



Research Article

Received: March 6, 2023

Accepted: April 3, 2023

Published: April 17, 2023

ISSN 2304-6295

## Quickly constructed joint of precast concrete arch elements

Tyukalov, Yury Yakovlevich<sup>1\*</sup> Ashikhmin, Stanislav Eduardovich<sup>1</sup> <sup>1</sup>Vyatka State University, Kirov, Russian Federation; yutvgu@mail.ru (T.Y.Y);  
[ashihminstanislav@gmail.com](mailto:ashihminstanislav@gmail.com) (A.S.E)Correspondence: \* email [yutvgu@mail.ru](mailto:yutvgu@mail.ru); contact phone [+79128218977](tel:+79128218977)

### Keywords:

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

### Abstract:

**The object of research** is the design and stress–strain state of the precast concrete element's rigid connection. For connection, composite rods are used, which are glued into prepared holes and channels. The reinforced concrete elements are connected by rods vertically and horizontally. In addition, for more uniform stresses transfer, polyurethane sheets are installed at the element's joint. **Method.** To analyze the stress-strain state of the precast concrete element's connection, a flat finite element model is used. The quadrangular physically non-linear finite elements are used for concrete modeling. For calculations, a non-linear stress-strain diagram for concrete, given in the regulatory documents for the reinforced concrete structures design, was applied. 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 and shear. **Results.** The quickly constructed structure for connecting precast concrete elements is proposed. A numerical analysis of the stress-strain state of such a connection is performed using the example of calculating the beam and the bridge arch. The comparison of the strength and rigidity of prefabricated and corresponding monolithic structures was made.

## 1 Introduction / Введение

Сборные железобетонные конструкции эффективно применяются в жилищном, гражданском и промышленном строительстве. Тем не менее, соединения элементов в таких конструкциях требуют дополнительных исследований. Различным типам соединений сборных железобетонных конструкций посвящены многочисленные научные статьи. В статье [1] исследуется напряженно-деформированное состояние соединения балки с колонной при сейсмических воздействиях, а в работе [2] – соединения сборных балок при циклических нагрузках. Экспериментальным исследованиям инновационных конструкций соединений железобетонных балок и колонн посвящена работа [3]. В [4] представлено экспериментальное исследование поведения на изгиб соединения сборной плиты при помощи перфорированных полос и растворов, армированных стальными волокнами. В исследовании [5] предлагаются сборно–разборные соединения железобетонных конструкций. Для соединения в пролете железобетонных балок применяются соединения при помощи стальных пластин и болтов [6]. В работе [7] исследуются сборные плиты покрытия армированные углеродными стержнями. Разработанные новые конструкции панелей продемонстрировали свою эффективность, связанную с высокой несущей способностью. В статье [8] представлены экспериментальные исследования различных типов Т–образных соединений изгибаемых железобетонных элементов. Восемь образцов с различными коэффициентами сдвига и типами соединений были нагружены до разрушения при изгибающих и сдвигающих нагрузках. Эти тесты предоставили количественные данные и фундаментальное представление о

Tyukalov Y.; Ashikhmin S.

Quickly constructed joint of precast concrete arch elements;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 107 Article No 10703. doi: 10.4123/CUBS.107.3



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. В [9] приведены экспериментальное исследование сдвиговых свойств соединений в сборных железобетонных сегментных мостах. В работе [10] дана оценка эффективности сегментных предварительно напряженных балок коробчатого сечения, соединенных сухим способом и с эпоксидной смолой, при монотонной и циклической нагрузке. Исследование поведения зубчатых сухих соединений в сборных железобетонных сегментных мостах при прямом сдвиге представлено в статье [11]. Анализ стадии строительства сборного железобетонного заглубленного арочного моста со стальными выносными опорами по результатам полномасштабных полевых испытаний приводится в работе [12]. Проектирование и изготовление арки из сборных штабелируемых элементов представлено в статье [13].

В работах [14]–[16] исследуются арочные грунтозасыпные сборные мосты из бетонных блоков, сооружаемые без использования арматуры. Определяются оптимальные формы и несущая способность таких арочных сооружений.

Численные методики анализа каменных арочных мостов с повреждениями под железнодорожной нагрузкой представлены в исследовании [17]. Следует отметить работу [18] в которой 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. Необходимы дополнительные исследования, чтобы лучше понять влияние модуля упругости эпоксидной смолы, а также армирования соединения на их поведение в сборных железобетонных элементах из стеклопластика. Предполагаемая область применения таких рам — это морские сооружения, где стальная арматура подвержена коррозии особенно сильно.

В статье [19] изучалось осевое поведение сборных железобетонных панелей с полыми композитными армирующими системами. Эти системы были предусмотрены для создания пустот, уменьшения бетона и собственного веса панелей. Отмечается увеличение осевой жесткости и прочности таких панелей. Экспериментальные исследования клеевых соединений стальных дюбелей и железобетонных элементов представлены в работе [20]. В статье приведены данные о влиянии длины заделки и диаметра вклеенных стержней на прочность соединения. Ряд работ посвящен исследованиям применения композитной арматуры и болтов для соединения балочных элементов. В частности, в работе [21] исследуются характеристики анкеровки болтового соединения, встроенного в тонкие элементы, а в [22] приведено сравнение характеристик сдвига бетонных балок, армированных стержнями из стеклопластика и из стали. В статье [23] применяется аналитическое моделирование нарушения сцепления между эпоксидным стеклопластиком и бетонным основанием. Такие соединения могут применяться в сборных железобетонных конструкциях.

Целью данной работы является численное исследование соединений железобетонных элементов сборных арок грунтозасыпных мостов. Для увеличения сроков эксплуатации актуальным является использование в соединениях таких конструкций вместо стальной арматуры композитной, которая не подвержена коррозии. При численном анализе сборных железобетонных арок необходимо учесть физическую нелинейность деформирования бетона и арматуры, а также конструктивную нелинейность, связанную с односторонней связью (сжатие) бетонных блоков и трением в местах их стыковки.

## 2 Materials and Methods / Материалы и методы

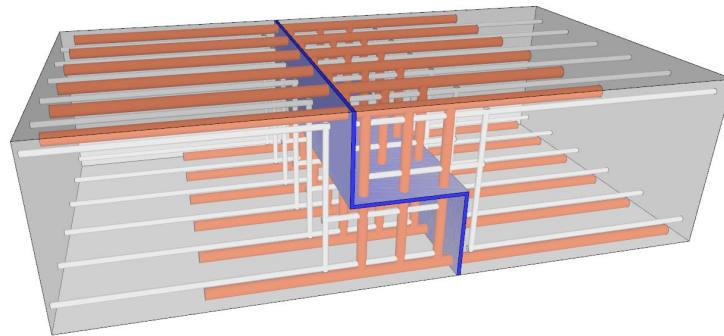
Рассматриваемые балочные железобетонные сборные элементы на концах имеют простую ступенчатую форму. Такая форма достаточно давно применяется в сборных железобетонных каркасах. Известно, что стальная арматура сборных железобетонных конструкций в большей степени подвержена коррозии в местах соединений. В стыках происходит растрескивание бетона, что приводит к проникновению влаги к арматуре, и как следствие к ускорению коррозии.

Tyukalov Y.; Ashikhmin S.

Quickly constructed joint of precast concrete arch elements;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 107 Article No 10703. doi: 10.4123/CUBS.107.3

В данной работе рассматривается соединение железобетонных элементов при помощи композитных стержней, которые клеиваются в заранее подготовленные отверстия и каналы (рис. 1). Сборные блоки соединяются вертикальной и горизонтальной композитной арматурой, которая клеивается в заранее подготовленные вертикальные отверстия и горизонтальные каналы.



**Рис. 1 - Стык сборных железобетонных блоков.**  
**Fig. 1 - Precast concrete elements connection.**

В отличие от стальной, композитная арматура не подвержена коррозии, поэтому ее применение для соединения железобетонных элементов вполне оправдано. Композитную арматуру можно вклеить в отверстия в бетоне используя эпоксидный клей, обладающий достаточной прочностью (Рис. 1). Клеевое соединение затвердевает и становится прочным уже через одни сутки, что позволяет производить быстрый монтаж сборных конструкций. Композитная арматура, обладая более высокой прочностью, чем стальная, имеет существенно меньший модуль упругости. Такая арматура деформируется упруго вплоть до разрыва, что может привести к хрупкому разрушению конструкции. При применении композитной арматуры для соединений сборных элементов следует учитывать данные особенности ее механических свойств. В соединении, для герметизации стыка и более равномерной передачи сжимающих напряжений, предполагается устанавливать полиуретановые пластины, обозначенные на рис. 1 синим цветом.

В таблице 1 приведены данные об основных характеристиках стеклопластиковой и базальтовой арматуры. Свойства эпоксидных смол приведены в таблице 2.

**Таблица 1. Характеристики композитной арматуры.**  
**Table 1. Characteristics of the composite reinforcement.**

Характеристики	Единица измерения	АНК-С	АНК-Б
Предел прочности при растяжении, не менее	МПа	800	800
Модуль упругости при растяжении, не менее	МПа	50000	50000
Предел прочности при сжатии, не менее	МПа	300	300
Предел прочности при поперечном срезе, не менее	МПа	150	150
Предел прочности сцепления с бетоном В25, не менее	МПа	12	

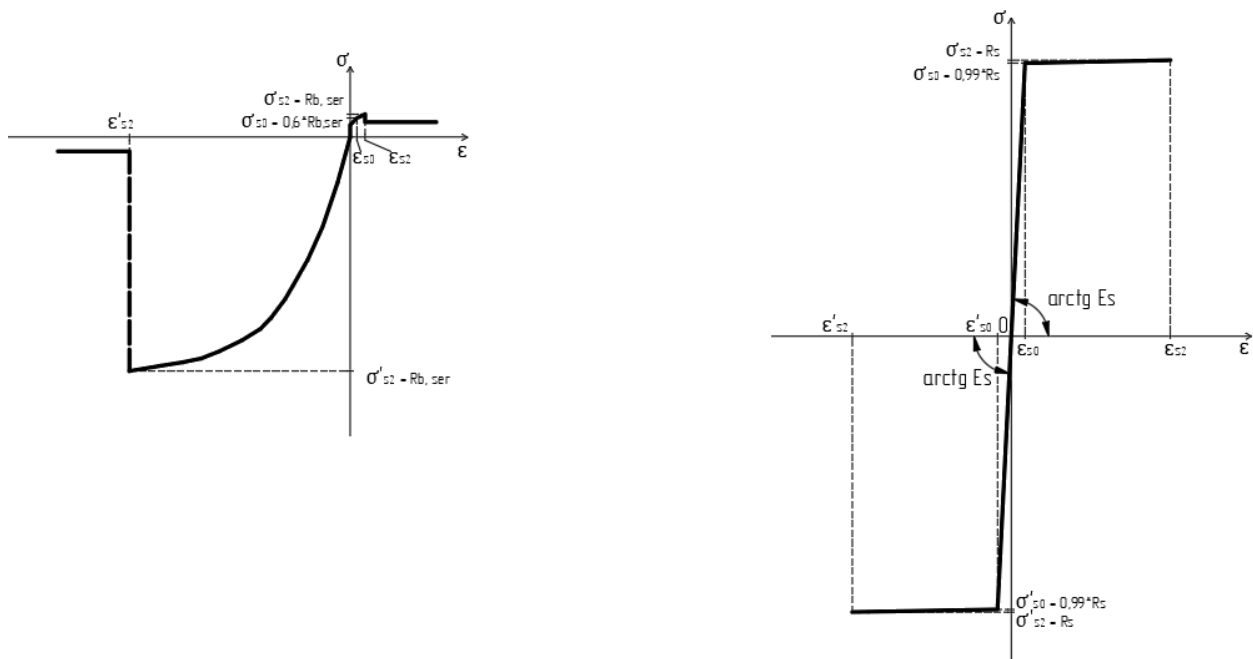
**Таблица 2. Характеристики эпоксидных смол.**  
**Table 2. Characteristics of epoxy resins.**

Плотность	Прочность на растяжение	Модуль упругости	Коэффициент Пуассона
кг/м <sup>3</sup>	МПа	Мпа	
1200-1400	55-130	2750-4100	0.38-0.40

Возможности применения композитной арматуры также ограничиваются температурой стеклования матрицы, которая может находиться в пределах от 75 до 175 градусов. При превышении данной температуры полимерная матрица теряет свои механические свойства. Защита конструкций с композитной арматурой от пожара накладывает ограничения на области применения таких конструкций.

Композитную арматуру для армирования бетонных конструкций в настоящее время допускается применять в мостостроении для пролетных строений, устоев, промежуточных опор, дорожного покрытия, в дорожном строительстве — для дорожных и аэродромных плит. В жилищном строительстве возможно применение композитной арматуры в фундаментных блоках и ограждающих конструкциях. В гражданском и промышленном строительстве можно применять композиты для ограждающих конструкций. Применение композитной арматуры для сборных грунтозасыпных мостов является предметом данного исследования.

Численный анализ напряженно–деформированного состояния сборных железобетонных конструкций с использованием для соединений композитной арматуры выполним методом конечных элементов в программном комплексе ЛИРА–САПР (<https://www.lirasapr.com>). Бетон блоков моделируется четырехугольными и треугольными плоскими конечными элементами с учетом физической нелинейности. Диаграмма напряжение–деформация для бетона принимается в виде экспоненциальной зависимости. Для стальной арматуры используется упругопластическая диаграмма (Рис.2). Стальная и композитная арматура моделируется стержневыми конечными элементами.



**Рис. 2 - Диаграммы нелинейного деформирования бетона и стальной арматуры.**  
**Fig. 2 - The non-linear deformation diagrams of concrete and steel reinforcement.**

Полиуретановые пластины представляются специальными двухузловыми конечными элементами, работающими только на сжатие и сдвиг за счет сил трения между поверхностями. Жесткость таких конечных элементов вычислялась в зависимости от размеров сетки плоских конечных элементов и толщины пластин.

### 3 Results and Discussion / Результаты и обсуждение

Для численного анализа напряженно-деформированного состояния соединения сборных железобетонных элементов выполнен расчет составной балки. Рассматривались нагружение вертикальной равномерно распределенной нагрузкой  $q_z$  (рис. 3) и нагружения сжимающей  $-q_x$  и растягивающей  $q_x$  нагрузками (рис. 4).

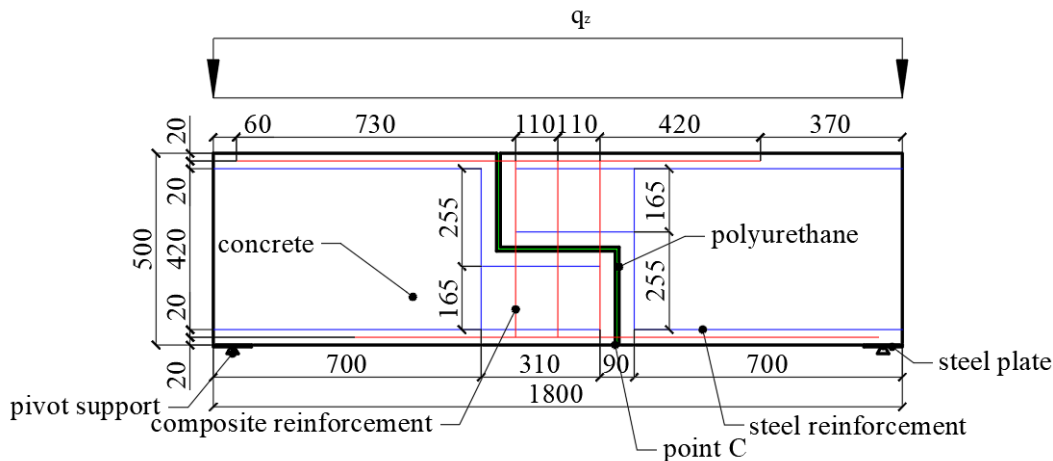


Рис. 3 – Составная железобетонная балка. Изгиб.  
Fig. 3 – The composite reinforced concrete beam. Bending.

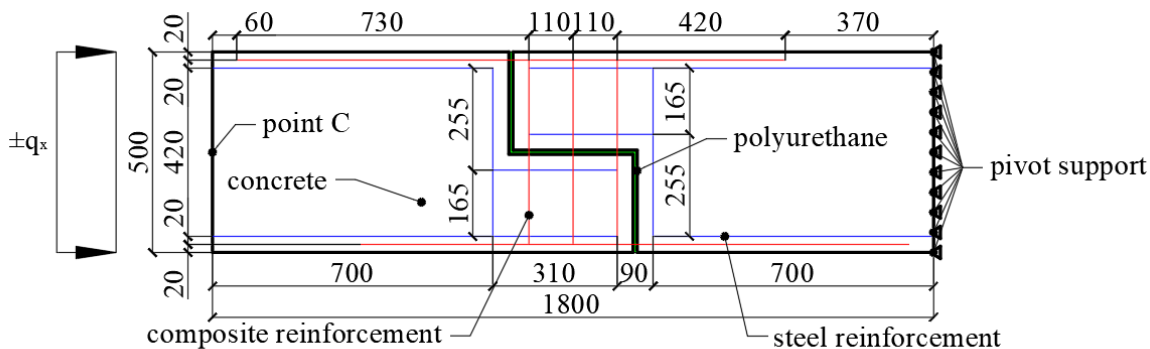


Рис. 4 – Составная железобетонная балка. Сжатие – растяжение.  
Fig. 4 – The composite reinforced concrete beam. Compression - stretching.

Размеры сетки плоских конечных элементов (Рис. 4) приняты равными 1 см. Характеристики материалов балки представлены в таблице 3.

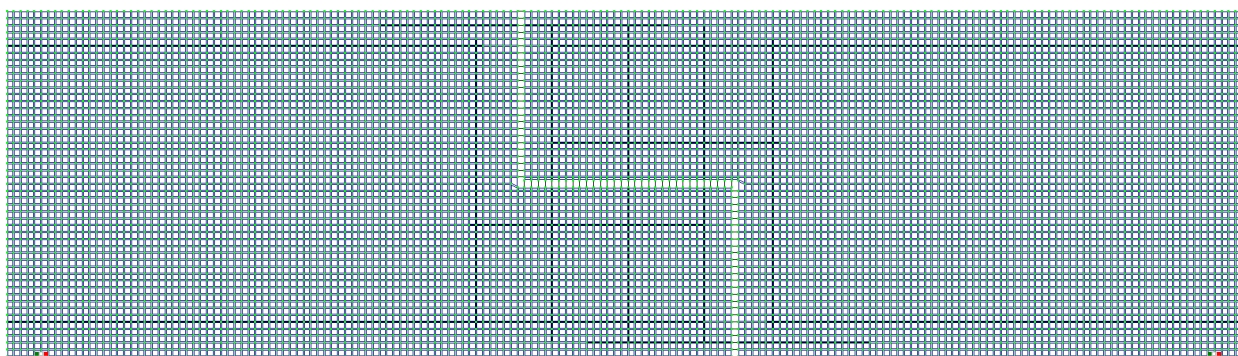


Рис. 4 – Конечно-элементная модель составной балки.  
Fig. 4 – The finite element model of the composite beam.

Таблица 3. Характеристики железобетонной балки.  
Table 3. The reinforced concrete beam characteristics.

Длина мм	Ширина мм	Высота мм	Класс бетона	$R_b$ кН/м <sup>2</sup>	Арматура стальная	$R_s$ кН/м <sup>2</sup>
-------------	--------------	--------------	-----------------	----------------------------	----------------------	----------------------------

1800	1000	500	B30	25	6 $\varnothing$ 16 AIII	75
------	------	-----	-----	----	-------------------------	----

Вертикальная композитная арматура диаметром 28 мм установлена с шагом 200 мм (6 стержней). Горизонтальная композитная арматура, обозначена на рисунках красным цветом, также, как и стальная, имеет диаметр 16 мм. Модуль упругости композитной арматуры равен 49000 МПа. Жесткость двухузловых конечных элементов, работающих только на сжатие, которые моделируют работу полиуретановых пластин равна 50000 МПа/м., коэффициент трения между поверхностями равен 0.6. Нелинейный расчет выполнялся с помощью шагового алгоритма, количество шагов по нагрузкам принималось 20.

Для оценки прочности и жесткости предлагаемого соединения железобетонных элементов, выполнено сравнение результатов расчета составной балки и аналогичной сплошной для трех вариантов нагружения (рис. 5-7). Величина нагрузки постепенно увеличивалась вплоть до разрушения, когда система превращалась в изменяемую (механизм).

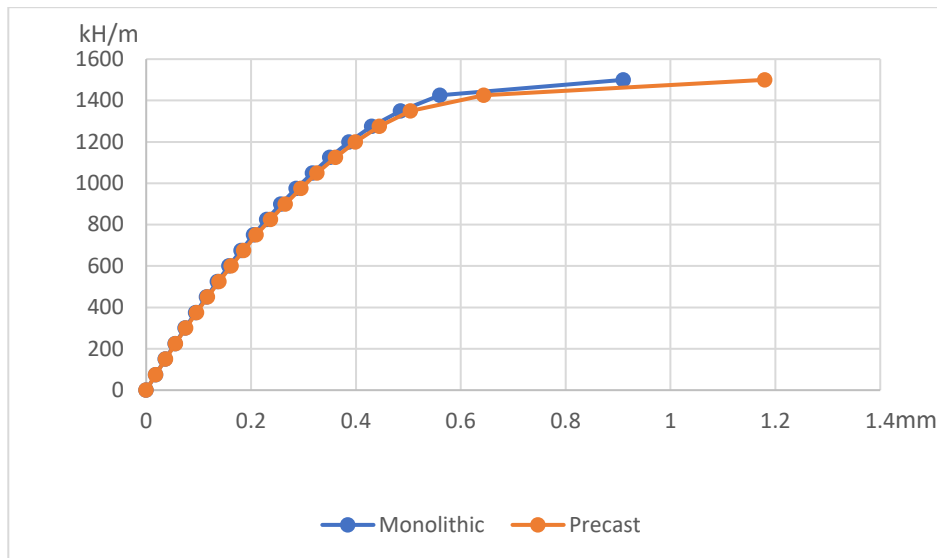


Рис. 5 – Вертикальное перемещение точки С в зависимости от величины нагрузки  $Q_z$ .

Fig. 5 – Vertical displacement of point C depending on the load  $Q_z$  magnitude.

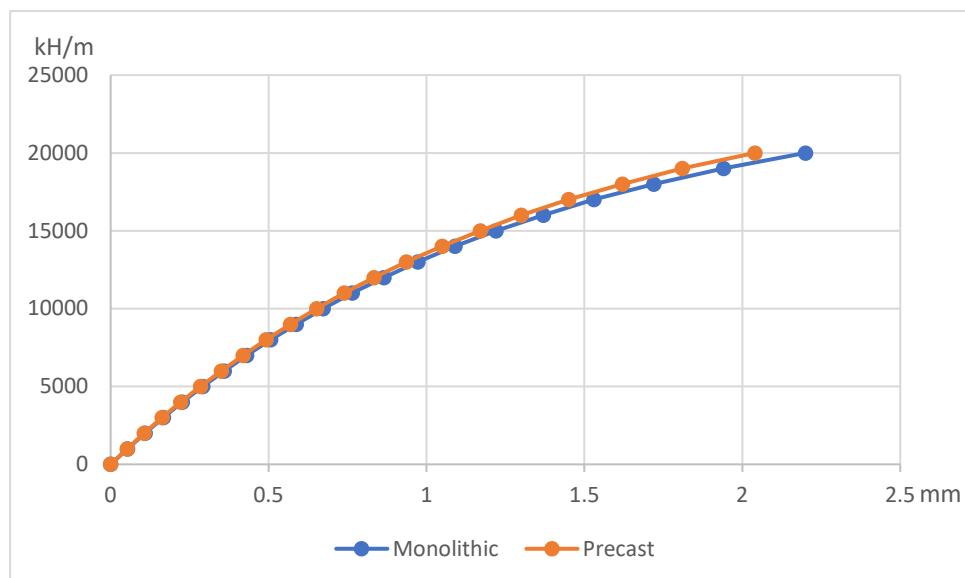
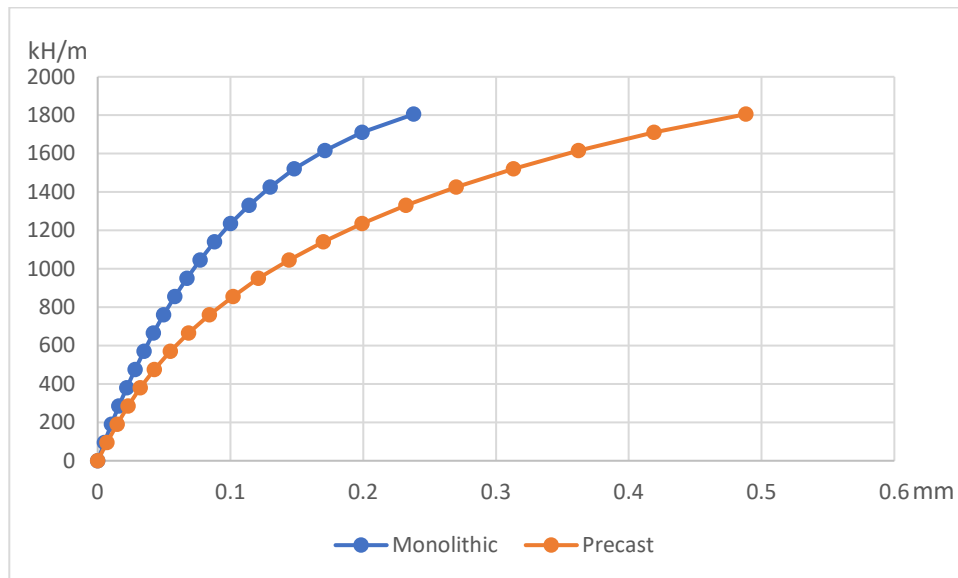


Рис. 6 – Горизонтальное перемещение точки С в зависимости от величины сжимающей нагрузки  $Q_x$ .

Fig. 6 – Horizontal displacement of point C depending on the compression load  $Q_x$  magnitude.





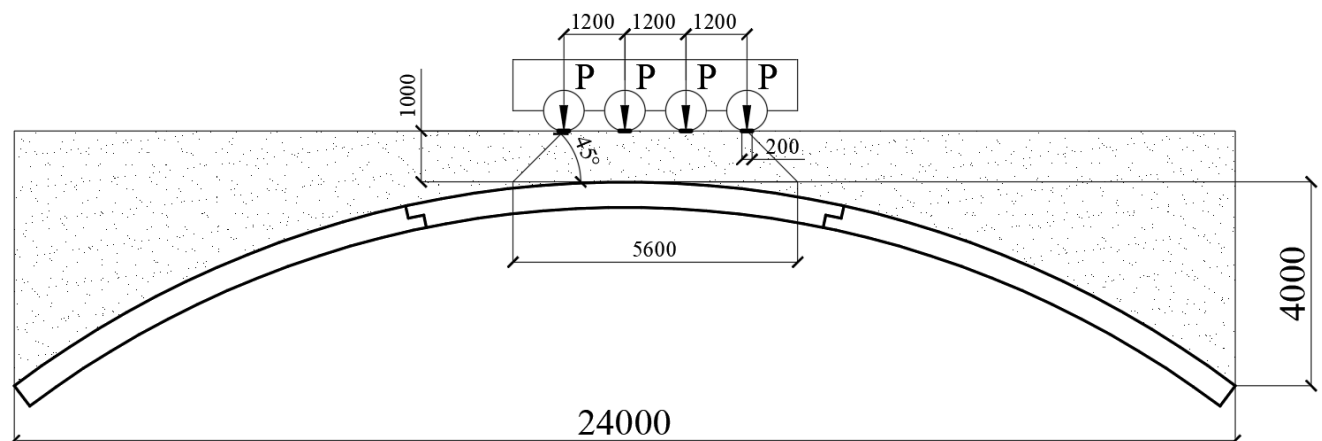
**Рис. 7 – Горизонтальное перемещение точки С в зависимости от величины растягивающей нагрузки  $q_x$ .**

**Fig. 7 – Horizontal displacement of point C depending on the stretching load  $q_x$  magnitude.**

Сравнение полученных результатов показывает, что при действии изгибающей и сжимающей нагрузок (рис. 5-6) перемещения составной балки очень близки к соответствующим перемещениям сплошной вплоть до разрушения. Следовательно, прочность и жесткость предлагаемого соединения сборных железобетонных элементов при таких нагрузках достаточна.

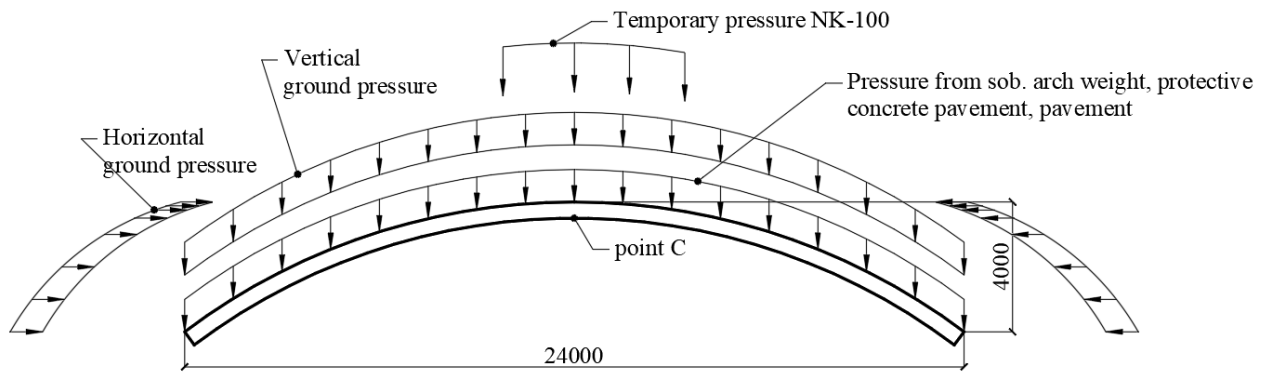
При действии растягивающей нагрузки (рис. 7) жесткость составной балки примерно в 2 раза меньше соответствующей сплошной балки, но разрушающие нагрузки практически одинаковы. Поэтому при растяжении предлагаемое соединение обеспечивает прочность, но не обеспечивает жесткость, как у сплошной балки.

В качестве второго примера, выполнено сравнение сборной арки моста, состоящей из трех частей, и аналогичной сплошной железобетонной арки.

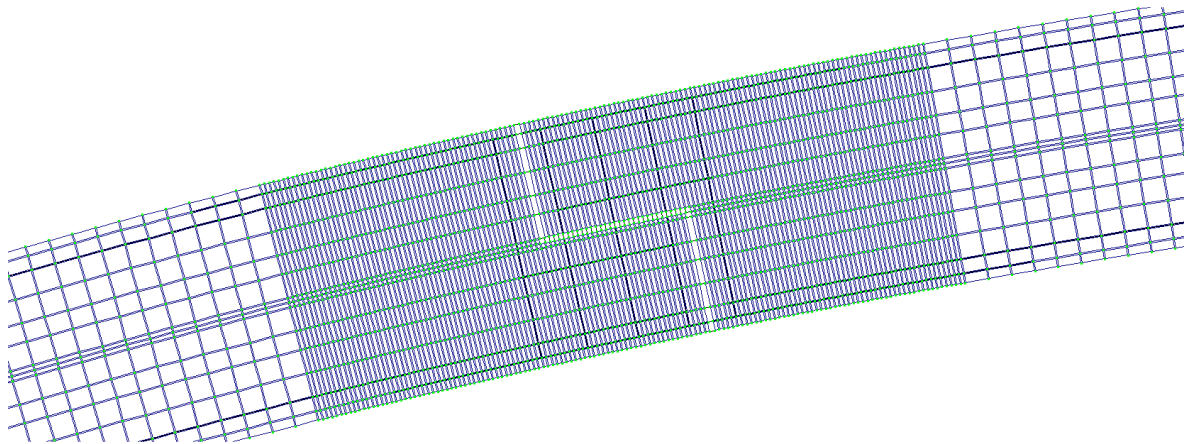


**Рис. 8 – Сборный арочный мост.**

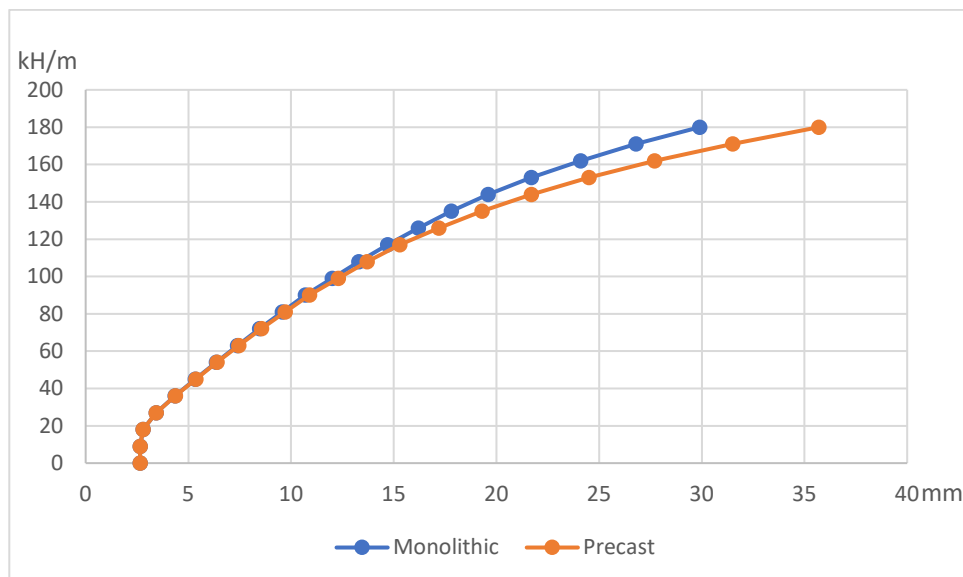
**Fig. 8 – The precast arch bridge.**



**Рис. 9 – Расчетные нагрузки, действующие на арку моста.**  
**Fig. 9 – The design loads on the bridge arch.**



**Рис. 10 – Фрагмент расчетной схемы арки.**  
**Fig. 10 – Fragment of the arch calculation scheme.**



**Рис. 11 – Вертикальное перемещение середины арки в зависимости от величины автомобильной нагрузки  $q_a$ .**

**Fig. 11 – The vertical displacement of the arch middle depending on the vehicle load value  $q_a$ .**

Пролет арки — 24 метра, высота — 4 метра, сечение — 1000x500 мм. Для арки и стыков использовалась арматура тех же диаметров, что и для балки (рис. 3). Нагрузка от автомобиля

Тыукалов Ю.; Ашихмин С.

Quickly constructed joint of precast concrete arch elements;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **107** Article No 10703. doi: 10.4123/CUBS.107.3





определялась на один метр ширины проезжей части моста, в виде равномерно распределенной на длину 5.6 метра (рис. 6). Таким образом, расчетная автомобильная нагрузка:

$$q_a = \frac{1000}{(3.6 + 2)(2.7 + 2)} = 40 \text{ кН} / \text{м} . \quad (1)$$

Результаты расчетов, приведенные на рис. 11, показывают, что при расчетной автомобильной нагрузке 40 кН/м, перемещения составной и сплошной арки практически совпадают. При дальнейшем увеличении нагрузки  $q_a$ , вплоть до разрушения, прогибы составной арки становятся больше прогибов монолитной арки. При разрушающей нагрузке  $q_a$ , которая в 4 раза больше расчетной, прогибы отличаются примерно на 25 процентов.

## 4 Conclusions / Выводы

1. Предложена быстро сооружаемая конструкция соединения сборных железобетонных элементов. Выполнен численный анализ напряженно-деформированного состояния такого соединения на примере расчета балки и арки моста. Выполнено сравнение прочности и жесткости сборных и соответствующих монолитных конструкций.
2. Сравнение и анализ результатов показывает, что предлагаемая быстро сооружаемая конструкция соединения сборных изгибаемых и сжато-изгибаемых железобетонных элементов позволяет обеспечить требуемую жесткость и прочность конструкции.

## References / Ссылки

- 1 Xue, W., Hu, X. et al 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>.
- 2 Xia, K., Hu, X. et al 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>.
- 3 Tadi Beni, M.B. et al Madhkhani, 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>.
- 4 Minh Hai, N., Fujikura, S., Nakajima, A. et al Nam Phan, H. (2022) Experimental investigation on flexural behavior of a precast slab joint with perfbond strips and steel fiber-reinforced mortars. *Structures*, Elsevier Ltd, **39**, 278–292. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.033>.
- 5 Figueira, D., Ashour, A., Yildirim, G., Aldemir, A. et al 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>.
- 6 Zhou, W., Xu, Z. et al 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>.
- 7 May, S., Steinbock, O., Michler, H. et al Curbach, M. (2019) Precast Slab Structures Made of Carbon Reinforced Concrete. *Structures*, Elsevier, **18**, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.005>.
- 8 Li, G., Wang, J., Shen, Y., Li, L. et al 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. et al 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. et al 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. eta 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. eta 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 Enrique, L. eta Schwartz, J. (2019) Design and production of an arch built of precast stackable components. *Structures*, Elsevier, **18**, 102–108. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.12.005>.
- 14 Tyukalov, Y. (2020) Optimal Shape of Arch Concrete Block Bridge. *Construction of Unique Buildings and Structures*. <https://doi.org/10.18720/CUBS.93.7>.
- 15 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>.
- 16 Tyukalov, Y. eta Ashihmin, S. (2022) Loading capacity of an arched underground bridge made of concrete blocks. *Construction of Unique Buildings and Structures*. <https://doi.org/10.4123/CUBS.101.5>.
- 17 Silva, R., Costa, C. eta Arêde, A. (2022) Numerical methodologies for the analysis of stone arch bridges with damage under railway loading. *Structures*, **39**, 573–592. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.063>.
- 18 Hassanli, R., Vincent, T., Manalo, A., Smith, S.T., Gholampour, A., Gravina, R. eta 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>.
- 19 Al-Fakher, U., Manalo, A., Alajarmeh, O., Aravinthan, T., Zhuge, Y., Bai, Y. eta Edoos, A. (2021) Axial behaviour of precast concrete panels with hollow composite reinforcing systems. *Structures*, Elsevier Ltd, **32**, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.015>.
- 20 Abd El-Hameed, S., Eladawy, M., Agamy, M.H. eta 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>.
- 21 Lu, K., Xu, Q., Wang, M., Yao, Y. eta 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>.
- 22 Halvonik, J., Borzovič, V. eta 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>.
- 23 Augustus Nelson, L., Al-Allaf, M. eta 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>.