018. № 21.9. C. 1388–1401.
17. Pham A. T., Tan K. H. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading // *Engineering Structures*. 2017. T. 139. Pp. 31-45.
18. Rahai A. et al. Progressive collapse assessment of RC structures under instantaneous and gradual removal of columns // *Advances in Structural Engineering*. 2013. T. 16. №. 10. P. 1671-1682.
19. Tsai M. H., Zhuang W. B. An Analytical Approach for the Flexural Robustness of Seismically Designed RC Building Frames Against Progressive Collapse // *International Journal of Civil Engineering*. 2020. T. 18. P. 1025-1037.
20. Yang T., Chen W., Han Z. Experimental investigation of progressive collapse of prestressed concrete frames after the loss of middle column // *Advances in Civil Engineering*. 2020. T. 2020.
21. Fedorova N.V., Khalina T.A. Issledovanie dinamicheskikh dogruzhenij v zhelezobetonnyh konstruktivnyh sistemah pri vnezapnyh strukturnykh perestrojkah [Investigation of dynamic loadings RS structural systems with sudden structural reorganizations] // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2017. №5. S. 32-36
22. Patent 2642542 Rossijskoj Federacii. Ustrojstvo dlya eksperimental'nogo opredeleniya dinamicheskikh dogruzhenij v ramno-sterzhnevyyh konstruktivnyh sistemah [A device for experimental determination of dynamic additions in frame-rod structural systems] / N. V. Klyueva, P. A. Koren'kov; zayavitel' i patentootbladatel' KFU; опубл. 29.01.2018 (rus)
23. Fedorova N.V., Fan D.K., Nguen T.CH. Eksperimental'nye issledovaniya zhivuchesti zhelezobetonnyh ram s rigelyami, usilennymi kosvennym armirovaniem [Method of physical models of reinforced concrete resistance] // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2013. №. 12. Pp. 51-55 (rus)
24. Fedorova N. V., Ngoc V. T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions // *Journal of Physics: Conference Series*. – *IOP Publishing*, 2019. T. 1425. №. 1. C. 012033

Информация об авторах:

Ильюшенко Татьяна Александровна

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
аспирант кафедры уникальных зданий и сооружений.

E-mail: tatkhalina93@yandex.ru

Колчунов Виталий Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
Академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой уникальных зданий и сооружений,

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

профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: asiorel@mail.ru

Федоров Сергей Сергеевич

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

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве.

E-mail: FedorovSS@mgsu.ru

Information about authors:

Iliushchenko Tatiana A.

Southwest State University, Kursk, Russia,
postgraduate student of unique buildings and structures.

E-mail: tatkhalina93@yandex.ru

Kolchunov Vitaliy Iv.

South-West State University, Kursk, Russia,
Academician of RAACS, Doctor of Engineering, professor, head of the department of unique building and structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
professor of the department of reinforced concrete and stone structures.

E-mail: asiorel@mail.ru

Fedorov Sergey S.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
candidate in technical sciences, Department of Information Systems, Technology and Automation in Construction.

E-mail: FedorovSS@mgsu.ru