

П.А. КОРЕНЬКОВ¹, Н.В. ФЕДОРОВА¹

¹Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УЗЛОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Аннотация. Разработана комплексная методика экспериментального исследования узлового соединения железобетонных рам при статико-динамическом нагружении. В качестве объекта исследования выбрана крестообразная модель узла рамного каркаса многоэтажного здания. Для испытаний предложено использовать специально разработанную нестандартную установку копрового типа, интегрированную в гидравлическую систему, которая позволяет моделировать как статические, так и динамические воздействия. Экспериментальными исследованиями, с использованием современных измерительных систем, включая тензометрические розетки и высокоскоростную видеосъемку цифровой видеокамерой, получены деформации бетона и арматуры, параметры трещинообразования и разрушения для опытных конструкций узлов рам. Полученные экспериментальные данные о статическом и динамическом сопротивлении узла железобетонной рамы позволят верифицировать создаваемые расчетные модели железобетонных конструкций рамных каркасов зданий.

Ключевые слова: железобетон, предельное состояние, статико-динамическое нагружение, узлы рам, экспериментальные исследования, трещинообразование, разрушение.

P.A. KORENKOV¹, N.V. FEDOROVA¹

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

EXPERIMENTAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE FRAME JOINT RESISTANCE UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADING

Abstract. A comprehensive methodology for experimental research of nodal connections under static-dynamic loading has been developed. A cruciform model of a frame joint in a multi-story building was chosen as the design scheme. For testing, it is proposed to use a specially developed non-standard drop-weight type setup, integrated into a hydraulic system. This system allows for the simulation of both service and emergency impacts, including the additional dynamic loading of the joint under special conditions. The experimental studies yielded data on concrete and reinforcement deformations, crack formation parameters, and failure characteristics for the prototype frame joints. This was achieved using modern measurement systems, including strain gauge rosettes and high-speed video recording. The obtained experimental data on the static and dynamic resistance of the frame system joints will allow for the verification of analytical models, enhance the current understanding of the behavior of joints made from a new type of concrete, and validate both improved and newly developed analytical models for reinforced concrete building frames.

Keywords: reinforced concrete, ultimate and beyond-ultimate states, static-dynamic loading, frame assemblies, experimental studies, crack formation, destruction.

©Кореньков П.А., Федорова Н.В., 2026

1. Введение

В настоящее время изучение проблемы защиты конструктивных систем зданий и сооружений из железобетона сопротивлению прогрессирующему обрушению активно развивается в научных исследованиях российских [1-3] и зарубежных [4-7] ученых. Решены ряд задач, связанных с прогнозированием поведения несущих систем при их статико-динамическом нагружении вследствие выключения из работы отдельных несущих элементов [8-12].

В то же время экспериментальные исследования по рассматриваемой проблеме в силу разных причин, крайне ограничены, а имеющиеся относятся в основном к испытаниям конструкций на моделях. Из известных в открытой печати исследований можно отметить работы, в которых установлена степень влияния различных типов армирования железобетонных конструкций на сопротивление прогрессирующему обрушению [12-15]. Экспериментально изучались характер и схемы приложения нагрузки на исследуемые конструкции [16,17], деформирование монолитных железобетонных узлов балок и колонн для оценки альтернативных механизмов перераспределения усилий в конструктивной системе.

Известен также ряд исследований, посвященных изучению силового сопротивления узлов железобетонных рам при статических и динамических нагружениях и на их основе разработаны способы усиления узловых соединений, например, с применением бетонно-стальной оболочки [19], армированием полимерным волокном [20], введение эпоксидно-смоляных инъекций [21-22] и др.

Из недавних исследований, выполненных по рассматриваемой тематике, можно отметить работу [23], в которой представлены результаты экспериментальных исследований четырех моделей узлов балка-колонна в масштабе 1:2, запроектированные со специальными L-образными кронштейнами на концах балок. Основное внимание здесь уделялось оценке деформативности, несущей способности, развитию вантового эффекта и механизмам разрушения конструкций. Полученные авторами результаты показали, что такие узлы обладают достаточно высокой жесткостью на различных уровнях их нагружения в предельных и запредельных состояниях. При больших перемещениях учет вантового механизма сопротивления позволил значительно увеличить несущую способность конструктивной системы, что может стать дополнительным резервом при проектировании. В то же время в этой и других работах по рассматриваемой тематике [8,13,24] недостаточно изучены динамические эффекты и картины трещинообразования, возникающие при особых воздействиях. Установленные эффекты обратного аточного действия (РАА) и компрессионного аточного действия (САА) оказываются значительными, особенно при увеличении скорости воздействия, что подчеркивает важность учета картин образования и раскрытия трещин, выявленных при динамических догружениях. В первом приближении оценка такого влияния, с учетом реализации известных механизмов сопротивления приведена в работе [25], но без учета физических особенностей сопротивления железобетона после образования трещин.

На рис. 1,а представлена подконструкция рамной системы в виде двухпролетного ригеля железобетонного рамного каркаса. Методом декомпозиции здесь выделяется конструктивный узел.

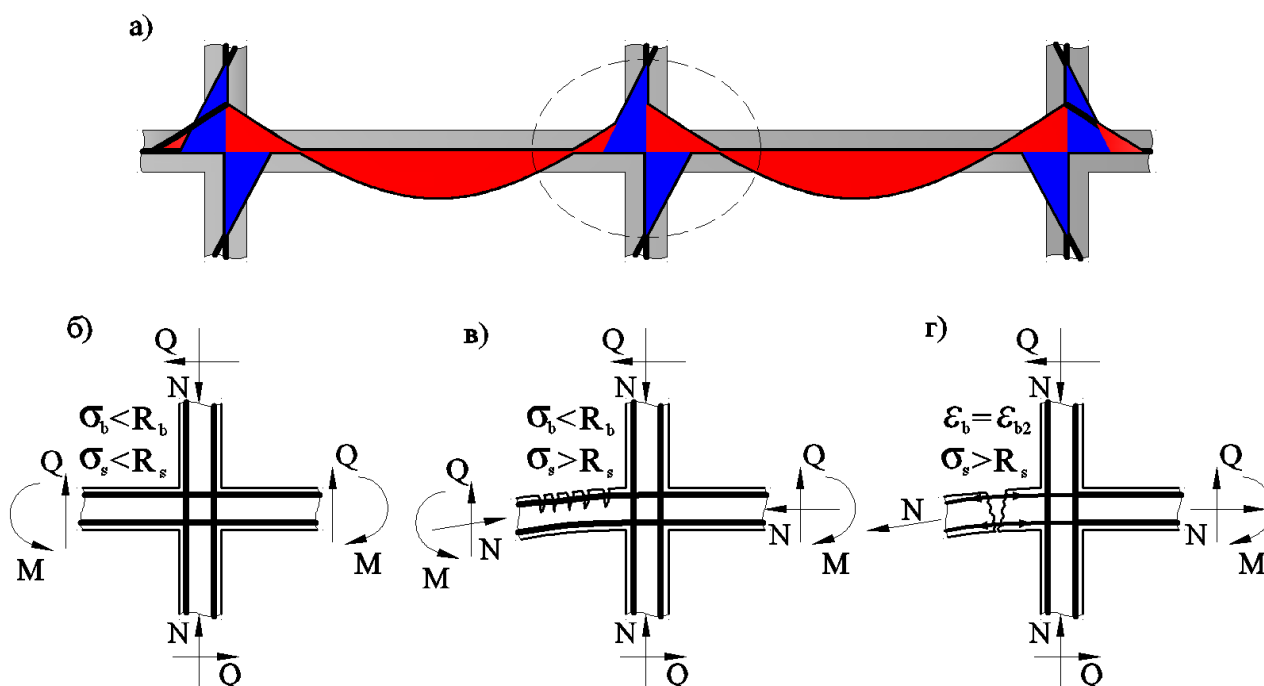


Рисунок 1 – Фрагмент каркасного здания (а) и реализация изгибного (б), арочного (в) и цепного (вантового) (г) механизма сопротивления при выключении из работы колонны крайнего ряда

В соответствии с принятой в исследованиях [26] моделью приопорный участок ригеля, примыкающего к узлу, на стадии нормальной эксплуатации работает по изгибной схеме (рис. 1,б). В результате возникновения начального локального разрушения от особого воздействия, например, разрушение промежуточной опоры, в рассматриваемой конструкции ригеля могут последовательно смениться следующие стадии напряженно-деформированного состояния: арочная схема работы ригелей в результате достижения предела текучести в растянутой арматуре $\sigma_s > R_s$ и роста деформаций, приводящего к значительному росту распора N (см. рис. 1,в); цепная схема работы ригелей после разрушения бетона сжатой зоны ($\epsilon_b = \epsilon_{b2}$) и при пластической работе наиболее растянутой арматуры в приопорном сечении $\sigma_s > R_s$ (см. рис. 1,г).

Экспериментальная проверка стадий деформирования нормальных и наклонных сечений узлов рам при статико-динамических режимах их нагружения характерных режимам нагружения рамных конструкций особыми воздействиями, в настоящее время отсутствует. В связи с этим целью настоящей работы явилась разработка методики и проведение экспериментальных исследований силового сопротивления узлов железобетонных рам каркасов зданий до и после образования трещин на всех уровнях их нагружения.

2. Модели и методы

На основании обобщения результатов исследований рамных конструктивных систем и их узлов, представленных в известных публикациях, была разработана конструкция модели опытных образцов и методика испытаний узлов железобетонных рам (рис. 2). Выбор конструктивного решения и масштаба опытного образца обусловлен необходимостью максимально адекватного моделирования реальных условий работы конструкции узла и наиболее полного отражения основных закономерностей деформирования

трещинообразования и разрушения узловых зон железобетонных рам при статическом и динамическом нагружении.

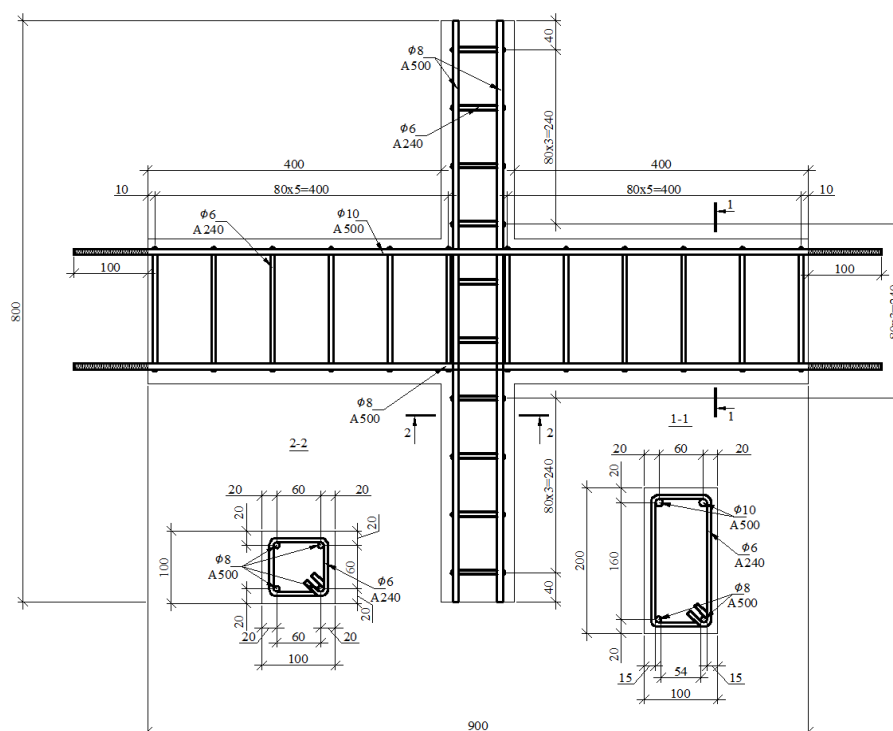


Рисунок 2 – Схема армирования конструкции опытного образца

Материалы конструкций узлов приняты следующими: тяжелый бетон со средней призмочной прочностью $R_{b,n} = 35$ МПа, рабочая продольная арматура колонн выполнена из стрежней диаметром 8 мм, класса А 500С. Рабочая продольная арматура ригелей принята из стрежней диаметром 8 и 10 мм, класса А 500С. Поперечная диаметром ригелей и колонн запроектирована из стрежней диаметром 6 мм класса А 240С. Продольная арматура имела выпуски с резьбой нарезанной на величину 100 мм, для надежной фиксации узла в испытательной установке.

Методика экспериментального исследования конструкции узла опытной рамы предусматривала установку опытного образца в специально разработанную установку в виде металлической рамы. Рама имела опорные устройства для закрепления опытного образца и упорные захваты для приложения сосредоточенных сил. Для ограничения горизонтальных перемещений опытных конструкций узлов и перемещений из плоскости изгиба торцы ригелей закреплены линейными связями (см. поз. 7, рис. 3).

Было испытано два опытных образца узла железобетонных рам. В соответствии с методикой испытания конструкция железобетонного узла рамы испытывалась в два этапа. На первом этапе испытаний к первой опытной конструкции узла с помощью гидравлической системы ступенчато прикладывалась статическая нагрузка.

Для моделирования динамического (ударного) воздействия на втором этапе испытаний использовалась специально разработанная и запатентованная установка копрового типа [27] Установка была интегрирована в гидравлическую систему, передающую нагрузку.

Способ создания динамического догружения узла реализовывался следующим образом. В силовую раму с помощью гидравлического домкрата и фиксирующих захватов устанавливается опытный образец.

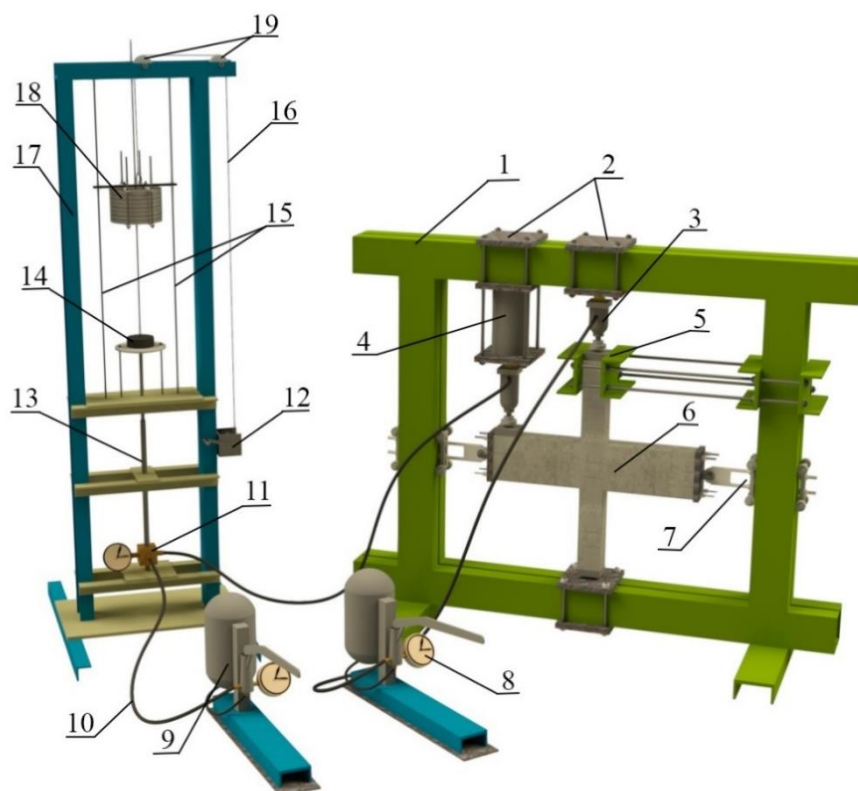


Рисунок 3 – Общий вид экспериментальной установки с гидравлической системой нагружения: 1-силовая рама; 2-упорные захваты; 3-гидравлический домкрат; 4-жесткий упор; 5-фиксирующий захват; 6-опытный образец; 7- устройство для закрепления узла от горизонтального смещения; 8-манометр; 9-насосная станция; 10-высокопрочный шланг; 11- соединительный элемент гидравлической системы; 12- лебедка поршень; 13-поршень; 14-резиновая прокладка; 15-направляющие; 16-трос; 17-силовой каркас ударной установки; 18-догружающий элемент; 19-направляющие блоки

Затем в местах передачи нагрузки были установлены гидравлические домкраты. В гидравлическую систему насосной станции нагнеталось давление, соответствующее заданному уровню статической нагрузки. Изначально экспериментальная установка подключалась к общей гидравлической системе. Затем, с помощью подъемного механизма, состоящего из блоков, троса и лебедки, осуществляется подъем догружающего элемента на заданную расчетом высоту и при его сбрасывании догружающий элемент соударяясь с резиновой прокладкой, передавал энергию удара на поршень, создавая при этом во всей гидравлической системе мгновенный градиент давления, и, соответственно, динамическое догружение опытного образца. Прирост нагрузки происходит за счет не сжимаемости жидкости в системе, и разнице площадей поршня, по которому наносится удар и поршня домкрата.

Программой исследований было предусмотрено два режима испытания узла: квазистатический- на первом этапе испытаний, с доведением опытной конструкции до разрушения; статико-динамический, при котором вначале образец нагружался до нагрузки, соответствующей эксплуатационному значению, ступенями по 10%, а затем производилось его динамическое догружение.

Для измерения деформаций бетона и арматуры использовались тензорезисторы и розетки тензорезисторов. Они устанавливались по специальной схеме (рис. 4) позволяющей определять деформации в зоне сложного напряженного состояния в месте сопряжения

ригеля с колонной (область 1) и в зоне совместного действия изгибающего момента и поперечной силы, а также сжимающих напряжений при реализации арочного механизма сопротивления (область 2) [28]. В процессе испытаний после образования трещин, в соответствии с методикой [29], устанавливались дополнительные датчики, по берегам трещин, позволяющие получать экспериментальные данные для параметров раскрытия трещин в около арматурной зоне и на различных расстояниях от оси арматуры по мере раскрытия и развития трещины

Исследование деформаций в сжатой зоне, включая определение её размеров и фактической высоты образования наклонных трещин, проводилось с помощью розеток тензорезисторов. Розетки, состоящие из четырех тензорезисторов, ориентированных под углом 45° , устанавливались на бетон в двух идентичных симметричных сечениях опытного образца (со стороны А). Такая схема позволяет экспериментально определять параметры плоского деформированного состояния узла в зоне сопряжения ригеля с колонной по измеренным опытным значениям главных деформаций ε_1 и ε_2 и угла φ между направлением ε_1 и заданной базовой осью.

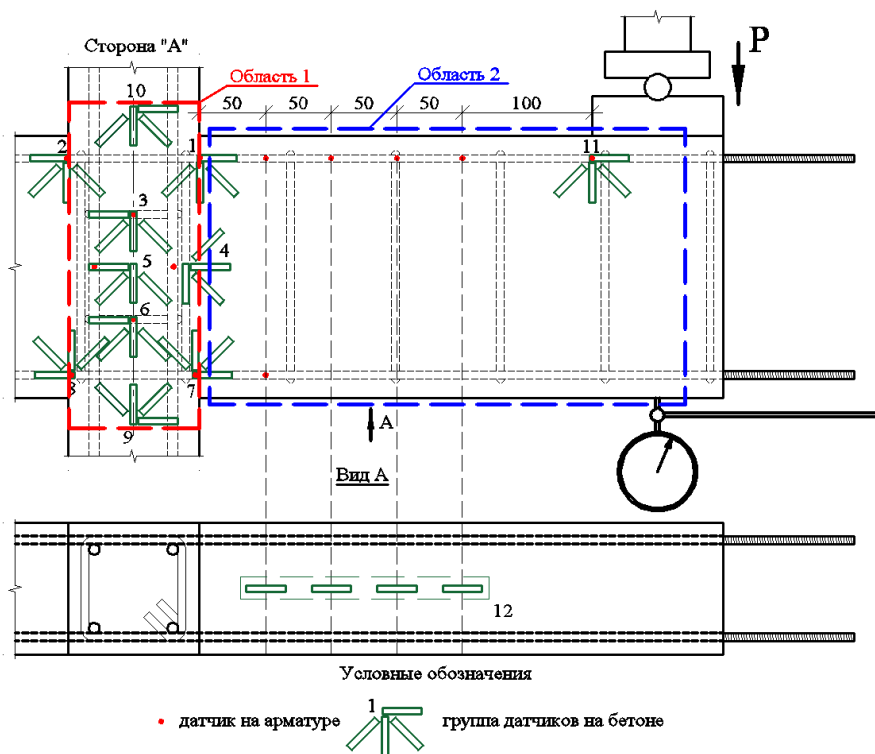


Рисунок 4 – Схема расположения групп электротензорезисторов на опытных образцах

Наряду с установкой тензорезисторов при поведении испытаний для измерения перемещений устанавливались механические приборы. Для измерения линейных перемещений и углов поворота устанавливаются прогибомеры часового типа, а также «мишени-ловушки» на поверхности опытного образца, нанесенные краской на всей поверхности опытной конструкции.

Для контроля данных, полученных методом тензометрии и подтверждения изучаемой модели деформирования рассматриваемых конструкций была предусмотрена также система наклеенных на поверхность образца магнитов с zenковкой, полностью повторяющей поверхность измерительного прибора и исключающей влияние механических неровностей

поверхности образца на точность выполняемых измерений путем приложения штангенциркуля, высокой точности измерения (0,01 мм), подключенного к компьютеру, когда значения измеряемых величин выходят за границы возможности их измерения методами тензометрии (см. рис. 5).

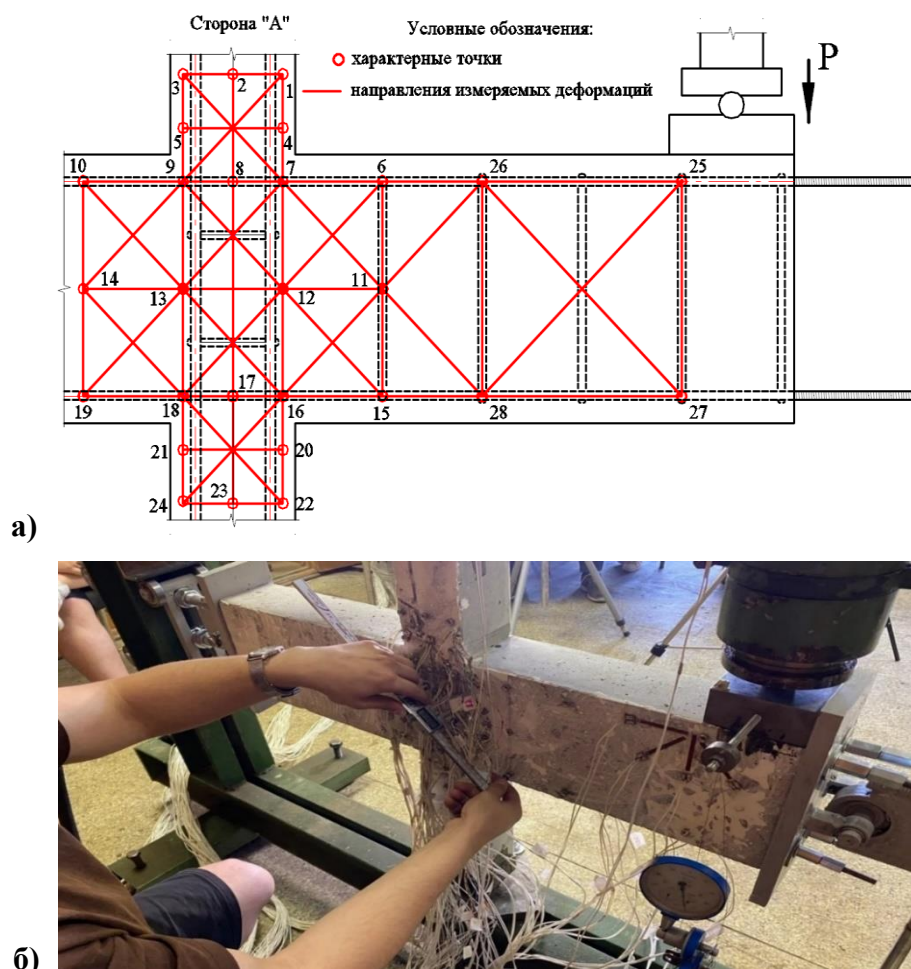


Рисунок 5 – Схема размещения характерных точек для оценки деформативности узлового соединения (а) и процесс измерения деформаций между базовыми точками (б) на прямой стороне опытных образцов

Контроль за образованием трещин осуществлялся методом визуального осмотра. Каждая новая трещина на поверхности образцов маркировалась с указанием соответствующей ступени нагружения. Ширина раскрытия трещин в точке пересечения с продольной арматурой измерялась на каждой ступени микроскопом МБП-2. Для обнаружения самых мелких трещин в элементах рам применялась лупа с 30-кратным увеличением.

Для фиксации характера образования и раскрытия трещин со стороны Б устанавливалась также камера высокого разрешения со скоростью записи 240 кадров в секунду (рис. 6).

В ходе проведения эксперимента было запланировано экспериментальное определение следующих параметров для конструкции узла рамы:

- характерных схем трещинообразования и разрушения конструкции;
- определение значения деформаций бетона и арматуры и взаимных смещений в момент образования трещин в зоне примыкания ригеля к стойке (см. рис.3, область 2 и зоне по длине ригеля);
- определение высоты сжатой зоны над нормальными и наклонными трещинами;
- определение перемещения элементов узла до и после образования трещин;

- определение ширины раскрытия и развитие трещин на оси продольной и поперечной растянутой арматуры и вдоль всего профиля трещин и изменения расстояния между трещинами l_{crc} .

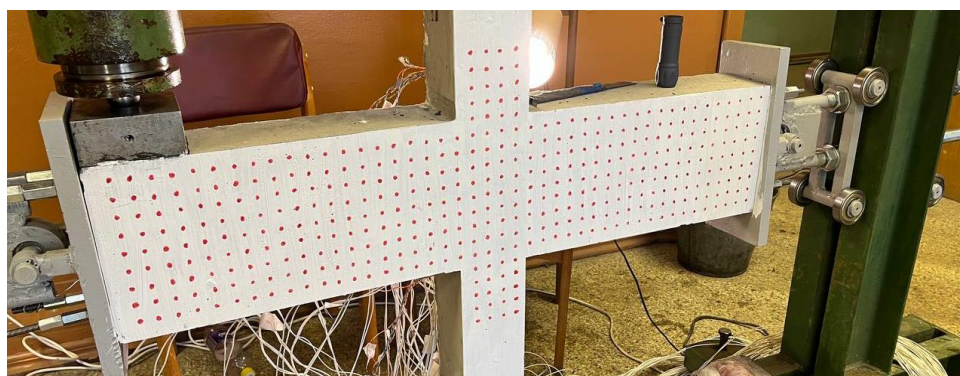


Рисунок 6 – Общий вид обратной стороны образца (стороны Б) для фиксации параметров развития и раскрытия трещин a_{crc} и Δa_{crc} цифровой видеокамерой

3. Результаты исследования и их анализ

Обработка полученных результатов измерений опытных параметров позволила установить ряд следующих особенностей сопротивления конструкции узла на разных этапах нагружения. В таблице приведены значения сосредоточенной силы P приложенной на конце ригеля (см. табл.) и значение соответствующих поэтапно приложенной нагрузке изгибающих моментов на различных ступенях нагружения.

Таблица – Значения нагрузок и изгибающих моментов на ступенях нагружения

№ ступени	P , кН	M , кН*м	№ ступени	P , кН	M , кН*м
I	3,55	1,25	VI	21,3	7,5
II	7,1	2,5	VII	24,85	8,75
III	10,65	3,75	VIII	28,4	10
IV	14,2	5	IX	31,95	11,25
V	17,75	6,25	X	35,5	12,5

Экспериментально установлено, что при статической нагрузке вплоть до 3-й ступени нагружения при $P_i = 0,30P_u$ образуются первые нормальные трещины в наиболее растянутой зоне ригеля. Затем, по мере увеличения нагрузки, на 4-й ступени нагружения образовывались наклонные трещины (рис. 7,8). Дальнейшее нагружение (этапы 5, 6 и 7) привело к образованию наклонных трещин в плосконапряженной области сопряжения ригеля с колонной, а также нормальные трещины в стойке от ее изгиба.

Полученная опытная картина прогибов на ступенях приложения относительной статической нагрузки в зависимости от относительных значений нагрузки и уровневых значений образования нормальных ($P_{crc,1}$) и наклонных ($P_{crc,2}$) трещин свидетельствует о заметном снижении жесткости ригеля после образования этих трещин и проявлении в конструкции узла нелинейных деформаций (рис. 7, кривая 1). Во время испытания второго опытного образца, в соответствии с методикой, к опытной конструкции узла, на первом этапе была приложена статическая нагрузка до уровня $P/P_{ult}=0,65$ а затем консоль узла была догружена динамической нагрузкой того же направления. Догрузка вызвало значительное приращение прогибов ригеля конструкции узла. Такой характер приложения нагрузки к узлу рамы был принят с той целью, чтобы моделировать сопротивление узла

рамы при особых воздействиях, когда к нагруженному узлу статической нагрузкой прикладывается дополнительная динамическая нагрузка [3]. При таком нагружении качественная картина образовавшихся при статической нагрузке типов не изменилась, а произошло лишь увеличение раскрытие образовавшихся при статическом нагружении трещин. (рис. 7, кривая 2).

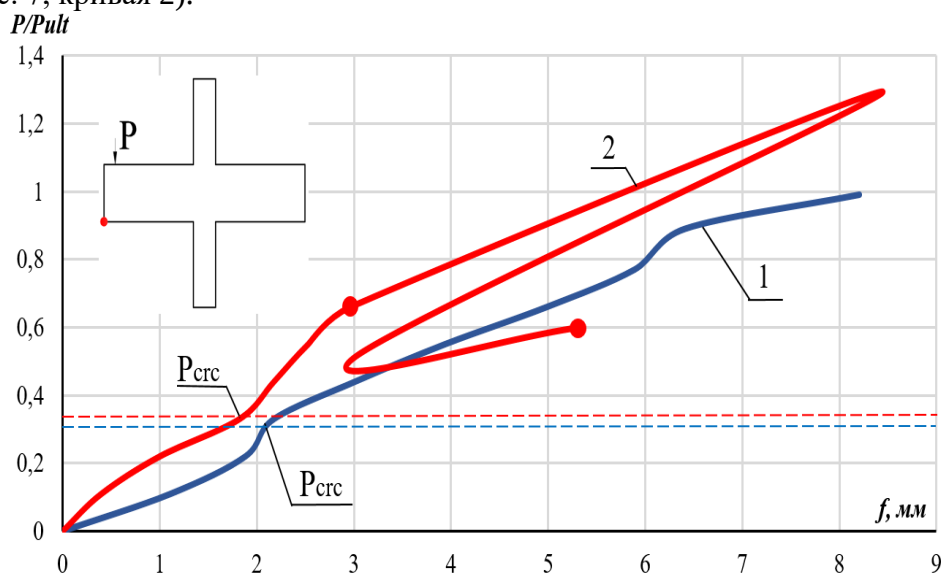


Рисунок 7 – Зависимость прогиба ригеля от относительного уровня нагрузки: 1-статическое нагружение; 2- статико-динамическое нагружение

Из этого следует важный вывод о том, что при моделировании параметров жесткости и трещиностойкости узла при статическом нагружении и динамическом воздействии картина и типы трещин может быть принята идентичной. При таком нагружении дополнительно образовались новые нормальные трещины от изгиба в верхней стойке узла (см. рис. 8).

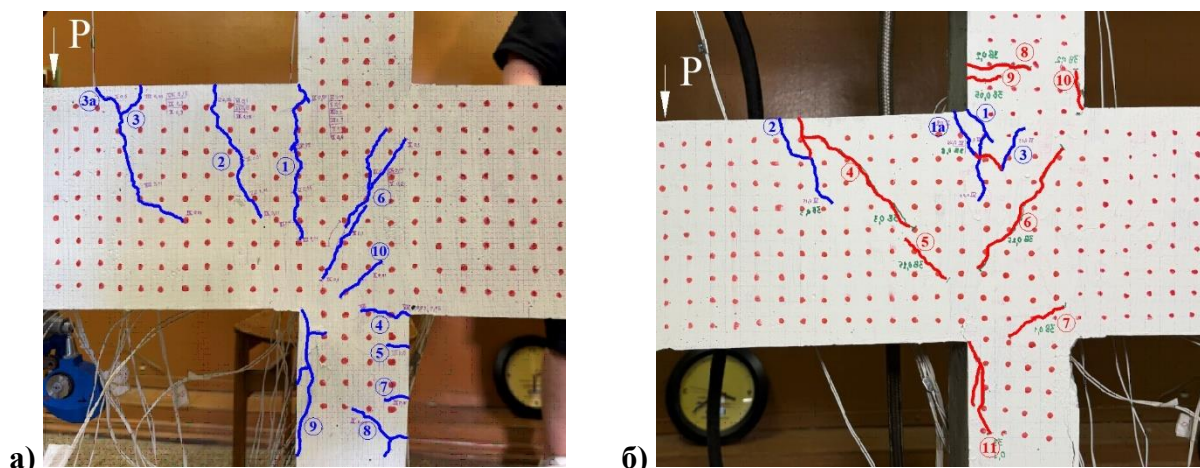


Рисунок 8 – Общий вид разрушения при испытании статической (а) и статико-динамической нагрузкой (б)

После приложения динамического воздействия (удара) на уровне нагрузки $P/P_{ult} = 0,65$ прогибы ригеля получили почти двухкратное приращение. При этом с помощью цифровой видеокамеры было определено изменение этих прогибов во времени (рис.9)

Установлено, что после динамического догружения узла период собственных колебаний составил 0,5 секунды, а частота собственных колебаний составила 2 Гц. Приращение прогиба на первом полупериоде собственных колебаний ригеля через 0,1

секунды увеличилось с 3,09 мм до 9,58 мм и соответственно ускорение до момента достижения амплитудного значения перемещения составило 649 мм/с^2 , а скорость - $64,9 \text{ мм/с}$.

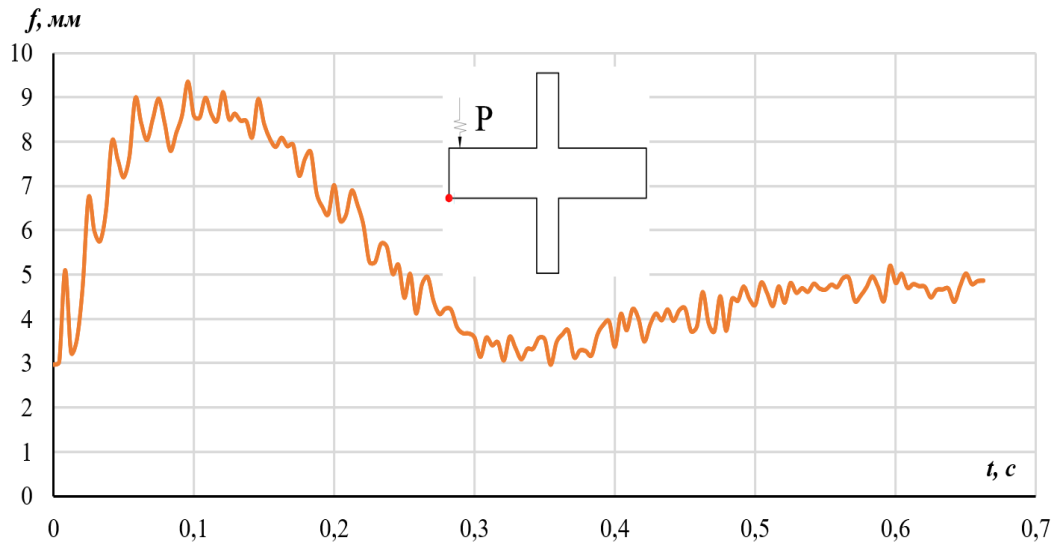


Рисунок 9 – Зависимость перемещений ригеля в сечении на конце консоли от времени при динамическом воздействии

В момент времени, равный 0,6 секунды колебательный процесс практически затух, что свидетельствовало об установлении статического равновесия в опытной конструкции.

С целью двойного контроля параметров собственных колебаний узла был проведен также анализ передаваемого нагрузочным устройством воздействия, экспериментально определенного посредством датчика силы, установленного между гидравлическим домкратом и силовой рамой. Изменение относительного значения этого динамического усилия (P/P_{ult}) в зависимости от времени приведено на рисунке 10.

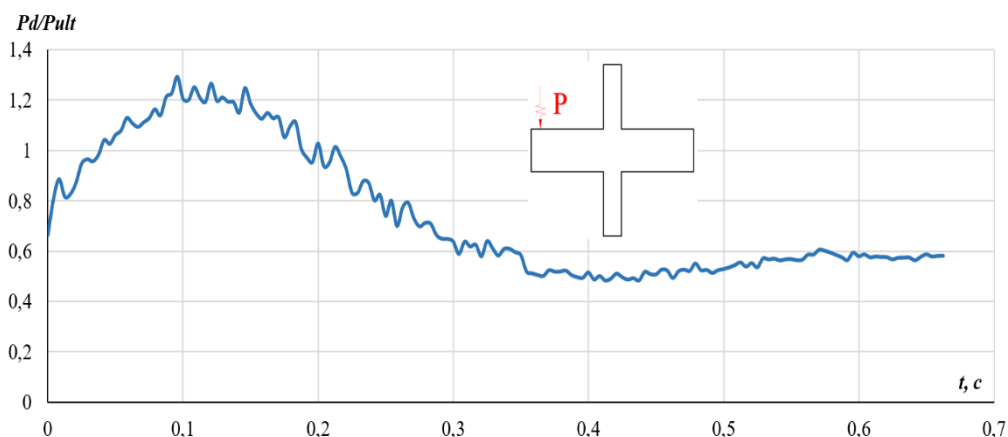


Рисунок 10 – Зависимость изменения относительной динамической нагрузки от времени

Указанное время определено от начала увеличения нагрузки гидравлическом домкрате во времени до максимального значения, т.е. это время первой полуволны от начала колебаний рассматриваемого конструктивного элемента (t_d). Уставлено, что время максимальной амплитуды колебаний от рассматриваемого динамического воздействия, так же как и в случае с перемещениями, составило составляет 0,1 секунды, что находится в

близком диапазоне значений, полученных как авторами [8-10], так и другими исследователями [32].

Сведения о других установленных экспериментально результатах, в частности о параметрах трещинообразования и раскрытия трещин в испытанной конструкции узла планируется представить в следующей публикации авторов.

4. Заключение

1. Предложенная методика экспериментальных исследований позволяет выявить ранее неизученные закономерности и особенности деформирования трещинообразования и разрушения узлов железобетонных рам при статическом и статико-динамическом нагружении. Применение инструментария высокоточных методов измерений (тензометрия, цифровые оптические системы, механические приборы) обеспечило получение достаточно точных значений параметров деформирования, трещинообразовании конструкции железобетонного рамного узла на всех этапах нагружения.

2. Полученные по результатам испытаний качественные и количественные характеристики статического и статико-динамического деформирования опытных конструкций узла железобетонной рамы на всех уровнях нагружения являются надежной основой для верификации численных и аналитических моделей сопротивления железобетонных рамных конструкций.

5. Благодарности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-49-10010, <https://rscf.ru/project/24-49-10010/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fedorova N. V., Savin S. Yu. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review // *Building and Reconstruction*. – 2021. – No. 3(95). – P. 76-108.
2. Колчунов В. И., Тур В. В. Направления проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2023. – № 7. – С. 5-15.
3. Колчунов В. И., Ильющенко Т. А., Федорова Н. В. [и др.] Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений: аналитический обзор исследований // *Строительство и реконструкция*. – 2024. – № 3(113). – С. 31-71.
4. Azim I, Yang J, Bhatta S et al. Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures. *J Build Eng*. 27, 100986 (2019). [https://doi.org/ 10.1016/j.jobe.2019.100986](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100986).
5. Ali B.H., Mete Güneyisi E., Bigonah M. Assessment of Different Retrofitting Methods on Structural Performance of RC Buildings against Progressive Collapse. *Appl. Sci.* 12, 1045 (2022). <https://doi.org/10.3390/app12031045>
6. Fei-Fan Feng, Hyeon-Jong Hwang, Yun Zhou, Jing-Ming Sun, Hu-Zhi Zhang, Jun-Ho Roh, Su-Min Kang, Wei-Jian Yi. Effect of three-dimensional space on progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under various column removal scenarios// *Journal of Building Engineering*. 90 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109405>
7. Qiang H., Yang J., Feng P., Qin W. Kinked rebar configurations for improving the progressive collapse behaviours of RC frames under middle column removal scenarios. *Eng. Struct.* 211, 110425 (2020).
8. Fedorova N., Medyankin M., Fedorov S., Savin S. Experimental and Theoretical Studies of the Concrete Static-Dynamic Stress–Strain Curves / // *Lecture Notes in Civil Engineering*. – 2022. – Vol. 170. – P. 151-161. – DOI 10.1007/978-3-030-79983-0_14.
9. Vu N. T., Fedorova N. V. Concrete Delayed Failure Time // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2024. – Vol. 20, No. 2. – P. 118-131. – DOI 10.22337/2587-9618-2024-20-2-118-131.
10. Бу Н. Т., Федорова Н. В. Динамический отклик железобетонного каркаса здания при сценарии удаления колонны // *Строительство и реконструкция*. – 2024. – № 5(115). – С. 82-94. – DOI 10.33979/2073-7416-2024-115-5-82-94.
11. Korenkov P. A., Meliksetyan S. R. Influence of Compliance of the Connection of Reinforced Concrete Structures in the Analysis of Progressive Collapse Hazard // *E3S Web Conf.* 533 02004 (2024). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453302004>

12. Ali B.H., Mete Güneyisi E., Bigonah M. Assessment of Different Retrofitting Methods on Structural Performance of RC Buildings against Progressive Collapse. *Appl. Sci.* 12, 1045 (2022). <https://doi.org/10.3390/app12031045>
13. Fei-Fan Feng, Hyeon-Jong Hwang, Yun Zhou, Jing-Ming Sun, Hu-Zhi Zhang, Jun-Ho Roh, Su-Min Kang, Wei-Jian Yi. Effect of three-dimensional space on progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under various column removal scenarios // *Journal of Building Engineering*. 90 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109405>
14. Qiang H., Yang J., Feng P., Qin W. Kinked rebar configurations for improving the progressive collapse behaviours of RC frames under middle column removal scenarios. *Eng. Struct.* 211, 110425 (2020).
15. Alogla K., Weekes L., Augustus-Nelson L. A new mitigation scheme to resist progressive collapse of RC structures. *Constr. Build. Mater.* 125, 533–545 (2016).
16. Cheng Y, Sun L, Liu J et al. Dynamic performance of a remaining RC frame with a central-column failure subjected to impact loads. *Arab J SciEng.* 47(10), 12479–96 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06525-3>
17. Ahmadi R., Rashidian O., Abbasnia R., Mohajeri Nav F., Usefi N. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassemblage. *Shock. Vib.* 2016, 1–17(2016).
18. Priti Patel, Atul Desai, Soumita Bid, Pranav Desai. An experimental study for effectiveness of steel fibre reinforced exterior beam-column joints under cyclic resistance. *Construction and Building Materials*. 411 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134511>.
19. Noyan M. Experimental Study on the Behavior of RC Beam-Column Joint Retrofitted with Ferrocement Jacket Under Cyclic Loading. Thesis Submitted to Bangladesh University of Engineering and Technology. 79 (2014).
20. Karayannis C.G., Chalioris C.E., Sideris K.K. Effectiveness of RC beam-column connection repair using epoxy resin injections. *J Earthq Eng.* 2(2), 217 (1998). <http://dx.doi.org/10.1080/13632469809350320>
21. Obaidat Y.T., Abu-Farsakh G.A., Ashteyat A.M. Retrofitting of partially damaged reinforced concrete beam-column joints using various plate-configurations of CFRP under cyclic loading. *Constr Build Mater.* 198, 313–22 (2019). <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.267>
22. Ma C, Wang D, Wang Z. Seismic retrofitting of full-scale RC interior beam-column-slab subassemblies with CFRP wraps. *Compos Struct.* 159, 397–409 (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.094>
23. Yintong Bao, Kang Hai Tan. Performance of precast concrete beam-column joint with a hidden corbel under progressive collapse scenarios // *Engineering Structures*. Volume 267. 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029622007738>
24. Zhong-Xian Li, Haokun Liu, Yanchao Shi. Experimental investigation on dynamic response behavior of PC beam-column sub-assemblages under middle-joint drop-weight loading // *Journal of Building Engineering*. Volume 80. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223022647>.
25. Design recommendations against progressive collapse in steel and steel-concrete buildings [Electronic resource] : CIB Report № 391 / ed. by D. A. Nethercot. — Electronic data. — Rotterdam : CIB, 2021. — 139 p.
26. Pham, A. T., & Tan, K. H. (2017). Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading. *Engineering Structures*, 139, 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.002>
27. Патент № 2841155 С1 Российская Федерация, МПК G01M 99/00. Способ экспериментального определения динамических догрузений в несущих конструктивных элементах монолитных железобетонных каркасов: заявл. 22.11.2024 : опубл. 03.06.2025 / В. И. Колчунов, П. А. Кореньков, И. М. Безгодов, С. Р. Меликсетян; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет".
28. Колчунов Вл. И., Яковенко И. А., Ключева Н. В. Метод физических моделей сопротивления железобетона // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2013. – № 12. – С. 51-55.
29. Колчунов, Вл. И. Программа экспериментальных исследований сложно напряженных узлов железобетонных конструкций / Вл. И. Колчунов, П. А. Кореньков, Н. В. Федорова // *Вестник МГСУ*. – 2025. – Т. 20, № 8. – С. 1165-1177. – DOI 10.22227/1997-0935.2025.8.1165-1177. – EDN SDAPQS.
30. Al-Salloum Y., Almusallam T., Ibrahim S.M., Abbas H., Alsayed S. Rate dependent behavior and modeling of concrete based on SHPB experiments // *Cement and Concrete Composites*, 2015, No. 55, pp. 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.011>.
31. Malvar L.J., Ross C.A. Review of strain rate effects for concrete in tension // *ACI Materials Journal*, 1998, No. 95(6), pp. 735739
32. Fu H.C., Erki M.A., Seckin M. Review of Effects of Loading Rate on Concrete in Compression // *Journal of Structural Engineering*, 1991, No. 117(12), pp. 3645-3659.

REFERENCES

1. Fedorova N.V., Savin S.Yu. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review. *Building and Reconstruction*. 2021;(3(95)):76-108.
2. Kolchunov V.I., Tur V.V. Directions for designing structural systems in special design situations. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*. 2023;(7):5-15.
3. Kolchunov V.I., Ilyushchenko T.A., Fedorova N.V., et al. Vitality of structural systems of buildings and structures: an analytical review of research. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*. 2024;(3(113)):31-71.
4. Azim I., Yang J., Bhatta S., et al. Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures. *Journal of Building Engineering*. 2019;27:100986. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100986>.
5. Ali B.H., Mete Güneyisi E., Bigonah M. Assessment of Different Retrofitting Methods on Structural Performance of RC Buildings against Progressive Collapse. *Applied Sciences*. 2022;12:1045. <https://doi.org/10.3390/app12031045>.
6. Fei-Fan Feng, Hyeon-Jong Hwang, Yun Zhou, Jing-Ming Sun, Hu-Zhi Zhang, Jun-Ho Roh, Su-Min Kang, Wei-Jian Yi. Effect of three-dimensional space on progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under various column removal scenarios. *Journal of Building Engineering*. 2024;90. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109405>.
7. Qiang H., Yang J., Feng P., Qin W. Kinked rebar configurations for improving the progressive collapse behaviours of RC frames under middle column removal scenarios. *Engineering Structures*. 2020;211:110425.
8. Fedorova N., Medyankin M., Fedorov S., Savin S. Experimental and Theoretical Studies of the Concrete Static-Dynamic Stress-Strain Curves. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;170:151-161. DOI 10.1007/978-3-030-79983-0_14.
9. Vu N.T., Fedorova N.V. Concrete Delayed Failure Time. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024;20(2):118-131. DOI 10.22337/2587-9618-2024-20-2-118-131.
10. Vu N.T., Fedorova N.V. Dynamic response of reinforced concrete building frame under column removal scenario. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*. 2024;(5(115)):82-94. DOI 10.33979/2073-7416-2024-115-5-82-94.
11. Korenkov P.A., Meliksetyan S.R. Influence of Compliance of the Connection of Reinforced Concrete Structures in the Analysis of Progressive Collapse Hazard. *E3S Web of Conferences*. 2024;533:02004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453302004>.
12. Ali B.H., Mete Güneyisi E., Bigonah M. Assessment of Different Retrofitting Methods on Structural Performance of RC Buildings against Progressive Collapse. *Applied Sciences*. 2022;12:1045. <https://doi.org/10.3390/app12031045>.
13. Fei-Fan Feng, Hyeon-Jong Hwang, Yun Zhou, Jing-Ming Sun, Hu-Zhi Zhang, Jun-Ho Roh, Su-Min Kang, Wei-Jian Yi. Effect of three-dimensional space on progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under various column removal scenarios. *Journal of Building Engineering*. 2024;90. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109405>.
14. Qiang H., Yang J., Feng P., Qin W. Kinked rebar configurations for improving the progressive collapse behaviours of RC frames under middle column removal scenarios. *Engineering Structures*. 2020;211:110425.
15. Alogla K., Weekes L., Augustus-Nelson L. A new mitigation scheme to resist progressive collapse of RC structures. *Construction and Building Materials*. 2016;125:533–545.
16. Cheng Y., Sun L., Liu J., et al. Dynamic performance of a remaining RC frame with a central-column failure subjected to impact loads. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2024;47(10):12479–12496. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06525-3>.
17. Ahmadi R., Rashidian O., Abbasnia R., Mohajeri Nav F., Usefi N. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassembly. *Shock and Vibration*. 2016;2016:1–17.
18. Priti Patel, Atul Desai, Soumita Bid, Pranav Desai. An experimental study for effectiveness of steel fibre reinforced exterior beam-column joints under cyclic resistance. *Construction and Building Materials*. 2024;411. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134511>.
19. Noyan M. Experimental Study on the Behavior of RC Beam-Column Joint Retrofitted with Ferrocement Jacket Under Cyclic Loading. Thesis Submitted to Bangladesh University of Engineering and Technology. 2014;79.
20. Karayannis C.G., Chalioris C.E., Sideris K.K. Effectiveness of RC beam-column connection repair using epoxy resin injections. *Journal of Earthquake Engineering*. 1998;2(2):217. <http://dx.doi.org/10.1080/13632469809350320>.
21. Obaidat Y.T., Abu-Farsakh G.A., Ashteyat A.M. Retrofitting of partially damaged reinforced concrete beam-column joints using various plate-configurations of CFRP under cyclic loading. *Construction and Building Materials*. 2019;198:313–322. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.267>.

22. Ma C., Wang D., Wang Z. Seismic retrofitting of full-scale RC interior beam-column-slab subassemblies with CFRP wraps. *Composite Structures*. 2017;159:397–409. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.094>.
23. Yintong Bao, Kang Hai Tan. Performance of precast concrete beam-column joint with a hidden corbel under progressive collapse scenarios. *Engineering Structures*. 2022;267. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029622007738>.
24. Zhong-Xian Li, Haokun Liu, Yanchao Shi. Experimental investigation on dynamic response behavior of PC beam-column sub-assemblages under middle-joint drop-weight loading. *Journal of Building Engineering*. 2023;80. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223022647>.
25. Nethercot D.A., ed. Design recommendations against progressive collapse in steel and steel-concrete buildings: CIB Report No. 391. Rotterdam: CIB; 2021. 139 p.
26. 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;139:31–45. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.002>.
27. Kolchunov V.I., Korenkov P.A., Bezgodov I.M., Meliksetyan S.R. Method for experimental determination of dynamic overloads in load-bearing structural elements of monolithic reinforced concrete frames. Patent No. 2841155 C1 Russian Federation. Filed November 22, 2024; Published June 3, 2025.
28. Kolchunov V.I., Yakovenko I.A., Klyueva N.V. Method of physical models of reinforced concrete resistance. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*. 2013;(12):51-55.
29. Kolchunov V.I., Korenkov P.A., Fedorova N.V. Program of experimental studies of complexly stressed joints of reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2025;20(8):1165-1177. DOI 10.22227/1997-0935.2025.8.1165-1177. EDN SDAPQS.
30. Al-Salloum Y., Almusallam T., Ibrahim S.M., Abbas H., Alsayed S. Rate dependent behavior and modeling of concrete based on SHPB experiments. *Cement and Concrete Composites*. 2015;55:34-44. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.011>.
31. Malvar L.J., Ross C.A. Review of strain rate effects for concrete in tension. *ACI Materials Journal*. 1998;95(6):735-739.
32. Fu H.C., Erki M.A., Seckin M. Review of Effects of Loading Rate on Concrete in Compression. *Journal of Structural Engineering*. 1991;117(12):3645-3659.

Информация об авторе:

Кореньков Павел Анатольевич

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры Промышленного и гражданского строительства.

E-mail: kpa_gbk@mail.ru

Федорова Наталья Витальевна

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой Промышленного и гражданского строительства.

E-mail: fedorovanv@mfmgsu.ru

Information about author:

Korenkov Pavel A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial and Civil Engineering.

Email: kpa_gbk@mail.ru

Fedorova Natalya V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial and Civil Engineering.

Email: fedorovanv@mfmgsu.ru

Статья поступила в редакцию 18.11.2025
Одобрена после рецензирования 12.03.2026
Принята к публикации 01.04.2026

The article was submitted 18.11.2025
Approved after reviewing 12.03.2026
Accepted for publication 01.04.2026