



Research Article

Received: July 16, 2023

Accepted: August 16, 2023

Published: September 2, 2023

ISSN 2304-6295

The joint of precast reinforcement frame elements using composite rods

Ashikhmin, Stanislav Eduardovich.¹ 
Tyukalov, Yury Yakovlevich.^{1*} 

¹ Vyatka State University, Kirov, Russian Federation; yutvqu@mail.ru (T.Y.Y.);
ashihminstanislav@gmail.com (A.S.E.)

Correspondence:* email yutvqu@mail.ru; contact phone [+79128218977](tel:+79128218977)

Keywords:

Frames; Precast concrete elements; Quickly constructed joint; Composite rods; Epoxy adhesive; Physical nonlinearity

Abstract:

The object of research is a connection of precast reinforced concrete frame elements made using composite rods. This work aims to numerically study the stress-strain state of prefabricated reinforced concrete frame elements' connections. **Method.** A flat finite element model is used to analyze the stress-strain state of the precast concrete element's connection. The physically nonlinear finite elements are used for concrete modeling. A nonlinear stress-strain diagram for concrete was applied for calculations, given in the regulatory documents for the reinforced concrete structures design. The deformation diagram of steel reinforcement is elastic plastic. Composite rods are deforming elastically. The polyurethane sheets were modeled by nonlinear two-node finite elements working in compression. **Results.** A numerical analysis of the stress-strain state of a prefabricated frame with the proposed connections of a beam and a column under the action of two loading options has been performed. The results of calculations of prefabricated and monolithic reinforced concrete frames are compared. The comparison results show that the proposed joint connection between the beam and the column provides the required strength and rigidity of the frame.

1 Introduction

Сборные железобетонные каркасы и рамы широко и успешно применяются в жилищном, гражданском и промышленном строительстве. Исследованию и конструированию соединений элементов в таких конструкциях посвящены многочисленные исследования. В исследовании [1], проведенном нами ранее, приведен следующий обзор публикаций, относящихся к теме данной статьи. В статьях [2], [3] исследуется соединение балки с колонной при сейсмических воздействиях и циклических воздействиях. Проведенный численный анализ показал согласие численных решений с экспериментальными результатами, а предложенные модели хорошо представляют реакцию сборных соединений балки и колонны с использованием высокопрочных бетонов при циклических нагрузках. Экспериментальным исследованиям конструкций соединений железобетонных балок и колонн посвящена статья [4], где были представлены два новых соединения балки с колонной со встроенными в колонну стальными опорными пластинами. Преимуществом предлагаемых соединений является простота конструкции и отсутствие необходимости во временных опорах. В [5] представлены эксперименты на изгиб соединения сборной плиты. Соединение плит создается с использованием стальных пластин с перфорацией. На основе испытаний материалов разработана оптимизированная смесь армированного стальной фиброй раствора, обладающая как ранним развитием прочности, так и высокой прочностью на разрыв. В работе [6] исследуются разборные соединения железобетонных конструкций. В исследовании отмечается, что к основным соединительным элементам относятся стальные

Ashikhmin S.; Tyukalov Y.

The joint of precast reinforcement frame elements using composite rods;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10910. doi: 10.4123/CUBS.109.10



пластины и болты, однако наличие болтов в бетоне снижает прочность бетона, а также создает концентрацию напряжений в бетоне рядом с болтами. Имеющиеся знания сосредоточены в основном на соединениях между балкой и колонной. В этом контексте были получены очень хорошие результаты, при которых структурное поведение было аналогично монолитному соединению. Наилучшие результаты были достигнуты для конфигураций соединений без предварительного напряжения, со встроенными стальными пластинами и предварительно натянутыми резьбовыми болтами.

Для соединения в пролете железобетонных балок также используются соединения при помощи стальных пластин и болтов [7]. Результаты экспериментов показали, что консольное соединение обеспечивает превосходные механические и деформационные характеристики, а также более высокую несущую способность по сравнению с обычными прямыми соединениями. В статье [8] представлены экспериментальные исследования соединений изгибаемых железобетонных элементов. Тесты предоставили количественные данные и представление о деформациях, распространении и характере трещин, видах разрушения, механизме сопротивления и несущей способности.

Сборные железобетонные конструкции с применением стальной и композитной арматуры широко распространены в мостостроении [9]. Для сборных сегментных мостов была разработана новая срезная шпонка, и было изготовлено 12 натуральных образцов. В качестве экспериментальных параметров принимались типы срезных шпонок (бетонная шпонка, стальная срезная шпонка, вставная арматурная шпонка), типы соединений (сухие, эпоксидные), а также количество срезных шпонок. Изучалось развитие трещин, режим разрушения, скольжение при сдвиге, предельная способность к сдвигу. Результаты показали, что жесткость и срез стальных шпоночных соединений выше, чем бетонных шпоночных соединений, а горизонтальная предварительно напряженная система более устойчива. В работе [10] дана оценка эффективности сегментных балок коробчатого сечения, соединенных сухим способом и с эпоксидной смолой.

Исследование поведения сухих стыков в сборных железобетонных мостах при прямом сдвиге представлено в статье [11]. В работе отмечается, что поведение при сдвиге сухих соединений между бетонными сегментами было наиболее тревожной проблемой. Десять образцов с отрывом были испытаны под прямым сдвигом с параметрами числа шпонок, удерживающего напряжения и типа стального волокна. Были получены характеры растрескивания, виды разрушения и кривые смещения и нагрузки сухих соединений. Экспериментальный анализ показал, что удерживающее напряжение способно значительно улучшить трещиностойкость и сдвиговую способность образцов, влияние которых на трех шпоночные соединения было выше, чем на одно шпоночные соединения и монолитные образцы.

Проектирование и изготовление арки из сборных штабелируемых элементов представлено в статье [12]. Новый тип подземного арочного моста из сборного железобетона со стальными аутригерами (выносными стальными консолями) был разработан для максимизации структурной эффективности и улучшения конструктивных возможностей арочной подземной системы из сборного железобетона. В этом исследовании были проведены полномасштабные полевые испытания подземного арочного моста из сборного железобетона со стальными аутригерами для оценки напряженного состояния и деформаций, наблюдаемых в бетонных панелях и стальных аутригерах на различных этапах строительства.

В работах [13]–[15] исследуются арочные грунтозасыпные сборные мосты из бетонных блоков, сооружаемые без использования арматуры. Определяются оптимальные формы и несущая способность таких арочных сооружений.

В работе [16] приведены результаты испытаний сборных одноэтажных железобетонных рам, в которых колонны и ригели соединяются с использованием композитных стержней. Испытания проводились на горизонтальную циклическую нагрузку. Отмечается, что использование материалов с высокой начальной прочностью, таких как эпоксидная смола, используемая в этом исследовании для соединения сборных элементов, значительно сокращает время строительства и, потенциально может снизить общую стоимость строительства. Следовательно, эпоксидная смола является жизнеспособной заменой цементного раствора, которому требуется больше времени для отверждения и набора прочности.

Экспериментальные исследования клеевых соединений стальных дюбелей и железобетонных элементов представлены в работе [17]. В статье приведены данные о влиянии длины заделки и диаметра вклеенных стержней на прочность соединения. В работе [18] исследуются характеристики анкеровки болтового соединения, встроенного в тонкие элементы, а

Ashikhmin S.; Tyukalov Y.

The joint of precast reinforcement frame elements using composite rods;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10910. doi: 10.4123/CUBS.109.10

в [19] приведено сравнение характеристик сдвига бетонных балок, армированных стержнями из стеклопластика и из стали. В статье [20] применяется аналитическое моделирование нарушения сцепления между эпоксидным стеклопластиком и бетонным основанием. Такие соединения могут применяться в сборных железобетонных конструкциях.

Для увеличения сроков эксплуатации железобетонных сборных конструкций актуальным является использование в соединениях таких конструкций вместо стальной арматуры композитной, которая не подвержена коррозии и обладает более высокой прочностью. Применение композитных стержней позволяет существенно сократить сроки строительства, за счет быстрого твердения эпоксидного клея. Целью данной работы является численное исследование напряженно деформированного состояния соединений элементов сборных железобетонных рам с использованием композитных стержней. При численном анализе сборных железобетонных рам необходимо учесть физическую нелинейность деформирования бетона и арматуры, а также конструктивную нелинейность, связанную с односторонней связью (только сжатие) в узловом соединении.

2 Materials and Methods / Материалы и методы

В данной работе исследуется конструктивная схема соединения элементов сборной железобетонной рамы с использованием композитной арматуры, вклеиваемой в подготовленные отверстия. Композитная арматура, в отличие от стальной, не подвержена коррозии и обладает высокой прочностью, а эпоксидный клей, в отличие от монолитного бетона, затвердевает в течение суток. Поэтому использование в соединениях элементов сборных конструкций вклеиваемой композитной арматуры позволяет сократить сроки монтажа железобетонных конструкций и обеспечить их прочность и долговечность. Наиболее актуально применение композитной арматуры для узловых соединений сборных железобетонных конструкций сооружений, подверженных воздействию агрессивных сред. К таким сооружениям относятся: подземные сооружения, морские и речные причалы, определенные складские сооружения.

В работе рассматривается железобетонная рама, которая состоит из двух колонн сечением 400x400мм, высотой 3м и ригеля (400(h)x200мм) длиной 6м. Для соединения ригеля с колонной используется ступенчатый узел с применением вклеиваемой композитной арматуры (рис. 1). Вертикальная и горизонтальная композитная арматура с помощью вклеивается в заранее подготовленные отверстия. Эпоксидный клей затвердевает в течение суток, что позволяет эксплуатировать конструкцию уже на следующий день и сокращает сроки монтажа. Для равномерной передачи сжимающих напряжений в стык устанавливаются полиуретановые пластины толщиной 10мм (показаны на рис. 1 зеленым цветом). Полиуретановые пластины обеспечивают выравнивание пиковых напряжений, связанных с возможными неровностями бетонных поверхностей стыкуемых блоков, а также обеспечивают герметичность соединения.

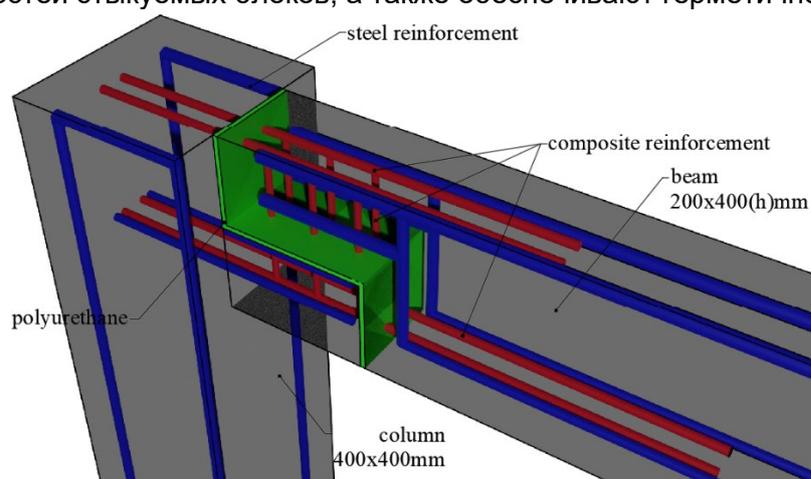


Рис. 1 - Соединение элементов сборной железобетонной рамы.

Fig. 1 - Precast concrete frame connection.

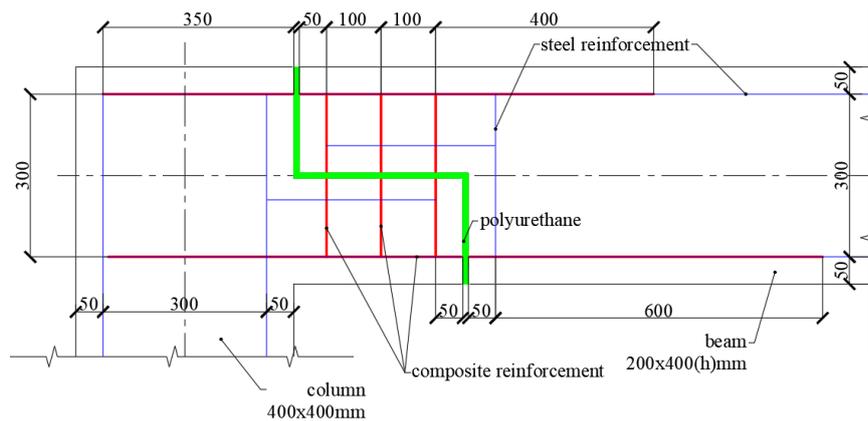


Рис. 2 - Схема стыка сборной железобетонной рамы.

Fig. 2 - Connection diagram of a prefabricated reinforced concrete frame.

Численный анализ напряженно-деформированного состояния сборной железобетонной рамы, выполняется методом конечных элементов в программном комплексе ЛИРА-САПР (<https://www.liraland.com>).

Бетон элементов рамы моделируется четырехугольными и треугольными плоскими конечными элементами (рис. 3) с учётом физической нелинейности (тип 244). Диаграммы напряжение–деформация для бетона и стальной арматуры представлены на рис. 4. Размер сетки для плоских конечных элементов бетона принят 25мм.

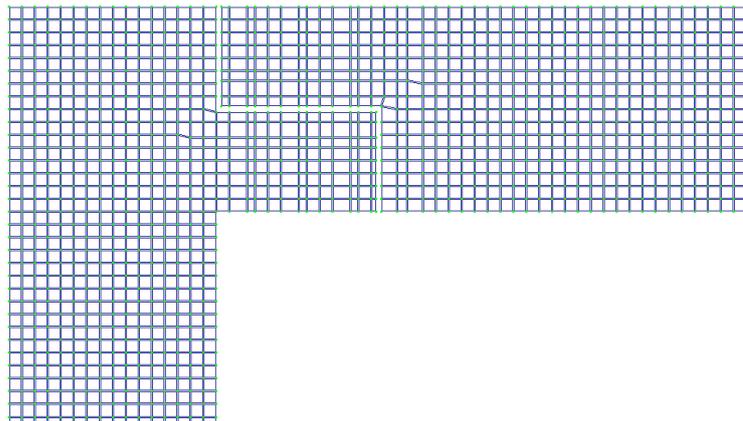


Рис. 3 - Конечно-элементная модель бетона половины сборной железобетонной рамы.

Fig. 3 - Finite element model of concrete of a composite reinforced concrete frame.

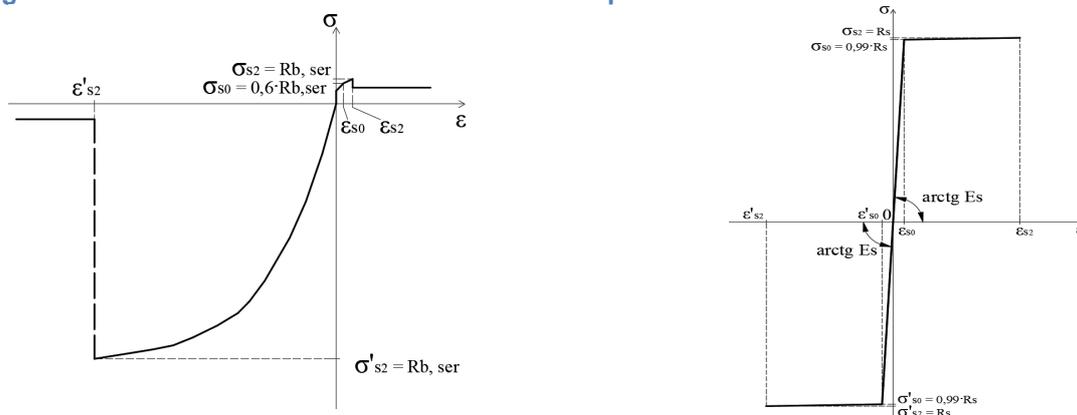


Рисунок ранее опубликован в статье *Tyukalov, Y. and Ashikhmin, S. (2023) Quickly constructed joint of precast concrete arch elements. Construction of Unique Buildings and Structures; 107. <https://doi.org/10.4123/CUBS.107.3>.*

Рис. 4 - Диаграмма нелинейного деформирования бетона и арматуры.

Fig. 4 - The nonlinear deformation diagrams of concrete and reinforcement.

Стальная арматура моделируется стержневыми конечными элементами с учётом физической нелинейности.

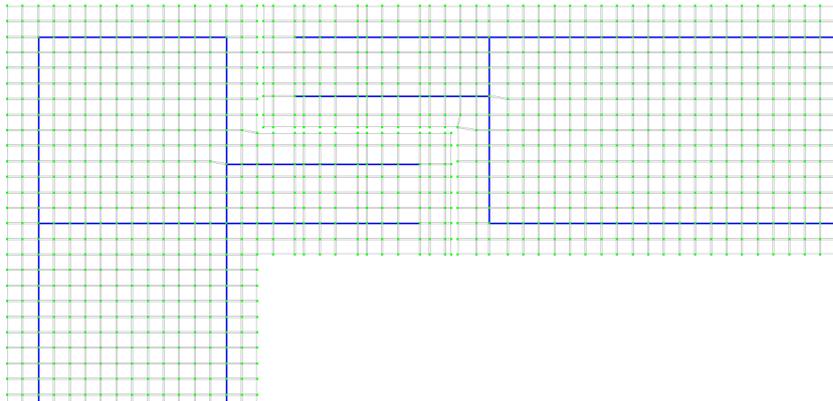


Рис. 5 - Конечно-элементная модель стальной арматуры.
Fig. 5 - Finite element model of steel reinforcement.

Композитные стержни деформируются упруго и моделируются стержневыми конечными элементами без учета физической нелинейности.

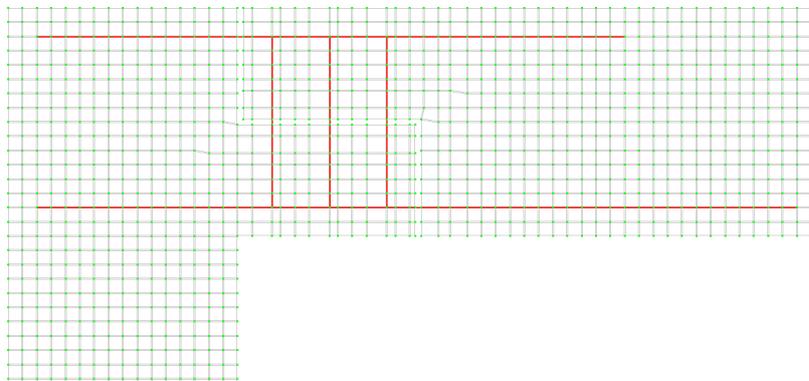


Рис. 6 - Конечно-элементная модель композитных стержней.
Fig. 6 - Finite element model of composite rods.

Тонкая, полиуретановая прокладка, передающая только напряжения сжатия, моделируется с помощью двухузловых конечных элементов упругой связи между узлами. Данный КЭ является нелинейным и предназначен для моделирования односторонней (воспринимающей либо растяжение, либо сжатие) линейной связи. Направление связи выстраивается в соответствии с координатами узлов, описывающих данный КЭ. Погонная жесткость связи на осевое сжатие вдоль ориентации связи вычисляется по формуле $R=(E \cdot h \cdot b)/\delta$, где E – модуль упругости полиуретановой вставки, h – шаг расположения линейных связей, b – толщина сечения ригеля, δ – толщина прокладки.

Между соединяемыми элементами в композитных стержнях возникают значительные растягивающие усилия. Эти усилия могут вызывать большие растягивающие напряжения в бетоне защитного слоя. Для направления растягивающих напряжений в бетоне внутрь соединяемых элементов можно использовать наклонные композитные стержни (рис. 7–8). Композитные стержни будут уходить вглубь колонны и балки под углом 15° . Такой угол принят как максимально возможный из-за конструктивных соображений.

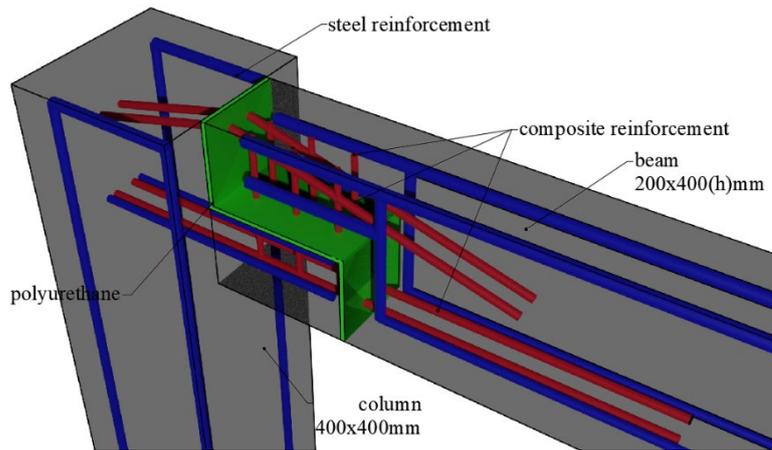


Рис. 7 - Соединение сборной железобетонной рамы с наклонными стержнями.
Fig. 7 - Precast concrete frame connection with inclined rods.

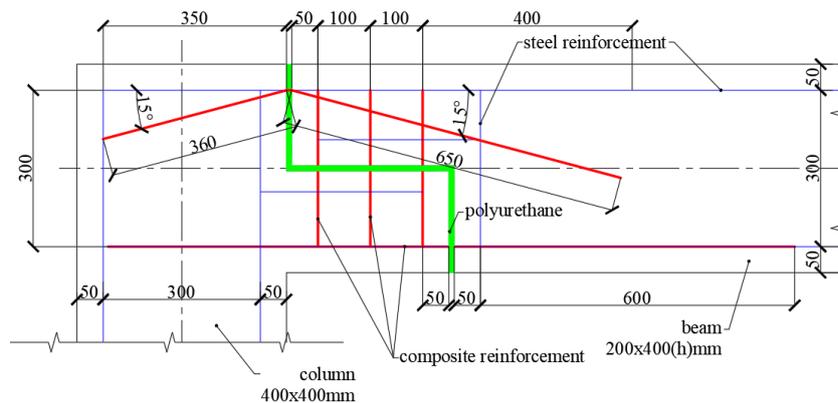


Рис. 8 - Схема соединения сборной железобетонной рамы с наклонными стержнями.
Fig. 8 - Connection diagram of a prefabricated reinforced concrete frame with inclined rods.

Композитная арматура сборной рамы моделируется линейными конечными элементами 10 типа (рис. 9). Тип конечного элемента композитной арматуры соответствует универсальному пространственному стрержневому конечному элементу.

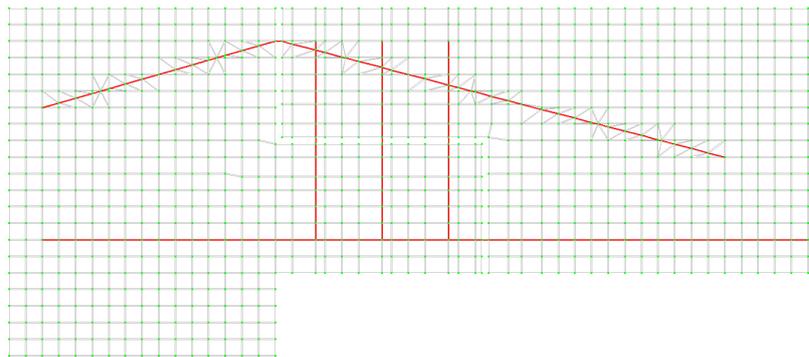


Рис. 9 - Конечно-элементная модель с наклонными стержнями.
Fig. 9 - Finite element model with inclined rods.

3 Results and Discussion

Для численного анализа напряженно-деформированного состояния соединения сборных железобетонных элементов выполнен расчет монолитной и составной (рис.8) железобетонной рамы. Рассматривались нагрузки вертикальной равномерно-распределенной нагрузкой qz (рис.9а) и нагрузка сосредоточенной сдвигающей силой Px (рис. 9б).

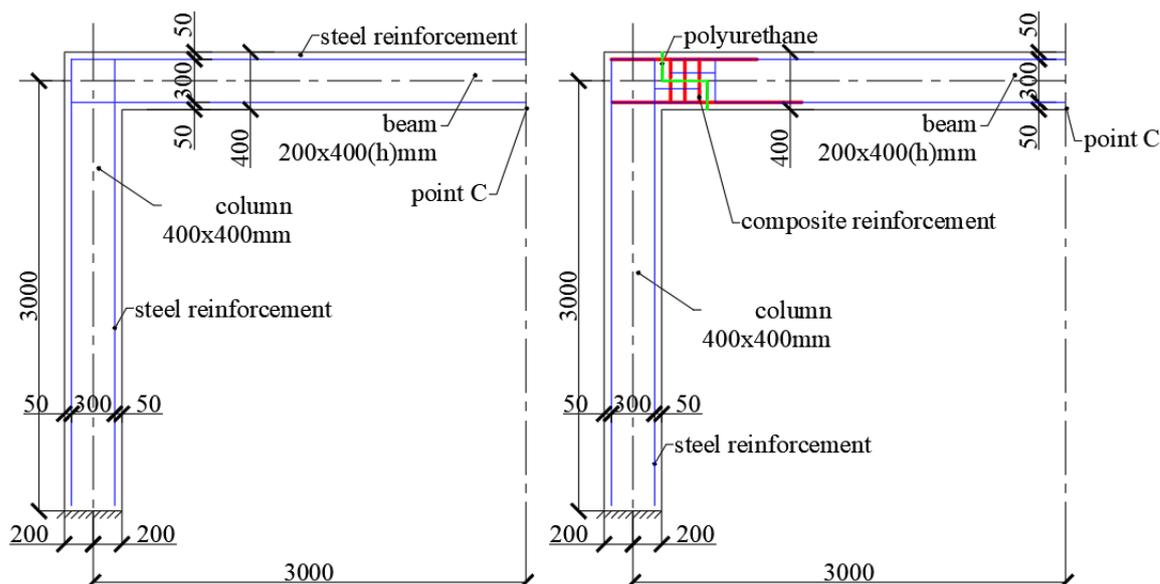


Рис. 10 - Схема монолитной и сборной с применением композитных стержней железобетонной рамы.

Fig. 10 - Scheme of a monolithic and prefabricated reinforced concrete frame using composite rods.

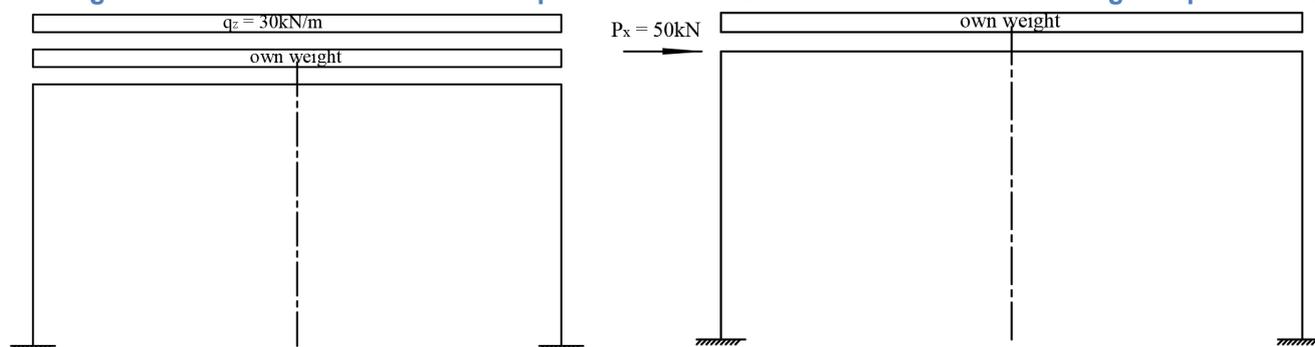


Рис. 11 - Варианты нагружения рамы.

Fig. 11 - Frame loading options.

Колонны и балка армированы стальной арматурой класса А-III. Диаметр угловой арматуры колонны - 22 мм. Диаметр верхней арматуры балки – 26мм, нижней – 18мм.

Для композитных стержней принят модуль упругости равен 50000 МПа. На рисунках они обозначены красным цветом. Вертикальные композитные стержни имеет диаметр 14мм, горизонтальные – 18мм. Модуль упругости полиуретановых пластин равен $E=16000\text{МПа}$. Нелинейный расчет выполняется шаговым методом, количество шагов для нагружений равно 20.

Для анализа прочности и жесткости рассматриваемого соединения, выполнены расчеты составной и монолитной рам для двух вариантов нагружения (рис. 12-13). Нагрузки, в соответствии с шаговым алгоритмом, увеличивались постепенно, вплоть до критически больших перемещений. Сравнение результатов показывает, что предлагаемый вариант соединения сборных блоков обеспечивает прочность и жесткость рамы, практически равные жесткости и прочности монолитной конструкции. Максимальные перемещения и напряжения в характерных сечениях, полученные для сборной и монолитной рам, отличаются менее чем на один процент вплоть до разрушения.

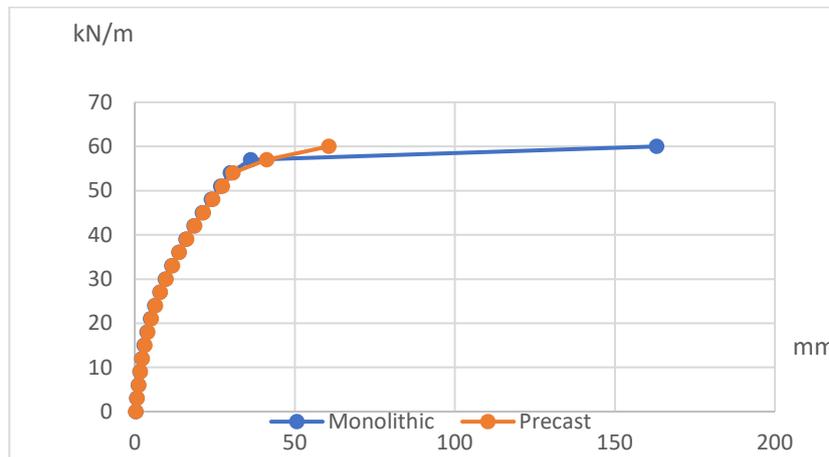


Рис. 12 - Вертикальное перемещение точки С в зависимости от величины нагрузки q_z .
 Fig. 12 - Vertical displacement of point C depending on the load q_z magnitude.

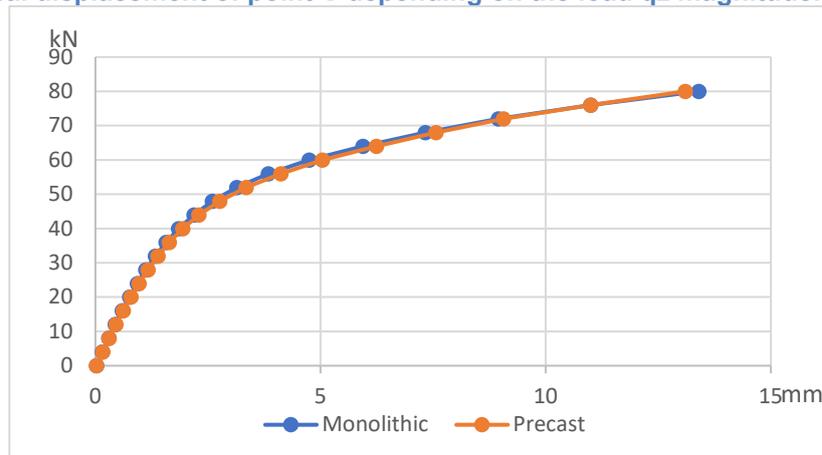


Рис. 13 - Горизонтальное перемещение точки С в зависимости от величины сдвигающей нагрузки P_x .
 Fig. 13 - Horizontal displacement of point C depending on the shifting load P_x magnitude.

Нагрузки прикладывались поэтапно. Для первого варианта нагружения, сначала прикладывался собственный вес, затем – равномерно-распределенная нагрузка на ригель. Для второго – собственный вес и горизонтальная сосредоточенная сила.

Для вертикальной композитной арматуры был выполнен подбор диаметров, в связи с экономическими соображениями. Диаметры принимались от 16мм до 10мм с шагом в 2мм. В результате выявлено влияние диаметра вертикальной арматуры на перемещения точки С сборной железобетонной рамы (рис. 14–15). Результаты показывают, что для обеспечения требуемой жесткости необходимо использовать вертикальные стержни диаметром не менее 12 мм.

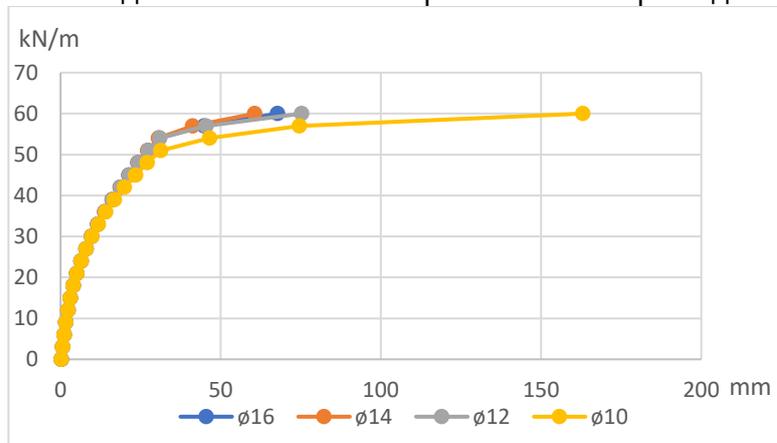


Рис.14 - Вертикальное перемещение точки С в зависимости от величины диаметра вертикальной композитной арматуры.

Fig.14 - Vertical displacement of point C depending on the diameter values of vertical composite reinforcement.

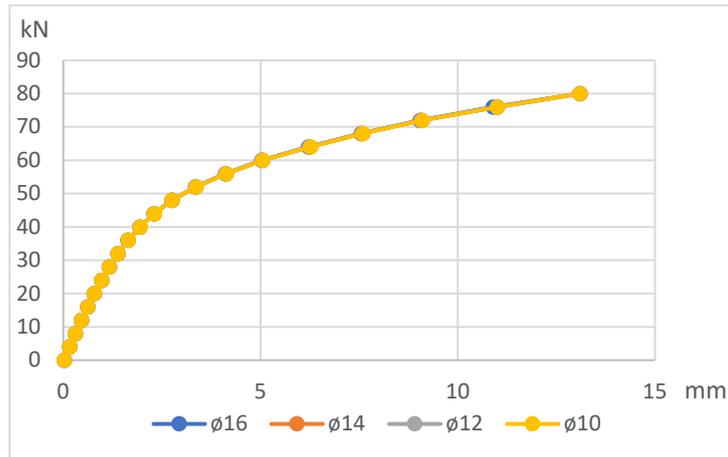


Рис.15 - Горизонтальное перемещение точки С в зависимости от величины диаметра вертикальной композитной арматуры.

Fig.15 - Horizontal displacement of point C depending on the diameter values of vertical composite reinforcement.

Для оценки влияния наклона продольных композитных стержней на величину максимальных растягивающих напряжений в бетоне были выполнены расчеты сборной рамы с наклоном композитных стержней на 15 градусов (рис. 7–8). Рассчитывалась сборная железобетонная рама с диаметрами вертикальной и горизонтальной композитной арматуры 14мм и 18мм соответственно. На рис. 16–17 представлено сравнение результатов расчетов двух вариантов расположения продольных композитных стержней: 1 – наклонные стержни, 2 – горизонтальные стержни.

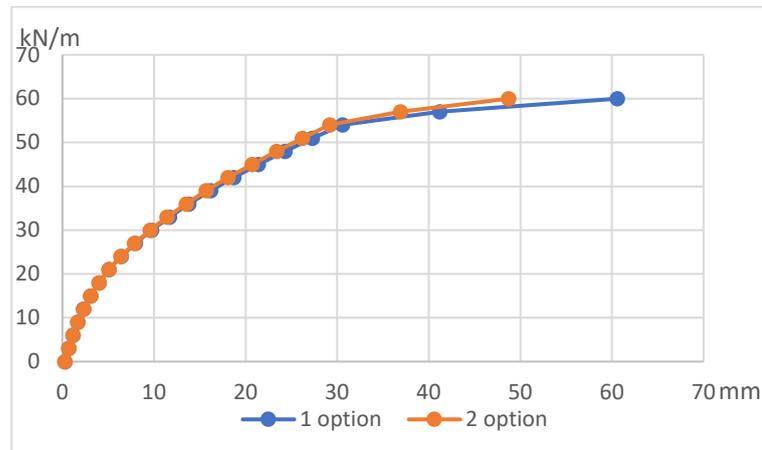


Рис.16 - Вертикальное перемещение точки С в зависимости от вида конструкции.

Fig.16 - Vertical displacement of point C depending on the type of structure.

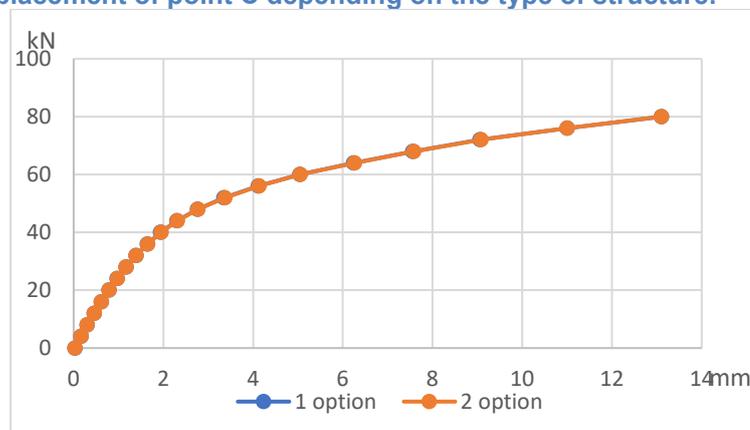


Рис.17 – Горизонтальное перемещение точки С в зависимости от вида конструкции.

Fig.17 – Horizontal displacement of point C depending on the type of structure.

Расчеты показывают, что наклон композитных связующих стержней приводит к уменьшению перемещений, и, следовательно, к увеличению жесткости соединения.

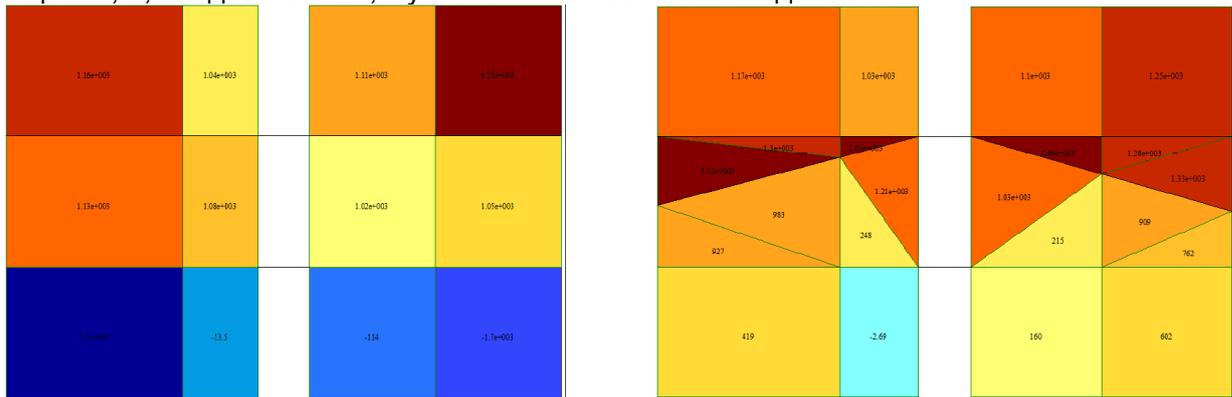


Рис. 18 - Напряжения в бетоне для двух вариантов расположения продольных стержней
Fig. 18 - Stresses in concrete for two options for arranging longitudinal rods

Сравнение расчетов показывает, что наклон связующих композитных стержней не приводит к уменьшению максимальных растягивающих напряжений в бетоне (Рис. 18). При этом максимальные напряжения в бетоне не превышают предельно допустимых для обоих вариантов расположения стержней. Отметим, что вклеивание наклонных композитных стержней, имеющих большую изгибную жесткость, является технически более сложной задачей, по сравнению с вклеиванием горизонтальных стержней.

В представленных расчетах не учитывались возможные сдвиги между бетоном и вклеенными композитными стержнями. Затвердевший эпоксидный клей имеет значительно меньший модуль упругости по сравнению с модулем упругости композита, что будет вызывать сдвиги. Учет в расчетах возможных сдвигов может привести к уменьшению жесткости предлагаемого узлового соединения. Поэтому, для определения сдвиговой жесткости клея, предполагается выполнить численные и экспериментальные исследования по вытягиванию вклеенных в бетон композитных стержней.

4 Conclusions / Заключение

1. Предложена конструктивная схема узлового соединения ригеля и колонны сборной железобетонной рамы с использованием вклеенных, вертикальных и горизонтальных связующих композитных стержней.

2. Выполнен численный анализ напряженно деформированного состояния сборной рамы с предложенными соединениями ригеля и колонны при действии двух вариантов нагружения. Проведено сравнение результатов расчетов сборной и монолитной железобетонных рам. Результаты сравнения показывают, что предлагаемое узловое соединение ригеля и колонны обеспечивает требуемую прочность и жесткость рамы. Максимальные перемещения и напряжения в характерных сечениях, полученные для сборной и монолитной рам, отличаются менее чем на один процент вплоть до разрушения.

3. Выполнен анализ влияния наклона связующих композитных стержней на величину максимальных растягивающих напряжений в бетоне и на жесткость рамы. Наклон связующих композитных стержней не приводит к уменьшению максимальных растягивающих напряжений в бетоне. При этом максимальные напряжения в бетоне не превышают предельно допустимых для обоих вариантов расположения стержней.

4. Для вертикальной композитной арматуры был выполнен подбор диаметров, в связи с экономическими соображениями. Диаметры принимались от 16мм до 10мм с шагом в 2мм. В результате выявлено влияние диаметра вертикальной арматуры на перемещения точки С сборной железобетонной рамы. Результаты показывают, что для обеспечения требуемой жесткости необходимо использовать вертикальные стержни диаметром не менее 12 мм.

5. С целью определения жесткости клеевого соединения на сдвиг, предполагается выполнить численные и экспериментальные исследования по вытягиванию вклеенных в бетон композитных стержней.



References

- 1 Tyukalov, Y. and Ashikhmin, S. (2023) Quickly constructed joint of precast concrete arch elements. *Construction of Unique Buildings and Structures*; 107. <https://doi.org/10.4123/CUBS.107.3>.
- 2 Xue, W., Hu, X. and Song, J. (2021) Experimental study on seismic behavior of precast concrete beam-column joints using UHPC-based connections. *Structures*, Elsevier Ltd, 34, 4867–4881. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.10.067>.
- 3 Xia, K., Hu, X. and Xue, W. (2021) Experimental studies on in-plane connections of composite beam-precast concrete shear wall under reversed cyclic loading. *Structures*, Elsevier Ltd, 34, 1961–1972. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.127>.
- 4 Tadi Beni, M.B. and Madhkhan, M. (2022) Experimental study on two innovative ductile moment-resisting precast concrete beam-column connections. *Structures*, Elsevier Ltd, 39, 559–572. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.059>.
- 5 Minh Hai, N., Fujikura, S., Nakajima, A. and Nam Phan, H. (2022) Experimental investigation on flexural behavior of a precast slab joint with perfobond strips and steel fiber-reinforced mortars. *Structures*, Elsevier Ltd, 39, 278–292. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.033>.
- 6 Figueira, D., Ashour, A., Yıldırım, G., Aldemir, A. and Şahmaran, M. (2021) Demountable connections of reinforced concrete structures: Review and future developments. *Structures*, 34, 3028–3039. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.053>.
- 7 Zhou, W., Xu, Z. and Ma, C. (2022) Flexural behavior of precast concrete beams in-span assembled with bolt-steel plate joints. *Structures*, Elsevier Ltd, 43, 1291–1304. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.067>.
- 8 Li, G., Wang, J., Shen, Y., Li, L. and Chen, M. (2020) Experimental study on the combined shear and bending behaviour of corbel joints in precast concrete segmental inverted-T caps. *Structures*, Elsevier Ltd, 28, 2367–2378. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.051>.
- 9 Zou, Y. and Xu, D. (2022) Experimental study on shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges. *Structures*, Elsevier Ltd, 39, 323–336. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.037>.
- 10 Saibabu, S., Srinivas, V., Sasmal, S., Lakshmanan, N. and Iyer, N.R. (2013) Performance evaluation of dry and epoxy jointed segmental prestressed box girders under monotonic and cyclic loading. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, 38, 931–940. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.068>.
- 11 Jiang, H., Huang, C., Feng, J., Gao, X., Wang, T. and Zhong, Z. (2021) Direct shear behavior of castellated dry RPC joints in precast concrete segmental bridges. *Structures*, Elsevier Ltd, 33, 4579–4595. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.013>.
- 12 Jeon, S.H., Moon, H.D., Sim, C. and Ahn, J.H. (2021) Construction stage analysis of a precast concrete buried arch bridge with steel outriggers from full-scale field test. *Structures*, Elsevier Ltd, 29, 1671–1689. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.050>.
- 13 Tyukalov, Y. (2020) Optimal Shape of Arch Concrete Block Bridge. *Construction of Unique Buildings and Structures*. <https://doi.org/10.18720/CUBS.93.7>.
- 14 Tyukalov, Y.Y. (2023) Elliptical underground concrete block bridge with minimal weight. *Magazine of Civil Engineering*, 117. <https://doi.org/10.34910/MCE.117.13>.
- 15 Tyukalov, Y. and Ashikhmin, S. (2022) Loading capacity of an arched underground bridge made of concrete blocks. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 101. <https://doi.org/10.4123/CUBS.101.5>.
- 16 Hassanli, R., Vincent, T., Manalo, A., Smith, S.T., Gholampour, A., Gravina, R. and Zhuge, Y. (2021) Connections in GFRP reinforced precast concrete frames. *Composite Structures*, Elsevier Ltd, 276, 114540. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114540>.
- 17 Abd El-Hameed, S., Eladawy, M., Agamy, M.H. and Haggag, H. (2022) Experimental and numerical investigation on the performance of adhesive steel-dowels used in precast reinforced concrete elements. *Structures*, Elsevier Ltd, 40, 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.006>.
- 18 Lu, K., Xu, Q., Wang, M., Yao, Y. and Wang, J. (2021) Anchorage performance of bolt connection embedded in thin UHPC members. *Structures*, Elsevier Ltd, 34, 1253–1260. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.060>.



- 19 Halvonik, J., Borzovič, V. and Lániova, D. (2022) Comparison of shear behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars and steel bars. *Structures*, 43, 657–668. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.06.065>.
- 20 Augustus Nelson, L., Al-Allaf, M. and Weekes, L. (2020) Analytical modelling of bond-slip failure between epoxy bonded FRP and concrete substrate. *Composite Structures*, Elsevier Ltd, 251, 112596. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112596>.