

Анализ методик расчета деформаций изгибаемых бетонных конструкций с композитной арматурой

Хох А.С.

Научный руководитель – Хотько А.А.

Белорусский национальный технический университет

Использование всех преимуществ композитной арматуры при армировании изгибаемых элементов возможно только при условии ее предварительного напряжения, способного повысить трещиностойкость и уменьшить прогибы конструкций при эксплуатационных нагрузках. Однако, даже при условии решения проблемы со сложностью создания предварительного напряжения композитной арматуры, является актуальным вопрос достоверной расчетной оценки ширины раскрытия трещин и величины прогибов. Исследования в этом направлении проводятся как в Республике Беларусь, под руководством профессоров Т.М. Пецольда, В.В.Тура, так и в Российской Федерации и в других странах [1-8]. Методики расчета прогибов изгибаемых элементов с композитной арматурой изложены в разработанных НИПТИС рекомендациях [3], а также в разработанных НИИЖБ им. А.А.Гвоздева строительных правилах [4].

Принцип расчета прогибов по методике, предлагаемой учеными РБ и по методике, предлагаемой Российскими учеными, идентичен. Прогибы (перемещения) конструкций с композитной арматурой по указанным методикам рассчитываются по аналогии с расчетами прогибов железобетонных конструкций со стальной арматурой, по общим правилам строительной механики, используя значения продольных деформаций, поперечных деформаций и кривизн по длине конструкций от расчетных воздействий и их сочетаний. В тех случаях, когда прогибы железобетонных элементов в основном зависят от изгибных деформаций, значения прогибов определяют по жесткостным характеристикам.

Кривизну железобетонных элементов для участков элементов с трещинами определяют как разность средних относительных деформаций крайнего волокна сжатого бетона и средних относительных деформаций крайнего растянутого арматурного стержня на этом участке, деленную на расстояние между крайним волокном сжатого

бетона и центром тяжести крайнего растянутого арматурного стержня.

Средние относительные деформации крайнего сжатого волокна бетона определяются по относительным деформациям крайнего сжатого волокна в сечении с трещиной, нормальном к продольной оси, умноженным на коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформаций сжатого бетона по длине между трещинами.

Средние относительные деформации крайнего растянутого арматурного стержня определяются по относительным деформациям крайнего растянутого арматурного стержня в сечении с трещиной, нормальном к продольной оси элемента, умноженным на коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформаций растянутой арматуры по длине между трещинами.

Относительные деформации сжатого бетона и растянутой арматуры в сечении с трещиной, нормальном к продольной оси элемента, в общем случае определяются из расчета системы уравнений деформационной модели железобетонных конструкций по заданным значениям изгибающего момента и продольной силы от соответствующего сочетания внешних нагрузок.

Допускается определять деформации в сжатом бетоне и растянутой арматуре исходя из условно упругого расчета сечения с трещиной, нормального к продольной оси элемента, принимая условно упругую работу бетона с приведенным модулем упругости и упругую работу композитной арматуры со своим модулем упругости.

Значения относительных деформаций ε_{cc} и ε_f согласно разработанным в НИПТИС рекомендациям [3] допускается определять по формулам:

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\sigma_{cc}}{E_{c,red}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \leq 0,3 \frac{f_{fk}}{E_f} \quad (2)$$

где σ_{cc} — напряжение в крайнем сжатом волокне бетона в сечении с трещиной;

σ_f — напряжение в крайнем растянутом стержне продольной арматуры в сечении с трещиной.

Для изгибаемых элементов прямоугольного, таврового и двутаврового сечений с арматурой, сосредоточенной у растянутой и сжатой

граней элемента, определение относительных деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры допускается производить по упрощенной схеме, рассматривая железобетонный элемент в виде сжатого пояса бетона и растянутого пояса арматуры с равномерным распределением напряжений по высоте сжатого и растянутого поясов:

$$\sigma_{cc} = \frac{M_{Ed}}{A_{cc} \cdot z} \quad (3)$$

$$\sigma_f = \frac{M_{Ed}}{A_f \cdot z} \leq 0,3f_{tk} \quad (4)$$

где A_{cc} — площадь сжатого бетона в сечении с трещиной;

A_f — площадь растянутой арматуры в сечении с трещиной;

z — расстояние между центрами тяжести площади сжатого бетона и растянутой арматуры.

Значения A_{cc} и z допускается определять из расчета изгибаемых элементов по предельным усилиям в сечении, нормальном к продольной оси.

Согласно методике РФ правил проектирования СП 63.13330-2012 [4] для элементов с нормальными трещинами в растянутой зоне напряжение в арматуре, пересекающей трещины, определяют по формуле:

$$\sigma_{fj} = \frac{E_{fj} \cdot v_{fj} \cdot \varepsilon_{fj}}{\psi_{fj}} \quad (5)$$

Где:

$$\psi_{fj} = 1 - \frac{1}{1 + 0,8 \cdot \frac{\varepsilon_{fj.crc}}{\varepsilon_{fj}}} \quad (6)$$

здесь $\varepsilon_{fj.crc}$ — относительная деформация растянутой арматуры в сечении с трещиной сразу после образования нормальных трещин;

ε_{fj} — усредненная относительная деформация растянутой арматуры, пересекающей трещины, в рассматриваемой стадии расчета.

Согласно рекомендациям НИПТИС [3] при использовании упрощенных методов расчета для определения деформаций железобетонных изгибаемых элементов, работающих с трещинами, окончательное значение проверяемого параметра следует определять по формуле:

$$\chi = \psi_f \cdot \chi_{II} - (1 - \psi_f) \cdot \chi_I \quad (7)$$

где χ — анализируемый параметр, в качестве которого могут рассматриваться кривизна, угол поворота или прогиб;

χ_I, χ_{II} — соответственно значения параметра, определенные для сечения без трещины и с трещиной;

ψ_f — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения относительных деформаций растянутой арматуры на участках между трещинами, определяемый в общем случае по выражению:

$$\psi_f = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{f,cr}}{\sigma_f} \right)^2 \quad (8)$$

здесь β — коэффициент, учитывающий длительность нагружения;

σ_f — напряжения в растянутой композитной арматуре, рассчитанные для сечения с трещиной;

$\sigma_{f,cr}$ — напряжения в растянутой композитной арматуре, рассчитанные для сечения с трещиной для условий нагружения, приводящих к появлению трещин.

В соответствии с рекомендациями [3] изгибную жесткость элемента с трещинами в общем случае следует определять по формуле:

$$B_{m,cr} = \frac{M_{Sd}}{(1/r)_{cr}} \quad (9)$$

Допускается определять изгибную жесткость железобетонного элемента с трещинами по формуле:

$$B(\infty, t_0) = \frac{E_{c,eff} \cdot I_{II}}{1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left(\frac{\sigma_{f,r}}{\sigma_f} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{I_{II}}{I_I} \right)} \quad (10)$$

где $E_{c,eff}$ — эффективный модуль упругости бетона;

I_{II}, I_I — соответственно момент инерции сечения с трещиной и без трещины, определяемый с учетом отношения:

$$\alpha_e = \frac{E_f}{E_{c,eff}} \quad (11)$$

Значения эффективного модуля упругости бетона $E_{c,eff}$ согласно рекомендациям [3] определяются:

— при действии кратковременной нагрузки: $E_{c,eff} = E_{cm}$;

— при действии длительной нагрузки:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \phi(\infty, t_0)} \quad (12)$$

где $\Phi(\infty, t_0)$ — предельное значение коэффициента ползучести для бетона,

В случае же расчета по методике Российских правил [4] изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента определяется по формуле:

$$B = E_{b1} \times I_{red} \quad (13)$$

где E_{b1} – модуль деформаций сжатого бетона, определяемый в зависимости от продолжительности действия нагрузки и с учетом наличия или отсутствия трещин;

I_{red} – момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его центра тяжести, определяемый с учетом наличия или отсутствия трещин.

Значения модуля деформаций бетона принимают равными:

- при непродолжительном действии нагрузки:

$$E_{b1} = 0,85 \times E_b \quad (14)$$

- при продолжительном действии нагрузки:

$$E_{b1} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}} \quad (15)$$

При определении момента инерции приведенного поперечного сечения, значения коэффициентов приведения растянутой арматуры к бетону принимают:

$$\alpha_{f1} = \frac{E_{f,red}}{E_{b,red}} \quad (16)$$

где $E_{b,red}$ - приведенный модуль деформации сжатого бетона, учитывающий неупругие деформации сжатого бетона и определяемый по формуле:

$$E_{b,red} = \frac{f_{cn}}{\varepsilon_{b,red}} \quad (17)$$

Относительную деформацию бетона $\varepsilon_{b,red}$ принимают равной 0,0015.

$E_{f,red}$ – приведенный модуль деформаций стеклопластиковой арматуры, определяемый с учетом влияния работы растянутого бетона между трещинами:

$$E_{f,red} = \frac{E_f}{\psi_f} \quad (18)$$

Значение ψ_f для изгибаемых элементов допускается определять по формуле:

$$\psi_f = 1 - 0.8 \cdot \frac{M_{cr}}{M} \quad (19)$$

где M_{cr} - момент образования трещин.

С целью оценки достоверности описанных выше методик, нами был выполнен расчет прогибов по указанным зависимостям, для изгибаемого элемента, армированного в растянутой зоне стеклопластиковой арматурой и сравнение полученных данных с результатами экспериментальных исследований.

К сожалению, нами не было найдено результатов экспериментальных данных с предварительно напряженной стеклопластиковой арматурой, что вероятно связано со сложностью захвата такой арматуры при создании предварительного напряжения. Из опубликованных данных по испытаниям предварительно напряженных изгибаемых элементов с композитной арматурой известны исследования профессора Тура В.В [6]. Однако эти исследования проводились с комбинированным армированием. Поэтому, с целью расчетной оценки рассматриваемых методик, нами были использованы опытные данные, полученные на изгибаемых элементах со стеклопластиковой арматурой без предварительного напряжения и описанные в работах А.Р. Воллик [7] и А.А. Почебыт [8].

В качестве исходных данных для первого численного эксперимента использованы данные, соответствующие экспериментальным условиям, описанным в [8]: изгибаемый элемент, прямоугольного сечения, с размерами 100×180мм, армированный в растянутой зоне 4Ø8мм стеклопластиковой арматуры (в два ряда, с расстоянием между ними 30мм) с характеристиками: $f_i=960\text{МПа}$, $E_f=45200\text{МПа}$, в сжатой зоне 2Ø6S500. В качестве исходных данных для второго численного эксперимента использованы данные, соответствующие экспериментальным условиям, описанным в [7]: изгибаемый элемент, прямоугольного сечения, с размерами 120×220мм, армированный в растянутой зоне 1Ø10мм стеклопластиковой арматуры с характеристиками: $f_i=962\text{МПа}$, $E_f=45660\text{МПа}$. Бетон класса C25/30.

Анализ численного эксперимента показал, что методика расчета прогибов, описанная в строительных правилах [4] дает БОльшее значение прогибов по сравнению с опытными данными, в то время как методика, изложенная в рекомендациях [3] дает заниженные значения по сравнению с опытами (таблица 1).

Таблица 1

Сравнение расчетных данных по различным методикам с экспериментальными данными по прогибам

	Экспериментальные данные согласно [8]	Экспериментальные данные согласно [7]
Размеры поперечного сечения образца, мм	100*180мм	120*220мм
Класс бетона	C25/30	C25/30
Арматура в растянутой зоне	Стеклопластиковая 4Ø8 ft=960МПа E=45200МПа	Стеклопластиковая 1Ø10 ft=960МПа E=45660МПа
Предельный опытный изгибающий момент, кН*м	7.0	5,625
Максимальные прогибы в опытах, мм	8,5	2,5
Результаты сравнения расчетных данных с опытными	<p>(темной заливкой – согласно методике [3], светлой - согласно методике [4])</p>	<p>(темной заливкой – согласно методике [3], светлой - согласно методике [4])</p>

Список использованных источников

1. ACI 440.1R-03, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. - American Concrete Institute, 2003.
2. CNR-DT 203/2006, Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. - Rome, Italy, 2006.
3. Рекомендации по проектированию конструкций из напрягающего бетона с композитной арматурой. – Минск, НИПТИС, 2014. (1ая редакция)
4. СП 63.13330-2012 «Конструкции из бетона с композитной неметаллической арматурой. Правила проектирования». – Москва, 2013.
5. Фролов, Н. П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции / Н. П. Фролов. – Москва: Стройиздат, 1980. – 107 с.
6. Тур, В. В. Экспериментальные исследования изгибаемых бетонных элементов с комбинированным армированием стальными и стеклопластиковыми стержнями / В. В. Тур, В. В. Малыха // Вестн. Полоц. гос. ун. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8. – С. 58–65.
7. Волик, А. Р. К вопросу замены металлической арматуры на стеклопластиковую в изгибаемых бетонных балках / А. Р. Волик, Е. К. Волик // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: материалы XX междунар. науч. – метод. семинара / М-во образования Респ. Беларусь, ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: В.Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2016. – С. 19–22.
8. Почебыт, А. А. Железобетонные балки с комбинированным армированием / А. А. Почебыт // Наука - 2017 : сборник научных статей. В 2 ч. Ч. 1/ Учреждение образования «Гродненский гос. ун-т им. Я.Купалы». – Гродно : ГрГУ им. Я. Купалы, 2017. – С.328 –330.