

О.Е. ОСОВСКИХ¹¹ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАГМЕНТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КАРКАСА МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований и расчетного анализа железобетонной пространственной рамы – фрагмента каркаса многоэтажного здания в предельных и запредельных состояниях. Выполнена серия испытаний на проектные и запроектные воздействия в стадии работы конструкции без трещин. Динамический расчет рассматриваемой конструктивной системы выполнен в режиме прямого интегрирования уравнений движения. Установлены особенности деформирования рамы до и после запроектного воздействия, вызывающего внезапную структурную перестройку конструктивной системы. Получено удовлетворительное согласование результатов расчета с результатами испытаний.

Ключевые слова: пространственная рама, железобетон, составное сечение, сложное напряженное состояние, двухуровневая расчетная схема, деформации.

O.E. OSOVSKIKH¹¹SouthwestState University, Kursk, Russia

EXPERIMENTAL STUDIES OF A FRAGMENT OF A REINFORCED CONCRETE FRAME OF A MULTI-STOREY BUILDING UNDER COMPLEX STRESS STATE

Abstract. The article presents the results of experimental research and computational analysis of a reinforced concrete spatial frame - a fragment of the frame of a multi-storey building in limiting and out-of-limit states. A series of tests for design and beyond design impacts was performed at the stage of construction without cracks. The dynamic calculation of the considered structural system was carried out in the mode of direct integration of the equations of motion. The features of frame deformation before and after the beyond design basis impact, causing a sudden structural restructuring of the structural system, have been established. Satisfactory agreement of the calculation results with the test results is obtained.

Keywords: spatial frame, reinforced concrete, composite section, complex stress state, two-level design scheme, deformations.

Введение

При проектировании ряда зданий и сооружений необходимо обеспечить их конструктивную безопасность, не допустив прогрессирующего разрушения всего объекта в случае локального разрушения одного из основных несущих элементов [1,2]. К таким элементам, в частности, относятся колонны зданий. При расчете зданий с учетом разрушения одного из основных несущих элементов не учитывается характер нагружения, при котором происходит разрушение этого элемента. На практике такое разрушение может произойти внезапно, вызвав колебания прилегающих конструкций.

Для выяснения возможных динамических эффектов в элементах конструкций зданий, возникающих при внезапном разрушении одного из несущих элементов здания, в развитие

исследований [3,4] был изучен фрагмент несущего каркаса здания в виде пространственной рамы, у которой внезапно разрушается центральная стойка.

Модели и методы

Конструкции опытного образца.

Испытания были проведены для фрагмента железобетонного рамно-стержневого каркаса здания с ригелями сплошного и составного сечения (рисунок 1), состоящего из двух накрест расположенных плоских рам А, Б и поддерживающей их в месте пересечения центральной стойки.

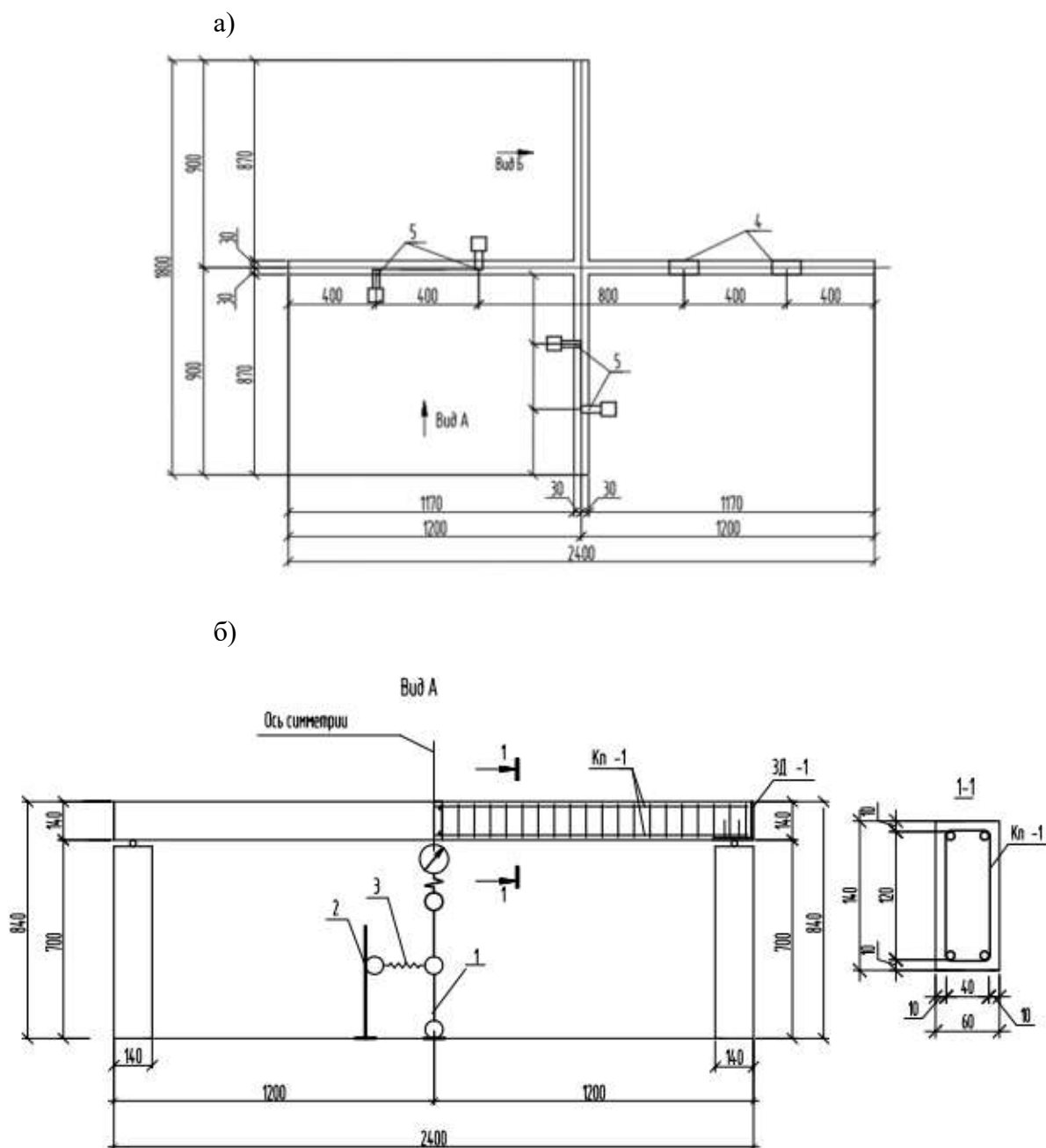
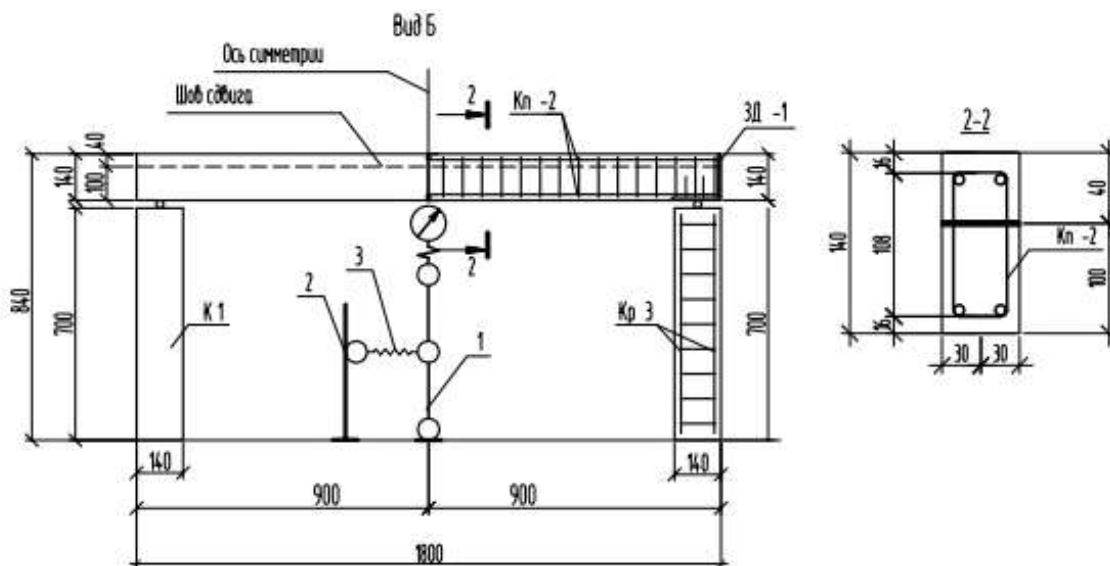


Рисунок 1 - Конструкция опытного образца рамы:
 а – план рамы, б – опалубка, в – схема армирования,
 1 – выключаемая стойка с динамометром, 2 – неподвижная опора, 3 – связь, 4 – опорные пластины,
 5 – выносной кронштейн

в)



г)



*Продолжение рисунка 1 - Конструкция опытного образца рамы:
г – общий вид; 1 – выключаемая стойка с динамометром, 2 – неподвижная опора, 3 – связь,
4 – опорные пластины, 5 – выносной кронштейн*

Плоская рама А имеет два пролета по 1130 мм, ригель рамы сплошной сечением 140х60 мм, плоская рама Б - два пролета по 830 мм, ригель этой рамы составной, сечением 140х60 мм. Сплошной ригель и верхняя часть составного ригеля сечением 40(н)х60 мм выполнены из бетона В35, нижняя часть сечения составного ригеля 100(н)х60 мм - из бетона класса В25. Горизонтальный плоский шов между слоями бетона составного ригеля проложен слоем полиэтиленовой пленки толщиной 100 мкм для исключения возникновения сдвигающих сил в бетоне на контакте слоев.

Армирование сплошного и составного ригелей принято в виде пространственных вязаных каркасов КП1, КП2 на всю высоту сечения с симметричным расположением арматуры. Рабочее продольное армирование нижней и верхней зоны - гладкие стержни диаметром 6 мм класса А240. Поперечная арматура с постоянным по длине шагом 60 мм – замкнутые вязаные хомуты из гладкой арматурной проволоки диаметром 1,6 мм.

Ригели рам монолитно соединены между собой в центральной точке и шарнирно опираются на расположенные по краям четыре стойки сечением 140х60 мм, высотой 700 мм по контуру фрагмента (С1, С2, С3, С4). Стойки изготовлены из мелкозернистого бетона класса В20 и жестко закреплены нижними торцами на неподвижной металлической раме. Армирование стоек – плоские вязаные каркасы КР-3, состоящие из двух продольных стержней периодического профиля d8 мм класса А500С, поперечная арматура - из проволоки диаметром 1,4 мм с шагом 70 мм.

В центре пространственной рамы располагается центральная опора С5, выполненная в виде вертикальной трехшарнирной системы с возможностью мгновенного ее выключения в заданный момент времени [5]. В качестве одного из элементов указанная опора также включает электронный динамометр для контроля опорной реакции при статической нагрузке.

Простое нагружение ригелей опытного фрагмента статической проектной нагрузкой производилось с использованием рычажно-подвесной системы и нагрузочных устройств, передающих нагрузку в виде сосредоточенных сил на ригели в местах установки пластин 4 или выносных кронштейнов 5 (рисунок 1), что позволяло прикладывать на участке между кронштейнами крутящие моменты. Величина крутящего момента задается изменением плеча силы с шагом 3 см. Рычаг нагрузочного устройства длиной 3,1 м из спаренных швеллеров №20 был закреплен шарнирно к неподвижной опоре за пределами конструкции опытного фрагмента. На расстоянии 0,85...0,9 м от указанной опоры нагрузка передавалась на систему промежуточных балок, при этом на ригели Р-1, Р-3, Р-4 приходилось по две сосредоточенные силы.

Методика исследования

Основному этапу испытаний, включающему сценарий внезапного удаления центральной стойки на заданном уровне эксплуатационной нагрузки, предшествовала приведенная в данной статье серия опытов в стадии работы конструкции до образования трещин. Анализ экспериментальных работ по теме исследований [6,7] показывает, что наиболее полная и достоверная информация о напряженно-деформированном состоянии исследуемой конструкции относится к этапам ее статического нагружения. Мгновенное выключение связи происходит в случайный или заданный момент времени, объем получаемой при этом информации весьма ограничен. Прогибомеры и иные механические приборы не предназначены для использования в быстро протекающих динамических процессах и во избежание поломок на данном этапе, как правило, заранее демонтируются. Амплитудные значения перемещений в характерных сечениях чаще всего определяются по материалам видеосъемки и без использования специализированной высокоскоростной камеры обладают недостаточно высокой точностью. То же относится к определению параметров динамического воздействия, таких как время динамического догружения, частоты колебаний, очередность откликов на динамическое воздействие в различных сечениях. Отдельные исследования, такие как [8], демонстрируют возможности применения современного измерительного оборудования при статических и динамических испытаниях образцов балок, но они ограничены решением частной задачи определения прочности сечений балочных элементов.

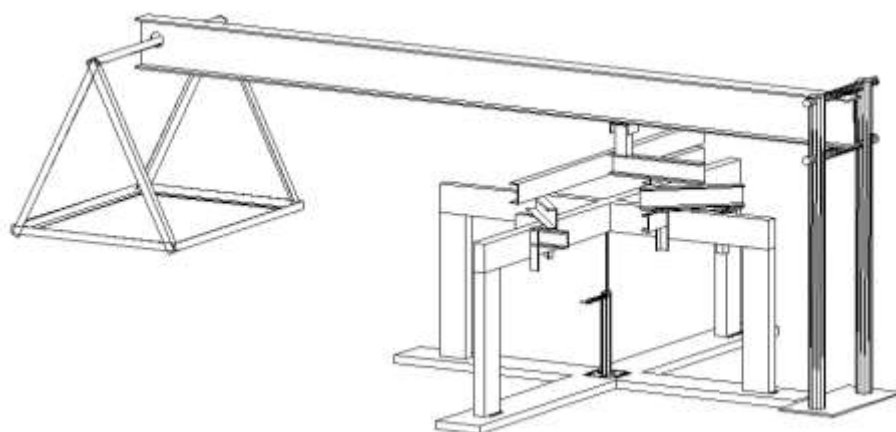
В настоящей работе предпринята попытка расширить объем получаемой опытной информации за счет проведения серии предварительных испытаний, включая мгновенное удаление опоры, на стадии работы конструкции без трещин, при уровне нагрузок не более

20% от максимально допустимой. Вначале конструкция с полным комплектом установленных механических и иных приборов нагружается статической нагрузкой как в исходном, так и в перестроенном состоянии, затем часть приборов демонтируется и производится выключение опоры. Полученные данные о соотношениях между соответствующими опытными величинами до и после перестройки системы используются для проверки расчетных моделей, а также для экстраполяции отдельных результатов на завершающем этапе испытаний рамы до разрушения.

С этой целью исследовано деформирование 1) исходной (И) рамы с центральной стойкой, 2) перестроенной (П) рамы без центральной стойки под действием проектных статических нагрузок при, а) медленном (С) и б) внезапном (Д) удалении центральной стойки.

Для измерения линейных и угловых перемещений были использованы механические и электромеханические приборы с ценой деления 0,01 мм и 0,001 мм, реакцию центральной опоры контролировали электронным динамометром сжатия ДМС-МГ4, перемещения центральной точки рамы при выключении стойки регистрировали неподвижно закрепленным к нижней части опоры механическим штангенциркулем с фиксацией амплитудного значения. Измерение относительных деформаций при статическом действии нагрузок фиксировали прибором СИИТ 3, а в момент выключения опоры - анализатором спектра ZET 017-T8.

а)



б)

в)

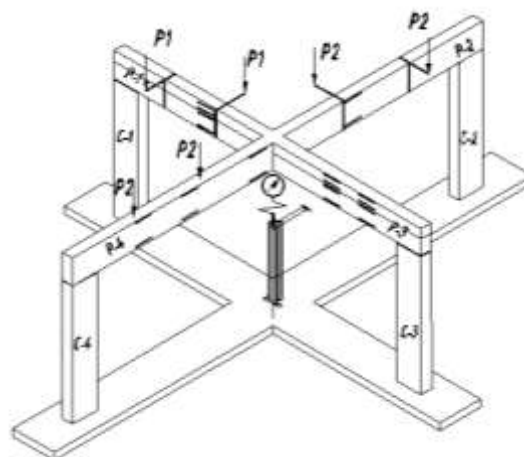
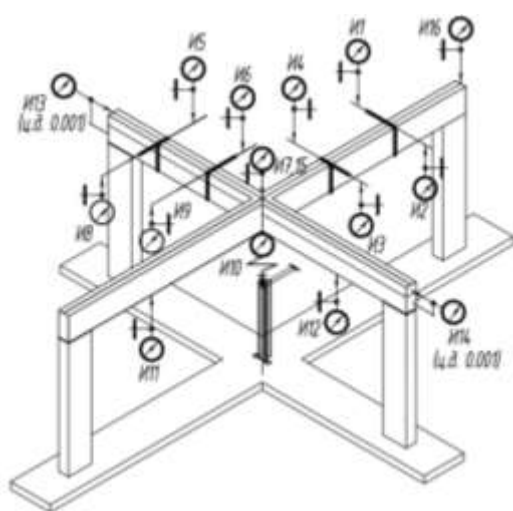


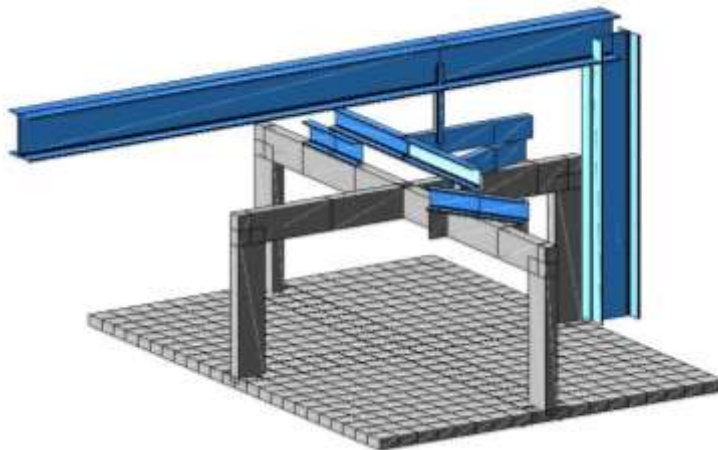
Рисунок 2 - Схема испытаний рамы: а – нагрузочное устройство, б – механические приборы, в – тензорезисторы.

Результаты исследования и их анализ

Расчет конструкции опытного фрагмента

Статический и динамический расчет опытной конструкции рамы выполнен с использованием расчетной модели, приведенной на рисунке 3. Модель включает деформируемое основание (пол), стальную опорную раму и нагрузочное устройство, рассчитываемую конструкцию. Динамическое ударное воздействие задано с учетом полученного в опытах значения времени выключения связи и логарифмического декремента затухания.

а)



б)

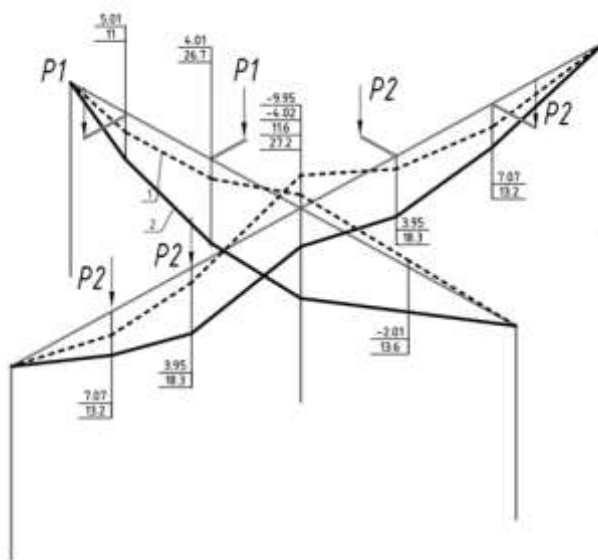


Рисунок 3 - К расчету опытного образца рамы: а - расчетная модель фрагмента, б – распределение изгибающих моментов при суммарной статической нагрузке 1,84 кН
1 - до (ИС1) и 2 – после (ПС1) удаления центральной опоры

Анализ опытных и расчетных параметров деформирования железобетонной пространственной рамы

Исходным состоянием для всей серии испытаний служила рама с центральной стойкой, опорная реакция в которой задавалась равной 0,75 кН по показаниям динамометра, что соответствовало расчетному значению указанной реакции рамы под действием собственного веса конструкции и прикрепленных к раме балок нижнего яруса элементов нагрузочной системы.

Далее посредством рычага прикладывалась нагрузка $P_1=0.296$ кН, $P_2=0.333$ кН по схеме ИС1, приведенной на рисунке 2, суммарное значение сил P_1 , P_2 составляло 1,85 кН. После приложения нагрузки производили удаление центральной стойки медленно (ПС1) или мгновенно (ПД1). В первом случае до и после нагружения снимали статические показания всех установленных механических приборов и тензорезисторов. Во втором случае, в момент выключения связи при помощи анализатора спектра фиксировали показания нескольких тензорезисторов на арматуре, а после стабилизации системы - перемещение контрольного устройства в центре рамы и статические показания тензорезисторов. Фильтрацию и обработку сигналов анализатора спектра выполняли с использованием разработанной программы [11].

Относительные деформации бетона и арматуры в сечении составного ригеля посередине пролета рамы приведены на рисунке 4. Выбор сечения обусловлен тем, что усилия в нем при перестройке рамы меняют знак, а деформации при заданном уровне нагрузок наибольшие по сравнению с другими исследуемыми сечениями, что снижает общие погрешности измерений. График изменения относительных деформаций бетона и арматурных стержней во времени показан на рисунке 5. Время между внезапным выключением стойки и достижением амплитудного значения составило 0,060 с, опытное значение периода колебаний 0,09 с, логарифмический декремент затухания колебаний 0,57.

Динамический расчет рассматриваемой конструктивной системы выполнен в режиме прямого интегрирования уравнений движения по методике, приведенной в [9,10]. Расчетный период колебаний составил 0,086 с.

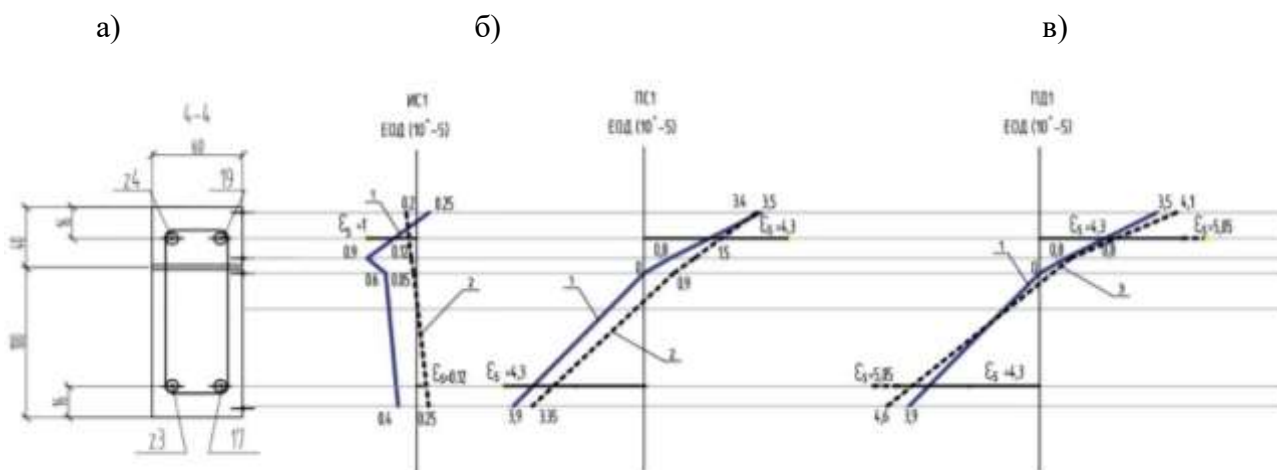


Рисунок 4 - Относительные деформации бетона и арматуры ($\times 10^{-5}$) в расчетном сечении составного ригеля при суммарной нагрузке на ригель 1,84 кН: а – исходная (ИС1) рама, б – при плавном удалении опоры (ПС1), в – при внезапном (ПД1) удалении опоры; 1 – опыт, 2 – расчет

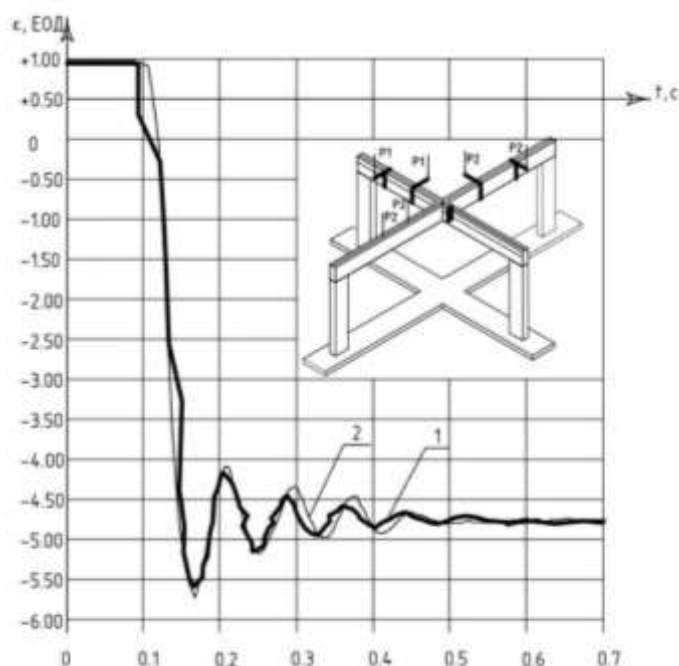


Рисунок 5 - Относительные деформации арматуры ($\times 10^{-5}$) в расчетном сечении составного ригеля при суммарной эксплуатационной нагрузке 1,84 кН при внезапном удалении (ПД1) центральной стойки: 1 – опыт, 2 – расчет

Кроме учета местной (поэтажной) нагрузки, действующей на опытный фрагмент рамы, также рассмотрен случай нагружения опытного фрагмента рамы реактивной силой 3,21 кН, моделирующей нагрузку, передаваемую от вышележащих этажей. Нагружение выполнено в двух вариантах, вначале при помощи рычажного устройства (испытание 2), а затем той же по величине силой, приложенной при помощи закрепленного на неподвижном основании гидравлического домкрата (испытание 3).

При приложении нагрузки 3,21 кН в центре рамы (ИС2) изгибающие моменты отсутствуют, измеренная опорная реакция 3,42 кН. Относительные деформации бетона и арматуры при медленной перестройке системы (ПС 2) и при мгновенном выключении опоры (ПД2) приведены на рисунке 6 и 7. Полученное в опыте время между выключением стойки и достижением амплитудного значения 0,055 с, период колебаний 0,22 с, логарифмический декремент затухания 0,11. Расчетный период колебаний составил 0,56 с.

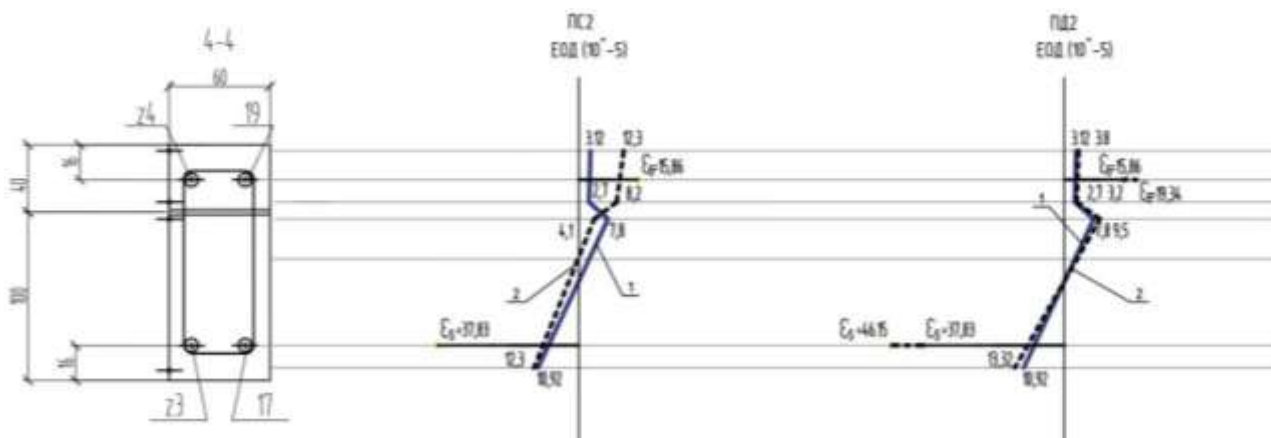


Рисунок 6 - Относительные деформации бетона и арматуры ($\times 10^{-5}$) в расчетном сечении составного ригеля при суммарной нагрузке рычагом в центре рамы 1,84 кН: а – при плавном удалении опоры (ПС2), б – при внезапном (ПД2) удалении опоры; 1 – опыт, 2 – расчет

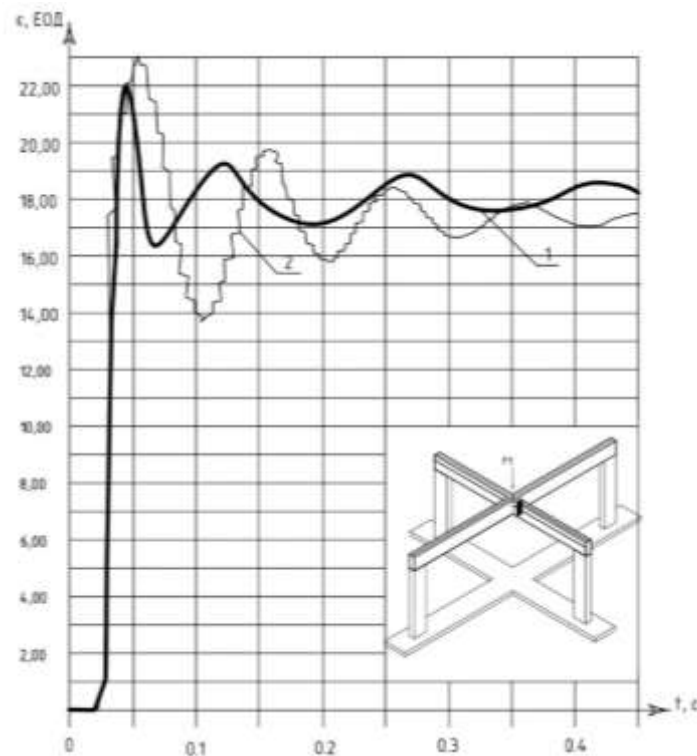


Рисунок 7 - Относительные деформации арматуры ($\times 10^{-5}$) в расчетном сечении составного ригеля при сосредоточенной нагрузке рычагом 3,21 кН в центральной точке рамы в момент выключения стойки (ПД2): 1- опыт, 2 – расчет

В испытании 3 исходное состояние рамы ИС3 аналогично ИС2, величина передаваемой нагрузки 3,21 кН, опорная реакция 3,42 кН. Относительные деформации при медленной перестройке системы (ПС3) и при мгновенном выключении опоры (ПД3) приведены на рисунке 8 и 9. Опытное время между выключением стойки и достижением амплитудного значения 0,050 с. Период колебаний 0,19 с, логарифмический декремент затухания 0,10.

В процессе нагружения рабочий ход домкрата превышал амплитудные перемещения рамы, то есть домкрат не выводился из контакта с рамой и служил гидравлическим гасителем колебаний. Опытный период колебаний увеличился более чем в 2 раза по сравнению с предыдущим испытанием. Расчетное значение периода колебаний на графике рисунок 9 приведено без учета демпфирования домкрата.

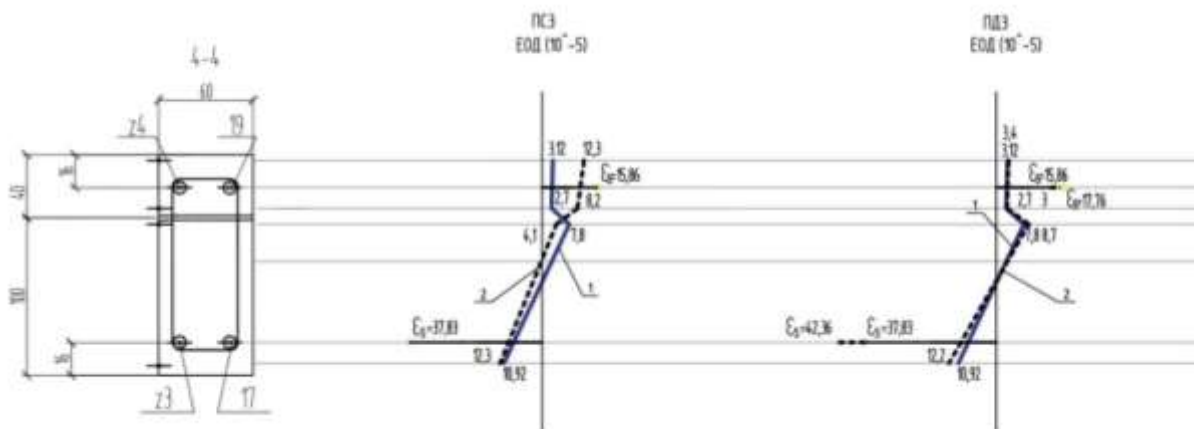


Рисунок 8 - Относительные деформации бетона и арматуры ($\times 10^{-5}$) в расчетном сечении составного ригеля при суммарной нагрузке домкратом в центре рамы 1,84 кН: а – при плавном удалении опоры (ПС3), б - при внезапном (ПД3) удалении опоры; 1 – опыт, 2 - расчет

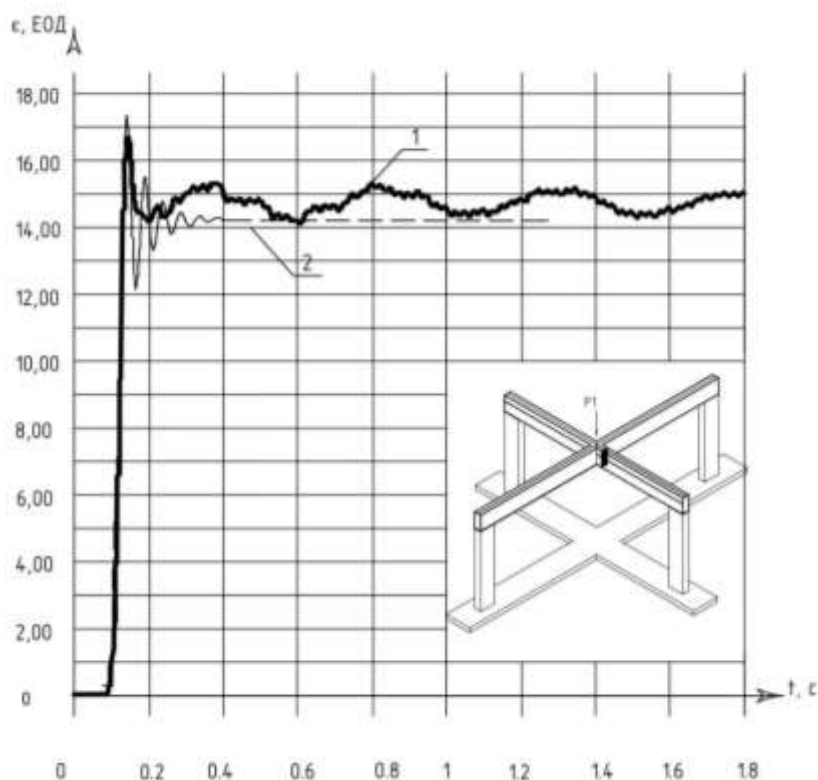


Рисунок 9 - Относительные деформации арматуры ($\times 10^{-5}$) в расчетном сечении составного ригеля при сосредоточенной нагрузке домкратом 3,21 кН в центральной точке рамы в момент выключения стойки (ПДЗ): 1- опыт, 2 – расчет (без учета демпфирования)

Полученные опытные и расчетные данные о деформировании рамы при проектных и запроектных воздействиях использованы для подготовки и последующего проведения испытаний рассматриваемой конструкции до разрушения.

Выводы

1. В результате проведенных экспериментальных исследований получены новые опытные данные об особенностях деформирования элементов конструктивной системы при их сложном сопротивлении при статическом действии нагрузок и в запредельных состояниях, вызванных внезапным выключением вертикального несущего элемента (стойки).
2. Для рассматриваемого опытного фрагмента время между выключением стойки и достижением амплитудного значения во всех исследуемых сечениях совпадает с точностью до 0,002 с.
3. Результаты динамического расчета опытного фрагмента согласуются с опытными данными только при учете элементов нагрузочного устройства и реальных граничных условий, включая деформируемое основание.
4. Относительные деформации в характерных сечениях, полученные опытным путем, согласуются с численными значениями как статического, так и динамического расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон №384 – ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Москва, 2010.
2. СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с Изменением N 1) М.: Минстрой России, 2019.
3. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability of structural systems of buildings with special effects // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 5 (81). С. 73-80.
4. Alkadi S.A., Osovskiyh O.E., Fedorova N.V. Analysis of reinforced concrete space frame deformation with composite sections elements // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novosibirsk, 2018. С. 012033.
5. Колчунов В.И., Осовских Е.В., Филатова С.А. Способ экспериментального определения динамических догрузений в рамно-стержневых конструктивных системах и устройство, реализующее его. Патент на изобретение RU 2622496 С, 15.06.2017. Заявка № 2016128903 от 15.07.2016.
6. Ключева Н.В., Кореньков П.А. Методика экспериментального определения параметров живучести железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 2. С. 44-48.
7. 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.
8. Родевич В.В., Арзамасцев С.А. Экспериментальные исследования железобетонных элементов, работающих на изгиб с кручением, при статическом и кратковременном динамическом воздействиях. //Жилищное строительство. 2014. № 10. С. 15-18.
9. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. About the problem of analysis resistance bearing systems in failure of a structural element. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Т. 14. № 3. С. 103-113.
10. Кабанцев О.В., Перельмутер А.В. О методах анализа сопротивления несущих систем в режимах отказа конструктивного элемента // В сборнике: "Лолейтовские чтения-150". Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям. Сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения профессора, автора методики расчета железобетонных конструкций по стадии разрушения, основоположника советской научной школы теории железобетона, основателя и первого заведующего кафедрой железобетонных конструкций Московского инженерно-строительного института (МИСИ) А.Ф. Лолейта. Под редакцией А.Г. Тамразяна. 2018. С. 132-137.
11. Осовских О.Е. Программа для обработки тензометрических данных динамических испытаний Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021616294, 20.04.2021. Заявка № 2021615148 от 13.04.2021

REFERENCES

1. Federal Law No. 384 - FZ "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures". Moscow, 2010.
2. SP 385.1325800.2018 Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules. Basic Provisions (with Amendment No. 1) M.: Ministry of Construction of Russia, 2019
3. Survivability of structural systems of buildings with special effects Travush V.I., Fedorova N.V. // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 5 (81). С. 73-80.
4. Kolchunov V.I., Osovskikh E.V., Filatova S.A. Sposob eksperimental'nogo opredeleniya dinamicheskikh dogruzhenij v ramno-sterzhnevyyh konstruktivnyh sistemah i ustrojstvo, realizuyushchee ego [A method for the experimental determination of dynamic additional loading in frame-rod structural systems and a device that implements it]. Invention patent RU 2622496 C, 15.06.2017. Application No. 2016128903 dated 15.07.2016.
5. Alkadi S.A., Osovskiyh O.E., Fedorova N.V. Analysis of reinforced concrete space frame deformation with composite sections elements // In the collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novosibirsk, 2018. С. 012033.
6. Klyueva N.V., Korenkov P.A. Metodika eksperimental'nogo opredeleniya parametrov zhivuchesti zhelezobetonnyh ramno-sterzhnevyyh konstruktivnyh sistem [The method of experimental determination of the parameters of survivability of reinforced concrete frame-bar structural systems] // Industrial and civil construction. 2016. No. 2. S. 44-48.
7. Fedorova N.V., Korenkov P.A., Wu N.T. Metodika eksperimental'nyh issledovaniy deformirovaniya monolitnyh zhelezobetonnyh karkasov zdaniy pri avariynyyh vozdeystviyah [Technique of experimental studies of deformation of monolithic reinforced concrete frames of buildings under emergency impacts] // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2018. No. 4 (78). S. 42-52.

8. Rodevich V.V., Arzamastsev S.A. Eksperimental'nye issledovaniya zhelezobetonnyh elementov, rabotayushchih na izgib s krucheniem, pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom vozejstviyah [Experimental studies of reinforced concrete elements operating in torsional bending under static and short-term dynamic effects] // Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2014. No. 10. S. 15-18.

9. Perelmutter A.V., Kabantsev O.V. About the problem of analysis resistance bearing systems in failure of a structural element. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. T. 14. № 3. С. 103-113.

10. Kabantsev O.V., Perelmutter A.V. O metodah analiza soprotivleniya nesushchih sistem v rezhimakh otказа konstruktivnogo elementa [On the methods of analysis of the resistance of bearing systems in the modes of failure of a structural element]. // In the collection: "Loleit readings-150". Modern methods for calculating reinforced concrete and masonry structures by limiting states. Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of the professor, the author of the method for calculating reinforced concrete structures by the stage of destruction, the founder of the Soviet scientific school of the theory of reinforced concrete, the founder and first head of the department of reinforced concrete structures of the Moscow Civil Engineering Institute (MISI) A. F. Loleita. Edited by A.G. Tamrazyan. 2018. S. 132-137.

11. Osovskikh O.E. Programma dlya obrabotki tenzometricheskikh dannyh dinamicheskikh ispytaniy [Program for processing tensometric data of dynamic tests]. Certificate of registration of the computer program RU 2021616294, 20.04.2021. Application No. 2021615148 dated 04/13/2021

Информация об авторе:

Осовских Ольга Евгеньевна

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

E-mail: olga-osa@mail.ru

Information about author:

Osovskikh Olga E.

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

E-mail: olga-osa@mail.ru