



УДК 624.046.2

Антаков А.Б. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: antakof@mail.ru

Антаков И.А. – ассистент

E-mail: igor788@bk.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Совершенствование методики расчета нормальных сечений изгибаемых элементов с полимеркомпозитной арматурой

Аннотация

В статье представлены результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований прочности нормальных сечений с полимеркомпозитной арматурой. В ходе анализа полученных данных выполнена оценка рассматриваемых методик расчета: США – АСI 440.1R-06, Евросоюза – fib Bulletin 40, России – СП 63.13330.2012 с изменением № 1, проект СП для конструкций с композитной арматурой и предложена усовершенствованная авторами методика. Исследованы изгибаемые элементы, армированные стержнями стеклопластиковой и базальтопластиковой арматуры.

Ключевые слова: неметаллическая арматура, прочность нормальных сечений, бетонные конструкции, изгибаемые элементы.

Представленные рекомендации по расчету нормальных сечений изгибаемых элементов с композитной арматурой являются результатом проведенных исследований в рамках диссертационной работы. Целью ставилось уточнение коэффициентов надежности и совершенствование методики расчета СП 63.13330.2012 с изменением № 1 нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных стеклопластиковой (далее АСК) и базальтопластиковой (далее АБК) арматурой, по 1 и 2 группам предельных состояний. Подробное описание этапов исследования изложено в ранее опубликованных работах [1, 2, 3]. На рис. 1 представлено графическое изображение внесенных изменений в методику расчета СП нормальных сечений по прочности. Изменена последовательность введения коэффициентов надежности, предельный изгибающий момент M_{ult} заменен на номинальный M_n , а так же откорректировано расчетное выражение по определению высоты сжатой зоны бетона, при $\zeta > \zeta_R$, для предварительно напряженных конструкций.

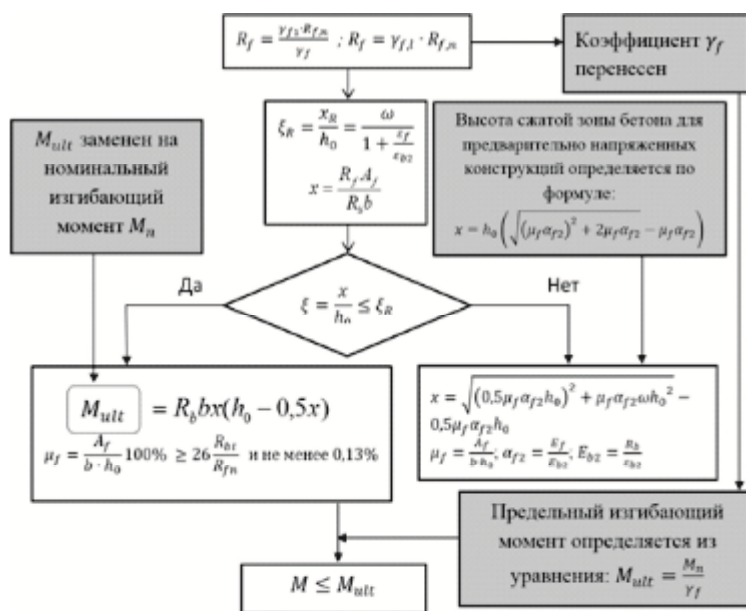


Рис. 1. Предлагаемые изменения методики СП по определению несущей способности нормальных сечений изгибаемых элементов

Расчетное значение сопротивления растяжению арматуры композитной полимерной (далее АКП) R_f принимается с учетом коэффициентов γ_{fl} – коэффициент, учитывающий условия эксплуатации конструкции и $\gamma_{f,l}$ – коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузки. Коэффициенты γ_{fl} и $\gamma_{f,l}$ не корректируются и принимаются по СП 63.13330.2012. Далее в зависимости от соотношения ζ и ζ_R определяется характер разрушения: при $\zeta < \zeta_R$ элемент разрушается от разрыва растянутой арматуры, при $\zeta > \zeta_R$ – дробление бетона в сжатой зоне.

При $\zeta < \zeta_R$ номинальный изгибающий момент M_n определяется исходя из найденной высоты сжатой зоны бетона. При $\zeta > \zeta_R$ корректируется высота сжатой зоны бетона, затем вычисляется номинальный изгибающий момент.

Номинальный изгибающий момент может быть также определен расчетом по прочности на основе нелинейной деформационной модели, с учетом предлагаемого расчетного сопротивления растяжению арматуры R_f .

Предельный изгибающий момент M_{ult} , который может быть воспринят сечением элемента, определяется с учетом коэффициента γ_f – коэффициент надежности по материалу.

Коэффициент γ_f принимается в зависимости от соотношения ζ и ζ_R . При $\zeta > \zeta_R$ γ_f для конструкций без предварительного напряжения арматуры принимается равным 1,1, с преднапряжением – 1,3. При $\zeta < \zeta_R$ принимается равным 1,3. Так как зависимость «напряжения – деформации» АКП имеет линейную форму, площадка текучести отсутствует. Величины γ_f приняты с целью приведения коэффициентов безопасности S к величине 1,6, которая по ГОСТ 8829-94 соответствует второму случаю разрушения железобетонных изгибаемых элементов из тяжелого бетона.

Принцип использования коэффициентов надежности и замена M_{ult} на M_n в предлагаемой методике приняты по аналогии с подходом американских норм ACI 440.1R-06, которые показали наиболее достоверные результаты по определению характера разрушения опытных образцов [2].

В ходе испытания опытных балок был зафиксирован характер разрушения от продергивания арматуры – нарушения анкеровки. В результате проведенного исследования авторами предлагается расчетное сопротивление сцепления арматуры с бетоном определять по уравнению, аналогичному для железобетонных конструкций с учетом коэффициента k :

$$R_{bond} = k\eta_1 R_{bt}. \quad (1)$$

Коэффициент k учитывает отношение сцепления АКП с бетоном по сравнению со стальной арматурой. Коэффициент η_1 , учитывающий влияние вида поверхности арматуры, принимается в соответствии с нормами для железобетонных конструкций. Необходимость введения коэффициента k связана с имеющимися различиями в величинах сцепления АКП и стальной арматуры, что подтверждено многочисленными исследованиями [4, 5, 7, 8]. По данным ACI 440.1R-06 величина k , в зависимости от вида АКП, варьируется в пределах от 0,6 до 1,72. Для определения величин коэффициентов k требуются обширные исследования сцепления различных видов АКП с бетоном при различных условиях эксплуатации.

В табл. 1-5 представлено сравнение теоретических, полученных с учетом коэффициентов надежности, и опытных данных по прочности нормальных сечений балок серий 1-5 [2, 3]. Расчеты по деформационной модели выполнены исходя из расчетных значений прочности материалов, определенных согласно СП 63.13330.2012 с изменением № 1.

Таблица 1

Результаты исследования балок серии 1

Маркировка балок	Несущая способность M_u , кН·м		M_{exp} , кН·м Эксперимент	$\frac{M_{exp}}{M_u^{сп}}$
	СП 63.13330.2012	Деформационная модель		
Бк-12ст	14,468	14,548	20,333	1,405
Бк-8ст	6,856	6,906	11,368	1,65
Бк-6ст	3,947	3,944	8,156	2,065

Таблица 2

Результаты исследования балок серии 2

Маркировка балок	Несущая способность M_u , кН·м						M_{exp} , кН·м Эксперимент
	Проект СП	СП 63.13330.2012 Изм. № 1	АСИ 440.1R-06	fib Bulletin 40	Деформационная модель	Модифицированная методика СП	
Бк-10сп	13,817	13,817	11,176	15,645	13,763	14,08	22,582
Бк-8сп	9,388	9,388	7,578	10,365	9,571	11,87	18,88
Бк-6сп	5,104	5,104	4,036	5,509	4,971	5,814	9,41

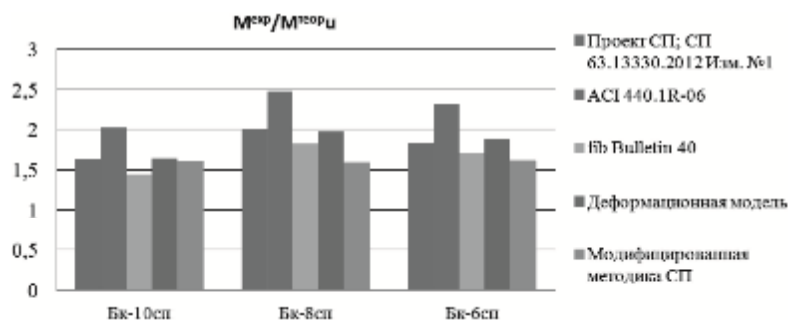


Рис. 2. Графическое сравнение данных табл. 2

Таблица 3

Результаты исследования балок серии 3

Маркировка балок	Несущая способность M_u , кН·м						M_{exp} , кН·м Эксперимент
	Проект СП	СП 63.13330.2012 Изм. № 1	АСИ 440.1R-06	fib Bulletin 40	Деформационная модель	Модифицированная методика СП	
Бк-76п	8,78	8,78	6,256	8,641	8,898	10,934	16,451
Бк-56п	5,64	5,64	3,963	5,447	5,53	6,404	11,283
Бк-46п	3,547*	3,547*	2,476	3,385	3,436	4,053*	5,95

* – процент армирования меньше допустимой величины по п. 8.2.4 проекта СП.

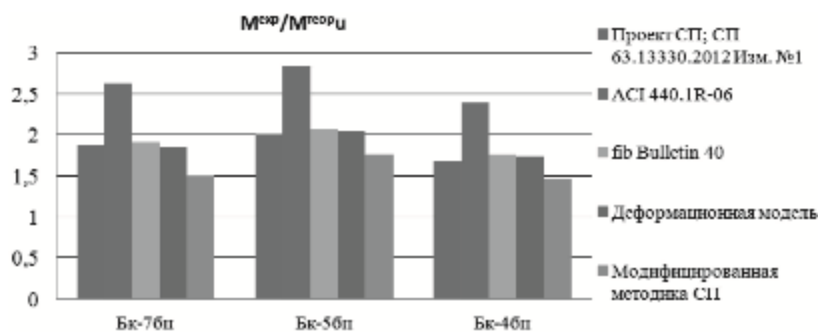


Рис. 3. Графическое сравнение данных табл. 3

Таблица 4

Результаты исследования балок серии 4 – прочность

Маркировка балок	Несущая способность M_u , кН·м					M_{exp} , кН·м Эксперимент
	СП ...2013	СП 63.13330.2012 Изм. № 1	АСИ 440.1R-06	fib Bulletin 40	Модифицированная методика СП	
Бк-10б ₁ сп	13,084	13,269	10,168	15,645	12,063	20,766
Бк-10сп	13,817	13,817	11,167	15,645	14,08	22,582
Бк-10б ₂ сп	13,943	13,943	11,259	16,037	15,185	22,959

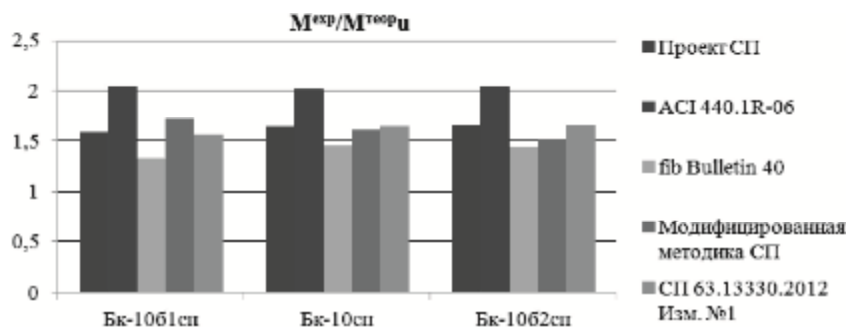


Рис. 4. Графическое сравнение данных табл. 4

Таблица 5

Результаты исследования балок серии 5 – прочность

Маркировка балок	Несущая способность M_u , кН·м				M_{exp} , кН·м Эксперимент
	СП ...2013	СП 63.13330.2012 Изм. № 1	ACI 440.4R-04	Модифицированная методика СП	
Бк-6п ₁ сп	7,62	7,62	5,913	7,613	11,731
Бк-6п ₂ сп	7,62	7,62	6,43	7,613	11,452
Бк-8п ₁ сп	10,699	10,699	8,542	10,853	19,216
Бк-8п ₂ сп	10,699	10,699	9,364	10,853	17,973

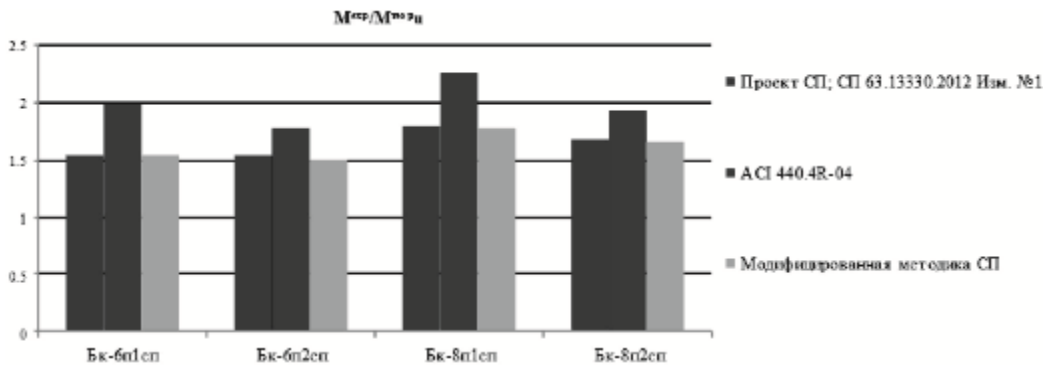


Рис. 5. Графическое сравнение данных табл. 5

Вычисленные величины прочности нормальных сечений по методикам проекта СП «Конструкции из бетона с композитной неметаллической арматурой. Правила проектирования» (далее проект СП), СП 63.13330.2012 Изм. № 1, ACI 440.1R-06 и fib Bulletin 40 (табл. 2-5) имеют различия в результатах от 1,6 % до 40 %.

В табл. 6 представлено сопоставление величин коэффициента безопасности S , представляющего собой отношение опытного разрушающего усилия к значению теоретической несущей способности, для опытных балок серий 2, 3 и 5. В качестве критерия точности принято значение коэффициента S равное 1,6, что по ГОСТ 8829-94 соответствует 2 случаю разрушения элемента из тяжелого бетона. Результаты расчетов, полученные по методикам проекта СП и СП 63.13330.2012 Изм. № 1 превышают принятое значение S до 25,63 %, модифицированная методика СП – до 10,63 %.

Таблица 6

Сопоставление значений коэффициента безопасности S для опытных балок серий 2, 3 и 5

№ серии (вид армирования)	Проект СП	СП 63.13330.2012 Изм. №1	ACI 440.1R-06, ACI 440.4R-04	fib Bulletin 40	Модифицированная методика СП
2 (АСК)	1,634÷2,01	1,634÷2,01	2,02÷2,491	1,44÷1,82	1,591÷1,619
3 (АБК)	1,678÷2,001	1,678÷2,001	2,403÷2,847	1,758÷2,071	1,47÷1,762
5 (АСК _{сп})	1,5÷1,8	1,5÷1,8	1,781÷2,25	-	1,504÷1,77

Для оценки точности определения разрушающих усилий по рассматриваемым методикам в табл. 7 представлено сопоставление отношений экспериментальных и теоретических разрушающих усилий для опытных балок серий 2, 3 и 5 без учета коэффициентов надежности.

Таблица 7

Сопоставление отношений экспериментальных и теоретических разрушающих усилий

№ серии (вид армирования)	Проект СП	СП 63.13330.2012 Изм. № 1	ACI 440.1R-06, ACI 440.4R-04	fib Bulletin 40	Модифицированная методика СП
2 (АСК)	0,994÷1,638	0,994÷1,24	1,014÷1,251	0,992÷1,278	0,994÷1,24
3 (АБК)	1,012÷1,21	1,012÷1,248	1,044÷1,236	1,234÷1,454	1,012÷1,248
5 (АСК _{сп})	1,758÷2,156	1,432÷1,663	1,157÷1,462	-	1,157÷1,362

Отношения экспериментальных разрушающих усилий к теоретическим значениям для балок, армированные АКП, вычисленные по проекту СП составляют 0,994-2,156, по методике СП 63.13330.2012 Изм. № 1 – 0,994-1,663. Модифицированная методика СП по данным показателям дает наиболее точные результаты – 0,994-1,362.

В методике проекта СП расчетные выражения аналогичны используемым для железобетонных конструкций. В ходе анализа методики проекта СП выявлен недостаток, связанный с эмпирической структурой выражений – при соблюдении условия $\xi > \xi_R$ с увеличением расчетного сопротивления растянутой арматуры предельный изгибающий момент M_{ult} уменьшается. В Изменении № 1 к СП 63.13330.2012 данный момент учтен и высота сжатой зоны определяется с использованием другого уравнения:

$$x = \sqrt{(0,5\mu_f \alpha_{f2} h_0)^2 + \mu_f \alpha_{f2} \omega h_0^2} - 0,5\mu_f \alpha_{f2} h_0, \text{ вместо } x = \xi_R \cdot h_0.$$

Сопоставление теоретических и экспериментальных данных о характере разрушения балок (табл. 8) показало, что критерии, принятые в рассматриваемых методиках и определяющие вид разрушения изгибаемых элементов, являются неточными. Наиболее достоверные результаты оценки характера разрушения с учетом коэффициентов надежности дают модифицированная методика СП и методика ACI 440.1R-06, где расчетное сопротивление растяжению арматуры определяется только с использованием коэффициента, учитывающего условия эксплуатации конструкции. То есть, величина расчетного сопротивления арматуры приближенно равна ее фактическому значению, а запас несущей способности обеспечивается коэффициентом надежности, применяемым к номинальному изгибающему моменту.

Наглядно влияние последовательности введения коэффициентов надежности в методиках СП можно оценить при помощи сопоставления величин ξ , ξ_R при расчетах с учетом и без учета коэффициентов надежности. В первом случае определяется несущая способность сечения, во втором величина разрушающего усилия.

Таблица 8

Сопоставление теоретических и опытных данных по характеру разрушения балок

№ серии	Маркировка балок	Характер разрушения балок				
		Проект СП; СП 63.13330.2012 Изм. № 1	ACI 440.1R-06	fib Bulletin 40	Модифицированная методика СП	Экспериментальные данные
2	Бк-10сп	Разрыв арматуры	Разрушение бетона в сжатой зоне	Разрыв арматуры	Разрушение бетона в сжатой зоне	Разрушение бетона в сжатой зоне
	Бк-8сп		Разрыв арматуры		Разрыв арматуры	Продергивание арматуры
	Бк-6сп					Разрыв арматуры
3	Бк-7бп	Разрыв арматуры	Разрыв арматуры	Разрыв арматуры	Разрушение бетона в сжатой зоне	Одновременно – разрыв арматуры и разрушение бетона в сжатой зоне
	Бк-5бп				Разрыв арматуры	
	Бк-4бп					

Продолжение таблицы 8

4	Бк-10б ₁ сп	Разрушение бетона в сжатой зоне	Разрушение бетона в сжатой зоне	Разрыв арматуры	Разрушение бетона в сжатой зоне	Продергивание арматуры
	Бк-10сп	Разрыв арматуры	Разрыв арматуры			Разрушение бетона в сжатой зоне
	Бк-10б ₂ сп					Продергивание арматуры / Разрушение бетона в сжатой зоне
5	Бк-6п ₁ сп	Разрыв арматуры	Разрушение бетона в сжатой зоне	-	Разрушение бетона в сжатой зоне	Разрушение бетона в сжатой зоне
	Бк-6п ₂ сп			-		Разрушение бетона в сжатой зоне / разрыв арматуры
	Бк-8п ₁ сп	Разрыв арматуры		-		Одновременно – разрыв арматуры и разрушение бетона в сжатой зоне
	Бк-8п ₂ сп			-		Разрыв арматуры / Продергивание арматуры

Величина ξ_R определяет момент перехода первого случая разрушения изгибаемого элемента во второй. Можно предположить, что при $\xi/\xi_R = 1,0$ должен происходить третий вид разрушения, описанный в иностранных нормах ACI 440.1R-06 и fib Bulletin 40, – одновременное разрушение элемента по арматуре и бетону. При определении разрушающих усилий для балки армированной двумя стержнями диаметром 7 мм АБК, расчет без учета коэффициентов надежности по методикам СП, значение ξ/ξ_R является наиболее близким к 1,0. По экспериментальным результатам (табл. 8) характер разрушения балок Бк-7бп произошел именно так: одновременно разрыв арматуры и разрушение бетона в сжатой зоне. Однако при определении несущей способности по методикам проекта СП и СП 63.13330.2012 Изм. № 1, где расчет выполняется с учетом коэффициентов надежности, отношение ξ/ξ_R уменьшилось на 48,35 %. Следовательно, в методиках СП при определении несущей способности нормальных сечений величины ξ_R являются завышенными и существует вероятность переармирования конструкций. По результатам расчета с использованием модифицированной методики СП отношение ξ/ξ_R увеличилось на 6,82 %.

Различия сбалансированных коэффициентов армирования и возможная недостоверность определения характеров разрушения, для рассматриваемых методик, были обнаружены ранее в проведенном анализе нормативных документов [1] и исследований [6], а также подтвердились экспериментальными данными.

По результатам выполненных исследований сделаны следующие выводы:

1. Занижение несущей способности по рассматриваемым методикам вызвано использованием избыточных коэффициентов надежности и в методике проекта СП недостоверностью расчета при $\xi > \xi_R$. Занижение расчетного сопротивления растяжению АКП приводит к неточному определению характера разрушения изгибаемого элемента и переармированию конструкций до 48,35 %.

2. Предлагаемая авторами модифицированная методика СП позволяет более точно и достоверно оценивать характер разрушения элементов, определять разрушающие усилия, а величины коэффициента безопасности S приближены к 1,6. Для приведения коэффициентов безопасности S к 1,6 выполнена корректировка величин коэффициентов надежности.

3. В связи с тем, что величина сцепления композитной арматурой с бетоном не является постоянной величиной, а зависит от вида АКП, производителя, условий эксплуатации, расчетное сопротивление сцепления АКП следует определять с учетом фактических свойств арматуры.

Список библиографических ссылок

1. Антаков А.Б., Антаков И.А. Анализ нормативных подходов к оценке прочности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных полимеркомпозитной арматурой // Известия КГАСУ, 2014, № 1 (27). – С. 75-80.

2. Антаков А.Б., Антаков И.А. Экспериментальные исследования изгибаемых элементов с полимеркомпозитной арматурой // Известия КГАСУ, 2014, № 3 (29). – С. 7-13.
3. Антаков А.Б., Антаков И.А., Гиздатуллин А.Р. Экспериментальные исследования изгибаемых элементов с предварительно напряженной полимеркомпозитной арматурой // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы VIII Всероссийской (II Международной) конференции НАСКР-2014. – Чебоксары, 2014. – С. 69-75.
4. Хозин В.Г., Пискунов А.А., Гиздатуллин А.Р., Куклин А.Н. Сцепление полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном // Известия КГАСУ, 2013, № 1 (23). – С. 214-220.
5. Gao D., Venmokrane B., and Tighiouart, B. Свойства сцепления АКП в бетоне. Технический отчет. Департамент строительства, Университет Шербрук, Шербрук, Квебек, Канада, 1998. – 27 с.
6. Iman Chitsazan, Mohsen Kobraei, Mohd Zamin Jumaat and Payam Shafigh. Экспериментальное исследование поведения прочности при изгибе бетонных балок армированных ПКА и сравнение предельного момента нагрузки с АСІ // Журнал гражданского строительства и строительных технологий, Том 1 (2), Декабрь 2010. – С. 27-42.
7. Marta Baena, Lluís Torres, Albert Turon, Cristina Barris. Экспериментальное исследование поведения сцепления между бетоном и АКП стержнями с использованием испытания на вырыв // Композиты Часть В: Строительство. – Великобритания, 2009. – С. 784-797.
8. Terfers R., De Lorenzis L. Сцепление армирования АКП в бетоне – трудная задача // Механика композиционных материалов, Vol. 39, № 4, 2003. – С. 315-328.

Antakov A.B. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: antakof@mail.ru

Antakov I.A. – assistant

E-mail: igor788@bk.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Improving the method for calculating the normal sections of bent elements with polymer composite reinforcement

Resume

The article presents the position of improved method for calculating the strength of the normal sections of bent elements SP 63.13330.2012 reinforced by composite fittings. The study used the rods of fiberglass and basalt plastic reinforcement. The calculation results by of the proposed method were compared with similar data of guidelines: of the USA – ACI 440.1R-06, of the EU – fib Bulletin 40, of Russia – SP 63.13330.2012 with amendment № 1 and project SP.

During the analysis of existing methods of calculating a number of conclusions were made:

– the bearing capacity value, calculated according to the methods of the project SP, SP 63.13330.2012 with Amendment № 1, ACI 440.1R-06 and fib Bulletin 40 has differences in the results from 1,6 % to 40 %;

– underestimation of the bearing capacity design values due to the use of excessive safety factors and the method of calculation of the project SP with the unreliable nature of the destruction of the structures of the crushing of the concrete in the compressed zone. Reduced design resistance to tension FRP results in the precise definition of the nature of the destruction of a flexible member and over-reinforced structures;

– due to the fact that the value of the bond composite reinforcement with concrete is not constant, and depends on the type of FRP, the manufacturer, the operating conditions, the design resistance of the bond FRP bars should be determined considering actual properties of the valve.

Keywords: non-metallic fitting, strength of normal sections, concrete structures, flexural members.

Reference list

1. Antakov A.B., Antakov I.A. Analysis of normative approaches to strength assessment of normal section bending members with fiber-reinforced polymer reinforcement // *Izvestiya KGASU*, 2014, № 1 (27). – P. 75-80.
2. Antakov A.B., Antakov I.A. Experimental study of flexural members with FRP reinforcement // *Izvestiya KGASU*, 2014, № 3 (29). – P. 7-13.
3. Antakov A.B., Antakov I.A., Gizatullin A.R. Experimental study of flexural members with FRP prestressed reinforcement // International conference on new architecture, design construction and renovation NASKR-2014. – Cheboksary, 2014. – P. 69-75.
4. Khozin V.G., Gizdatullin A.R., Kuklin A.N., Piskunov A.A. Adhesion of polymer composite reinforcement with cement concrete // *Izvestiya KGASU*, 2013, № 1 (23). – P. 214-220.
5. Gao D., Benmokrane B., Tighiouart, B. Bond Properties of FRP Rebars to Concrete // Technical Report, Department of civil engineering, University of Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada, 1998. – 27 p.
6. Iman Chitsazan, Mohsen Kobraei, Mohd Zamin Jumaat and Payam Shafigh. An experimental study on the flexural behavior of FRP RC beams and a comparison of the ultimate moment capacity with ACI // *Civil engineering and construction technology*, Vol. 1 (2), December 2010. – P. 27-42.
7. Marta Baena, Lluís Torres, Albert Turon, Cristina Barris. Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test // *An International journal «Composites Part B: Engineering»*, United Kingdom, 2009. – P. 784-797.
8. Tepfers R., De Lorenzis L. Bond of FRP reinforcement in concrete – a challenge // *Mechanics of composite materials*, Vol. 39, № 4, 2003. – P. 315-328.