

Н.В. ФЕДОРОВА¹, ФАН ДИНЬ ГУОК¹, НГУЕН ТХИ ЧАНГ¹¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИВУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМ С РИГЕЛЯМИ, УСИЛЕННЫМИ КОСВЕННЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований деформирования, трещиностойкости и несущей способности многоэтажных монолитных железобетонных рам, усиленных косвенным армированием при их статико—динамическом нагружении, вызванном внезапным гипотетическим удалением одной из колонн. По экспериментальным данным построены диаграммы «момент — кривизна» и «нагрузка — ширина раскрытия трещин» при рассматриваемом двух этапном режиме нагружения. Полученные результаты позволили оценить динамические догружения в элементах исследуемой рамы (статическом — на первом и динамическом — на втором этапе). Сопоставлением опытных параметров диаграммы для конструкций рам усиленных косвенной арматурой и рам без косвенного армирования показано, что применение косвенного армирования в дополнение к обычному стержневому армированию повышает живучесть конструктивной системы при особых воздействиях и может рассматриваться как один из способов защиты железобетонных каркасов зданий от прогрессирующего обрушения.

Ключевые слова: железобетонная конструкция, особое воздействие, экспериментальные исследования, статико — динамическое нагружение, косвенное армирование

N.V. FEDOROVA¹, FAN DINH GUOK¹, NGUYEN THI CHANG¹¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

EXPERIMENTAL LIFE STUDIES OF REINFORCED CONCRETE FRAMES WITH GIRDERS REINFORCED BY INDIRECT REINFORCEMENT

Abstract. Results of experimental investigations of deformation, crack resistance and bearing capacity of multi-storey monolithic reinforced concrete frames reinforced by indirect reinforcement at their static-dynamic loading caused by sudden hypothetical removal of one of the columns are presented. According to the experimental data, diagrams "moment - curvature" and "load - crack opening width" are built under the considered two stage loading mode: the obtained results allowed to estimate dynamic loading in frame elements (static - at the first stage and dynamic - at the second stage). Comparison of experimental parameters of the diagram for structures of frames reinforced by indirect reinforcement and frames without indirect reinforcement shows that the use of indirect reinforcement in addition to conventional rod reinforcement increases the survival of the structural system under special effects and can be considered as one of the ways to protect reinforced concrete frames of buildings from progressive collapse.

Keywords: reinforced concrete structure, special impact, experimental studies, static - dynamic loading, indirect reinforcement.

Введение

В связи с введением в практику проектирования России и ряда других стран нормативных документов нового поколения, нормирующих требования по защите зданий и сооружений от особых аварийных воздействий [1-12] актуальны исследования, направленные на оценку способов защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Для конструктивных систем из железобетона одним из эффективных относительно недорогих способов защиты может стать способ усиления, основанный на применении косвенного армирования сжатых зон - как элементов, повышающих их прочность и пластичность сечений при из-

менениях в них силовых потоков внезапной структурной перестройкой конструктивной системы [13,14]. В настоящей статье приведены некоторые результаты экспериментальных исследований многоэтажных железобетонных рам с ригелями, усиленными в опорных зонах косвенным армированием.

Методика исследования

Одним из сценариев аварийного воздействия на конструктивную систему является сценарий внезапного удаления из нее одной из несущих конструкций (рисунок 1), например, колонны первого этажа [6,11,15,16]. Экспериментально моделирование такого воздействия выполнено для конструкции железобетонной трехэтажной двухпролетной рамы с такими же размерами и армированием что и в опытах [17], но ее ригели дополнительно усилены в опорных зонах косвенной арматурой в виде сеток (рисунок 2). Целью испытаний являлось определение параметров статико - динамического деформирования элементов железобетонной рамы для оценки эффективности косвенного армирование при защите таких конструкций от прогрессирующего обрушения.

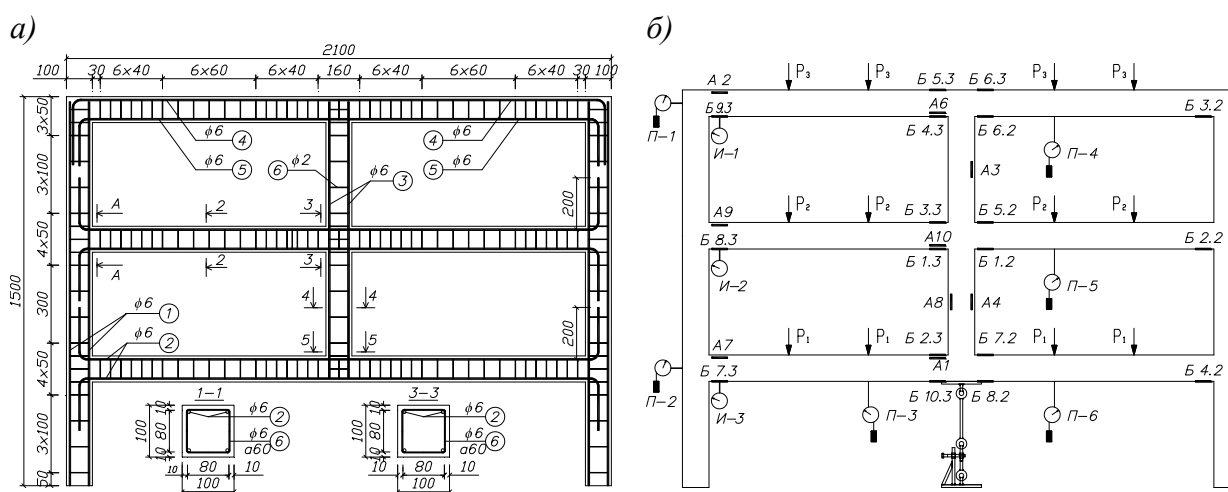


Рисунок 1 – Схемы конструкции железобетонной рамы без косвенной арматуры:
а - схема армирования, б - схема нагрузки и установки приборов

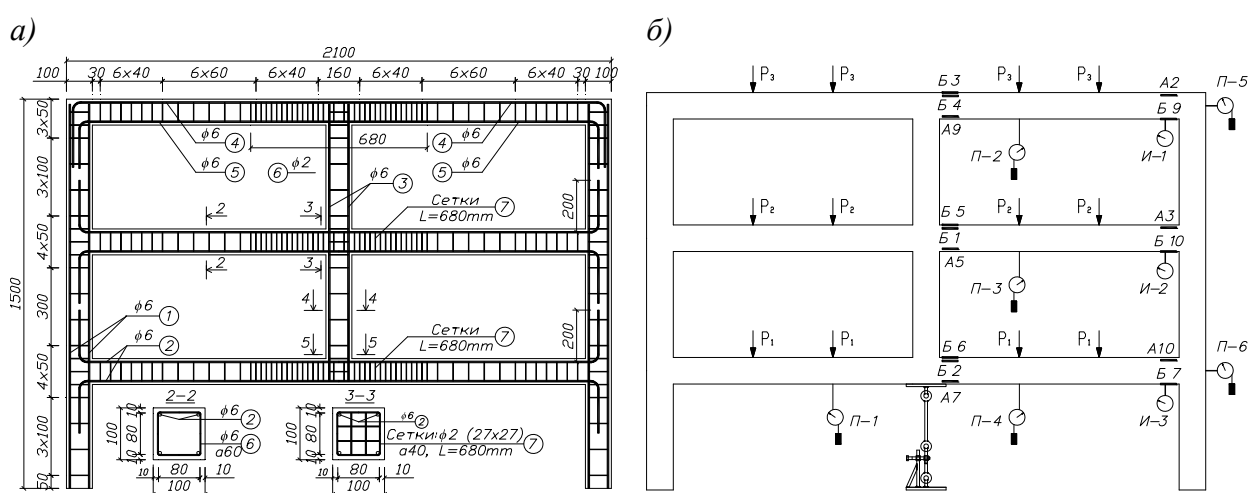


Рисунок 2 – Схемы конструкции железобетонной рамы с косвенной арматурой:
а - схема армирования, б - схема нагрузки и схемы установки приборов

Испытаны два опытных образца рамы РЖ-БК - без косвенной арматуры (рисунок 1) и РЖ-СК - с косвенной арматурой (рисунок 2). Конструкции выполнены из среднезернистого бетона. Ригели рам армированы симметричной арматурой из четырех стержней диаметром 6 мм класса А 240. Поперечная арматура принята из проволоки диаметром 2 мм, шагом в приопорных зонах 40 мм и в пролете - 60 мм. Ригели в приопорных зонах усилены косвенным армированием в виде сеток С-1 из проволоки с ячейкой 27х27мм диаметром 2 мм., установленных шагом 40 мм на длине ригеля 680 мм. Характеристики материалов опытных конструкций рам приведены в таблице 1. Общий вид испытаний опытных конструкций приведен на рисунке 3.

Таблица 1 – Характеристики материалов опытных конструкций рам

Бетон	E_b (мПа)	R_m (мПа)	R_{ch} (мПа)	$R_{b,n}$ (мПа)	R_b (мПа)
РЖ-БК	13669.24	7.53	5.68	4.26	3.28
РЖ-СК	23781.82	20.69	15.60	11.70	9.00
Арматура	E_s (мПа)	$R_{s,n}$ (мПа)	R_s (мПа)	R_{sc} (мПа)	$\sigma_{sc,u}$ (мПа)
A240 (□6)	247699.93	326.55	283.95	283.95	400.00
B500 (□2)	200000.00	500.00	435.00	435.00	400.00



Рисунок 3 – Общий вид испытаний опытных конструкций

Одновременно с испытаниями опытных конструкций рам для определения физико-механических характеристик бетона, в том числе усиленного косвенной арматурой, были испытаны бетонные кубы с ребром 70 мм, бетонные призмы и призмы, армированные сетками С-1 из проволоки диаметром 2 миллиметра с ячейкой 27 мм, установленным шагом 40 миллиметров по высоте призм.

Результаты и обсуждение

Анализ результатов испытаний позволяет отметить следующее.

Рост кривизны в приопорном сечении А-А (см. рисунок 1,2) ригелей рамы до уровня нагрузки трещинообразования был близок к линейному (см. рисунок 4).

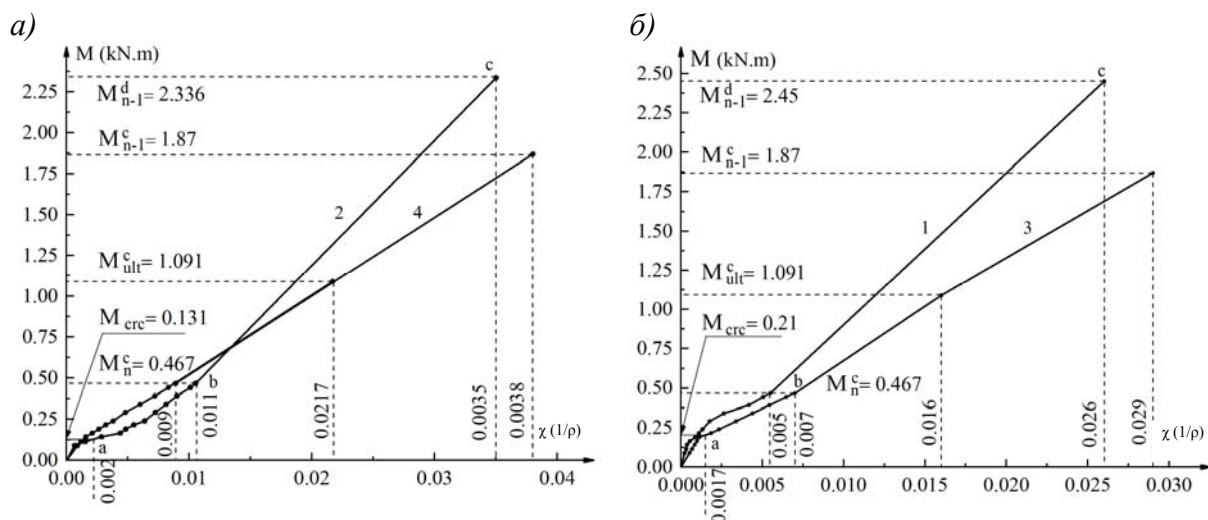


Рисунок 4 – Зависимости «момент — кривизна» в опорном сечении А-А при статико-динамическом нагружении рамы РЖ-БК(а) и РЖ-СК(б) соответственно:

1, 2 – опытные значения, 3, 4 – расчетные значения

Образование трещин в наиболее напряженных сечениях растянутых зон ригелей резко изменяет жесткость элементов ригелей, что характеризовалось значительным ростом кривизн в рассматриваемом сечении.

После внезапного удаления в опытной конструкции средней колонны происходило изменение силовых потоков в конструкции рамы, высокоскоростное догружение всех элементов конструктивной системы, что характеризовалось мгновенным увеличением кривизн в сечениях ригелей рамы максимальные значения которых превышали их значения в исходной первичной системе в 3-5 раз.

В процессе испытаний, с помощью цифровой видеокамеры было определено время динамического догружения ригелей рамы от момента удаления колонны до максимального всплеска перемещений в сечениях ригелей, примыкающих к удаленной опоре. В опорном сечении нижнего ригеля рамы при удалении средней колонны в сечении А-А оно составило 0,08 сек, в пролетном сечении - 0,05 сек. Сопоставляя эти значения со значениями времени динамического догружения полученными в испытаниях рам без их усиления косвенным армированием [17-20] можно отметить заметное увеличение времени деформирования на первой полуволне динамического догружения ригелей с 0,03-0,04 сек. до 0,05-0,08 сек. Из этого следует, что установка косвенной арматуры в приопорных зонах ригелей увеличивает пластические деформации сжатых зон ригелей и соответственно повышает их демпфирующие свойства. Это подтверждается и испытаниями на сжатие вспомогательных опытных образцов не армированных и армированных арматурными сетками бетонных призм (рисунок 5). Было установлено, что косвенное армирование призм при их статико-динамическом нагружении при прочих равных условиях повышает их динамическую прочность и заметно увеличивает пластические деформации при нагружении (рисунок 5, в, г). Аналогичный вывод об увеличении пластических деформации в изгибаемых конструкциях балок, армированных в сжатой зоне косвенной арматурой был сделан по результатам исследований [13, 14].

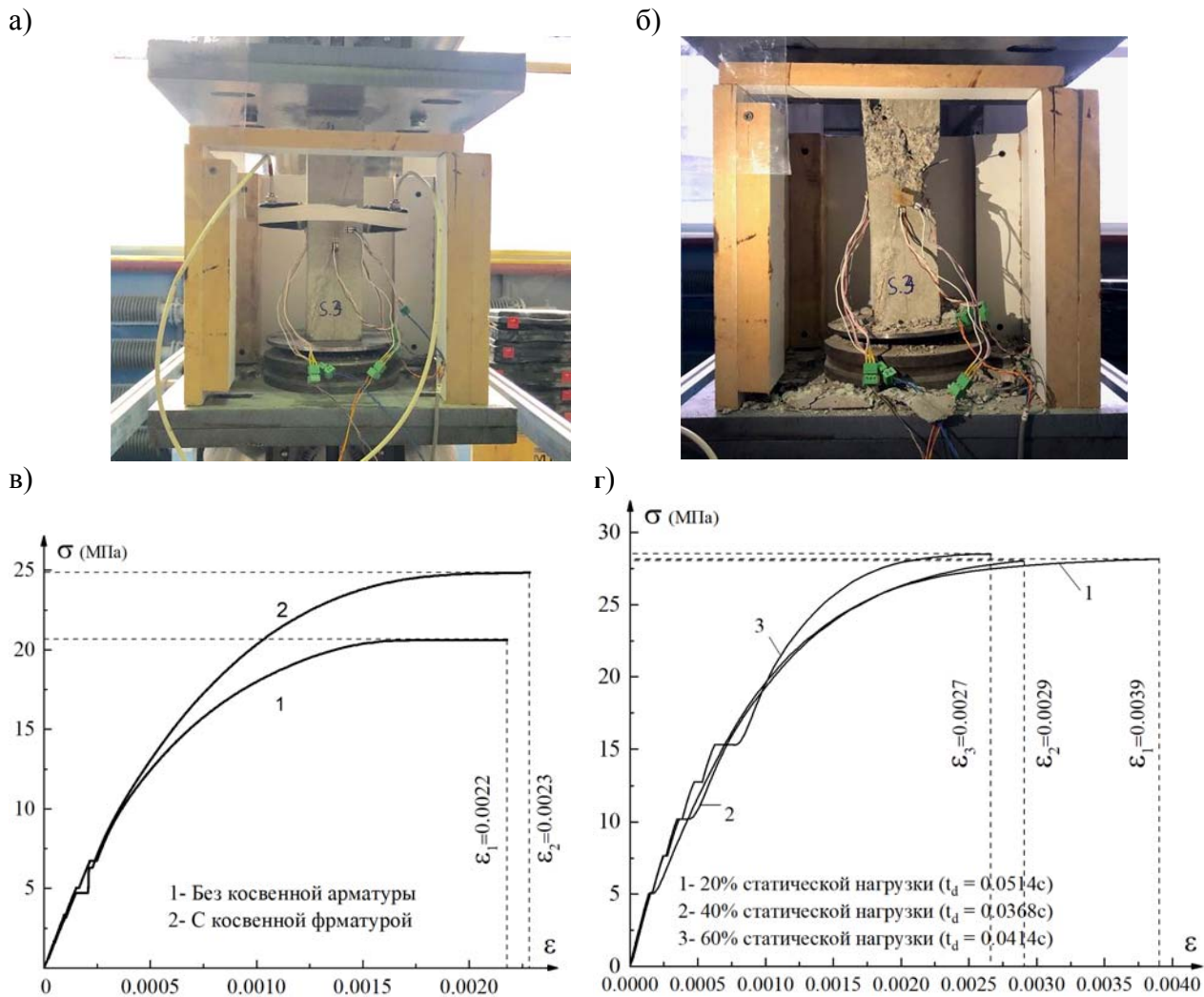


Рисунок 5 – Экспериментальные исследования опытных образцов призм с косвенным армированием при статическом (в) и статико – динамическом (г) режимах нагружения: а, б – общий вид испытаний; в, г - кривые «напряжение - деформация» бетонных призм при статическом и статико-динамическом нагружении соответственно:

1- без косвенного армирования, 2- с косвенным армированием

Важным параметром при исследованиях статико—динамического деформирования железобетонных рам, вызванного особым воздействием в виде внезапного удаления одной из колонн, является определения коэффициента динамического догружения в конструктивных элементах рамы. Анализ трещинообразования в опытных конструкциях рам до приложения особого воздействия показал, что значения момента трещинообразования в раме с косвенной арматурой существенно выше (см. рисунок 6).

Первые трещины в приопорной растянутой зоне ригеля над первым этажом при статическом нагружении рамы с раскрытием до 0,05 мм появились при суммарной нагрузке $\sum P_i^{st} = 8,84$ кН ($M_{cr} = 0,165$ кН.м). Затем на следующем этапе нагружения при нагрузке $\sum P_i^{st} = 12,01$ кН ($M_{cr} = 0,216$ кН.м) появились аналогичные трещины в ригелях над вторым и третьим этажом рамы. Ширина раскрытия трещины в опытных конструкциях рам без косвенного армирования после динамического догружения, вызванного внезапным удалением центральной колонны при суммарной динамической нагрузке $\sum P_i^d = 27,56$ кН составила $a_{crc}^d = 1,5$ мм, в раме с косвенным армированием - $a_{crc}^d = 0,55$ мм (см. рисунок 7).

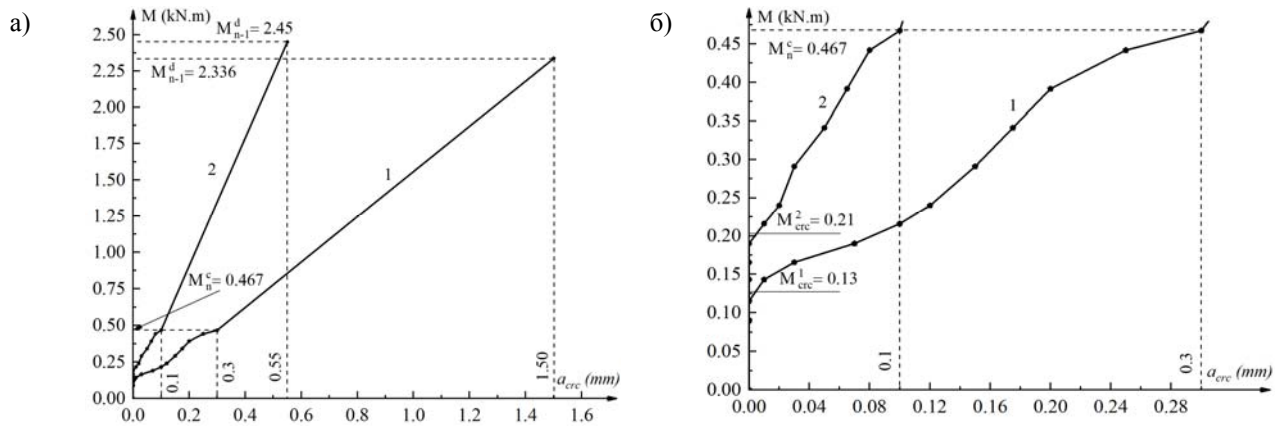


Рисунок 6 – Общий вид диаграмм (а) и фрагмент статического участка роста ширины раскрытия трещин (б) при статическом нагружении и динамическом догружении рамы при удалении средней колонны:
1 - без косвенной арматуры и 2 - с косвенной арматурой

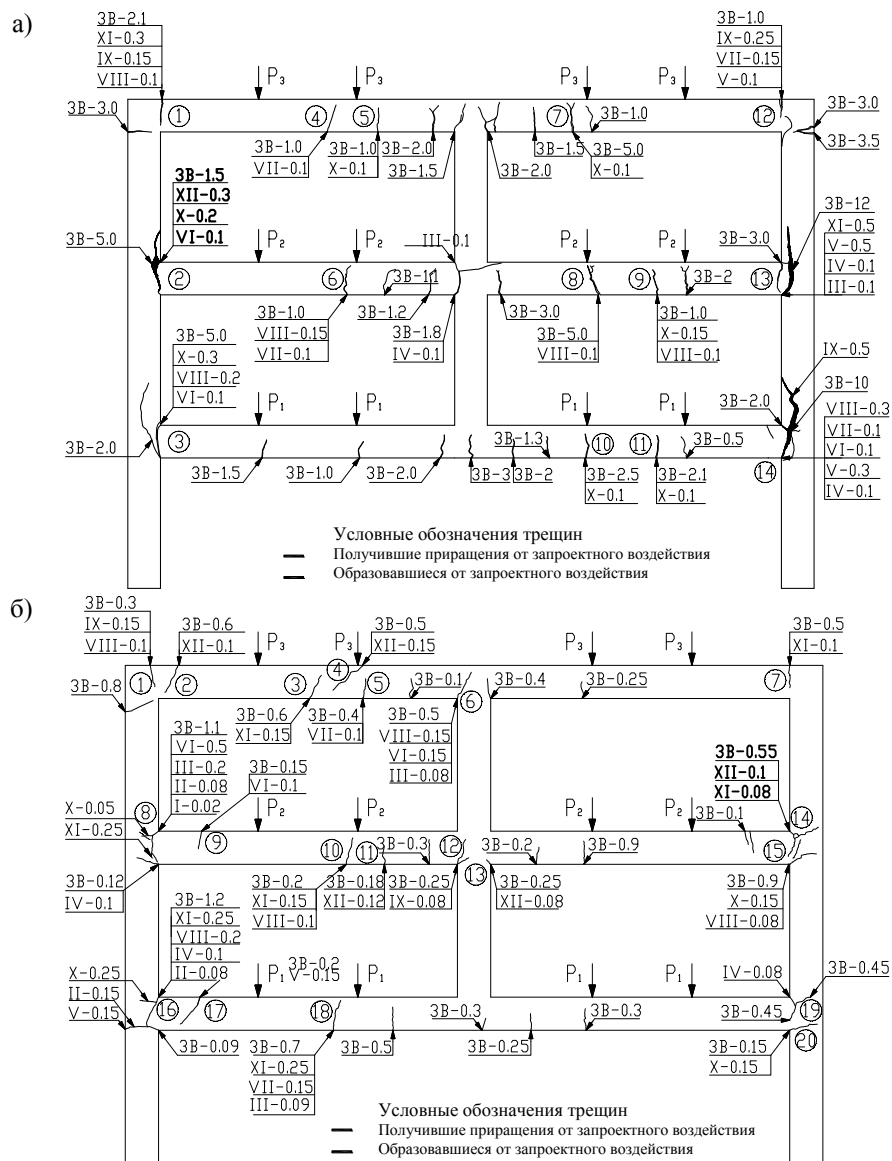


Рисунок 7 – Общий вид трещинообразования в раме после особого воздействия:
а) без косвенной арматуры, б) с косвенной арматурой

Коэффициент динамического догружения наиболее напряженного сечения ригеля, примыкающего к удаленные колонне от рассматриваемого воздействия, вычисленный как отношение ширины раскрытия трещин после динамического догружения (n-1) - системы к значению ширины раскрытия трещин при статическом нагружении исходной n - системы для рамы без косвенного армирования составил $\theta_{ds}=5,0$, для рамы с косвенной арматурой $\theta_{ds}=5,5$. Сопоставляя эти значения с опытными значениями коэффициента динамического догружения, полученного в испытаниях аналогичных рам, но без косвенного армирования [17] установлено, что опытные значение θ_{ds} в конструкциях монолитных железобетонных рам с косвенной арматурой на 27-30 % меньше чем в рамах без косвенной арматуры.

Анализ численных значений ширины раскрытия трещин после динамического догружения рам обеих серий показал следующее. Деформации арматуры ε_{su} вычисленные по опытным значениям ширины раскрытия трещин в рамах без косвенного армирования достигли предельных значений при особом воздействии статической нагрузки и динамического догружения при $M_{ult}^d = 1,98 \text{ кН.м}$.

В опытных конструкциях рам с ригелем, усиленным косвенным армированием при суммарной статической нагрузке $\sum P_i^{st} = 12,01 \text{ кН}$ и максимальном динамическом догружении предельные деформации в арматуре наиболее напряженных сечений соответствующие рассматриваемому особому воздействию достигнуты не были.

Из этого следует вывод о том, что установка косвенного армирования в наиболее напряженных зонах конструктивных элементов монолитных железобетонных рам (с учетом возможного изменения силовых потоков) после внезапного гипотетического удаления одной из несущих конструкций, может стать одним из возможных способов защиты железобетонных каркасов зданий от прогрессирующего обрушения.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования деформирования, трещинообразования и разрушение монолитных железобетонных рам позволили установить эффективность установки косвенного армирования несущих элементов для повышения их живучести и соответственно защиты от прогрессирующего обрушения при особых и аварийных воздействиях.

Установка косвенной арматуры в виде сеток в приопорных участках ригелей на все высоту их сечения повышает прочность бетона сжатой зоны и уменьшают ширину раскрытия трещин при нагружении рамы статической нагрузкой и динамическом догружении, вызванным аварийным воздействием.

Косвенное армирование в виде арматурных сеток ригелей монолитных рам, в дополнение к обычному стержневому армированию, может рассматриваться как один из способов защиты железобетонных каркасов зданий от прогрессирующего обрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. – М.: Минстрой России, 2018. 33с.
2. СП 296.1325800.2017 Здания и сооружения. Особые воздействия. Минстрой России. М., 2017. 23 с.
3. General services administration (GSA). Alternative path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance, revision 1, January 28, 2016
4. 53 UFC 2-023-03. Unified facilities criteria (UFC). Design of buildings to resist progressive collapse, 14 July 2009, change 3, 1 november 2016
5. Травуш В.И., Федорова Н.В. Живучесть конструктивных систем сооружений при особых воздействиях // Инженерно-строительный журнал. 2018. №5. С. 73-80.
6. Travush V.I., Fedorova N.V Survivability parameter calculation for framed structural systems // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2017. № 1(33). Pp. 6–14.

7. Fintel M., Schultz D.M. Philosophy for Structural Integrity of Large Panel Buildings // *Journal of the Prestressed Concrete Institute*. 1976. Vol. 21. No 21. Pp. 46-69.
8. Ahmadi R., Rashidian O., Abbasnia R., Nav F.M., Usefi N. Experimental and Numerical Evaluation of Progressive Collapse Behavior in Scaled RC Beam-Column Subassemblage // *Shock Vib*. 2016.
9. Pham A.T., Tan K.H. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading // *Eng. Struct.* 2017. № 139. С. 31–45.
10. Yu J., Tan K.H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages // *Eng. Struct.* – 2013. – № 55 – 90–106с.
11. 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.
12. Кабанцев О.В., Тамразян А.Г. Учет изменений расчетной схемы при анализе работы конструкции // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 5(49). С. 15-26. DOI: 10.5862/MCE.49.2.
13. Манаенков И.К. К совершенствованию диаграммы сжатого бетона с косвенным армированием // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 2 (76). С. 41-50.
14. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. К расчету изгибаемых железобетонных элементов с косвенным армированием сжатой зоны // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 7. С. 41-44.
15. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Чесноков Д.А. Защита многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. №6. С.8-13.
16. Зенин С.А., Шарипов Р.Ш., Кудинов О.В., Шапиро Г.И., Гасанов А.А. Расчёты крупнопанельных зданий на устойчивость против прогрессирующего обрушения методами предельного равновесия и конечного элемента // *Academia. Архитектура и строительство*. 2016. № 4. С. 109-113.
17. Fedorova N., Vu N.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions // *IOP Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2020. Volume 1425. 1. 012033
18. 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.
19. Колчунов В.И., Кудрина Д.В. Экспериментально-теоретические исследования преднапряженных железобетонных элементов рам в запредельных состояниях // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2010. №3. С. 14-17.
20. Klueva N., Emelyanov S., Kolchunov V., Gubanova M. Criterion of crack resistance of corrosion damaged concrete in plane stress state // *Procedia Engineering*. 2015. T. 117. С. 179-185.

REFERENCES

1. SP 385.1325800.2018 Zashchita zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya. Pravila proyektirovaniya. Osnovnyye polozheniya [Building Code of Russian Federation SP 385.1325800.2018 Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules. The main provisions]. Minstroy Rossii. Moscow, 2018. 33 p.(rus)
2. SP 296.1325800.2017 Zdaniya i sooruzheniya. Osobyie vozdeystviya [Code of Regulations 296.1325800.2017 Buildings and structures. Special effects]. Minstroy Rossii. Moscow, 2017. 23 p. (rus)
3. General services administration (GSA). Alternative path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance, revision 1, January 28, 2016.
4. UFC 2-023-03. Unified facilities criteria (UFC). Design of buildings to resist progressive collapse, 14 July 2009, change 3, 1 november 2016.
5. Travush, V.I., Fedorova, N.V. Survivability of structural systems of buildings with special effects. *Magazine of Civil Engineering*. 2018, No.5. Pp. 73–80.
6. Travush V.I., Fedorova N.V Survivability parameter calculation for framed structural systems. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2017. No 1 (33). Pp. 6–14.
7. Fintel M., Schultz D.M. Philosophy for Structural Integrity of Large Panel Buildings. *Journal of the Prestressed Concrete Institute*. 1976. Vol. 21. No 21. Pp. 46-69.
8. Ahmadi R., Rashidian O., Abbasnia R., Nav F.M., Usefi N. Experimental and Numerical Evaluation of Progressive Collapse Behavior in Scaled RC Beam-Column Subassemblage. *Shock Vib*. 2016.
9. Pham A.T., Tan K. H. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading. *Eng. Struct.* 2017. No 139. Pp. 31–4.
10. Yu J., Tan K. H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages. *Eng. Struct.* 2013. No 55. Pp. 90–106.
11. Kodysh E.N. Proyektirovaniye zashchity zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya s uchetom vozniknoveniya osobogo predel'nogo sostoyaniya [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 No 10 Pp. 95-101.

12. Kabancev O.V., Tamrazyan A.G. Uchet izmenenij raschetnoj skhemy pri analize raboty konstrukcii [Allowing for changes in the calculated scheme during the analysis of structural behaviour]. *Magazine of Civil Engineering*, No.5 (49), 2014 Pp. 15-26. DOI: 10.5862/MCE.49.2.
13. Manaenkov I.K. K sovershenstvovaniyu diagrammy szhatogo betona s kosvennym armirovaniem [To improve the diagram of compressed concrete with indirect reinforcement]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. No. 2 (76), Pp. 41–50. (rus).
14. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K. K raschetu izgibaemykh zhelezobetonnykh jelementov s kosvennym armirovaniem szhatoj zony [To the calculation of bent reinforced concrete elements with indirect reinforcement of the compressed zone]. *Industrial and Civil Engineering*. 2016. No. 7, Pp. 41–44. (rus).
15. Kodysh E.N., Trekin N.N., Chesnokov D.A. Zashchita mnogoetazhnykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya [Protection of Multistory Buildings from Progressing Collapse]. *Industrial and Civil Engineering*. 2016. No. 6. Pp. 8–13. (rus)
16. Zenin S.A., Sharipov R.Sh., Kudinov O.V., Shapiro G.I., Gasanov A.A. Methods of calculating of large-panel buildings: how to prevent progressing collapse. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2016 No. 4 Pp. 109–113. (rus)
17. Fedorova N., Vu N.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions. *IOP Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2020. Volume 1425. 1. 012033
18. Fedorova. N.V., Koren'kov P.A., Vu N.T. Experimental method of research of deformation of monolithic reinforced concrete building under accidental actions. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. No. 4 (78). Pp. 42-52. (rus)
19. Kolchunov V.I., Kudrina D.V. Eksperimental'no-teoreticheskiye issledovaniya prednapryazhennykh zhelezobetonnykh elementov ram v zapredel'nykh sostoyaniyakh [Experimental and theoretical studies of prestressed reinforced concrete frame elements in transcendental states]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2010. No 3. Pp. 14-17.
20. Klueva N., Emelyanov S., Kolchunov V., Gubanova M. Criterion of crack resistance of corrosion damaged concrete in plane stress state. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 117. Pp. 179-185.

Информация об авторах

Федорова Наталия Витальевна

ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: FedorovaNV@mgsu.ru

Фан Динь Куок

ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: D2nucevn@gmail.com

Нгуен Тхи Чанг

ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
магистрант кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: Nguyentrangxdk54@gmail.com

Information about authors

Fedorova Natalia V.

National Research Moscow State Construction University, Moscow, Russia,
doctor of Engineering, professor, professor of Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.
E-mail: FedorovaNV@mgsu.ru

Fang Din Kuok

National Research Moscow State Construction University, Moscow, Russia,
postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures/
E-mail: D2nucevn@gmail.com

Nguyen Tkhi Chiang

National Research Moscow State Construction University, Moscow, Russia,
master student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.
E-mail: Nguyentrangxdk54@gmail.com