

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов, Н. П. Стеклопластиковая арматура и стеклопласт-бетонные конструкции / Н. П. Фролов – М. : Стройиздат, 1980.
2. Рекомендации по проектированию конструкций из напрягающего бетона с композитной арматурой : утв. М-вом архитектуры и строительства Респ. Беларусь 28.11.2014. – Минск : ГП «Института жилища – НИИПТИС им. Атаева С.С.», 2014.
3. Семенюк, О. С. Собственные деформации и самонапряжения элементов из напрягающего бетона при его расширении в условиях осевого ограничения: дис ... канд. техн. наук: 2017 / О. С. Семенюк. – Брест, 2017.
4. Талецкий, В.В. Увеличение модуля упругости стеклопластиковой арматуры / В. В. Талецкий // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства: сборник научно-технических статей (материалы научно-технического семинара), 22-23 мая 2013 г. В 2 ч. Ч. 1 / ред. колл.: В.Ф. Зверев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 130-136.

УДК 624.046.02

ОБЗОР МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОМПОЗИТОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ПОЧЕБЫТ А. А.

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы
Гродно, Беларусь

Вопросами армирования бетонных конструкций стержнями из композитной арматуры занимаются исследовательские центры по всему миру: Институт бетона Америки (The American Concrete Institute), Японское сообщество гражданских инженеров (Japan Society for Civil Engineers) и другие исследовательские группы, например, в Канаде, Италии и др. На основании комплексных исследований, проведенных к настоящему времени, разработаны и совершенствуются нормативные документы по вопросам проектирования

и расчета бетонных строительных конструкций, армированных композитными стержнями: ACI 440.1R-15 (США) [1], fibBulletin 40 (Евросоюз) [2], CAN/CSA-S806-02 (Канада) [3], СП 63.133320.2012 (Россия) [4], ДСТУ-Н (Украина) [5], CNR-DT 203/2006 (Италия) [6]. В Беларуси отсутствуют нормативные документы, регулирующие производство и применение композитных материалов. Применение осуществляют на основе данных испытаний производителей данной арматуры.

Высокая деформативность композитной рабочей арматуры фактически не позволяет производить большинство конструкций, которые привычно выполняются в железобетоне. Фактически, для композитной арматуры отношение прочности к жесткости на порядок больше, чем у стали, и это влияет на распределение напряжений вдоль рабочей высоты.

Если учесть, что в качестве сжатой композитную арматуру использовать невозможно, то расчет и конструирование композитобетонных конструкций не могут выполняться по методикам, справедливым в отношении железобетона. Уравнения равновесия, действительные в отношении сечений со стальной арматурой, совершенно не работают в отношении сечений с арматурой, имеющей значительно более низкий модуль упругости [1].

В настоящее время предлагаются рекомендации, регулирующие проектирование композитобетонных конструкций главным образом, в виде модификаций существующих документов для железобетонных конструкций. Основные гипотезы, заложенные в основу расчета композитобетонных изгибаемых элементов для рассматриваемых норм и рекомендаций [1 – 6].

- гипотеза плоских сечений выполняется на всех этапах работы сечения;
- присутствует совместная работа композитной арматуры и бетона;
- бетон в растянутой зоне не учитывается;
- композитная арматура работает по линейно-упругой диаграмме до разрушения.

В мировой практике композитобетонные конструкции рассчитываются по предельным состояниям несущей способности и эксплуатационной пригодности. При расчете по предельному состоянию несущей способности, как и для железобетонных конструкций,

выделяют два основных расчетных случая: разрушение по растянутой арматуре и разрушение по сжатому бетону. Расчетный случай разрушения в нормативных документах [1 – 6] определяется при сопоставлении величин фактического (ρ_f) и сбалансированного (ρ_{fb}) процента армирования.

Расчет в соответствии с ACI 440.1R-06 [1]. Основные принципы расчета прочности в соответствии с ACI 440.1R-06 [1] указывают на то, что расчетная прочность на изгиб в сечении конструктивного элемента должна превышать расчетный момент.

$$\varphi M_n \geq M_u \quad (1)$$

Расчетная прочность на изгиб определяется как номинальная прочность на изгиб конструктивного элемента, умноженная на коэффициент понижения прочности (φ). Расчетный момент определяется как момент, рассчитанный посредством использования расчетных нагрузок.

Ввиду того, что композитная арматура не обладает пластичными свойствами, сбалансированный коэффициент армирования рассчитывается с использованием расчета прочности на разрыв.

$$\rho_{fb} = 0,85\beta_1 \frac{f_c'}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (2)$$

Если коэффициент армирования меньше, чем сбалансированный коэффициент армирования ($\rho_f < \rho_{fb}$), происходит разрушение по композитной арматуре. В противном случае ($\rho_f > \rho_{fb}$) происходит разрушение по бетону.

При разрушение по сжатому бетону распределение нагрузок в бетоне приближено к эпюре с равномерным распределением напряжений по высоте сжатой зоны. Композитная арматура обладает линейно-упругим поведением при разрушении бетона, поэтому напряжения в композитной арматуре, не достигнут своих предельных значений.

$$M_n = \rho_f \cdot f_f \left(1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f_c'} \right) b d^2 \quad (3)$$

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + 0,85 \frac{\beta_1 f_c'}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu}}. \quad (4)$$

При разрушении по растянутой арматуре бетон не достигает максимальных деформации, в этом случае прямоугольная эпюра распределения напряжений бетона не применяется. В данном случае, понадобится использовать эквивалентную эпюру напряжений, которая описывает распределение напряжений в бетоне при достижении определенного уровня деформации.

$$M_n = A_f \cdot f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 C_b}{2} \right), \quad (5)$$

$$C_b = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} d. \quad (6)$$

В указанных руководствах рекомендуется проектировать конструкции с разрушением по бетону.

Расчет в соответствии с fib Bulletin 40. В основе расчета несущей способности используется EN 1992.

$$M_n \geq M_u. \quad (7)$$

Как и в АСІ [1], характер разрушения определяется в зависимости от величин фактического и сбалансированного коэффициента армирования. Величина сбалансированного процента армирования зависит от механических свойств композитной арматуры и бетона и рассчитывается из выражений, полученных с учетом уравнения равновесия внутренних сил.

$$\rho_{fb} = \frac{0,81(f_{ck} + 8) \varepsilon_{cu}}{f_{fk} \left(\frac{f_{fk}}{E_{fk}} + \varepsilon_{cu} \right)}. \quad (8)$$

В случае разрушения по сжатому бетону значение предельного разрушающего изгибающего момента определяется исходя из прочности бетона сжатой зоны с последующей проверкой условия исключения разрушения от разрыва арматуры.

$$M_u = \eta f_{cd} b d^2 (\lambda \xi) \left(1 - \frac{\lambda \xi}{2} \right), \quad (9)$$

$$\xi = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_f} \quad (10)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu} + \sqrt{\varepsilon_{cu}^2 + \frac{4\eta\alpha_{cc}f_{ck}\lambda\varepsilon_{cu}}{\gamma_c\rho_f E_f}}}{2} \quad (11)$$

В случае разрушения по растянутой арматуре, предварительно необходимо определить величину деформации сжатого бетона, исходя из этого, определяется относительная высота сжатого бетона.

$$M_n = \frac{A_f \cdot f_{fk}}{\gamma_f} \left(1 - \frac{\xi}{2}\right), \quad (12)$$

$$\xi = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{fu}} \quad (13)$$

Расчет в соответствии СП 63.13330.2012. Существующие нормы расчета в РФ по структурному содержанию не отличаются от европейских норм. Расчет конструкций без предварительного напряжения композитной арматуры по предельным состояниям первой группы выполняют по указаниям для железобетонных конструкций, при этом в расчетные зависимости вместо характеристик и параметров стальной арматуры подставляют соответствующие характеристики и параметры композитной. Значение граничной относительной высоты сжатой зоны, при котором предельное состояние конструкции наступает одновременно с достижением в растянутой арматуре, напряжения равного расчетному сопротивлению определяется по формуле:

$$\xi_R = \frac{\omega}{1 + \frac{\varepsilon_{f,ult}}{\varepsilon_{b2}}} \quad (14)$$

При $x > \xi_R h_0$ высота сжатой зоны определяется по следующим формулам:

$$x = \sqrt{(0,5\mu_f\alpha_{f2}h_0)^2 + \mu_f\alpha_{f2}\omega h_0^2} - 0,5\mu_f\alpha_{f2}h_0, \quad (15)$$

$$\mu_f = \frac{A_f}{bh_0}; \alpha_{f2} = \frac{E_f}{E_{b2}}; E_{b2} = \frac{R_b}{\varepsilon_{b2}} \quad (16)$$

В противном случае:

$$x = \frac{R_f A_f}{R_b b} , \quad (17)$$

$$M_{ult} = R_b b x (h_0 - 0,5x) . \quad (18)$$

Проект украинских норм ДСТУ [5] и действующие итальянские нормы CNR [6] предлагают выполнять расчеты согласно действующих норм расчета железобетонных конструкций, заменяя характеристики стальной арматуры на неметаллическую. Специальных расчетных зависимостей нормами не вводится. В итальянских нормах введено дополнительное условие надежности – ограничение предельных деформаций композитной арматуры.

Основное отличие существующих методик расчета композитобетонных изгибаемых элементов заключается в принципах обеспечения надежности. Так в американских стандартах понижающий коэффициент ϕ применяется к моменту, в стандартах, по Еврокоду, с помощью частных коэффициентов надежности по материалу и нагрузкам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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
2. FRP reinforcement in RC structures. Technical report TG9.3: fib bul. 40 – Lausanne, Switzerland: fib, 2007 – 151 p.
3. Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers: CAN/CSA–S806–02 – Toronto, Ontario, Canada: CSA, 2002
4. Конструкции из бетона с композитной неметаллической арматурой. Правила проектирования: СП 63.13330.2012 – М.: Минрегион России, 2013 – 94 с.
5. 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.