

УДК 624.012

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛЕФИБРОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕСТНОМУ СЖАТИЮ

канд. техн. наук, доц. **Н.А. РАК**

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлены результаты анализа существующих методов расчета прочности элементов из сталефибробетона при местном сжатии. Предложена методика расчета прочности элементов из сталефибробетона при местном концентричном сжатии. Выполнено сопоставление точности предложенной методики и методик, представленных в нормативных документах. По своей точности предложенная методика расчета значительно превышает точность методик расчета, представленных в нормах.

Ключевые слова: *сталефибробетонные конструкции, прочность элементов, сопротивление местному сжатию, методы расчета.*

Введение. В настоящее время в Республике Беларусь ведется работа по расширению масштабов применения сталефибробетонных конструкций, одним из направлений которой является разработка нормативных документов по проектированию таких конструкций. Следует отметить, что методы расчета действовавших в СССР [1] и действующих в настоящее время в Российской Федерации [2] и Украине [3] нормативных документов по проектированию сталефибробетонных конструкций приняты по аналогии методам расчета норм проектирования армоцементных конструкций [4]. Кроме того, значения коэффициентов надежности по материалам в этих документах приняты в соответствии с требованиями норм [5; 6], что не отвечает требованиям действующих в Республике Беларусь отечественных [7] и европейских [8] нормативных документов. При этом более низкие значения коэффициентов по материалам, используемым в [1–6], могут привести к снижению надежности и долговечности проектируемых конструкций.

С целью повышения надежности расчета и увеличения долговечности конструкций при разработке рекомендаций по проектированию сталефибробетонных конструкций [9; 10] осуществлена адаптация положений рекомендаций [1] к требованиям действующих в Республике Беларусь норм [7]. Однако при этом сохранена аналогия с методами расчета норм проектирования армоцементных конструкций [4].

После накопления опыта применения перечисленных рекомендаций в практике проектирования и изготовления сталефибробетонных конструкций в 2013–2015 годах разработан нормативный документ более высокого уровня ТКП 45-5.03-300-2015 «Изделия и конструкции из сталефибробетона. Правила проектирования» [11].

Обзор методов расчета сопротивления сталефибробетонных элементов при местном сжатии. Одним из направлений разработки ТКП послужило изучение возможности применения для расчета сталефибробетонных элементов на местное сжатие методик расчета, приведенных в различных нормативных документах. В связи с этим был выполнен анализ основных положений свода правил Российской Федерации (СП РФ) [2] и Государственного стандарта Украины (ДСТУ) Украины [3], касающихся расчета сталефибробетонных элементов при местном сжатии.

Согласно СП РФ [2] расчет элементов на местное сжатие при фибровом армировании (рисунок 1) производят из условия:

$$N \leq \psi R_{fb,loc} A_{fb,loc}, \quad (1)$$

где N – местная сжимающая сила от внешней нагрузки; $A_{fb,loc}$ – площадь приложения сжимающей силы (площадь смятия); $R_{fb,loc}$ – расчетное сопротивление сталефибробетона сжатию при местном действии сжимающей силы; ψ – коэффициент, принимаемый равным 1,0 при равномерном и 0,75 при неравномерном распределении местной нагрузки по площади смятия.

Значение $R_{fb,loc}$ определяют по формуле:

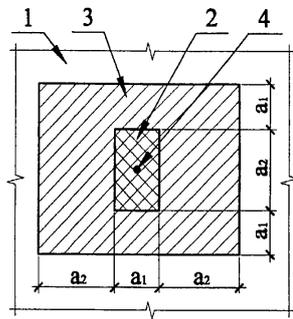
$$R_{fb,loc} = \varphi_{fb} R_{fb}, \quad (2)$$

где φ_{fb} – коэффициент, определяемый как

$$\varphi_{fb} = 0,8 \sqrt{\frac{A_{fb,max}}{A_{fb,loc}}}, \quad (3)$$

но принимаемый не более 2,5 и не менее 1,0.

В формуле (3) $A_{fb,max}$ – максимальная расчетная площадь, устанавливаемая по следующим правилам: центры тяжести площадей $A_{fb,loc}$ и $A_{fb,max}$ совпадают; границы расчетной площади $A_{fb,max}$ отстоят от каждой стороны площади $A_{fb,loc}$ на расстоянии, равном соответствующему размеру этих сторон (рисунок 1).



- 1 – элемент, на который действует местная нагрузка;
 2 – площадь смятия $A_{fb,loc}$;
 3 – максимальная расчетная площадь $A_{fb,max}$;
 4 – центр тяжести площадей $A_{fb,loc}$ и $A_{fb,max}$

Рисунок 1. – Схемы для расчета элементов на местное сжатие при расположении местной нагрузки вдали от краев элемента по [2]

Анализ приведенных выше формул показал, что раздел 6.5 «Расчет сталефибробетонных элементов на местное сжатие» СП РФ [2] полностью основан на положениях СП РФ [6], касающихся расчета железобетонных конструкций на местное сжатие. Однако для расчета в [2] применяется расчетная призматическая прочность сталефибробетона на сжатие вместо призматической прочности бетона по [6].

Раздел 6.4 «Розрахунок сталефібробетонних елементів на місцевий стиск» ДСТУ Украины [3] полностью повторяет раздел 6.5 «Расчет сталефибробетонных элементов на местное сжатие» СП РФ [2].

В стандарте Швеции [12] предложено дополнить раздел 6.7 EN 1992-1-1 абзацем следующего содержания: «(4) Для восприятия растягивающей силы, возникающей в результате действия нагрузки, должно быть предусмотрено армирование. Фибровое армирование может быть рассчитано в соответствии с разделом 6.5». Здесь следует отметить, что раздел 6.5 [12] регламентирует расчет по моделям «распорки и тяжи».

В рекомендациях SFRC Consortium [13], разработанных в Дании, предложения стандарта [12] были детализированы расчетной схемой, отражающей применение расчетной модели «распорка и тяжи» для случая плоской задачи. Согласно [13] проверка несущей способности должна основываться на использовании прямоугольной эпюры напряжений и расчетной прочности сталефибробетона осевому растяжению, учитывающей ориентацию фибр по отношению к направлению усилия в тяже.

Международной федерацией бетона FIB разработан FIB Model Code 2010 [13] в качестве основы для дальнейшего совершенствования нормативных документов по расчету конструкций из бетона. В [13] содержатся разделы, посвященные свойствам сталефибробетона как материала (раздел 5.6) и проверкам несущей способности и эксплуатационной пригодности конструкций из сталефибробетона (раздел 7.7). В FIB Model Code 2010 [13] не приведены рекомендации, касающиеся особенностей расчета сталефибробетонных конструкций при местном сжатии.

Методика расчета сопротивления сталефибробетонных элементов местному сжатию. При разработке ТКП по проектированию изделий и конструкций из сталефибробетона [11] для расчета местном сжатии была применена методика СНБ 5.03.01-02 [7]. Однако для более полного отражения физической сущности повышения прочности сталефибробетона при местном сжатии введено понятие коэффициента ψ_c , учитывающего относительный уровень бокового обжатия, создаваемого окружающим сталефибробетоном.

Значение коэффициента ψ_c следует определять при средней прочности сталефибробетона при осевом растяжении f_{ctm} и средней прочности сталефибробетона при осевом сжатии f_{cm} по формуле

$$\psi_c = \frac{f_{ctm}}{f_{cm}} \left(\sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \right) \geq 0,07 \left(\sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \right), \quad (4)$$

где A_{c0} – площадь приложения сжимающей силы (площадь смятия); A_{c1} – максимальная расчетная площадь, устанавливаемая согласно рисунку 2.

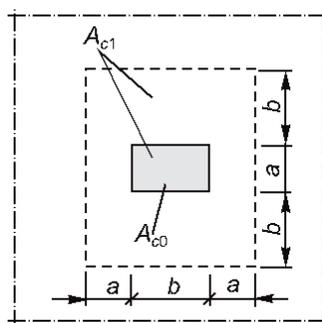


Рисунок 2. – Схема для расчета элементов на местное сжатие при расположении местной нагрузки вдали от краев элемента по [11]

Значения средних прочностей бетона при сжатии f_{fcm} и осевом растяжении f_{fctm} определяются расчетом с использованием средних прочностей бетона-матрицы при сжатии f_{cm} и осевом растяжении f_{ctm} и средних значений прочности стальной фибры на растяжение.

Коэффициент повышения ω_u , учитывающий повышение прочности сталефибробетона при смятии (местном сжатии), определяется по формуле

$$\omega_u = 1 + k_c \cdot k_f \cdot \psi_c \leq \omega_{u,max}, \quad (5)$$

где k_c – коэффициент эффективности бокового обжатия, создаваемого окружающим сталефибробетоном; принимают равным 12,5; k_f – принимают по таблице 7.4 [11]; $\omega_{u,max}$ – предельное значение коэффициента повышения прочности сталефибробетона при смятии, принимают по таблице 7.4 [11].

Расчетную прочность сталефибробетона при местном сжатии f_{fctd} следует определять по формуле

$$f_{fctd} = \omega_u \cdot f_{fcd}, \quad (5)$$

где f_{fcd} – расчетная прочность бетона при осевом сжатии, определенная при частном коэффициенте по бетону, равном $\gamma_c = 1,6$.

Оценка точности предложенной методики расчета сопротивления сталефибробетонных элементов местному сжатию

Анализ экспериментальных исследований несущей способности сталефибробетонных элементов при местном сжатии показал, что такие исследования проводились с 1970-х годов в различных странах [15–23]. При этом использовались различные виды опытных образцов (кубы, призмы, цилиндры), виды стальных фибр (прямые, волнистые, с отгибами на концах и т.д.). Как правило, варьируемыми параметрами явились объемный процент армирования фиброй и отношение нагружаемой плоскости образца к площади приложения местной нагрузки. Следует отметить, что в большинстве перечисленных публикаций данные о результатах испытаний опытных образцов приведены в графическом виде или в относительных величинах, что не позволяет с достаточной достоверностью определить фактическую несущую способность образцов. Кроме того, во многих публикациях отсутствуют данные о виде контрольных образцов сталефибробетона и прочности на сжатие этих контрольных образцов, а также о виде применяемой стальной фибры. В связи с отсутствием в доступных источниках полных данных использовать результаты большинства из перечисленных экспериментальных исследований для дальнейшего анализа оказалось невозможным.

В связи с этим точность перечисленных выше методик расчета несущей способности сталефибробетонных элементов при местном сжатии была проверена по экспериментальным данным, приведенным в исследованиях [21; 23], в которых информация представлена в достаточном для дальнейшего анализа объеме. Следует отметить, что в этих исследованиях приведены результаты определения прочности сталефибробетона на сжатие по кубам согласно [24], определения прочности сталефибробетона на растяжение при раскалывании согласно стандарту [25]. В методике расчета норм [2; 11] при расчете несущей способности сталефибробетонных элементов при местном сжатии используется призматическая прочность. В связи с этим при расчете по нормам [2; 3] призматическая прочность принималась равной $R_{fb} = 0,72R_{fb,cube}$. В методике расчета норм [11] при расчете несущей способности сталефибробетонных элементов при местном сжатии используется цилиндрическая прочность сталефибробетона. Вследствие этого при расчете по [11] цилиндрическая прочность принималась равной $f_{cm} = 0,8f_{c,cube}$. Кроме того, в методике расчета норм [11] используется прочность сталефибробетона на осевое растяжение. В связи с этим прочность сталефибробетона на осевое растяжение принималась равной 90% от полученной при испытании при раскалывании по стандарту [25]. При расчете по всем методикам не принимались во внимание ограничения верхнего предела значений коэффициентов повышения прочности сталефибробетона при местном сжатии ϕ_{fb} и ω_u , а также внешним границам площади $A_{fb,max}$ и A_{c1} . Расчет выполнен по 18 сталефибробетонным образцам, испытанным при концентричном приложении нагрузки. При этом показатели варьировались: кубиковая прочность сталефибробетона на сжатие – от 53 до 94,5 МПа; объемный процент фибрового армирования – от 0,5 до 1%; отношение нагружаемой плоскости образца к площади приложения местной нагрузки – от 2,25 до 16.

Результаты выполненных по методикам норм [2; 3; 11] расчетов несущей способности показали (рисунок 3), что расчет по нормам [11] дает хорошее совпадение с экспериментальными значениями, а расчет по нормам [2; 3] – систематическое занижение по сравнению с экспериментальными значениями.

Кроме того полученные данные свидетельствуют о том, что среднее отношение расчетных по методике норм [11] значений к опытным составило 0,988 при коэффициенте вариации 0,059, а при расчете по методике норм [2; 3] – 0,666 при коэффициенте вариации 0,065.

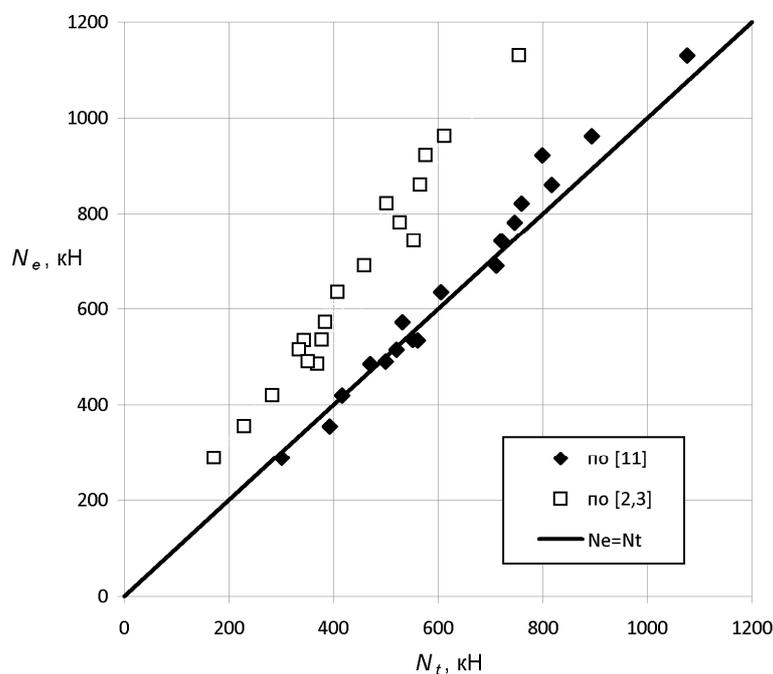


Рисунок 3. – Диаграмма сравнения экспериментальных значений несущей способности сталефибробетонных элементов на местное сжатие N_e с теоретическими значениями N_t

Заключение. В развитие положений норм [7] предложена методика расчета прочности при местном сжатии элементов из сталефибробетона, которая обеспечивает хорошую сходимость расчетных и экспериментальных значений прочности элементов. По своей точности предложенная методика расчета значительно превышает точность методик расчета норм [2; 3]; использовалась при разработке ТКП 45-5.03-300-2015 «Изделия и конструкции из сталефибробетона. Правила проектирования» [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций. – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1987. – 148 с.
2. Сталефибробетонные конструкции : СП 52-104-2006. – М. : ФГУП ЦПП, 2007. – 56 с.
3. Настанова з проектування та виготовлення сталефібробетонних конструкцій : ДСТУ-Н Б В.2.6-78:2009. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 43 с.
4. Армоцементные конструкции. Нормы проектирования : СНиП 2.03.03-85. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 24 с.
5. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования: СНиП 2.03.01-84*. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
6. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения : СП 63.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М. : Минрегион России, 2011. – 161 с.
7. Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01-02. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2003. – 132 с.
8. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1992-1-1-2009. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2009. – 207 с.
9. Рекомендации по проектированию и изготовлению строительных сталефибробетонных конструкций и технологии производства сталефибробетона с применением фрезерованной фибры ЗАО «Курган-стальмост». Р5.03.044.08. – Минск : РУП «Институт БелНИИС», 2008. – 88 с.
10. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций и технологии производства сталефибробетона с применением стальной фибры БМЗ. Р5.03.054.09. – Минск : РУП «Институт БелНИИС», 2009.

11. Изделия и конструкции из сталефибробетона. Правила проектирования : ТКП 45-5.03-300-2015. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2015. – 44 с.
12. SS 812310:2014. Fiberbetong – Dimensionering av fiberbetongkonstruktioner.
13. Design Guideline for Structural Applications of Steel Fibre Reinforced Concrete. – SFRC Consortium, 2014. – 65 p.
14. FIB Model Code for Concrete structures 2010. – Berlin, Ernst&Sohn, 2013. – 402 p.
15. Chen, W.F. Bearing capacity of fiber reinforced concrete / W.F. Chen, J.L. Carson // ACI Special Publication. – SP-44. – 1974. – P. 209–220.
16. Kameswara Rao, C.V.S. Bearing strength of steel fibre reinforced concrete / C.V.S. Kameswara Rao, R.N. Swamy // Building Science. – 1974. – Vol. 9, I. 4. – P. 263–268.
17. Al-Feel, J.R. Bearing Capacity of Fibrous Concrete / J.R. Al-Feel // Scientific Jour. Of Tikrit University. – 2000. – Vol. 7, No. 1. – P. 56–64.
18. Al-Ta'an, S.A. Bearing capacity of steel fibrous concrete / S.A. Al-Ta'an, J.A. Al-Hamdony // Al-Rafidain Engineering. – 2005. – Vol. 14, No1. – P. 1–11.
19. Klotz, S. Ultrahochfester Beton unter Teilflächenbelastung : Dissertation for the degree Doctor of Engineering (Dr.-Ing.) / S. Klotz. – Universität Leipzig, 2008. – 225 p. (in German).
20. Zhao, J. Deep research on fundamental problems of local compression of concrete under anchorages / J. Zhao. – Harbin institute of technology, 2008.
21. Experimental and numerical study on the load-bearing behavior of steel fiber reinforced concrete for precast tunnel lining segments under concentrated loads / R. Breitenbücher [et al.] // Proceedings of Joint ACI-fib International Workshop : Fibre Reinforced Concrete : from Design to Structural Applications (FRC 2014). – P. 431–443.
22. Research of Local Compression Concrete Reinforced by Steel Fibres / V. Keras [et al.] // Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering. – 2015. – Vol. 2, No. 11. – P. 72–78.
23. Song, F. Steel Fiber Reinforced Concrete Under Concentrated Load : Dissertation for the degree Doctor of Engineering (Dr.-Ing.) / F. Song. – Ruhr University, Bochum, 2017. – 178 p.
24. EN 12390-3:2009. Testing hardened concrete. – Part 3 : Compressive strength of test specimens. – CEN, Brussels, 2009. – 22 p.
25. EN 12390-6:2009. Testing hardened concrete. – Part 6 : Tensile splitting strength of test specimens. – CEN, Brussels, 2009. – 14 p.

Поступила 08.12.2017

A BEARING STRENGTH DESIGN FOR STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

M. RAK

In article the analysis of existing methods of calculation of strength of steel fibre concrete elements is made at local compression. The design procedure of strength of steel fibre concrete elements is offered at local concentric compression. Comparison of accuracy of the offered design procedure and the procedures presented in standard documents is executed.

Keywords: *steel-fiber-concrete structures, strength of elements, resistance to local compression, calculation methods.*