Строительные конструкции, здания и сооружения

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-7>
УДК 624.012.35:69.058.2

Ю.Ф. Рогатнев, Ж. Минани, О.О. Соколов, А.М. Хорохордин

РОГАТНЕВ ЮРИЙ ФЕДОРОВИЧ – к.т.н., доцент, ScopusID: 57204526554,
yrogatnev @yandex.ru

МИНАНИ ЖЕРЕМИ – аспирант, SPIN: 9938-9219, mijeremie1@gmail.com

СОКОЛОВ ОЛЕГ ОЛЕГОВИЧ – аспирант (автор, ответственный за переписку),
SPIN: 9547-9458, osokolov@vgasu.vrn.ru

ХОРОХОРДИН АЛЕКСЕЙ МИТРОФАНОВИЧ – аспирант, SPIN: 5484-9442,
ahorohordin@vgasu.vrn.ru

Воронежский государственный технический университет
Воронеж, Россия

Влияние значения процента армирования композитной арматуры на напряженно-деформированное состояние двухслойных изгибаемых бетонных элементов

Аннотация: Проведен анализ моделирования напряженно-деформированного состояния двухслойных прямоугольных балок с композитной арматурой с целью определения их деформативности. Исследована эффективность применения композитной арматуры для армирования двухслойных изгибаемых бетонных элементов с высокопрочным бетоном в сжатой зоне. Представлены численные результаты прогибов, полученные авторами с помощью программных комплексов «ЛИРА-САПР 2017 R3» и «ANSYS 2019 R3». Сделан сравнительный анализ двух вариантов значений для двухслойных балок: с композитной и стальной арматурой. Для балок с композитной арматурой получены прогибы, значительно отличающиеся от величин, приведенных в нормативной документации, особенно при расчетах с помощью «ЛИРА-САПР».

Ключевые слова: композитная арматура, двухслойный изгибаемый элемент, фактическое армирование, оптимизация процента армирования

Введение

Исследования применения композитного полимерного армирования в изгибаемых бетонных элементах, которые активно ведутся в настоящее время, можно разделить на две группы: бетонные элементы с комбинированной арматурой (стальная и композитная полимерная) и бетонные элементы, армированные исключительно композитной арматурой.

Композитная полимерная арматура – высокопрочный материал на растяжение. Ее использование в бетонных конструкциях позволяет предотвратить коррозию материалов, подверженных воздействию агрессивных сред (кислот, солей и щелочей). Однако модуль упругости полимерных композиционных материалов примерно в 4 раза ниже, чем у стали, что препятствует их широкому применению в изгибаемых бетонных элементах в качестве рабочего армирования [1, 9, 12, 13, 16]. Проведенные ранее исследования прочности однослойных элементов из высокопрочного бетона и композитной арматуры показали эффективность их применения [2, 8, 11, 14, 15].

В настоящей работе мы предпримем попытку провести анализ деформативности двухслойных бетонных элементов с композитной арматурой и высокопрочным бетоном в сжатой

зоне с помощью программных комплексов «ЛИРА-САПР 2017 R3» и «ANSYS 2019 R3» и с учетом физической нелинейности материала.

Материалы и методы

В ряде стран существуют нормативные документы по применению и расчетам изгибаемых бетонных конструкций с композитной арматурой, в том числе СП 295.1325800.2017 (Россия), fib Bulletin 40 (Европейский Союз) и ACI440.1R (США) [4, 7, 10].

Прежде всего нам необходимо провести расчет по нормативной документации и численные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) двухслойных балок с композитной арматурой с целью определения их деформативности на изгиб. Предположим, что нижний слой выполнен из обычного бетона В30, а верхний – из высокопрочного бетона В90. Для численного расчета взяты модели двухслойных прямоугольных балок: размер сечения – 60х120 мм, пролет $l_0 = 1,2$ м, общая длина элемента – 1,4 м, высота верхнего слоя из высокопрочного бетона – 30 мм.

Физико-механические характеристики стеклокомпозитной и стальной арматуры приняты по [6], где приведено сравнение результатов их испытаний (табл. 1)

Таблица 1

Характеристики стеклокомпозитной и стальной арматур

Тип арматуры	Диаметр, мм	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости, МПа	Относительное удлинение, мм/мм
Стеклокомпозитная	6	1081,7	40300	0,0290
	8	1008,2	53300	0,0350
	10	930,8	52380	0,0310
Стальная	12	869,3	67830	0,0163
	8	672,1	193100	0,1940
	10	743,71	194000	0,1340
	12	770,0	200100	0,0830

Примечание. Все рисунки и таблицы в статье выполнены авторами.

Физико-механические характеристики высокопрочного бетона приняты по данным, опубликованным в [3]: прочность бетона на сжатие – $R_{b,n} = 71,6$ МПа, на растяжение – $R_{b,t} = 3,6$ МПа, относительная деформация при сжатии – $\varepsilon_b = 0,0014$. Характеристики нижнего слоя балки из бетона В30: прочность бетона на сжатие $R_{b,n} = 25$ МПа, на растяжение – $R_{b,t} = 1,36$ МПа, относительная деформация при сжатии – $\varepsilon_{b1} = 0,0015$, предельная относительная деформация при сжатии – $\varepsilon_{b2} = 0,0035$.

Моделирование балок (рис. 1) выполнено на основе программ «ЛИРА-САПР 2017 R3» и «ANSYS 2019 R3» с учетом физической нелинейности материала.

Для описания механических характеристик бетона и арматуры использована диаграмма зависимости напряжений от деформаций (рис. 2).

В программном комплексе «ЛИРА-САПР 2017 R3» бетон и арматура смоделированы соответственно с использованием объемного конечного элемента типа жесткости 236 и конечного элемента типа жесткости 210. Эти конечные элементы описаны коэффициентом Пуассона, диаграммами зависимости напряжения от деформации при сжатии и растяжении.

В программном обеспечении «ANSYS 2019 R3» выбраны узловые конечные элементы «Solid 65» для моделирования бетона и конечные элементы «Beam 188» – для моделирования продольной и поперечной арматуры.

Сведенные результаты проведенных расчетов по нормативной документации и численных исследований см. в табл. 3.

Рис. 1. Модель и геометрические параметры исследуемых прямоугольных балок:
а – геометрические параметры; б – модель по «ЛИРА-САПР 2017 R3» (слева)
и модель по «ANSYS 2019 R3» (справа).

Рис. 2. Диаграмма «напряжение–деформация» при сжатии и растяжении:
а – бетон; б – композитная арматура.

Результаты и обсуждение

Общие перемещения балки по «ЛИРА-САПР 2017 R3» и по «ANSYS 2019 R3» представлены на рис. 3.

На рисунках 4–8 приведены результаты численного моделирования двухслойных балок. Представлены зависимости относительного прогиба от относительного изгибающего момента для двухслойных балок со стеклокомпозитной и стальной арматурой при различных значениях процента армирования и классах бетона. Основные параметры этих балок: тип армирования, процент армирования и прочность бетона на сжатие.

a

b

Рис. 3. Общие перемещения балки:
a – по ЛИРА-САПР 2017 R3»; b – по “ANSYS 2019 R3”

Рис. 4. Диаграммы «относительный момент–относительный прогиб» по “ANSYS 2019 R3”: двухслойные балки со стеклокомпозитной арматурой Б. АСК.

Рис. 5. Диаграммы «относительный момент–относительный прогиб» по «ЛИРА-САПР 2017 R3»: двухслойные балки со стеклокомпозитной арматурой Б. АСК.

Рис. 6. Диаграммы «относительный момент–относительный прогиб» по «ANSYS 2019 R3»: двухслойные балки со стальной арматурой Б. ЖБ.

Рис. 7. Диаграммы «относительный момент–относительный прогиб» по «ЛИРА-САПР 2017 R3»: двухслойные балки со стальной арматурой Б. ЖБ.

Рис. 8. Диаграммы «относительный момент–относительный прогиб» по «ЛИРА-САПР 2017 R3»: двухслойные балки при разных классах бетона Б. АСК d = 8 мм.

Сопоставлялись значения прогибов балок в середине пролета при различных комбинациях армирования и прочности бетона на сжатие. Сравнительный анализ деформативности балок с композитной и стальной арматурой на изгиб показал, что при одинаковых диаметрах наибольшее значение деформативности на изгиб характерно для балок со стеклокомпозитной арматурой, как показано в табл. 2.

Результаты показали, что с увеличением процента армирования и прочности бетона на сжатие прогиб в середине пролета значительно уменьшается.

Таблица 2

Сравнение максимальных прогибов балок со стеклокомпозитной и стальной арматурой

Программный комплекс	Диаметр, мм	ρ_f	ρ_{fb}	Максимальные прогибы, мм	
				Б. АСК	Б. ЖБ
ANSYS 2019 R3	8	0,008	0,0089	24,4	7,4
	10	0,013	0,0101	19,1	6,9
	12	0,019	0,0141	13,6	5,5
ЛИРА 2017	8	0,008	0,0089	37,3	7,6
	10	0,013	0,0101	43,2	7,0
	12	0,019	0,0141	34,7	10,6

Примечание. Б. АСК – балки со стеклокомпозитной арматурой, Б. ЖБ – балки со стальной арматурой, ρ_f – фактическое армирование, ρ_{fb} – сбалансированный процент армирования.

Анализ значений табл. 2 позволяет сделать вывод: деформативность двухслойных балок со стеклокомпозитной арматурой по сравнению со стальной арматурой выше в среднем: в 3 раза (расчет по “ANSYS 2019 R3”) и в 5 раз («ЛИРА-САПР 2017 R3»). Отмечено, что результаты численного моделирования по “ANSYS 2019 R3” показали разрушение балок со стеклокомпозитной арматурой в сжатой зоне бетона, которое может произойти потому, что фактический коэффициент армирования ρ_f больше, чем сбалансированный процент армирования ρ_{fb} . По методикам ACI 440.1R и fib Bulletin 40 [7, 10] условие $\rho_f > \rho_{fb}$ обеспечивает разрушение изгибаемых бетонных элементов с композитной арматурой в сжатой зоне. Однако по программе «ЛИРА-САПР 2017 R3» наблюдаются разрушения изгибаемых элементов в растянутой арматуре.

Сравнение результатов по нормативной документации [4, 5] и численных расчетов прогибов двухслойных изгибаемых элементов со стеклокомпозитной арматурой с учетом трещин (табл. 3) показывает, что применение нелинейной деформационной модели в «ЛИРА-САПР 2017 R3» и “ANSYS 2019 R3” приводит к расхождению результатов по нормативной документации и численных значений прогибов. Это расхождение составляет 55,3% (“ANSYS 2019 R3”) и 69,8% («ЛИРА-САПР 2017 R3») при максимальной нагрузке. Данная несходимость зависит от различных характеров разрушения балок со стеклокомпозитной арматурой, полученных с использованием «ЛИРА-САПР 2017 R3» и “ANSYS 2019 R3”.

Результаты по программе “ANSYS 2019 R3”, показали, что нагрузки, при которых прогибы не превышали предельно допустимого значения в 8 мм, меньше, чем нагрузки по «ЛИРА-САПР 2017 R3», в среднем на 56,7%. В численных расчетах показатель деформативности на изгиб при максимальной нагрузке не соответствует предельно допустимому прогибу $f = l_0/150 = 8$ мм.

Двухслойные балки с использованием обычного бетона В30 в растянутой зоне и высокопрочного бетона В90 в сжатой зоне по деформативности значительно превосходят однослойные балки с обычным бетоном В30. Значения деформативности у двухслойных бетонных элементов существенно меньше, чем у однослойных бетонных элементов. Применение высокопрочного бетона в сжатой зоне и увеличение фактического процента армирования позволяет уменьшить прогибы балок в сравнении с аналогами из обычного бетона.

Таблица 3

Сравнение теоретических и численных значений прогибов

Наименование балки	Максимальная нагрузка P_{ult} , кН			Нагрузка P , кН при прогибе 8 мм			Прогиб, мм		
	ANSYS 2019 R3	ЛИРА 2017	СП	ANSYS 2019 R3	ЛИРА 2017	СП	ANSYS 2019 R3	ЛИРА 2017	СП
Б. АСК d = 6 мм	14,7	48	16,3	3,0	15,6	12,5	44,3	47	10,5
Б. АСК d = 8 мм	17,8	42,9	24,6	5,9	13,3	11,7	24,4	37,3	16,8
Б. АСК d = 10 мм	20,0	53	29,4	8,5	15,9	11	19,1	43,2	21,8
Б. АСК d = 12 мм	24,0	65	37,7	13,12	21,5	12	13,6	34,7	25,2
Б. ЖБ А500С d = 8 мм	15,68	28	24,55	15,68	28	18,5	7,4	7,6	10,7
Б. ЖБ А500С d = 10 мм	21,04	38,2	29,4	21,04	38,2	15,8	6,9	7,0	14,9
Б. ЖБ А500С d = 12 мм	22,5	46	37,7	22,5	43,9	20,4	5,5	10,6	14,8

Выводы

Итак, мы провели сравнение значений прогибов, полученных с использованием программных комплексов «ЛИРА-САПР 2017 R3» и “ANSYS 2019 R3”, и нормативной документации. Результаты свидетельствуют, что показатели прогибов всех рассмотренных элементов с композитной арматурой до разрушения превышали предельно допустимые 8 мм. Численные

исследования двухслойных и однослойных изгибаемых элементов прямоугольного сечения с композитной арматурой не соответствуют показателям в отношении изгибаемых железобетонных элементов. Значения прогибов элементов со стеклокомпозитной арматурой в среднем выше, чем у элементов со стальной арматурой: в 3 раза по «ANSYS 2019 R3» и в 5 раз – по «ЛИРА-САПР 2017 R3». При различных уровнях нагрузки на элемент значения прогибов в «ЛИРА-САПР 2017 R3» больше в среднем на 50.4%, а максимальная нагрузка на элемент – на 63,3%.

Поскольку значения прогибов по нормативной документации не сходятся со значениями численного моделирования, необходимо проводить экспериментальные исследования для уточнения методики расчета двухслойных изгибаемых элементов прямоугольного сечения с композитной арматурой.

Вклад авторов в статью: Ю.Ф. Рогатнев – проблематика, постановка задачи исследований, общее руководство, обобщение результатов; Ж. Минани – создание конечно-элементной модели НДС в расчетном комплексе «ЛИРА-САПР 2017 R3», проведение численного исследования, анализ результатов численного моделирования, проставление результатов исследований, выводы по результатам исследований, ответственность за целостность всех частей статьи; О.О. Соколов – создание модели НДС в программе «ANSYS 2019 R3», анализ и интерпретация результатов, проставление результатов исследований, написание и редактирование текста, выводы по результатам исследований; А.М. Хорохордин – проведение испытаний арматуры. Все авторы – утверждение окончательного варианта статьи. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиль А.И. Перспективы применения пологоотогнутой стеклопластиковой арматуры в зоне среза изгибаемых армобетонных элементов // Прикладные науки. Строительство. Строительные конструкции. 2016. № 8. С. 61–66.
2. Кудяков К.Л., Плевков В.С. Исследование прочности, трещиностойкости и жесткости предварительно напряженных изгибаемых базальтофибробетонных элементов со стеклокомпозитной арматурой при статическом и кратковременном динамическом воздействиях // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. 2018. № 1. С. 82–87.
3. Рогатнев Ю.Ф., Потапов Ю.Б., Барабаш Д.Е., Панфилов Д.В., Джавид М.М. Расчет прогибов железобетонных изгибаемых элементов с верхним слоем из высококачественного бетона // Научный вестник МГСУ. 2016. № 3. С. 26–36.
4. СП 295.1325800.2017. Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования. М.: Минстрой, 2017. 55 с.
5. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Минстрой, 2015. 168 с.
6. Хорохордин А.М., Усачев А.М., Коротких Д.Н. Сравнительная оценка механических свойств полимерной композитной арматуры // Строительные материалы. 2018. № 7. С. 71–75.
7. ACI American Concrete Institute. ACI440.1R. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI Committee 440. Farmington Hills, Michigan, 2006, 45 p.
8. Chattopadhyay S., Rajkumar R., Umamaheswari N. Analytical investigation on flexural behavior of concrete beams reinforced with FRP rebars. Intern. J. of Civil Engineering and Technology. 2018;9(4):1–8.
9. Doo Y.Y., Nemkumar B, Young S.Y. Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars. Engineering Structures. 2016;111:246–262.
10. FIB International Federation for Structural Concrete. FRP Reinforcement in RC Structures. Fib Task. Group 9.3. fib Bulletin. 2007, N 40, 147 p.
11. Maher A.A., Mohamed S., Ahmed A.M., Ali S.S. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with Glass fiber reinforced polymer bars. Construction and Building Materials. 2015(84):354–366.
12. Missoum L., Djermane M., Labbaci B. Concrete beams reinforcement using composite materials (CFRP and GFRP). International J. of Civil Engineering and Technology. 2017;8(7):660–668.
13. Nadzirah M., Bashar S.M., Mohd S.L., Parnam S. Flexural strength of RC beams with multiple layers of CFRP Sheet. International J. of Civil Engineering and Technology. 2017;8(12):134–143.

14. Naveen K.G., Sundaravadivelu K. Experimental study on flexural behaviour of beams reinforced with GFRP rebars. ICCIEE. 2017, p. 1–12.
15. Premalatha J., Vengadeshwari S., Srihari P. Finite element modeling and analysis of RC beams with GFRP and steel bars. International Journal of Civil Engineering and Technology. 2017;8(9):671–679.
16. Talha J.M., Abdalla E., Salah A., Zaid A.S. Experimental study on the effect of matrix on the flexural behavior of beams reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars. Composite Structures. 2019;222:1–10.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 4/45
Buildings and Structures

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-7>

Rogatnev Y., Minani J., Sokolov O., Khorokhordin A.

YURI ROGATNEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate professor,
 ScopusID: 57204526554, yrogatnev@yandex.ru
 JEREMIE MINANI, Postgraduate student, mijeremie1@gmail.com
 OLEG SOKOLOV, Postgraduate student (corresponding author), osokolov@vgasu.vrn.ru
 ALEXEY KHOROKHORDIN, Postgraduate student, ahorokhordin@vgasu.vrn.ru
Voronezh State Technical University
 Voronezh, Russia

Influence of the ratio of reinforcement of composite reinforcement on the stress–strain state of two–layer bending concrete elements

Abstract: The analysis of modeling the stress-strain state of two-layer rectangular beams with the composite reinforcement was carried out in order to determine their deformability. The effectiveness of application the composite reinforcement for reinforcement of the two-layer bending concrete elements with high-strength concrete in a compressed zone has been investigated. The numerical results of deflections obtained by authors with a help of software “LIRA-SAPR 2017 R3” and “ANSYS 2019 R3” are presented. A comparative analysis of two variants of values for two-layer beams was made: with composite and steel reinforcement. The obtained deflections of beams with composite reinforcement are greatly differ from values given in codes especially in estimations with a help of “LIRA-SAPR”.

Keywords: composite reinforcement, two-layer bending element, reinforcement ratio, optimization of reinforcement ratio

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Article: received: 01.09.2020; reviewed: 21.09.20; accepted: 02.10.2020; financing: Voronezh State Technical University.

REFERENCES

1. Gil A. I. Prospects for the use of hollow-bent fiberglass reinforcement in the shear zone of flexible reinforced concrete elements. Applied Sciences. Building Construction. 2016(8):61–66.
2. Kudyakov K.L., Plevkov V.S. Investigation of the strength, fracture toughness, and stiffness of pre-stressed bending basalt-fiber-reinforced concrete elements with glass composite reinforcement under static and short-term dynamic effects. Safety of the Russian Construction Fund. Problems and Solutions. 2018 (1):82–87.
3. Rogatnev Y.F., Potapov Y.B., Barabash D.E., Panfilov D.V., Javid M.M. Calculation of deflections of reinforced concrete flexible elements with a top layer of high-quality concrete. Scientific Bulletin of MGSU. 2016(3):26–36.
4. SP 295.1325800.2017. Concrete structures, reinforced with polymer composite reinforcement. Design rules. M., Minstroy, 2017, 55 p.
5. SP 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. M., Minstroy, 2015, 168 p.

6. Horokhordin A.M., Usachev A.M., Korotkikh D.N. Comparative assessment of mechanical properties of polymer composite reinforcement. *Building Materials*. 2018(7):71–75.
7. ACI American Concrete Institute. ACI440.1R. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI Committee 440. Farmington Hills, Michigan, 2006, 45 p.
8. Chattopadhyay S., Rajkumar R., Umamaheswari N. Analytical investigation on flexural behavior of concrete beams reinforced with FRP rebars. *Intern. J. of Civil Engineering and Technology*. 2018;9(4):1–8.
9. Doo Y.Y., Nemkumar B, Young S.Y. Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars. *Engineering Structures*. 2016;111:246–262.
10. FIB International Federation for Structural Concrete. FRP Reinforcement in RC Structures. Fib Task. Group 9.3. fib Bulletin. 2007, N 40, 147 p.
11. Maher A.A., Mohamed S., Ahmed A.M., Ali S.S. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with Glass fiber reinforced polymer bars. *Construction and Building Materials*. 2015(84):354–366.
12. Missoum L., Djermame M., Labbaci B. Concrete beams reinforcement using composite materials (CFRP and GFRP). *International J. of Civil Engineering and Technology*. 2017;8(7):660–668.
13. Nadzirah M., Bashar S.M., Mohd S.L., Parnam S. Flexural strength of RC beams with multiple layers of CFRP Sheet. *International J. of Civil Engineering and Technology*. 2017;8(12):134–143.
14. Naveen K.G., Sundaravadivelu K. Experimental study on flexural behaviour of beams reinforced with GFRP rebars. *ICCIEE*. 2017, p. 1–12.
15. Premalatha J., Vengadeshwari S., Srihari P. Finite element modeling and analysis of RC beams with GFRP and steel bars. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017;8(9):671–679.
16. Talha J.M., Abdalla E., Salah A., Zaid A.S. Experimental study on the effect of matrix on the flexural behavior of beams reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars. *Composite Structures*. 2019;222:1–10.