

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-49-56

Донченко О.М.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: kafedrasigsh@mail.ru

СОПРОТИВЛЕНИЕ КОРОТКИХ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕЦЕНТРЕННОМУ СЖАТИЮ С БОЛЬШИМИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТАМИ

Аннотация. В статье рассмотрена методика расчета коротких бетонных элементов при внецентренном сжатии с большими эксцентриситетами. Проведен анализ нормативных методик расчета внецентренно-сжатых элементов и установлены причины несоответствия расчетных значений экспериментальным для бетона классов В15-В60. Приведены уравнения условий равновесия, деформаций, физические законы и геометрические соотношения, разработанные автором на основании анализа результатов многочисленных экспериментальных лабораторных исследований бетонных и железобетонных элементов в условиях центрального и внецентренного сжатия и изгиба. Проведено численное исследование несущей способности внецентренно-сжатых элементов с большими эксцентриситетами (от 0,167 до 0,45h) и различной прочности бетона на сжатие в сопоставлении с данными других исследований и нормативной методикой. Результаты показали, что несущая способность большинства рассчитанных элементов по сравнению с определенной по нормативной методике оказалась на 20–25 % больше, а поперечная жесткость на 30–35 %. Установлено, что разработанное решение дает качественно более правильные и количественно более точные результаты во всем диапазоне изменения эксцентриситетов и прочности бетона, чем полученные с помощью нормативной литературы, осуществляя дифференцированный подход к различным по прочности бетонам. Аналитические зависимости разработанной методики, полученные в замкнутой форме, могут быть рекомендованы для использования в проектной практике.

Ключевые слова: внецентренно-сжатые элементы, большие эксцентриситеты, условия равновесия, предельные усилия и деформации, предельная сжимаемость бетона, коэффициент пластичности бетона.

Введение. Значительная часть коротких внецентренно-сжатых бетонных элементов – подпорные стены, пилоны, колонны, столбы и диафрагмы жесткости – работают в условиях больших эксцентриситетов, и точность их расчетов существенно влияет на надежность и экономичность строительства [1–3]. От элементов с малыми эксцентриситетами они отличаются не только двухзначными эпюрами напряжений и деформаций в поперечном сечении, но и наличием растянутой зоны бетона и горизонтальных или наклонных трещин на его наименее напряженной грани. Физически разделение на эти случаи определяется положением нормальной сжимающей силы N – на грани или за пределами ядра сечения, что аналитически определяется величиной ее относительного эксцентриситета, равного $e_0/h \geq 0,167$ [4–6].

Несмотря на столь существенное различие случаев, методика, которая описана в СП 63.13330.2018, назначает их расчет одинаково – путем установления величины внешней продольной сжимающей силы N только сопротивлением сжатой зоны бетона прямоугольной эпюрой напряжений с центром по линии ее действия, без определения напряженно-деформированного состояния (НДС) растянутой зоны поперечного сечения, как это приведено на рис. 1, а,

отражая их несущую способность простейшей аналитической зависимостью:

$$N \leq A_b R_b = R_b b h (1 - \frac{2e_0}{h}) \quad (1)$$

Таким образом, нормативная методика искусственно наделяет реальный бетонный элемент свойствами односторонних связей, то есть рассматривает его работающим только на сжатие и не сопротивляющимся растягивающим напряжениям и деформациям, тем самым постулируя, что исчерпание сопротивления внецентренно-сжатого элемента, независимо от величины относительного эксцентриситета e_0/h , всегда начинается с появления горизонтальной или наклонной трещины на наименее напряженной (сжатой) грани с разделением его на две взаимно независимые вертикальные призмы, одна из которых подвержена центральному сжатию, а другая – отстранена от каких-либо воздействий.

К достоинствам нормативного решения относится его исключительная простота и хорошо знакомый инженеру аналитический аппарат. Однако его точность и надежность недостаточны для развития бетонных и железобетонных конструкций, поскольку позволяет получать довольно точные результаты только для бетонов невысокой прочности классов В12,5-В20. Для бетонов классов В40-В60 погрешности нормативной методики достигают 20 %.

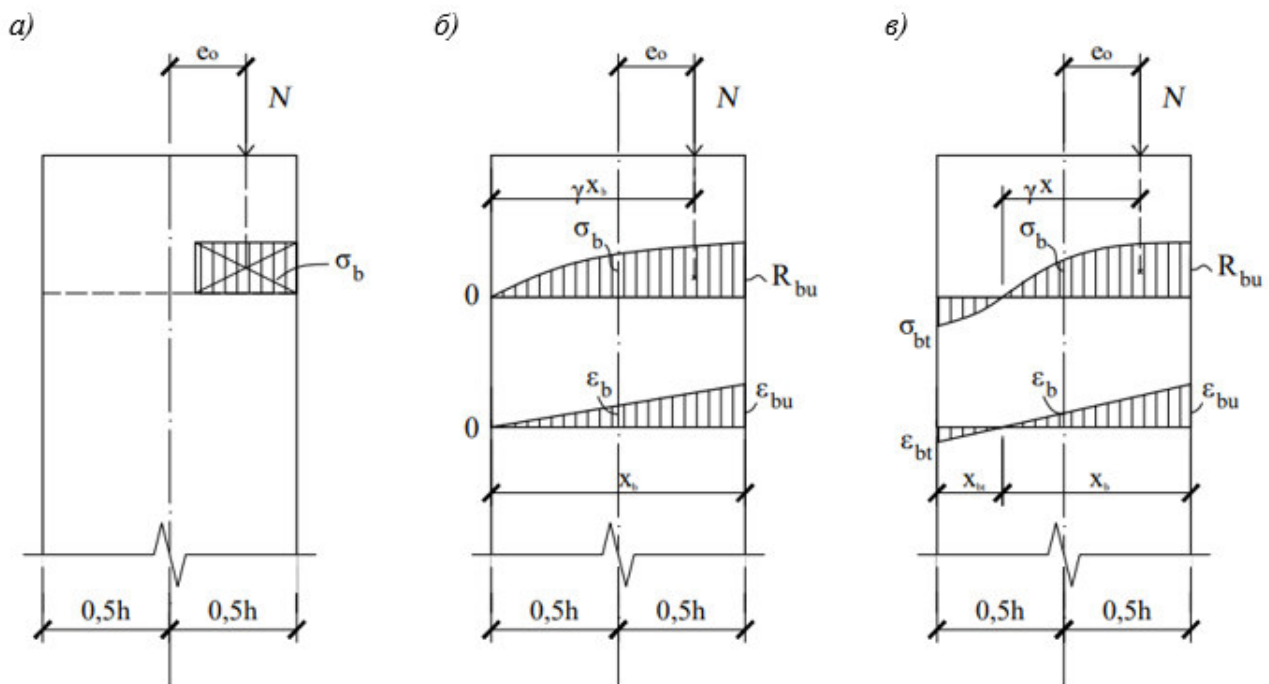


Рис. 1. Физические модели НДС в поперечном сечении внецентренно-сжатого элемента с большими эксцентриситетами: а – по нормам; б и в – в решениях автора

Несмотря на известные успехи в исследовании строительных материалов, достоверная физическая теория работы и сопротивления внецентренно-сжатого бетона еще не создана и действующие нормы проектирования и расчета вынуждены прибегать к существенно упрощенным решениям и методикам. Но естественный ход событий, в первую очередь, постоянное внедрение в практику строительства новых эффективных видов бетонов, в том числе композитных и высокопрочных, выдвигает настоятельную необходимость создания физически обоснованной теории сопротивления бетонных и железобетонных конструкций внецентренному сжатию и изгибу [7, 8]. Главное, чтобы она была общей для широкого круга применяемых материалов, базировалась на действительных физических предпосылках и допущениях, не противоречащих друг другу, а также была более точной для различных случаев внецентренного сжатия. Естественное при этом усложнение математического аппарата в условиях широкого использования электронно-вычислительных машин может быть допущено без ограничений.

Методы, оборудование, материалы. В БГТУ им. В.Г. Шухова разработаны новая физическая теория работы и расчет внецентренно-сжатых бетонных элементов, лишенные недостатков нормативной методики [9]. В основу теории положен ряд общепринятых и выдвигаемых автором новых гипотез и предпосылок, а именно:

- в общем случае внецентренного сжатия бетона верное решение возможно лишь при совместном рассмотрении и использовании условий равновесия предельных усилий и деформаций;
- в расчетах должны использоваться только зависимости, описывающие действительные (нелинейные) свойства бетона, который не наделяется свойствами абсолютной упругости или пластичности. Это реальный упругопластический материал, обладающий свойствами двусторонних связей, то есть работающий на сжатие и растяжение;
- по условиям работы, внецентренно-сжатые элементы, в предельном состоянии разрушения сжатого бетона, рассчитываются без учета сопротивления их растянутой зоны;
- законы однородного НДС центрального сжатия бетона (эпюры и диаграммы напряжений и деформаций) не переносятся однозначно на описание его неоднородного НДС при внецентренном сжатии, для которого характерны градиенты сопротивлений и предельных деформаций, а трансформируются с увеличением их значений на наиболее напряженной грани;
- для условий деформации принимается закон плоских сечений;
- важнейшим фактором общего решения для бетона является его основное свойство, отличающее от абсолютно упругих материалов – пластичность;

– коэффициенты полноты эпюры нормальных напряжений бетона заранее не задаются, а определяются в ходе общего решения;

– в качестве критерия прочности принимается предельная сжимаемость бетона при неоднородном НДС, которое можно определить в экспериментах прямыми методами.

Основная часть. Формализация авторских предпосылок и гипотез строгими физическими моделями НДС в поперечном сечении бетонного элемента (рис. 1, б, в), отображаемые соответствующими аналитическими зависимостями при нахождении искомого продольного усилия сжатия N , приводит к необходимости решения следующей системы совместных уравнений:

I. Условия равновесия:

$$N = \omega_{bu} b x_{bu} R_{bu} \quad (2)$$

$$N e_0 \leq \omega_{bu} b x_{bu}^2 (1 - \gamma_{bu}) R_{bu} \quad (3)$$

II. Условия деформаций:

$$\varepsilon_{bu} / x_{bu} = \varepsilon_{bt} / x_{bt} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{bu} = \varepsilon_b (1 + 6e_0/h) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{bt} = \varepsilon_b (1 - 6e_0/h) \quad (6)$$

III. Физические законы:

$$\lambda = 1 / (1,25 + 0,015 \cdot R_b) \quad (7)$$

$$\varepsilon_b = 1,25 \cdot 10^{-3} + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot R_b \quad (8)$$

$$\sigma_b = \varepsilon_b E_b / (1 + \lambda E_b \varepsilon_b / R_b) \quad (9)$$

$$R_b = \varepsilon_{bu} E_b / (1 + \lambda E_b \varepsilon_{bu} / R_b) \quad (10)$$

IV. Геометрические соотношения:

$$h = x_b + x_{bt} \quad (11)$$

$$\omega_{bu} = \int_0^x \sigma_b d_z = R_b \left[1 - \frac{R_b}{\lambda \varepsilon_{bu} E_b} \ln \left(1 - \frac{\lambda \varepsilon_{bu} E_b}{R_b} \right) \right] / \lambda R_{bu} \quad (12)$$

$$\gamma_{bu} = \int_0^x \sigma_b z dz = 0,333 (2,5 - \omega_{bu}) \quad (13)$$

Аналитические зависимости вышеприведенных условий равновесия предельных усилий, деформаций и геометрических соотношений являются хорошо известными и в дополнительном объяснении не нуждаются. А уравнения и аналитические зависимости, отражающие физические законы, разработанные автором на основании анализа результатов многочисленных экспериментальных лабораторных исследований бетонных и железобетонных элементов в условиях центрального и внецентренного сжатия и изгиба, требуют определенных пояснений.

Так, зависимость (7) для определения коэффициента пластичности бетона λ , являющегося важнейшим свойством упругопластических материалов, установлена автором на основании

энергетических принципов – как отношение работы, затраченной на пластическое деформирование, к общей работе, пошедшей на его разрушение при центральном сжатии (рис. 2).

Зависимость (8) позволяет получать теоретические значения предельных относительных деформаций укорочения коротких центрально-сжатых бетонных призм из различных по прочности бетонов при исчерпании их сопротивления, установленного по результатам опытных экспериментальных исследований [10].

Зависимости (9) и (10) отображают кривую, ограничивающую эпюру нормальных напряжений внецентренно-сжатого элемента (рис. 2). В связи с невозможностью прямыми методами экспериментально определять градиенты краевых напряжений укорочения при исчерпании сопротивления бетона, в качестве основы физического закона при его неоднородном напряженно-деформированном состоянии принимаем кривую деформирования, полученную с постоянной скоростью при осевом нагружении, то есть без ниспадающей ветви, с теоретической экстраполяцией вперед. Эти монотонные дробно-рациональные функции выгодно отличаются от других аналитических зависимостей отсутствием экстремума, то есть открытым с одной стороны интервалом. Их теоретическая экстраполяция вперед позволяет подобным образом наиболее просто и с наименьшими погрешностями отобразить эпюру нормальных напряжений и деформаций бетона при неоднородном НДС внецентренного сжатия бетона [11–13].

Анализ обработки по методу наименьших квадратов опытных результатов деформирования различных по прочности тяжелых бетонов при центральном сжатии позволяет полагать, что достаточно точно эти кривые можно провести так, чтобы они удовлетворяли трем точкам: началу координат ($\sigma_b = 0$), микротрещинообразования ($\sigma_b = 0,4R_b$), и последней устойчивой при измерении точке ($\sigma_b = 0,9R_b$), сохраняя для удобства практических расчетов условие равенства начального секущего модуля деформаций E'_b его нормативному значению E_b . Полученные по зависимостям (9) и (10) теоретические значения ($\sigma_b \varepsilon_b$, $R_{bu} \varepsilon_{bu}$) хорошо соответствуют результатам многочисленных экспериментов с бетонами различной прочности при центральном и внецентренном сжатии.

Необходимо отметить, что полученная автором на основании обработки многочисленных опытных данных зависимость (10) отображает принятый в качестве основного деформационный критерий прочности бетона, соответствующий концепции о том, что при неоднородном НДС исчерпание сопротивления наступает

вследствие достижения его наиболее напряженными (сжатыми) фибрами градиентов предельной сжимаемости. Теоретические значения ε_{bu} и R_{bu} , получаемые по (10), всегда больше ε_b и

R_b , и хорошо соответствуют опытным данным исследований для различных по прочности бетонов при внецентренном сжатии и изгибе.

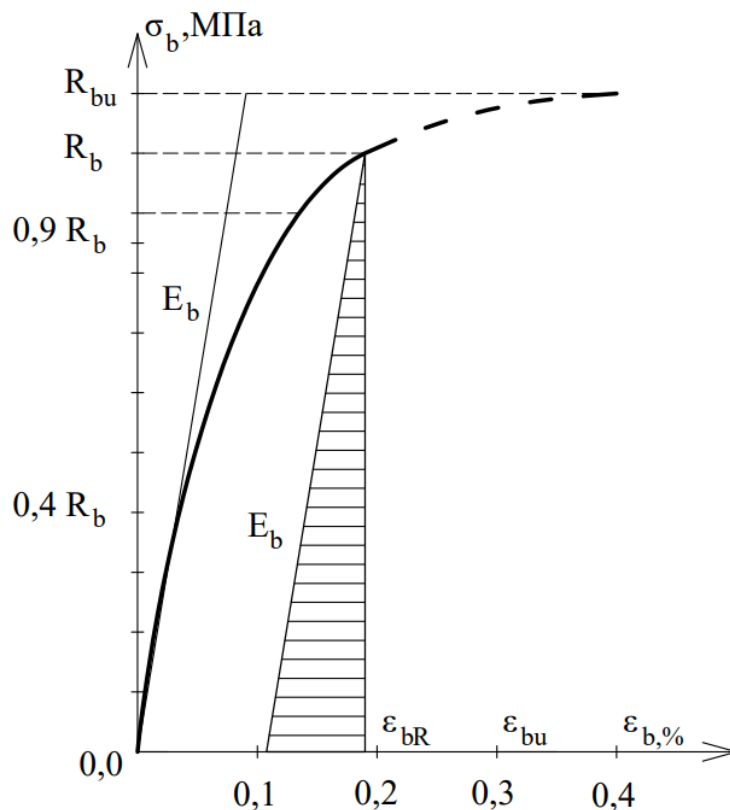


Рис. 2. Деформирование бетона при центральном (ε_b, R_b) и внецентренном сжатии (ε_{bu}, R_{bu})

Теперь эта сложная задача легко решается, поскольку мы располагаем системой всех необходимых совместных уравнений (2–13). На основании разработанного решения составлены алгоритмы и программы машинного счета для электронно-вычислительных машин, по которым искомое значение N устанавливается быстро [14]. Незатруднителен и соответствующий ручной счет, последовательность которого приведена ниже.

При заданных значениях класса бетона B , размеров поперечного сечения b и h и длины внецентренно-сжатого элемента, величины относительного эксцентриситета l_0/h – по зависимостям (5), (6) и (8) определяются соответственно значения ε_b , ε_{bu} и ε_{bt} , располагая которыми, устанавливаются по (4), (7) и (10) значения x_{bu} , λ и R_{bu} . Далее по уравнению (12) определяется величина ω_{bu} , позволяющая по зависимости (3) определить искомое значение продольной сжимающей силы N . В случае необходимости, определив по зависимости (13) величину координаты γ_{bu} , можно по зависимости (4) произвести проверку полученного решения.

Для установления качественного соответствия и количественной оценки степени точности

разработанного теоретического решения и аналитических зависимостей были проведены соответствующие машинные и ручные численные расчеты относительной несущей способности внецентренно-сжатых элементов с большими эксцентриситетами (от $0,167$ до $0,45h$) классов бетона по прочности на сжатие от $B15$ до $B60$ в сопоставлении с данными других исследований [15–20] и нормативной методикой. Установлено, что разработанное решение дает качественно более правильные и количественно более точные результаты во всем диапазоне изменения этих эксцентриситетов и прочности бетона, чем в нормах, осуществляя дифференцированный подход к различным по прочности бетонам.

Разработанное теоретическое решение позволяет получить ряд важнейших следствий. Так, установлено, что несущая способность большинства рассчитанных элементов [9, 10], по сравнению с определенной по нормативной методике, оказалась на 20–25 % больше, а поперечная жесткость на 30–35 %.

Выводы. Основанная на наиболее физически достоверных, строгих предположениях и гипотезах, разработанная теория сопротивления и методика расчета коротких бетонных элементов

при внецентренном сжатии с большими эксцентриситетами оказалась наиболее общей и точной для различных по прочности бетонов.

Высокая степень точности разработанного теоретического решения позволяет считать оправданным и возможным учет особенностей деформирования бетона при неоднородном НДС градиентов предельных краевых сопротивлений и деформаций, для разработки верных физических теорий работы и сопротивления бетонных и железобетонных конструкций при внецентренном сжатии и изгибе. Аналитические зависимости разработанной методики, полученные в замкнутой форме, могут быть рекомендованы для использования в проектной практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Старишко И.Н. Варианты и случаи, предлагаемые для расчетов внецентренно сжатых элементов // Бетон и железобетон. 2012. № 3. С. 14–20.
2. Кодыш Э.Н., Никитин И.К., Трекин Н.Н. Расчет железобетонных конструкций из тяжёлого бетона по прочности, трещиностойкости и по деформациям. М.: Изд-во АСВ, 2011. 352 с.
3. Тамразян, А.Г. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 29–35.
4. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов на кратковременную динамическую нагрузку // Строительство: наука и образование. 2013. № 4. С. 2.
5. Reliability Analysis for Eccentrically Loaded Columns. ACI Structural Journal. American Concrete Institute; 2005. 102(5). Available from: doi:10.14359/14663.
6. Lechman M., Stachurski A. Determination of stresses in RC eccentrically compressed members using optimization methods // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1922(130003). doi:10.1063/1.5019133.
7. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного и коробчатого сечений из высокопрочного бетона при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2018. № 6(80). С. 32–43.
8. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. Часть II // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 9–13.
9. Донченко О.М., Никулин А.И., Литовкин Н.И. Анализ теории сопротивления и методики расчета внецентренно сжатых железобетонных элементов // Сб. трудов «Строительные конструкции, здания и сооружения». Белгород: БТИСМ, 1988. С. 3–13.
10. Донченко О.М., Никулин А.И., Литовкин Н.И. Надежность и экономичность теории сопротивления внецентренно сжатых железобетонных элементов // Тезисы докладов к предстоящей Всесоюзной конференции: «Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном моделировании». Белгород, 1989. Ч. 11. Т. 1.
11. Cherpurnenko V., Rusakova E., Bugayan I., Vysokovskiy D., Babakhina L. Calculation of eccentrically compressed reinforced concrete columns under various creep laws // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 281(01050). doi:0.1051/e3sconf/202128101050.
12. Никулин, А.И. Ломтев И.А., Никулина Ю.А. Прочность внецентренно сжатых железобетонных элементов с трещинами в растянутой зоне // Технические науки в мире: от теории к практике : Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону: Инновационный центр развития образования и науки, 2015. С. 58–61.
13. Ильин Н.А., Мордовский С.С., Мальгина В.А., Киреева Н.А. К расчету прочности внецентренно-сжатого железобетонного элемента прямоугольного сечения // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10. № 1(38). С. 4–8. doi: 10.17673/Vestnik.2020.01.1.
14. Св. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616266 Российская Федерация. Определение прочности и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов прямоугольного поперечного сечения. Оpubл. 15.06.2020 / А. И. Никулин, А. Ф. К. Аль-Хаваф. Заявитель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».
15. Foster S., Attard M. Experimental Tests on Eccentrically Loaded High Strength Concrete Columns. ACI Structural Journal. American Concrete Institute. 1997. Vol. 94(3). doi:10.14359/481.
16. Szcześniak A., Stolarski A. Numerical analysis of failure mechanism of eccentrically compressed reinforced concrete columns // Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation. 1st Edition. 2016. Pp. 1325–1329. doi:10.1201/9781315641645-217.
17. Адищев В.В., Иванов А.И., Петрова О.В., Мальцев В.В. Применение нелинейных диаграмм деформирования бетона для расчета внецен-

тренно сжатых железобетонных колонн // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 9(717). С. 5–19.

18. Савин С.Ю. К построению деформационных критериев особого предельного состояния внецентренно-сжатых элементов железобетонных каркасов зданий и сооружений // Строительство и реконструкция. 2020. № 5(91). С. 59–69. doi:10.33979/2073-7416-2020-91-5-59-69.

19. Masiuk H., Aleksiievets V., Aleksiievets I., Masiuk V. Calculated reliability of eccentrically

compressed concrete columns under the action of low cycle loading with alternating eccentricities // Strength of Materials and Theory of Structures. 2020. Vol. 104. Pp. 289–298. doi:10.32347/2410-2547.2020.104.289-298.

20. Trapko T., Musiał M. The effectiveness of CFRP materials strengthening of eccentrically compressed reinforced concrete columns // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2011. Vol. 1. Pp. 249–262. doi:10.1016/s1644-9665(12)60187-3.

Информация об авторах

Донченко Олег Михайлович, кандидат технических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 23.11.2021 г.

© Донченко О.М., 2022

Donchenko O.M.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

E-mail: kafedrasigsh@mail.ru

RESISTANCE OF SHORT CONCRETE ELEMENTS TO OFF-CENTER COMPRESSION WITH LARGE ECCENTRICITIES

Abstract. *The paper considers the methodology of calculation of short concrete elements under eccentric compression with large eccentricities. The analysis of normative methods of calculation of eccentrically-compressed elements has been carried out and the reasons of non-compliance of design values with experimental ones for concrete of B15-B60 classes have been established. The equations of equilibrium conditions, deformations, physical laws and geometrical relations developed by the author on the basis of the results analysis of numerous experimental laboratory researches of concrete and reinforced concrete elements under central and eccentric compression and bending are presented. The numerical investigation of the bearing capacity of eccentrically compressed elements with large eccentricities (from 0.167 to 0.45h) and different compressive strengths of concrete in comparison with the data of other researches and normative methods has been made. The results showed that the bearing capacity of the majority of calculated elements compared to the normative method turned out to be 20–25 % higher, and transverse stiffness by 30–35 %. It has been established that the developed solution gives qualitatively more correct and quantitatively more exact results in the whole range of eccentricities and concrete strength than those obtained by means of normative literature, realizing a differentiated approach to different concrete strengths. The analytical dependences of the developed method, obtained in closed form, can be recommended for use in design practice.*

Keywords: *eccentrically compressed elements, large eccentricities, equilibrium conditions, ultimate forces and deformations, ultimate compressibility of concrete, plasticity factor of concrete.*

REFERENCES

1. Starishko I.N. Variants and cases proposed for calculations of eccentrically compressed elements [Varianty i sluchai, predlagaemye dlya raschetov vnecentrenno szhatyh elementov]. Beton i zhelezobeton. 2012. No. 3. Pp. 14–20. (rus)

2. Kodesh E.N., Nikitin I.K., Trekin N.N. Calculation of Reinforced Concrete Structures of Heavy Concrete for Strength, Fracture Resistance and Deformations [Raschet zhelezobetonnykh konstrukcij iz tyazhylogo betona po prochnosti, treshchinos-tojkosti i po deformatsiyam]. Moscow: Publishing House ASV, 2011. 352 p. (rus)

3. Tamrazyan A.G. Calculation of eccentrically compressed reinforced concrete elements under dynamic loading under fire loads [Raschet vnecentrenno szhatyh zhelezobetonnykh elementov pri dinamicheskom nagruzenii v usloviyah ognevnykh vozdeystvij] Industrial and Civil Engineering. 2015. No. 3. Pp. 29–35. (rus)

4. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Calculation of eccentrically compressed reinforced concrete elements for short-term dynamic loading [Raschet vnecentrenno szhatyh zhelezobetonnykh elementov na kratkovremennuyu dinamicheskuyu nagruzku]. Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie. 2013. No. 4. P. 2. (rus)

5. Reliability Analysis for Eccentrically Loaded Columns. *ACI Structural Journal*. American Concrete Institute; 2005. 102(5). Available from: doi:10.14359/14663
6. Lechman M., Stachurski A. Determination of stresses in RC eccentrically compressed members using optimization methods. *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 1922(130003). doi:10.1063/1.5019133
7. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I. Results of experimental studies of structures of square and box sections of high-strength concrete in torsion with bending [Rezultaty eksperimental'nyh issledovaniy konstrukcij kvadratnogo i korobchatogo sechenij iz vysokoprochnogo betona pri kruchenii s izgibom]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2018. No. 6(80). Pp. 32–43. (rus)
8. Kaprielov S.S., Travush V.I., Karpenko N.I. Modified high strength concretes of classes B80 and B90 in monolithic structures. Part II [Modificirovannye vysokoprochnye betony klassov V80 i V90 v monolitnykh konstrukciyah. CHast' II]. *Stroitel'nye materialy*. 2008. No. 3. Pp. 9–13. (rus)
9. Donchenko O.M., Nikulin A.I., Litovkin N.I. Analysis of the Theory of Resistance and Calculation Techniques of eccentrically Compressed Concrete Elements [Analiz teorii soprotivleniya i metodiki rascheta vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov] *Sb. trudov «Stroitel'nye konstrukcii, zdaniya i sooruzheniya»*. Belgorod: BTISM, 1988. Pp. 3–13. (rus)
10. Donchenko O.M., Nikulin A.I., Litovkin N.I. Reliability and efficiency of resistance theory of noncentrally compressed reinforced concrete elements [Nadezhnost' i ekonomichnost' teorii soprotivleniya vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov]. «Fundamental'nye issledovaniya i novye tekhnologii v stroitel'nom modelirovanii». Belgorod, 1989. Part 11. Vol. 1. (rus)
11. Chepurnenko V., Rusakova E., Bugayan I., Vysokovskiy D., Babakhina L. Calculation of eccentrically compressed reinforced concrete columns under various creep laws. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 281(01050). doi:10.1051/e3sconf/202128101050
12. Nikulin A.I., Lomtev I.A., Nikulina Y.A. The strength of eccentrically compressed reinforced concrete elements with cracks in the tensile zone [Prochnost' vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov s treshchinami v rastyanutoj zone]. *Tekhnicheskie nauki v mire: ot teorii k praktike*. Rostov-na-Donu: Innovacionnyj centr razvitiya obrazovaniya i nauki, 2015. Pp. 58–61. (rus)
13. Ilyin N.A., Mordovsky S.S., Malgina V.A., Kireeva N.A. To the calculation of the strength of off-center-compressed reinforced concrete element of rectangular section [K raschetu prochnosti vnecentrenno-szhatogo zhelezobetonного элемента pryamougol'nogo secheniya]. *Gradostroitel'stvo i arhitektura*. 2020. Vol. 10. No. 1(38). Pp. 4-8. doi:10.17673/Vestnik.2020.01.1 (rus)
14. State Registration Certificate for a Computer Program No. 2020616266 of the Russian Federation. Determination of Strength and Cracking Resistance of Out-of-Center Compressed Reinforced Concrete Elements of Rectangular Cross-Section [Rossijskaya Federaciya. Opredelenie prochnosti i treshchinostojkosti vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov pryamougol'nogo poperechnogo secheniya.]. Published on June 15, 2020. A.I. Nikulin, A.F. K. Al-Khawaf. Applicant FGBOU VPO "Belgorod State Technological University named after Shukhov. V.G. Shukhov". (rus)
15. Foster S., Attard M. Experimental Tests on Eccentrically Loaded High Strength Concrete Columns. *ACI Structural Journal*. American Concrete Institute. 1997. Vol. 94(3). doi:10.14359/481.
16. Szcześniak A., Stolarski A. Numerical analysis of failure mechanism of eccentrically compressed reinforced concrete columns. *Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation*. 1st Edition, 2016. Pp. 1325–1329. doi:10.1201/9781315641645-217
17. Adishev V.V., Ivanov A.I., Petrova O.V., Maltsev V.V. Application of nonlinear diagrams of concrete deformation to calculate eccentrically compressed reinforced concrete columns [Primenenie nelinejnykh diagramm deformirovaniya betona dlya rascheta vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnykh kolonn]. *News of higher educational institutions. Construction*. 2018. No. 9(717). Pp. 5–19. (rus)
18. Savin S.Yu. To the construction of deformation criteria of the special limiting state of the noncentrally compressed elements of reinforced concrete frames of buildings and structures [K postroeniyu deformacionnykh kriteriev osobogo predel'nogo sostoyaniya vnecentrenno-szhatykh elementov zhelezobetonnykh karkasov zdaniy i sooruzhenij]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2020. No. 5(91). Pp. 59–69. doi:10.33979/2073-7416-2020-91-5-59-69 (rus)
19. Masiuk H., Aleksiiievets V., Aleksiiievets I., Masiuk V. Calculated reliability of eccentrically compressed concrete columns under the action of low cycle loading with alternating eccentricities. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2020. Vol. 104. Pp. 289–298. doi:10.32347/2410-2547.2020.104.289-298
20. Trapko T., Musiał M. The effectiveness of CFRP materials strengthening of eccentrically compressed reinforced concrete columns. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2011. Vol. 1. Pp. 249–262. doi:10.1016/s1644-9665(12)60187-3

Information about the author

Donchenko, Oleg M. PhD, Professor. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 23.11.2021

Для цитирования:

Донченко О.М. Сопротивление коротких бетонных элементов внецентренному сжатию с большими эксцентриситетами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 49–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-49-56

For citation:

Donchenko O.M. Resistance of short concrete elements to off-center compression with large eccentricities. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 49–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-49-56