

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов): ГОСТ 25.601–80. – Москва, 1981.

1. Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych do ciśnieniowej i bezciśnieniowej kanalizacji deszczowej i sanitarnej. Termoutwardzalne tworzywa sztuczne wzmocnione włóknem szklanym (GRP) na baize nienasyconej żywicy poliestrowej (UP). Specyfikacje dotyczące rur, kształtek i połączeń: PN-EN 14364:2006 (U), EN 14364:2006, IDT. – Warszawa, 2006.

2. Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych. Rury z uttwarzalnych tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknem szklanym (GRP). Oznaczanie doraznych właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu wzdluznym: PN-EN 1393:2002 (U), EN 1393:1997, IDT. – Warszawa, 2002.

3. Rury z termoutwardzalnych tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknem szklanym (GRP). Oznaczanie początkowej właściwości sztywności obwodowej: PN-EN 1228:1999 (U). – Warszawa, 1999.

УДК 624.046.2

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РАЗРУШАЮЩЕГО МОМЕНТА ИЗГИБАЕМЫХ БАЛОК, АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРОЙ

ВОЛИК А. Р., ПОЧЕБЫТ А. А., ЧУРИЛО К. Ю.

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,
Гродно, Беларусь

В последние десятилетия все большую популярность для армирования железобетонных конструкций набирает арматура из композитных материалов, механические свойства которой отличаются от свойств стальной арматуры. Стержни композитной арматуры имеют более низкий модуль упругости, более высокую прочность на растяжение, чем стальные стержни, ведут себя вплоть до разрушения как идеально упругие тела, подчиняясь закону Гука.

Проведенные исследования изгибаемых композитобетонных балок в ГрГУ им. Я. Купалы [1] показали, что разрушение балок, армированных только стержнями из композитных материалов, происходило хрупко. При этом арматурные стержни не достигают своих предельных деформаций, и их высокие прочностные характеристики оказывались недоиспользованными.

В настоящее время в ряде стран существуют нормативные документы по расчету конструкций с композитным армированием: в США – ACI 440.1R-15 [2], в странах Евросоюза – fibBulletin 40 [3], в Канаде – CAN/CSA-S806-02 [4], в России – СП 63.133320.2012 [5], в Украине подготовлен проект ДСТУ-Н [6], в Италии – CNR-DT 203/2006 [7]. В Беларуси отсутствуют нормы, регулирующие производство и применение композитных материалов.

Существующие методики являются модификацией норм железобетонных конструкций со стальной арматурой: формулы для определения расчетных параметров конструкций с композитной арматурой, в целом, повторяют формулы для конструкций со стальной арматурой.

Для определения разрушающего момента можно выделить два подхода: европейский и американский. Европейский подход основывается на методе частных коэффициентов, в американском подходе используется понижающий обобщающий коэффициент надежности к величине предельного момента.

Для сопоставления методик определения предельного разрушающего момента были проведены теоретические исследования несущей способности изгибаемой композитобетонной балки размерами 60×120×1000 мм из бетона класса С25/30, армированной стеклопластиковой арматурой Ø10 АКС. Результаты расчетов (рис. 1.) показали разброс значений разрушающего момента до 60 %: минимальное значение $M_{Rd} = 1,22$ кН получено при использовании российских норм СП 63.133320.2012, максимальное $M_{Rd} = 1,98$ кН – при расчете по fibBulletin 40 [3].

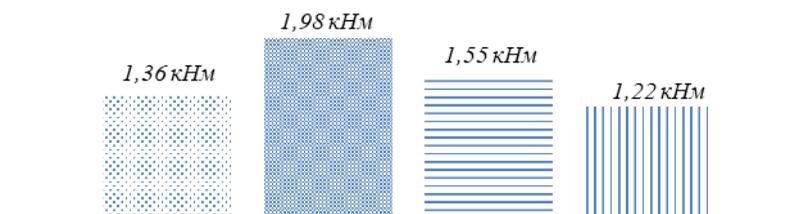


Рис. 1. Значения предельного разрушающего момента композитобетонных балок, определенных по нормативным документам разных стран

Для увеличения жесткости элемента и изменения характера разрушения конструкции предлагается применение комбинированного армирования, т. е. одновременное использование стальных и композитных материалов как арматурных стержней. Дополнительные стальные стержни могут повысить жесткость балки. Применение комбинированного армирования в изгибаемых балках позволяет получить пластическую форму разрушения опытных образцов. Были проведены многочисленные исследования [8–13] балок с различным количеством и расположением стальной и композитной арматуры (рис. 2).

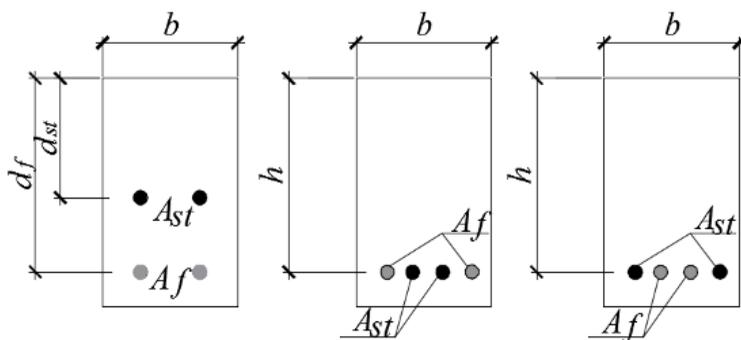


Рис. 2. Варианты комбинированного армирования изгибаемых балок [8–13]

Несмотря на изменение характера разрушения при добавлении стальных стержней, несущая способность балки с комбинированным армированием может уменьшиться из-за хрупкого разрушения при неправильном соотношении композитной арматуры к стальной. Исследования показывают, что пластический характер разрушения и минимальный прогиб достигается при соотношении стеклопластиковой арматуры к стальной от 1 до 2,5 [8].

В исследованиях, проводимых в Юго-западном университете г. Нанкин (Китай) [9], для определения теоретического значения разрушающего момента с комбинированным армированием использовались формулы расчета железобетонных конструкций по ACI318M-02 [14], но с применением эффективного коэффициента армирования и прочности только композитной арматуры:

$$M = \phi \rho b d^2 f_y \left(1 - \frac{\rho f_y}{1,7 f_c} \right), \quad (1)$$

где $\rho = \frac{A_s m + A_f}{bd} = \rho_s m + \rho_f$;

$$m = \frac{f_y}{f_u}.$$

Большинство исследователей для расчета балок с комбинированным армированием используют американские нормы проектирования с композитным армированием [10–12], где принимаются следующие основные допущения:

- деформации в сечении изменяются по линейному закону;
- напряжения растянутого бетона не учитываются;
- нелинейный профиль эпюры напряжений бетона моделируется эквивалентной прямоугольной эпюрой напряжений.

Напряжения стальной арматуры и композитных стержней получены из их соответствующих диаграмм «напряжения–деформации». Положение нейтральной оси и величина предельного разрушающего момента определяются из уравнения равновесия сил.

В исследованиях, проведенных в Юго-западном университете г. Нанкин (Китай), предельный разрушающий момент для балок с комбинированным армированием определяется по формуле (2):

$$M_n = f_c b h_0^2 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2} \right);$$

$$\xi = \frac{A - B + \sqrt{(A - B)^2 + 3,2B}}{2}; \quad (2)$$

$$A = \frac{f_y \rho_s}{f_c}; \quad B = \frac{0,0033 E_f \rho_f}{f_c}.$$

В исследованиях, проводимых в университете Тунцзи в г. Шанхай (Китай) [11], для балок с комбинированным армированием выделены три типичные формы разрушения:

тип I: балки разрушаются по сжатию бетону, стальные стержни не достигают предела текучести, а напряжение в композитной арматуре малы;

тип II: балки теряют несущую способность из-за разрушения бетона в зоне сжатия после того как стальные стержни достигли предела текучести, деформации композитных стержней не достигли своих предельных значений;

тип III: балки теряют несущую способность из-за разрыва композитных стержней. Стальные стержни достигают предельных деформаций, бетон не разрушается.

Тип I и III не допускаются из-за хрупкого характера разрушения.

Тип разрушения определяется соотношением величин сбалансированного коэффициента армирования и процента армирования: при $\rho_s > \rho_{sb}$ возникает I тип разрушения; при $\rho_f < \rho_{fb}$ – тип III; при $\rho_f > \rho_{fb}$ и $\rho_s < \rho_{sb}$ возникает II тип. Для каждого типа разрушения были выведены формулы для определения предельного разрушающего момента.

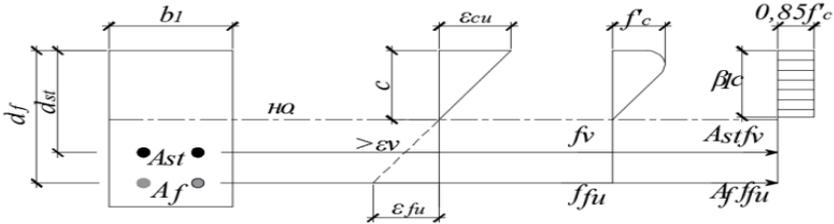
В исследованиях, проводимых в г. Гонконг [12], также предложены три формы разрушения: 1 – разрушение по композитной арматуре; 2 – разрушение по стальной арматуре; 3 – разрушение по сжатой зоне. Форма разрушения определяется графически в зависимости от отношения величины рабочей высоты для стальной арматуры d_{st} к рабочей высоте композитной арматуры d_f и величины предельных деформаций арматуры. Для двух областей (при разрушении по растянутой композитной или растянутой стальной

арматуре) были составлены уравнения равновесия внутренних сил (рис. 3.) и выведены формулы (3) для определения высоты сжатой зоны и предельного разрушающего момента:

$$M = 0,85 f'_c \beta_2 c b \left(c - \frac{\beta_2 c}{2} \right) + A_{st} f_y (d_{st} - c) + A_f f_{fu} (d_f - c), \quad (3)$$

где $c = \frac{A_{st} f_y + A_f f_{fu}}{0,85 f'_c \beta_2 b}$.

a



б

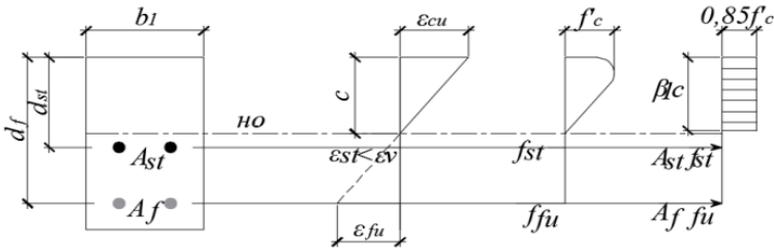


Рис. 3. Баланс внутренних сил:

a – при разрушении по композитной арматуре; *б* – при разрушении по композитной арматуре

Для анализа существующих методик расчета изгибаемых балок с комбинированным армированием были проведены теоретические исследования определения предельного разрушающего момента по данным экспериментальных исследований, проведенных в БрГТУ [13] и г. Нанкин (Китай) [8]. При определении предельного разрушающего момента были использованы фактические

геометрические характеристики балок и механические характеристики материалов (табл. 1.).

Таблица 1

Характеристики опытных образцов

	Размеры поперечного сечения	f_c , МПа	Характеристики композитной арматуры			Характеристики стальной арматуры	
			A_f , мм ²	f_f , МПа	E_f , МПа	A_s , мм ²	f_s , МПа
Образец № 1 [13]	120×190	29,2	50,3	960	36000	157,1	435
Образец № 2 [8]	280×380	41,3	283,5	558	55000	981,7	336

В результате расчетов по методике [9], основанной на методике для железобетонных конструкций, предельный разрушающий момент составил для опытного образца № 1 и № 2 78 % и 97 % от экспериментального, соответственно. Теоретический предельный разрушающий момент [10] составил для опытного образца № 1 59 % и от экспериментального, для опытного образца № 2 126 % от экспериментальной. Предельный разрушающий момент, просчитанный по методике, приведенной в исследовании [11] меньше экспериментального значения на 3,2 – 0,01 % (рис. 4).

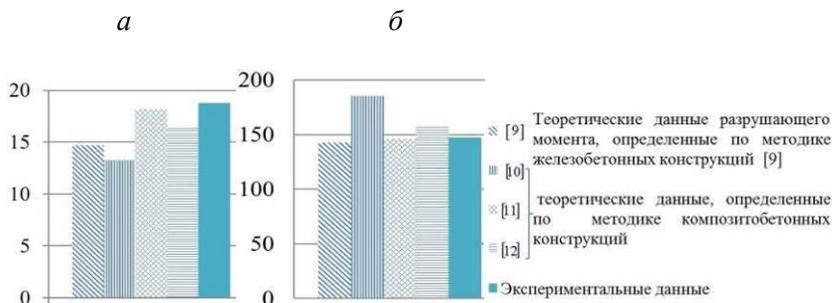


Рис. 4. Предельный разрушающий момент:
а – опытного образца № 1; б – опытного образца № 2

Проведенные теоретические исследования указывают на несовершенство методов расчета при армировании изгибаемых балок с использованием композитной арматуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волик, Е. К. Сравнительный анализ работы изгибаемых балок, армированных металлической и стеклопластиковой арматурой / Е. К. Волик // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства: Сборник научных работ; ГрГУ им. Я. Купалы. Гродно, 2015. – С. 24–27.
2. Мерват Хишмах. Прочность и деформативность изгибаемых элементов из тяжелого бетона, армированных стеклопластиковой и стальной арматурой / Мерват Хишмах, Д. Р. Маилян, П. П. Польской, А. М. Блягоз // Новые технологии. – 2012. – № 4. – С. 116–121.
3. Lau, D. Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams / D. Lau, H.J. Pam // Eng. Struct. – 2010. – № 32. – P. 3857–3865.
4. Ge, W. Experimental Study on the Flexural Behavior of Concrete Beam Hybrid Reinforced with FRP Bars and Steel Bars / W. Ge, J. Zhang, H. Dai, Y. Tu // Advances in FRP Composites in Civil Engineering. – 2011. – № 1. – P. 301–303.
5. Yinghao, L. Arrangement of hybrid rebars on flexural behavior of HSC beams/ L. Yinghao, Y. Yong // Composites Part B: Engineering. – 2013. – № 45. – P. 22–31.
6. Leung, H. Y. Flexural capacity of concrete beams reinforced with steel and fibre-reinforced polymer (FRP) bars/ H. Y. Leung // Journal of Civil Engineering and Management. – 2010. – № 3. – P. 209–215.
7. Тур, В. В. Экспериментальные исследования изгибаемых бетонных элементов с комбинированным армированием стальными и стеклопластиковыми стержнями / В. В. Тур, В. В. Малыха // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2013. – № 8. – С. 58–65.
8. Guide for the Design and Construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars: ACI 440.1R-15 – Farmington Hills: MI. ACI, 2015. – 88 p.
9. FRP reinforcement in RC structures. Technical report TG9.3: fib bul. 40 – Lausanne, Switzerland: fib, 2007 – 151 p.
10. Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers: CAN/CSA–S806–02 – Toronto, Ontario, Canada: CSA, 2002. – 97 p.

11. Конструкции з бетона с композитной неметаллической арматурой. Правила проектирования: СП 63.13330.2012 – Москва: Минрегион России, 2013. – 94 с.

12. Настанова з проектування та виготовлення бетонних виробів і конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальтового і скло ровінгів: ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012 – Киев, Минрегион Украины, 2011. – 28 с.

13. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars: CNR-DT 203/2006 – Rome, Italy, CNR 2006. – 38 p.

14. ACI 318M-02. Building code requirements for structural concrete. Michigan (USA): AmericanConcreteInstitute (ACI), Committee 318; 2002. – 443 p.

УДК 624.04

МЕТОДЫ РАСЧЕТА СТАЛЕФИБРОБЕТОННЫХ ПЛИТ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ С УЧЕТОМ НЕУПРУГОЙ РАБОТЫ МАТЕРИАЛА

ВОЛОДИН А. Ю., РАК Н. А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. В данной статье описываются некоторые методы расчета сталефибробетонных плит на упругом основании, учитывающие неупругую работу материала. Рассмотрены методики расчета по TR 34 [1], DBV [5], некоторые другие методики.

Необходимость учета неупругой работы сталефибробетона. Во многих случаях индустриальные полы проектируются в предположении упругой работы материала и отсутствия трещин в сечении. В этом случае невозможно учесть несущую способность сталефибробетонной плиты пола в стадии после образования трещин. Соответственно, невозможно определить рост надежности конструкции в результате введения в стальной фибры.

Лабораторные испытания сталефибробетонных плит на упругом основании при действии сосредоточенных сил показали, что введение