

В.А. ЛЮБЛИНСКИЙ¹, Ю.В. МИРОНОВА²¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия²ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Россия

ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ШТЕПСЕЛЬНОГО СТЫКА КОЛОНН ПРОГРЕССИРУЮЩЕМУ ОБРУШЕНИЮ

Аннотация. Рассмотрена необходимость разработки решений, повышающих сопротивляемость несущих систем прогрессирующему разрушению, приводящему к моментальному или длительному разрушению отдельных конструктивных элементов и узлов. Штепсельный стык колонн в сборных и сборно-монолитных каркасах запроектированный на сжимающие усилия, при аварийном воздействии начинает работать на растяжение. Определены максимальные растягивающие усилия в колоннах и стыках типового сборного каркаса при аварийном воздействии и предложены варианты модернизации конструктивных решений штепсельного стыка. Предложено использование закладной детали для скважины штепсельного стыка сборных колонн, обеспечивающее работу на растягивающие усилия. Проведено многофакторное численное моделирование штепсельного стыка с учетом работы на растяжение, определены прочностные характеристики. Разработаны рекомендации по проектированию штепсельного стыка для несущих систем с учетом их работы при прогрессирующем разрушении, предложены рекомендации по армированию стыка в зависимости от усилий в нем. Результаты могут быть использованы при проектировании штепсельных стыков сборных и сборно-монолитных каркасов.

Ключевые слова: многоэтажные здания, сборный железобетонный каркас, прогрессирующее разрушение, штепсельный стык, напряженно-деформированное состояние.

V.A. LYUBLINSKIY¹, Ju.V. MIRONOVA²¹National Research Moscow State University of civil engineering, Moscow, Russia²Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

INCREASING THE RESISTANCE OF THE PLUG JOINT OF COLUMNS TO PROGRESSIVE COLLAPSE

Abstract. The necessity of developing solutions that increase the resistance of load-bearing systems to progressive destruction, leading to instant or prolonged destruction of individual structural elements and assemblies, is considered. The plug joint columns in prefabricated and prefabricated monolithic frames designed for compressive forces, in case of emergency impact, begins to work on tension. The maximum tensile forces in the columns and joints of a typical prefabricated frame in case of emergency impact are determined and options for upgrading the design solutions of the plug joint are proposed. It is proposed to use a plug-in part for the well of the plug joint of the prefabricated columns, which provides work for tensile forces. Multivariate numerical simulation of the plug joint was carried out taking into account the tensile work, strength characteristics were determined. Recommendations have been developed for the design of a plug joint for load-bearing systems, taking into account their work with progressive destruction, recommendations for reinforcing the joint depending on the efforts in it have been proposed. The results can be used in the design of plug joints of prefabricated and prefabricated monolithic frames.

Keywords: multi-storey buildings, precast reinforced concrete frame, progressive destruction, plug joint, stress-strain state.

Введение

Несмотря на массовое применение монолитного железобетона, сборный железобетон остается востребованным для возведения зданий различного назначения. Основными его преимуществами являются экономичность, быстровозводимость, высокая степень контроля при изготовлении на заводе, применение типовых решений и другие. С учетом данных преимуществ, а также относительной простоты технологии и качества выполнения работ, строительство каркасных зданий жилого и административного назначения из сборных железобетонных элементов остается актуальным. Существующие типовые решения не всегда могут обеспечить условия прочности, устойчивости и долговечности несущих систем с учетом современных требований по безопасности зданий [1-3]. В частности, требуется модернизация конструктивных решений элементов и узлов с целью повышения сопротивляемости несущих систем прогрессирующему обрушению в случае возникновения аварийных ситуаций [4]. Слабым местом сборного железобетона является соединение элементов между собой, как с точки зрения технологических решений, так и с точки зрения конструктивных [5, 6, 7]. Задача по выбору оптимального решения стыка колонн, обеспечению его работы на вертикальные и горизонтальные нагрузки является актуальной. Предпринимаются попытки создать долговечные, пригодные к нормальной эксплуатации, прочные и технологичные стыки [8, 9], которые окажут положительное влияние на сопротивляемость зданий из сборного железобетона прогрессирующему разрушению [4, 6].

Многочисленные исследования механизмов разрушения многоэтажных зданий при аварийных воздействиях [10, 11, 12, 13] показали, что в элементах несущих систем происходит перераспределение усилий, усилия многократно превышают проектные значения, меняются схемы работы конструкций и т.п. Различные виды аварийных воздействий, приводят к разным схемам прогрессирующего обрушения [14, 15, 16], это определяет направление модернизации элементов и узлов как монолитных, так и сборных зданий [17, 18]. В частности, при удалении средней колонны первого яруса нагрузка от вышележащих этажей может вызывать в ней значительные растягивающие усилия. Несмотря на то, что арматура в железобетонных конструкциях одинаково хорошо работает и на сжатие, и на растяжение, площади поперечного сечения ее становится недостаточно для восприятия противоположных по знаку напряжений, более того, нарушается ее анкеровка, все это приводит к нарушению работы стыка и системы в целом, запуская процесс лавинообразного разрушения.

Одним из распространенных способов соединения сборных колонн являются штепсельные стыки [19, 20], подразумевающие установку выпусков арматуры верхней колонны в скважины нижней колонны с последующим инъецированием скважин прочным мелкозернистым бетоном. В реальных условиях в стыке возникают продольные сжимающие и сдвигающие усилия, изгибающие моменты, однако при прогрессирующем обрушении основным усилием в колонне становится продольная сила. Разрушение штепсельных стыков при растяжении может происходить как по арматуре, так и по бетону скважины соединения. Конструктивное решение стыка должно предотвращать разрыв арматуры, нарушения ее анкеровки в скважине, вырыва или скола бетона скважины. Это возможно с применением в стыках колонн решений, аналогичных шпоночным соединениям [19, 20].

В работе предложено конструктивное решение штепсельного стыка колонн сборного железобетонного каркаса с использованием закладной детали в виде гофрированной трубы и установка дополнительных арматурных стержней для восприятия увеличивающихся усилий. Целью исследования является определение напряженно-деформированного состояния предложенного конструктивного решения и разработка рекомендаций по проектированию.

Натурные испытания штепсельных стыков с целью усовершенствования их работы рассмотрены в работах [19-21]. Исследовались соединения продольной арматуры сборных элементов посредством муфт, предложены решения по установке арматуры на полимеррастворе в металлических трубах, было установлено, что разрушение большинства стыков происходит вследствие сдвига арматуры по контакту с раствором.

В работе [21] были испытаны металлические трубы с гладкой внутренней поверхностью и с резьбой. Внутренняя структура поверхности не оказала существенного влияния на характер работы соединения. Изучению на вырыв арматуры из тела колонны при горизонтальных нагрузках были посвящены работы [9, 22, 23]. Предложено решение с обрамлением арматуры спиралью, а натурным экспериментом определены среднее значение прочности анкеровки, сопротивление стыка при выдергивании арматуры из скважины для типового и предложенного решений. Во всех случаях испытания разрушение происходило плавно из-за выхода из скважины арматурного стержня вместе с оболочкой. После испытаний образцы имели гладкую поверхность без видимых трещин и повреждений. Растворная оболочка имела лишь частичную адгезию к поверхности арматуры, но плотно прилежала и повторяла ее профиль, выявлено отсутствие силовых трещин, выколов на теле раствора и его равномерное заполнение скважины без раковин и крупных пор. Среднее значение прочности анкеровки составило 8,4 тс, что соответствовало 43% от прочности арматуры на растяжение. Сделан вывод, что значительный разброс деформаций и разрушающих усилий объясняется неоднородностью контакта раствор-бетон по длине заделки арматуры, наличием усадочных явлений и отклонениями геометрии скважины от поверхности цилиндра. Это подтверждает необходимость изменения формы скважины преобразованием в многошпоночное соединение или установкой дополнительных анкерующих элементов.

Модели и методы

Для повышения сопротивляемости сборного железобетонного каркаса прогрессирующему разрушению предложено два конструктивных решения штепсельного стыка, которые предусматривали скважины с применением гофрированной трубы и с применением металлической трубы с приваренными кольцевыми элементами (рисунок 1). Эти два варианта конструктивного решения должны обеспечить работу стыка на возможные растягивающие усилия.

Конструктивное решение №1 представляет собой устройство в скважине закладной детали в виде стальной трубы класса С245 с приваренными к ней кольцевыми элементами. Количество кольцевых элементов варьировалось от 3 до 5 штук, толщина колец принята 5мм. Установка такой закладной детали между бетоном колонны и бетоном скважины повышает сопротивляемость вырыву, обеспечивая более надежную анкеровку арматурного стержня и бетона скважины. Разрушение может происходить как от вырыва бетона скважины, так и от разрыва арматурного стержня. Конструктивное решение №2 подразумевает использование закладной детали в виде гофрированной трубы, образующей многошпоночное соединение. Труба помещается между арматурой и бетоном колонны создавая опалубку для скважины. За счет переменного диаметра трубы создается хорошее сцепление бетона колонны с бетоном скважины. Такое решение увеличивает сопротивление осевому сдвигу арматурного стержня и бетона скважины и предполагает разрушение от текучести арматуры.

Для установления характера разрушения данных соединений и напряженно-деформированного состояния в программном комплексе ANSYS были рассмотрены численные модели, с варьированием диаметров арматурного стержня, класса арматуры, типа закладной детали скважины.

Верификация численной модели выполнена по результатам натурального эксперимента. Смоделирован образец колонны (рисунок 2), который подвергся испытаниям аналогичным [9]. Численное моделирование экспериментального образца проведено в программном комплексе ANSYS. Физическая нелинейность бетона как в сжатой, так и в растянутой зоне учтена использованием встроенной модели бетона Menetrey-Willam Base, описывающей работу бетона как упругопластического анизотропного материала как до, так и после образования макротрещин в бетоне. В Autodesk Revit 2020 была построена геометрия модели, соответствующая модели из эксперимента с сечением 200х200. Это четверть

колонны с сечением 400х400. Модель экспортирована в ANSYS Workbench 2020. Для арматуры и бетона расчет был произведен в нелинейной постановке. При рассмотрении контактной задачи коэффициент трения между бетоном колонны В30 и бетонной оболочкой скважины В45 был принят равным 0,6. Бетонная оболочка и арматура работали совместно (в программе принят параметр «bonded»).

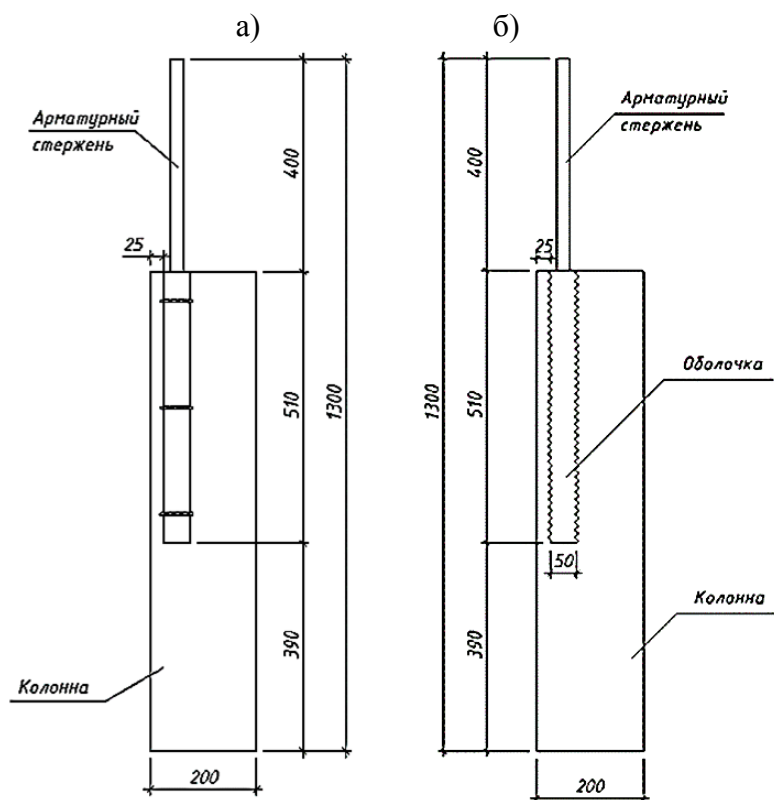


Рисунок 1 – Конструктивное решение скважины иттенсельного стыка с использованием:
а) трубы с приваркой стальных колец; б) гофрированной трубы

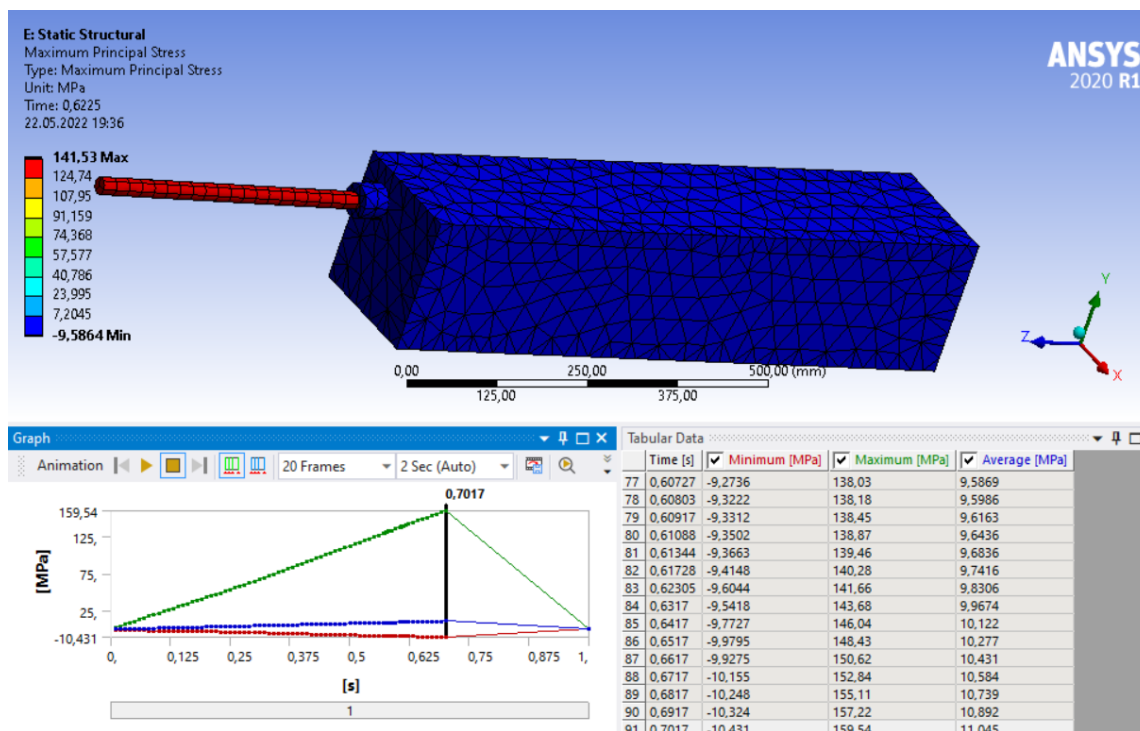


Рисунок 2 – Верификация расчетной модели с данными натурного эксперимента

По результатам работы модели сделан вывод, что характер разрушения соответствует данным физического эксперимента [9], деформации по оси z линейные, усилие, при котором арматурный стержень вместе с оболочкой выходит из скважины отличается от исходного на 7%. Следовательно, результаты проведенного численного моделирования адекватно отражают действительную работу стыка.

Результаты исследования и их анализ

В ходе численного моделирования конструктивного решения №1 получены данные о его напряженно-деформированном состоянии, установлено, что сопротивление стыка растяжению увеличилось более чем в два раза относительно типового решения. Отрыв бетонной оболочки от трубы происходит при усилии 18,6 тс (рисунок 3). Уменьшение диаметра арматуры не отражается на схеме разрушения скважины и значениях напряжений отрыва бетона скважины. При рассмотрении варианта с пятью приваренными кольцами, установлено, что отрыва оболочки и вырыва бетона скважины не происходит, разрушение наступает вследствие достижения предела текучести и разрыва арматурного стержня.

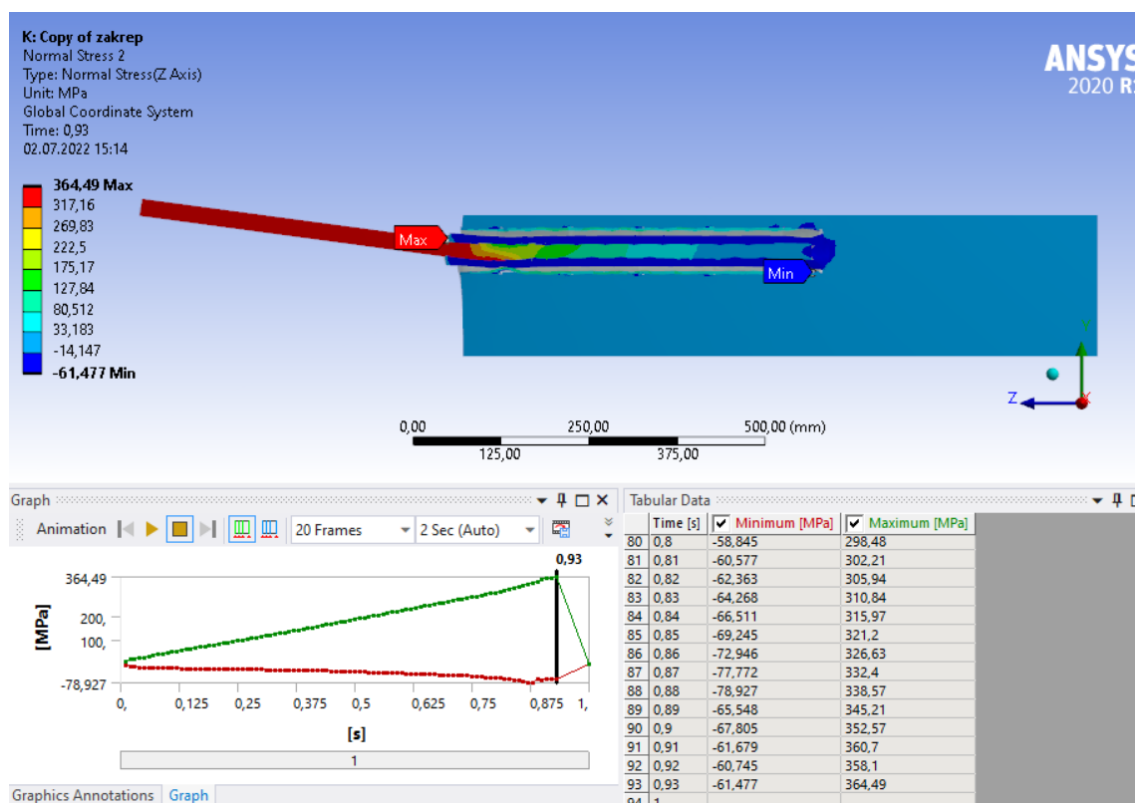


Рисунок 3 – Конструктивное решение №1. Нормальные напряжения, МПа

Результаты численного исследования конструктивного решения №2 показали, что разрушение происходит по арматуре, напряжения в бетоне не превышают разрушающих (рисунок 4). Таким образом, применение в качестве закладной детали гофрированной трубы обеспечивает работу соединения на растяжение без вырыва бетона скважины. Разрыв арматуры происходит при усилии 19,127 тс, для класса A400 и при 24, 481 тс для класса A500.

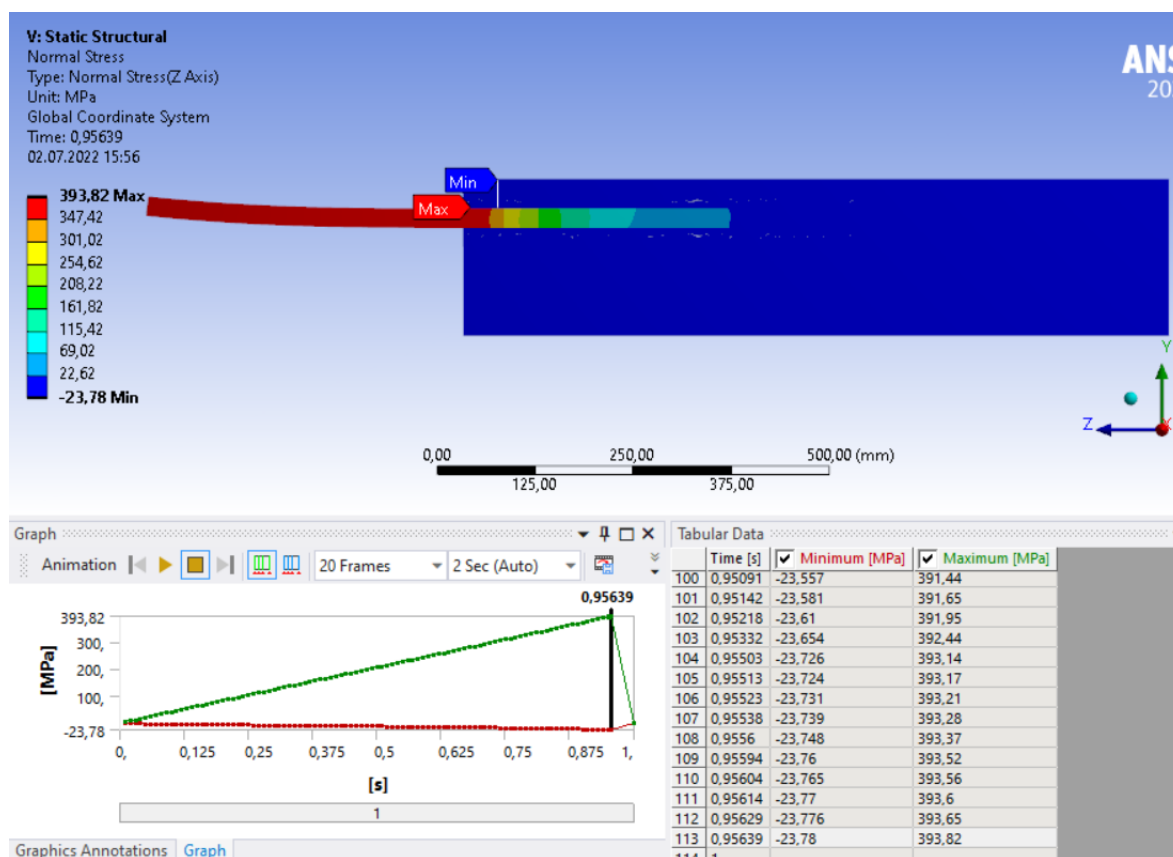


Рисунок 4 – Конструктивное решение №2. Нормальные напряжения, МПа

Итоговые значения напряжений и деформаций двух конструктивных решений штепсельного стыка приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты численного моделирования стыка двух конструктивных решений

Конструктивное решение		Деформации по оси Z, мм	Нормальные напряжения, МПа	
			min	max
№1	Ø16 A400 с тремя кольцами	0,977	- 38,681	262,36
	Ø16A400 с пятью кольцами	1,398	- 45,086	391,73
	Ø25A400 с тремя кольцами	0,545	- 34,975	100,93
	Ø25A400 с пятью кольцами	1,188	- 60,066	364,75
№2	Ø25A400	4,130мм.	-23,78	393,83
	Ø25A500	1,605мм.	-34,999	509,78

Для определения значений растягивающих усилий в колонне каркаса был выполнен расчет на прогрессирующее обрушение. Рассмотрено 25-этажное административное здание со сборным железобетонным каркасом, высота здания 75м, сетка колонн 6х6м, сечение колонн 400х400мм, бетон кл. В30, район строительства – г. Казань, производилось удаление средней, крайней и угловой колонн. Максимальное растягивающее усилие, полученное при анализе схем разрушения, составило 152,9 тс – на уровне второго яруса, растягивающие усилия уменьшаются по мере увеличения высоты колонны.

Для повышения сопротивляемости сборного железобетонного каркаса прогрессирующему обрушению необходимо изменить проектное решение штепсельного стыка, предполагая возможность его работы на растяжение. Исходя из полученных результатов, лучшим решением является использование в качестве закладной детали скважины гофрированной трубы, диаметр и количество арматурных стержней должны подбираться исходя из возможных максимальных сжимающих и растягивающих усилий

(рисунок 5). Необходимости установки дополнительной арматуры по всей высоте колонны нет, достаточно установить промежуточные стержни с учетом необходимой длины анкеровки. Учитывая вышесказанное, предложено решение для сборного элемента колонны с размещением в расчетном сечении двух или четырех дополнительных стержней.

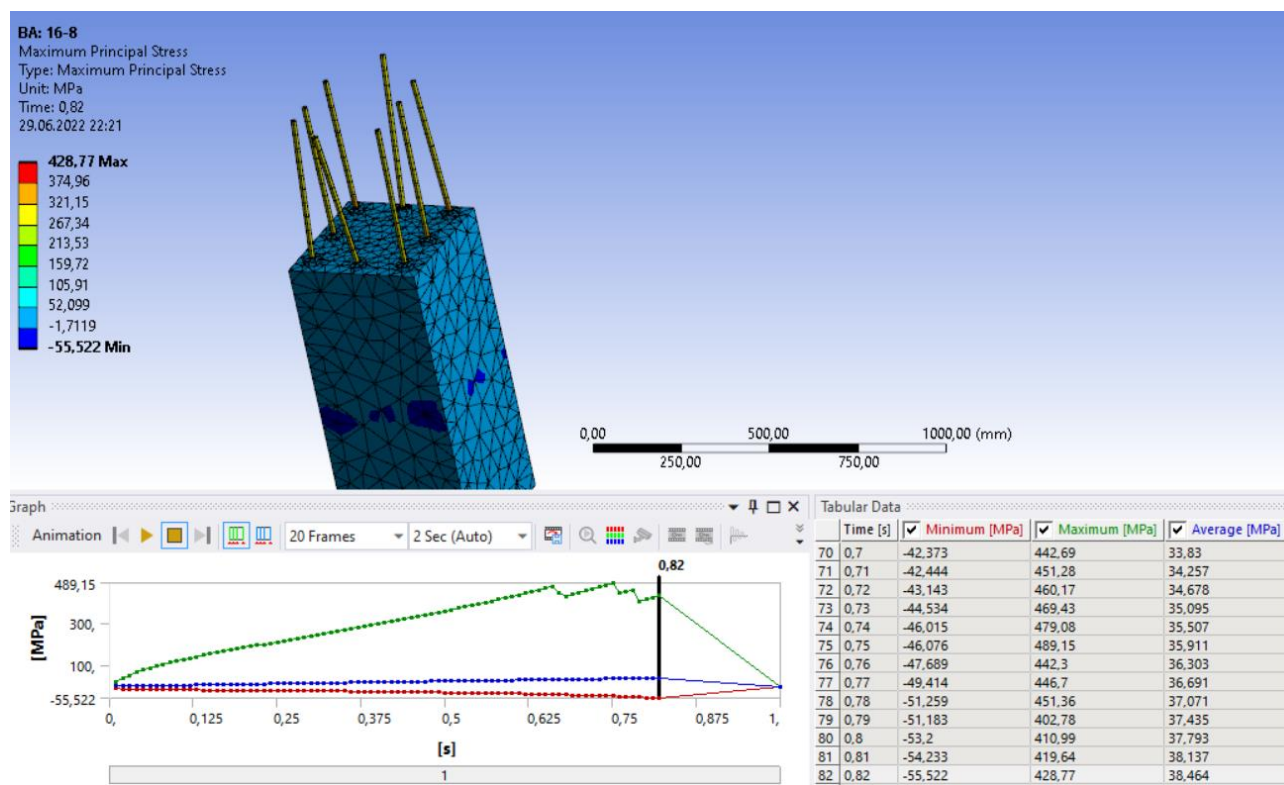


Рисунок 5 – Нормальные напряжения при размещении в сечении дополнительных стержней 4Ø16 A400, МПа

Разработаны рекомендации по конструированию штепсельного стыка с применением конструктивного решения №2. В табличном виде (таблица 2) предложены рекомендации по подбору необходимого количества арматурных стержней для колонны сечением 400х400мм, арматуры 16, 18, 20, 22 и 25 диаметра класса А400 в зависимости от растягивающих усилий. Рекомендации могут быть уточнены и расширены для арматуры других классов и диаметров, а также других размеров сечений колонн и классов бетона.

Таблица 2 – Подбор арматуры класса А400 в зависимости от растягивающих усилий в стыке

Растягивающее усилие в стыке, тс	Ø16	Ø18	Ø20	Ø22	Ø25
	Количество стержней / тс				
30	4 / 26,647	4 / 33,33	4 / 41,637	4 / 51,078	4 / 60,464
40	6 / 36,157	6 / 51,184	4 / 41,637	4 / 51,078	4 / 60,464
50	8 / 55,802	6 / 51,184	6 / 63,189	4 / 51,078	4 / 60,464
60	-	8 / 65,6	6 / 63,189	6 / 67,746	4 / 60,464
70	-	-	8 / 77,09	8 / 99,574	6 / 88,40
80	-	-	-	8 / 99,574	6 / 88,40
90	-	-	-	8 / 99,574	8 / 120,929
100	-	-	-	-	8 / 120,929
110	-	-	-	-	8 / 120,929
120	-	-	-	-	8 / 120,929

Выводы

Проблема прогрессирующего обрушения диктует необходимость принятия конструктивных мер по его недопущению для проектируемых и существующих зданий, что особенно актуально для сборных и сборно-монолитных несущих систем, имеющих типовые унифицированные решения. Изменение конструктивной схемы здания в результате аварийного воздействия приводит к иной работе узлов и элементов, меняя не только значения, но и знаки усилий. В проведенной работе штепсельный стык колонн, запроектированный на внецентренное сжатие, может подвергнуться растяжению. На некоторых участках колонны типовое решение позволяет воспринять эти новые усилия, а на некоторых требуется усиление. Учитывая унификацию и типизацию сборных элементов, нет необходимости усиливать все расчетные сечения, можно спрогнозировать работу каркаса в целом и дать рекомендации по армированию в зависимости от этажности, выполнить это на стадии проектирования. Предложено конструктивное решение скважины, обеспечивающее работу стыка без вырыва бетона скважины и разрыва арматуры с использованием гофрированной трубы. На основании анализа результатов численного моделирования выявлены особенности напряженно-деформированного состояния стыка при работе на растяжение и даны рекомендации по подбору арматуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Травуш В.И., Колчунов В.И., Ключева Н.В. Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 4-11.
2. Тамразян А.Г. Основные принципы оценки риска при проектировании зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2011. № 2-1. С. 21-27.
3. 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.
4. Juliya Mironova. Structural solution of the horizontal joint of floor slabs in girderless frame // 2 International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE –2021). 2021. Vol. 274. Pp. 1–10. doi:10.1051/e3sconf/202127403017
5. Люблинский В.А. К вопросу о перераспределении напряжений в вертикальных несущих железобетонных конструкциях многоэтажных зданий // Строительство и реконструкция. 2021. № 2. С. 39-45. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-94-2-39-45>
6. Люблинский В.А. К испытанию вертикальных сварных стыковых соединений панельных зданий // Строительство и реконструкция. 2019. № 5. С. 17-22. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-85-5-17-22>
7. Liu J., Xue Y., Wang C., Nie J., Wu Z. Experimental investigation on seismic performance of mechanical joints with bolted flange plate for precast concrete column // Engineering Structures. 2020. Vol. 216. doi:10.1016/j.engstruct.2020.110729.
8. Hu J.Y., Hong W.K., Park S.C. Experimental investigation of precast concrete based dry mechanical column-column joints for precast concrete frames // Structural Design of Tall and Special Buildings. 2017. Vol. 26. No. 5. doi:10.1002/tal.1337.
9. Ruiz-Pinilla J.G., Cladera A., Pallarés F.J., Calderón P.A., Adam J.M. Joint strengthening by external bars on RC beam-column joints // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 45. doi:10.1016/j.jobbe.2021.103445.
10. Федорова Н.В., Савин С.Ю. Анализ особенностей сопротивления прогрессирующему обрушению конструктивных систем зданий и сооружений при внезапных структурных перестройках: аналитический обзор научных исследований // Строительство и реконструкция. 2021. № 3. С. 76-108. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-76-108>.
11. Kiakojouri F. et al. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // Engineering Structures. 2020. Vol. 206. P. 110061. doi:10.1016/j.engstruct.2019.110061
12. Колчунов В.И., Московцева В.С., Бушова О.Б., Жуков Д.И. Расчетный анализ способов защиты монолитных каркасов многоэтажных зданий с плоскими перекрытиями от прогрессирующего обрушения // Строительство и реконструкция. 2021. № 4. С. 35-44. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-35-44>.
13. Morey P.K., Satone P.S.R. Progressive collapse analysis of building // International Journal of Optimization in Civil Engineering. 2012. Vol. 2. No. 4.
14. Yi N.H. et al. Collision capacity evaluation of RC columns by impact simulation and probabilistic evaluation // Journal of Advanced Concrete Technology. 2015. Vol. 13. No. 2. Pp. 67–81.
15. Rong Q., Luo Q. Experimental study on seismic performance of an improved precast reinforced concrete

- column-to-column joint // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2022. Vol. 50. No. 5. doi:10.1080/15397734.2020.1763183.
16. Thai H.T., Ho Q.V., Li W., Ngo T. Progressive collapse and robustness of modular high-rise buildings // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2021. doi:10.1080/15732479.2021.1944226.
 17. Sharafi P., Alembagheri M., Kildashti K., Ganji H.T. Gravity-Induced Progressive Collapse Response of Precast Corner-Supported Modular Buildings // *Journal of Architectural Engineering*. 2021. Vol. 27. No. 4. doi:10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000499.
 18. Peng J., Hou C., Shen L. Progressive collapse analysis of corner-supported composite modular buildings // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 48. doi:10.1016/j.jobe.2021.103977.
 19. Соколов Б.С., Латыпов Р.Р. Прочность и податливость штепсельных стыков железобетонных колонн при действии статических и сейсмических нагрузок. М. : Изд-во АСВ, 2010. 127 с.
 20. Трошков Е.О. Сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований штепсельных стыков сборных железобетонных колонн с плитами перекрытий // *Жилищное строительство*. 2017. № 7. С. 41-46.
 21. Васильев А.П., Матков Н.Г., Мирмунинов М.М. Местное сжатие в стыках колонн каркаса многоэтажных зданий // *Бетон и железобетон*. 1977. № 9. С. 30-32.
 22. Абдрахимова Н.С., Миронова Ю.В., Шамсутдинова А.И. Экспериментально-теоретические исследования усиленных штепсельных стыков железобетонных колонн при действии поперечной силы // *Известия КГАСУ*. 2016. № 3(37). С. 118-128.
 23. Соколов Б.С., Трошков Е.О. Деформативность штепсельных стыков сборных железобетонных плит перекрытий с колоннами в несущей системе УИКСС // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 3(62). С. 32-39.

REFERENCES

1. Travush V.I., Kolchunov V.I., Klueva N.V. Some directions of development of survivability theory of structural systems of buildings and structures // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2015. No. 3. P. 4–11.
2. Tamrazyan A.G. Recommendations to working out of requirements to robustness of buildings and constrictions // *Vestnik MGSU*. 2011. No. 2-1. Pp. 21-27.
3. Kodysh E.N. Designing the protection of buildings and structures against progressive collapse in view of the emergence of a special limiting state // *Promyshlennoye i grazhdanskoye Stroitel'stvo*. 2018. No. 10. P. 95–101.
4. Juliya Mironova. Structural solution of the horizontal joint of floor slabs in girderless frame // *2 International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE –2021)*. 2021. Vol. 274. Pp.1–10. doi:10.1051/e3sconf/202127403017
5. Lyublinskiy V.A. To the question of redistribution of stress in vertical bearing RC structures multi-story buildings // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2021. No. 2. Pp. 39-45. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-94-2-39-45>
6. Lyublinskiy V.A. To test vertical welded butt joints of panel buildings // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2019. No. 5. P. 17-22. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-85-5-17-22>
7. Liu J., Xue Y., Wang C., Nie J., Wu Z. Experimental investigation on seismic performance of mechanical joints with bolted flange plate for precast concrete column // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 216. doi:10.1016/j.engstruct.2020.110729.
8. Hu J.Y., Hong W.K., Park S.C. Experimental investigation of precast concrete based dry mechanical column-column joints for precast concrete frames // *Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2017. Vol. 26. No. 5. doi:10.1002/tal.1337.
9. Ruiz-Pinilla J.G., Cladera A., Pallarés F.J., Calderón P.A., Adam J.M. Joint strengthening by external bars on RC beam-column joints // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 45. doi:10.1016/j.jobe.2021.103445.
10. Fedorova N.V., Savin S. Yu. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2021. No. 3. Pp. 76-108. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-76-108>
11. Kiakojouri F. et al. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 206. P. 110061. doi:10.1016/j.engstruct.2019.110061
12. Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S., Bushova O.B., Zhukov D.I. Computational analysis of methods for protecting monolithic frames of multi-storey buildings with flat floors from progressive collapse // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2021. No. 4. Pp. 35-44. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-35-44>
13. Morey P.K., Satone P.S.R.. Progressive collapse analysis of building // *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 2012. Vol. 2. No. 4.
14. Yi N.H. et al. Collision capacity evaluation of RC columns by impact simulation and probabilistic evaluation // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2015. Vol. 13. No. 2. Pp. 67–81.
15. Rong Q., Luo Q. Experimental study on seismic performance of an improved precast reinforced concrete column-to-column joint // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2022. Vol. 50. No. 5.

doi:10.1080/15397734.2020.1763183.

16. Thai H.T., Ho Q.V., Li W., Ngo T. Progressive collapse and robustness of modular high-rise buildings // Structure and Infrastructure Engineering. 2021. doi:10.1080/15732479.2021.1944226.

17. Sharafi P., Alembagheri M., Kildashti K., Ganji H.T. Gravity-Induced Progressive Collapse Response of Precast Corner-Supported Modular Buildings // Journal of Architectural Engineering. 2021. Vol. 27. No. 4. doi:10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000499.

18. Peng J., Hou C., Shen L. Progressive collapse analysis of corner-supported composite modular buildings // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 48. doi:10.1016/j.jobe.2021.103977.

19. Sokolov B.S. Latypov R.R. Strength and pliability of plug joints of reinforced concrete columns under the action of static and seismic loads. Moscow: Izdatelstvo Associaciyi Stroitel'nykh Vuzov, 2010. 127 p.

20. Troshkov E.O. Comparison of the results of computer modeling and experimental studies of plug joints of precast reinforced concrete columns with floor slabs // Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2017. No. 7. P.41-46.

21. Vasiliev A.P., Matkov N.G., Mirmuminov M.M. Local compression at the joints of the columns of the frame of multi-storey buildings // Beton i zhelezobeton. 1977. No. 9. P. 30-32.

22. Abdrakhimova N.S., Mironova Yu.V., Shamsutdinova A.I. Experimental and theoretical studies of reinforced plug joints of reinforced concrete columns under the action of transverse force // Izvestiya KGASU. 2016. No. (37). P. 118-128.

23. Sokolov B.S., Troshkov E.O. Deformability of plug joints of precast reinforced concrete floor slabs with columns in the bearing system of UICSS // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2017. No. 3(62). P. 32-39.

Информация об авторах:

Люблинский Валерий Аркадьевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: lva_55@mail.ru

Миронова Юлия Викторовна

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Россия, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: yul.mironova2018@mail.ru

Information about authors:

Lyublinskiy Valery A.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

candidate of technical sciences, professor, professor of the department of reinforced concrete and stone structures.

E-mail: lva_55@mail.ru

Mironova Juliya V.

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia,

candidate of technical science, associated professor, associated professor of the department of reinforced concrete and stone structures.

E-mail: yul.mironova2018@mail.ru