



УДК 624.075

DOI: 10.22227/2949-1622.2024.3.12-23

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Устойчивость железобетонных колонн, подверженных сжатию с кручением в особой расчетной ситуации

В.И. Колчунов¹, С.Ю. Савин¹, М.А. Амелина^{1*}¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация*

* margo.dremova@mail.ru

Ключевые слова: устойчивость, кручение, сжатие, колонна, железобетонные конструкции**История статьи**

Поступила в редакцию: 01.08.2024

Доработана: 20.08.2024

Принята к публикации: 28.08.2024

Для цитирования

Колчунов В.И., Савин С.Ю., Амелина М.А. Устойчивость железобетонных колонн, подверженных сжатию с кручением в особой расчетной ситуации // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 7. № 3. С. 12–23.

Аннотация. Изучено влияние процента армирования и класса прочности бетона по сжатию на устойчивость железобетонных элементов при различных соотношениях продольной силы и крутящего момента. Для целей исследования использовано численно-аналитическое решение для стержневых железобетонных элементов, учитывающее изменение жесткости при комбинированном действии продольной сжимающей силы и крутящего момента с учетом нелинейной связи между напряжениями и деформациями по Model Code и изменения прочности и деформативности бетона при сложном напряженно-деформированном состоянии по модели Г.А. Гениева. Для исследуемых железобетонных элементов построены границы области устойчивости при комбинированном действии продольной сжимающей силы и крутящего момента. Показано, что при комбинированном нагружении продольной силой и крутящим моментом для малых значений продольной силы N следует ожидать разрушение от потери прочности сечений при действии крутящего момента M . Для подверженных сжатию с кручением элементов из бетонов разных классов прочности по сжатию, но с близкими значениями эффективного процента армирования α_s , установлено снижение безразмерной продольной силы α_n и безразмерного крутящего момента α_m по мере роста класса прочности бетона.

Stability of Reinforced Concrete Columns Subjected to Compression with Torsion under Accidental Action

Vitaly I. Kolchunov¹, Sergei Yu. Savin¹, Margarita A. Amelina^{1*}¹ *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation*

* margo.dremova@mail.ru

Виталий Иванович Колчунов, академик РААСН, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 1301-4838, Scopus: 57052453700, ResearcherID: M-8375-2016, ORCID: 0000-0002-6697-3388, E-mail: suwin@yandex.ru

Сергей Юрьевич Савин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; E-mail: margo.dremova@mail.ru

Мargarita Андреевна Амелина, аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, E-mail: margo.dremova@mail.ru

© Колчунов В.И., Савин С.Ю., Амелина М.А., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: stability, torsion, compression, column, reinforced concrete structures

Article history

Received: 01.08.2024

Revised: 20.08.2024

Accepted: 28.08.2024

For citation

Kolchunov V.I., Savin S.Yu., Amelina M.A. Stability of Reinforced Concrete Columns Subjected to Compression with Torsion under Accidental Action. *Reinforced concrete structures*. 2024; 3(7): 12-23.

Abstract. The effect of reinforcement ratio and compressive strength of concrete on the stability of reinforced concrete elements at different ratios of longitudinal force to torque is examined. For the purposes of the study, an analytical solution is used for reinforced concrete bars, which takes into account the change in stiffness under the combined action of axial compressive force and torque, considering the nonlinear relationship between stresses and strains according to Model Code and the change in strength and deformability of concrete under complex stress-strain state according to the model of G.A. Geniev. For the reinforced concrete elements considered in the study, the stability region boundaries for the combined action of the axial compressive force and torque are plotted. It is shown that at combined loading by axial force and torque for small values of axial force N one should expect failure due to loss of strength of sections under the action of torque M_t . For elements made of concrete of different compressive strength classes, but with close values of effective reinforcement ratio α_s , the dimensionless axial force α_n and dimensionless torque α_m decrease as the concrete strength class increases.

ВВЕДЕНИЕ

В связи со случаями обрушений зданий, приведших к массовым жертвам [1–3], в начале 2000-х гг. в нормы проектирования ряда стран мира, включая Россию, были включены требования по учету особой расчетной ситуации [4–9], имеющей малую вероятность возникновения и небольшую продолжительность, но являющейся важной с точки зрения последствий [10]. В качестве стратегий защиты несущих систем зданий от обрушения в особой расчетной ситуации выделяют следующие: проектирование ключевых элементов таким образом, чтобы они были способны воспринимать аварийные воздействия [4, 5, 8, 9]; устройство дополнительных горизонтальных и (или) вертикальных связей [4, 5, 8, 9]; обеспечение передачи нагрузок по альтернативным путям в случае начального локального разрушения одного из несущих элементов каркаса здания [4–9]; систематический анализ рисков для зданий и сооружений [4, 8, 9]. Учитывая высокий уровень неопределенности, связанный с идентификацией явных и неявных угроз механической безопасности конструктивных систем зданий и сооружений в течение всего срока их эксплуатации, в качестве основной стратегии во всех указанных нормативных документах рассматривается метод передачи нагрузки по альтернативному пути, получивший также в отечественной научной литературе название ситуационного подхода. В рамках этого подхода предполагается проверка способности поврежденной конструктивной системы здания или сооружения сопротивляться распространению разрушений в результате начального локального отказа одного из элементов. Уместно заметить, что в результате перераспределения нагрузок может существенно изменяться напряженно-деформированное состояние несущих элементов в поврежденной конструктивной системе. В частности, вертикальные несущие элементы каркаса могут оказаться в условиях комбинированного действия сжимающей продольной силы и крутящего момента [11].

Vitaly I. Kolchunov, Full Member of RAACS, Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 4512-6499, ScopusID: 55534147800, ResearcherID: J-9152-2013, ORCID: 0000-0001-5290-3429, E-mail: asiorel@mail.ru

Sergei Yu. Savin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 1301-4838, Scopus: 57052453700, ResearcherID: M-8375-2016, ORCID: 0000-0002-6697-3388, E-mail: suwin@yandex.ru

Margarita A. Amelina, postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, E-mail: margo.dremova@mail.ru

Применительно к железобетонным сжатым элементам каркасов зданий при аварийном догружении крутящим моментом следует ожидать снижения несущей способности по продольной силе. Кроме того, наблюдается тенденция по более широкому внедрению в строительную практику высокопрочных бетонов и проектирования из них «изящных» железобетонных элементов с большой гибкостью. Это выводит на первый план проблемы, связанные с учетом влияния геометрической нелинейности деформирования и обеспечением устойчивости.

В научной литературе представлены результаты исследований несущей способности и жесткости железобетонных элементов при комбинированном действии изгибающих моментов, продольных сил и крутящего момента. В частности, сопротивление железобетонных несущих элементов рамных каркасов зданий при сложном напряженно-деформированном состоянии, вызванном изгибом с кручением, было исследовано Вл.И. Колчуновым и др. [12–14]. В этих работах на основе экспериментальных данных были сформулированы исходные предпосылки и гипотезы, позволившие получить в замкнутом виде решение задачи по определению напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при сложном напряженном состоянии с учетом аппроксимации расчетного сечения малыми квадратами. В исследованиях [12, 15] была выявлена специфика деформирования и разрушения железобетонных элементов из высокопрочного бетона, состоящая в образовании единичной (дискретной) трещины и узком диапазоне изменения нагрузок от достижения предельного состояния эксплуатационной пригодности до предельного состояния несущей способности.

В исследованиях Lei et al. [16] установлено влияние интенсивности поперечного армирования на трещиностойкость железобетонных элементов из базальтофибробетона при изгибе с кручением. Трехосное напряженно-деформированное состояние, создаваемое в таких элементах, приводило к повышению трещиностойкости. Deng [17] вместе с соавторами предложили расчетную модель железобетонного элемента, подверженного сжатию с кручением с учетом наличия спиральной пространственной трещины. В исследовании было выявлено снижение несущей способности элемента при комбинированном действии сжимающей силы и кручения. Аналогичные результаты снижения несущей способности по мере роста крутящего момента были экспериментально установлены Chen et al. [18] для железобетонных колонн и Selmy & El-Salakawi [19] для модели стеклофибробетонной опоры. Причем крутильная жесткость снижалась быстрее изгибной. Следует заметить, что в представленных исследованиях принятые гибкости элементов не оказывали существенного влияния на их продольный изгиб. Вопросы устойчивости железобетонных элементов при кратковременных и длительных нагрузках рассмотрены в исследованиях Р.С. Санжаровского и А.Д. Беглова [20, 21], А.Г. Тамразяна [22] и др. Однако в этих работах не рассматривалось влияние на устойчивость комбинированного действия продольной силы и крутящего момента, а также снижение жесткости при сложном напряженно-деформированном состоянии — сжатии с кручением.

В работе [23] было предложено аналитическое решение и рассмотрен пример расчета устойчивости стержневого железобетонного элемента при сжатии с кручением с учетом снижения изгибной и крутильной жесткости при сложном напряженном состоянии. Данное решение может быть использовано для оценки влияния конструктивных параметров и соотношения продольной силы и крутящего момента на устойчивость железобетонных элементов при их аварийном догружении. В связи с этим цель рассматриваемой работы состоит в оценке влияния процента армирования и класса прочности бетона по сжатию на устойчивость железобетонных элементов при различных соотношениях продольной силы и крутящего момента.

МЕТОД

Для исследования приняты железобетонные элементы прямоугольного сечения 100×50 мм длиной 2000 мм, отличающиеся армированием и классом бетона по сжатию. Рассматриваются элементы, армированные продольной арматурой А500С диаметром 8 мм (рис. 1, а) и диаметром 6 мм (рис. 1, б), а также бетоны В40, В80, В120 (таблица). Граничные условия предполагают жесткую заделку на одном конце и шарнирное закрепление на противоположном, допускающее свободное кручение. К шарнирно закрепленному сечению элемента прикладывается сосредоточенная продольная сила и крутящий момент (рис. 1, с). Выбранные размеры элемента предполагают последующее изготовление и экспериментальное исследование моделей для подтверждения достоверности исходных предпосылок.

Масштабный эффект в данном исследовании не учитывается. Как было показано Bazant [24], масштабный эффект оказывает влияние на картину трещинообразования и распространения повреждений в отдельных элементах, однако механизмы разрушения элементов модели и реального объекта достаточно похожи. Таким образом, использование масштабных моделей объектов допустимо для анализа механизмов их разрушения и оценки применимости критериев несущей способности.

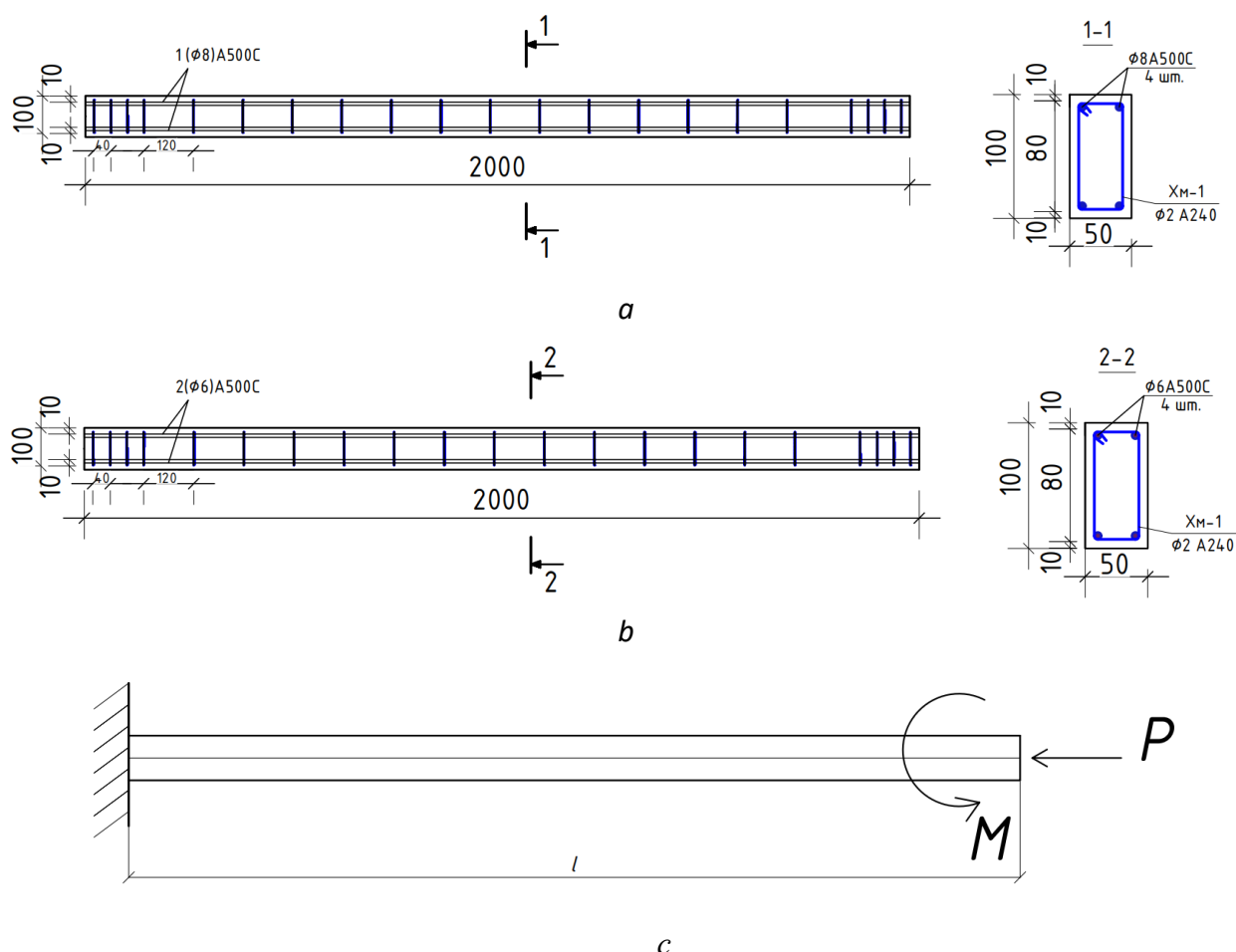


Рис. 1. Схема армирования железобетонных колонн (а, б) и их расчетная схема (с)
Fig. 1. Reinforcement scheme of reinforced concrete columns (a, b) and their design scheme (c)

Для численно-аналитического исследования устойчивости рассматриваемых элементов при варьировании соотношения между продольной силой и крутящим моментом используются исходные предпосылки и решение, приведенные в работе [23] и состоящие в следующем:

- потеря устойчивости рассматривается с позиции смены формы равновесия упругопластического стержневого элемента (бифуркационный критерий);
- до момента потери устойчивости в элементе предполагается отсутствие трещин;
- влияние стесненной деформации сечений не учитывается на расстоянии от опорных закреплений, превышающих размер сечения;
- для описания деформирования бетона при сложном напряженно-деформированном состоянии, вызванном сжатием с кручением, используются зависимости напряжений от деформаций по [25] в сочетании с критерием прочности при трехосном напряженно-деформированном состоянии по Г.А. Гениеву [26].

Конструктивные параметры железобетонных элементов
Design parameters of reinforced concrete elements

Класс бетона Concrete grade	B120	B80	B40
Диаметр арматуры А500С Rebar diameter А500С	ø8		
Величина критической силы, кН Critical force value, kN	$P_{cr} = 156,15$	$P_{cr} = 135,90$	$P_{cr} = 120,60$
Диаметр арматуры А500С Rebar diameter А500С	ø6		
Величина критической силы, кН Critical force value, kN	$P_{cr} = 143,10$	$P_{cr} = 124,20$	$P_{cr} = 108,00$

Для учета касательных напряжений от кручения стержневого элемента используется функция напряжений Φ , удовлетворяющая граничным условиям на контуре сечения:

$$\Phi = A \left(z^2 - \frac{b^2}{4} \right) \left(y^2 - \frac{h^2}{4} \right), \tag{1}$$

где b, h — размеры поперечного сечения элемента; z, y — координаты произвольной точки сечения, отсчитываемые от его геометрического центра; параметр A , согласно [23], определяется из выражения:

$$A = \frac{-\frac{E_{c1} \cdot \theta}{2 \cdot (1 + \nu)} \cdot \frac{k \cdot \varepsilon_{c1} - \varepsilon}{\varepsilon_{c1} + (k - 2) \cdot \varepsilon}}{\left(z^2 - \frac{b^2}{4} \right) + \left(y^2 - \frac{h^2}{4} \right)}, \tag{2}$$

где E_{c1} — модуль деформации при напряжениях, равных пределу прочности по сжатию, принимаемый по [25]; ν — коэффициент Пуассона; k — отношение начального модуля упругости бетона к E_{c1} ; ε_{c1} — относительная деформация при напряжениях, равных пределу прочности по сжатию, принимаемые по [25]; ε — относительная деформация в произвольной точке сечения.

Для принятой функции напряжений (1) выполняются условия:

$$\tau_{xy} = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}; \quad \tau_{xz} = \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \tag{3}$$

где τ_{xy}, τ_{xz} — касательные напряжения от действия крутящего момента.

Деформированное состояние стержневого элемента при сжатии с кручением описывается системой дифференциальных уравнений (4):

$$\begin{cases} D_z \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -M_t \cdot \frac{\partial w}{\partial x} - P \cdot v; \\ D_y \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -M_t \cdot \frac{\partial v}{\partial x} - P \cdot w, \end{cases} \quad (4)$$

где v, w — перемещения вдоль осей y и z стержневого элемента; P, M_t — продольная сила и крутящий момент; D_z, D_y — изгибные касательно-модульные жесткости сечения элемента относительно соответствующих координатных осей, связанных с геометрическим центром сечения.

Решением уравнения (4) в линеаризованной постановке согласно [27] является следующее выражение:

$$P_{cr} = P_{cr}(M_t) = \frac{4 \cdot D_{\min}^2 \cdot \pi^2 - M_t^2 \cdot l_0^2}{4 \cdot l_0^2 \cdot D_{\min}}, \quad (5)$$

где l_0 — расчетная длина элемента.

В отличие от известного решения для упругих стержней [27] в (5) применительно к железобетонным элементам вводится минимальная касательно-модульная жесткость сечений $D_{\min}$, определяемая, согласно [23], для деформированного состояния элемента по формуле:

$$\begin{aligned} D_{\min} &= D_{\min}(P, M_t) \\ &= \iint_{F_1} \frac{d}{d\varepsilon} \left(E_{c11} \cdot \frac{k_1 \cdot \varepsilon_{c11} - \varepsilon}{\varepsilon_{c11} + (k_1 - 2) \cdot \varepsilon} \right) \cdot y^2 dz dy + \dots \\ &+ \iint_{F_n} \frac{d}{d\varepsilon} \left(E_{c1n} \cdot \frac{k_n \cdot \varepsilon_{c1n} - \varepsilon}{\varepsilon_{c1n} + (k_n - 2) \cdot \varepsilon} \right) \cdot y^2 dz dy + E_s \cdot A_{s,tot} \cdot \left(\frac{h}{2} - a \right)^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где k_n — коэффициент, равный отношению начального модуля упругости бетона к модулю деформации при напряжениях, равных пределу прочности по сжатию; ε_{c1n} — относительные деформации бетона при напряжениях, равных пределу прочности по сжатию. Параметры k_n, ε_{c1n} принимаются постоянными в пределах каждого из малых квадратов, которыми разбивается сечение, и учитывают изменение прочности бетона при трехосном напряженном состоянии согласно критериям прочности по Г.А. Гениеву [26].

Из (5) критический момент при фиксированной сжимающей силе P может быть определен по формуле:

$$M_{t,cr} = 2 \cdot \left(D_{\min} \cdot \left(\frac{\pi^2 \cdot D_{\min}}{l^2} - P \right) \right)^{0,5}. \quad (7)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты численно-аналитического расчета устойчивости железобетонных элементов (табл.) при варьировании прочности бетона, процента продольного армирования и соотношения продольной силы и крутящего момента приведены на рис. 2–4.

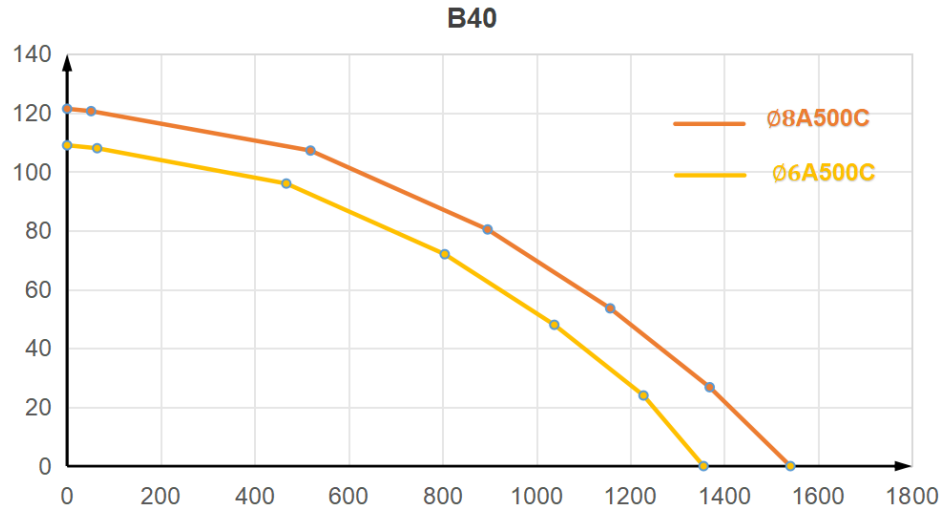


Рис. 2. Диаграммы зависимости величины критической силы от крутящего момента для железобетонного элемента из бетона класса B40

Fig. 2. Diagrams of critical force versus torque for a reinforced concrete element made of concrete of class B40

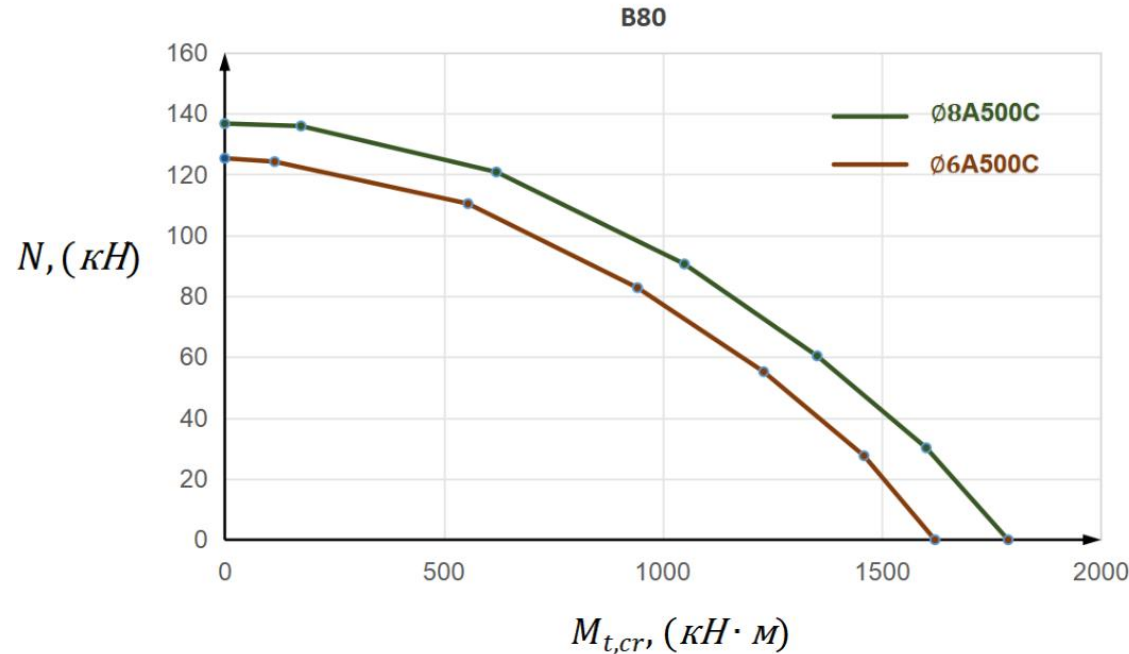


Рис. 3. Диаграммы зависимости величины критической силы от крутящего момента для железобетонного элемента из бетона класса B80

Fig. 3. Diagrams of critical force versus torque for a reinforced concrete element made of concrete of class B80

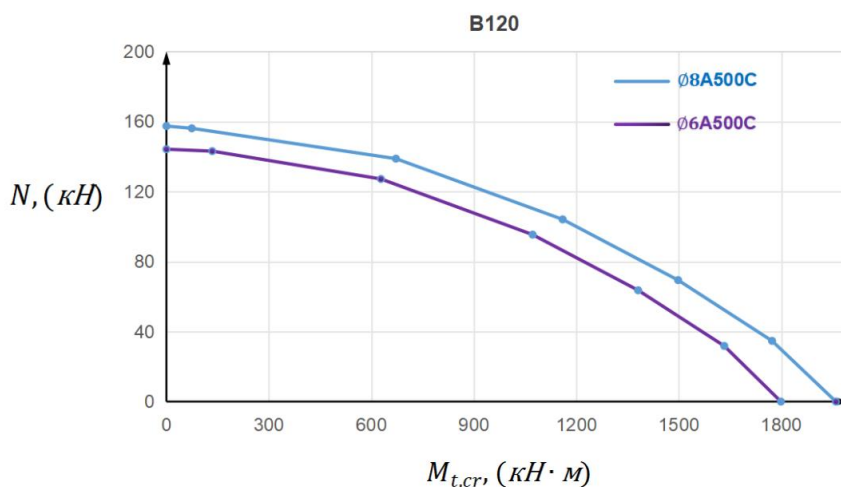


Рис. 4. Диаграммы зависимости величины критической силы от крутящего момента для железобетонного элемента из бетона класса B120

Fig. 4. Diagrams of critical force versus torque for a reinforced concrete element made of concrete of class B120

Приведенные на рис. 2–4 диаграммы зависимости величины критической силы от крутящего момента представляют собой границы области устойчивости рассматриваемых железобетонных элементов при сжатии с кручением. Увеличение процента армирования и класса бетона по прочности на сжатие ожидаемо привели к увеличению значений критических сил в абсолютных величинах. Однако из рис. 4 видно, что влияние процента армирования для элементов из высокопрочного бетона класса B120 было менее значительным, чем для бетонов B40 и B80: кривые $N - M_t$ для Ø6 и Ø8 оказались ближе друг к другу. Следует отметить, что потеря устойчивости рассматриваемых элементов по бифуркационному критерию при отсутствии сжимающей продольной силы согласно диаграммам на рис. 2–4 происходит при значениях крутящего момента, превышающих прочность пространственных сечений по СП 63.13330. Из этого следует, что при малых значениях N можно ожидать разрушение от потери прочности сечений при действии крутящего момента M_t .

Для возможности сопоставления на рис. 5 результаты расчета представлены в безразмерных координатах (безразмерная продольная сила α_n — безразмерный крутящий момент α_m) при различных значениях эффективного процента армирования α_s . Безразмерные параметры, принятые на рис. 5, связаны с абсолютными величинами продольных сил N , крутящих моментов M_t и процентом армирования $\mu = \frac{A_s}{b \cdot h_0}$ следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}\alpha_n &= \frac{N}{f_c \cdot b \cdot h_0}; \\ \alpha_m &= \frac{M_t}{f_c \cdot b \cdot h_0^2}; \\ \alpha_s &= \frac{f_y \cdot A_s}{f_c \cdot b \cdot h_0},\end{aligned}\tag{8}$$

где f_c — прочность бетона при одноосном сжатии; f_y — предел текучести стали.

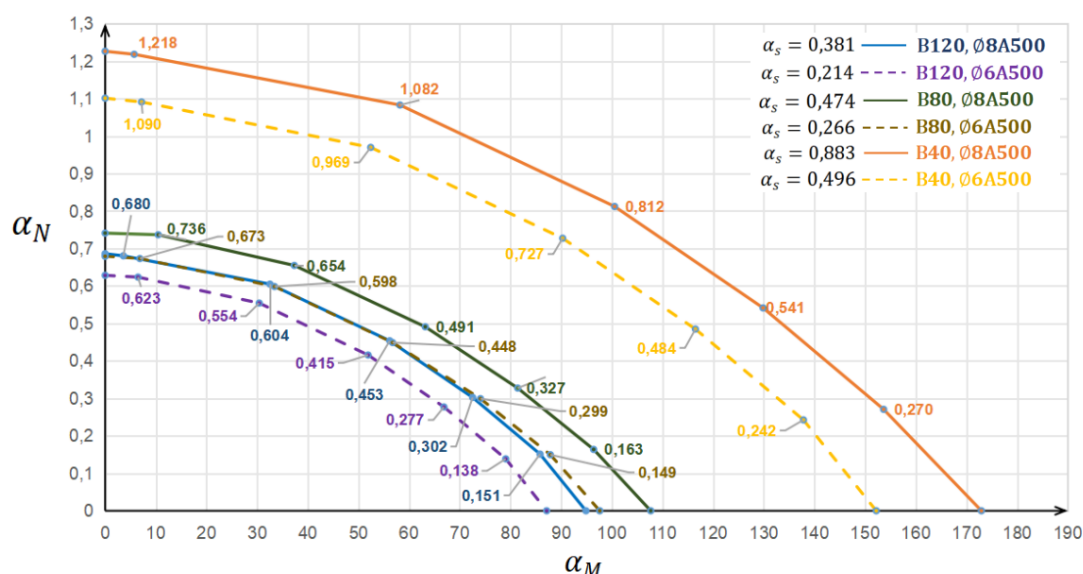


Рис. 5. Диаграммы зависимости величины критической силы от крутящего момента для железобетонных элементов в безразмерных координатах при различных значениях эффективного процента армирования
Fig. 5. Diagrams of critical force versus torque for reinforced concrete elements in dimensionless coordinates at different values of effective percentage of reinforcement

Из рис. 5 видно, что в относительных координатах границы области устойчивости железобетонных элементов, подверженных сжатию с кручением, пропорциональны эффективному проценту армирования α_s для каждого из рассмотренных классов бетона по прочности на сжатие по отдельности. Однако рассматривая бетоны разных классов прочности с близкими значениями α_s , можно видеть снижение безразмерной продольной силы α_n и безразмерного крутящего момента α_m по мере роста класса бетона по прочности на сжатие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе численно-аналитического решения выполнена оценка влияния процента армирования и класса прочности бетона по сжатию на устойчивость железобетонных элементов при различных соотношениях продольной силы и крутящего момента.

Для рассмотренных в исследовании железобетонных элементов построены границы области устойчивости при комбинированном действии продольной сжимающей силы и крутящего момента. При этом расчетные значения усилий при потере устойчивости по бифуркационному критерию в области больших значений крутящих моментов превышают прочность пространственных сечений. Таким образом, при комбинированном нагружении продольной силой и крутящим моментом для малых значений продольной силы N можно ожидать разрушение от потери прочности сечений при действии крутящего момента M_t .

Установлено, что для подверженных сжатию с кручением элементов из бетонов разных классов прочности по сжатию, но с близкими значениями эффективного процента армирования α_s происходит снижение относительного значения продольной силы α_n и относительного значения крутящего момента α_m по мере роста класса прочности бетона.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-49-10010, URL: <https://rscf.ru/project/24-49-10010/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bažant Z.P., Verdure M. Mechanics of Progressive Collapse: Learning from World Trade Center and Building Demolitions // J Eng Mech. 2007. Vol. 133. No. 3. Pp. 308–319.
2. Tagel-Din H., Rahman N.A. Simulation of the Alfred P. Murrah federal building collapse due to blast loads // AEI 2006: Building Integration Solutions — Proceedings of the 2006 Architectural Engineering National Conference. 2006. Vol. 2006. P. 32.
3. Kong X., Smyl D. Investigation of the condominium building collapse in Surfside, Florida : a video feature tracking approach // Structures. 2022. Vol. 43. Pp. 533–545.
4. ASCE 76–23. Standard For Mitigation Of Disproportionate Collapse Potential In Buildings And Other Structures. American Society of Civil Engineers, 2023. 62 p.
5. UFC 4-023–03. Design of Buildings To Resist Progressive Collapse. Design of Buildings To Resist Progressive Collapse. 2016. No. November. Pp. 34–37.
6. General Services Administration Alternate Path Analysis & Design Guidelines For Progressive Collapse Resistance Approved For Public Release. Distribution Unlimited GSA Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. 2013.
7. СП 385.132580.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. М. : Минстрой России, Стандартинформ, 2018.
8. CEN Comité Européen de Normalisation. EN 1991-1-7: eurocode 1 – actions on structures – part 1–7: general actions – accidental actions. Brussels (Belgium) : CEN, 2006.
9. Строительные правила Республики Беларусь. СП 5.03.01–2020. Бетонные и железобетонные конструкции (Concrete and reinforced concrete structures). Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020.
10. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 (ред. от 02.07.2013). М. : Президент Российской Федерации, 2009.
11. Karayannis C.G., Naoum M.C. Torsional behavior of multistory RC frame structures due to asymmetric seismic interaction // Eng Struct. Elsevier, 2018. Vol. 163. No. July 2017. Pp. 93–111.
12. Kolchunov V.I. Deplanation hypotheses for angular deformations in reinforced concrete structures under combined torsion and bending // Building and reconstruction. 2022. Vol. 100. No. 2. Pp. 3–12.
13. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Protchenko M.V. Moments in reinforced concrete structures under bending with torsion // Building and reconstruction. 2021. Vol. 95. No. 3. Pp. 27–46.
14. Kolchunov V., Dem'yanov A., Protchenko M. The new hypothesis angular deformation and filling of diagrams in bending with torsion in reinforced concrete structures // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19. No. 4. Pp. 972–979.
15. Kolchunov V.I., Dem'yanov A.I. The modeling method of discrete cracks in reinforced concrete under the torsion with bending // Magazine of Civil Engineering. St-Petersburg State Polytechnical University, 2018. Vol. 81. No. 5. Pp. 160–173.
16. Lei Y. et al. Comparison of torsional damage and size effects of BFRP- and steel-reinforced concrete beams with different stirrup ratios // Eng Struct. 2023. Vol. 285. P. 116042.
17. Deng J., Cao S., Peng Z. Crack-based model for seismic behaviour of concrete columns under combined compression-bending and torsion // Structures. 2023. Vol. 56. P. 104998.
18. Chen Y. et al. Bending restoring force model of angle-steel reinforced concrete columns under combined torsion // Structures. 2023. Vol. 55. Pp. 2186–2198.
19. Selmy Y.M., El-Salakawy E.F. Behaviour of circular concrete bridge columns internally reinforced with GFRP under reversed-cyclic loading including torsion // Structures. 2024. Vol. 59. P. 105680.
20. Беглов А.Д., Санжаровский П.С. Теория расчета железобетонных конструкций на прочность и устойчивость. Современные нормы и евростандарты. М. : АСВ, 2006. 218 p.
21. Санжаровский П.С. Устойчивость элементов строительных конструкций при ползучести. Л. : Изд-во Ленинградского университета, 1984. 217 p.
22. Тамразян А.Г. К устойчивости внецентренно сжатых железобетонных элементов с малым эксцентриситетом с учетом реологических свойств бетона // Железобетонные конструкции. 2023. Vol. 2. № 2. Pp. 48–57.

23. Kolchunov V.I., Savin S.Y., Amelina M.A. Stability of a reinforced concrete column under compression with torsion caused by accidental action // *Building and Reconstruction*. 2024. No. 2. Pp. 59–73.
24. Bažant Z.P., Kwon Y.W. Failure of slender and stocky reinforced concrete columns: tests of size effect // *Materials and Structures*. 1994. Vol. 27. Pp. 79–90. DOI: 10.1007/BF02472825
25. FIB Model Code 2010. CEB and FIP, 2011.
26. Гениев Г.А., Кисюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М. : Стройиздат, 1974. 316 с.
27. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М. : Изд-во «Наука», 1967. 984 с.

REFERENCES

1. Bažant Z.P., Verdure M. Mechanics of Progressive Collapse: Learning from World Trade Center and Building Demolitions. *J Eng Mech*. 2007; 133(3):308-319.
2. Tagel-Din H., Rahman N.A. Simulation of the Alfred P. Murrah federal building collapse due to blast loads. *AEI 2006: Building Integration Solutions — Proceedings of the 2006 Architectural Engineering National Conference*. 2006; 2006:32.
3. Kong X., Smyl D. Investigation of the condominium building collapse in Surfside, Florida : a video feature tracking approach. *Structures*. 2022; 43:533-545.
4. ASCE 76–23. Standard For Mitigation Of Disproportionate Collapse Potential In Buildings And Other Structures. American Society of Civil Engineers, 2023; 62.
5. UFC. UFC 4-023–03. Design of Buildings To Resist Progressive Collapse. Design of Buildings To Resist Progressive Collapse. 2016; November:34-37.
6. General Services Administration Alternate Path Analysis & Design Guidelines For Progressive Collapse Resistance Approved For Public Release. Distribution Unlimited GSA Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. 2013.
7. Building Code of Russian Federation. SP 385.132580.2018. Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic statements. Moscow, Ministry of RF, Standardinform, 2018. (in Russian).
8. CEN Comité Européen de Normalisation. EN 1991-1-7: Eurocode 1 – actions on structures – part 1–7: general actions – accidental actions. Brussels (Belgium), CEN, 2006.
9. Building Code of Belarus Republic SP 5.03.01–2020. Concrete and reinforced concrete structures. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of Belarus Republic, 2020. (in Russian).
10. Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures : Federal Law No. 384-FZ dated 30.12.2009 (ed. Available on 02.07.2013). Moscow, President of RF, 2009. (in Russian).
11. Karayannis C.G., Naoum M.C. Torsional behavior of multistory RC frame structures due to asymmetric seismic interaction. *Eng Struct. Elsevier*. 2018; 163(July 2017):93-111.
12. Kolchunov V.I. Deplanation hypotheses for angular deformations in reinforced concrete structures under combined torsion and bending. *Building and reconstruction*. 2022; 100(2):3-12.
13. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Protchenko M.V. Moments in reinforced concrete structures under bending with torsion. *Building and reconstruction*. 2021; 95(3):27-46.
14. Kolchunov V., Dem'yanov A., Protchenko M. The new hypothesis angular deformation and filling of diagrams in bending with torsion in reinforced concrete structures. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021; 19(4):972-979.
15. Kolchunov V.I., Dem'yanov A.I. The modeling method of discrete cracks in reinforced concrete under the torsion with bending. *Magazine of Civil Engineering*. St-Petersburg State Polytechnical University, 2018; 81(5):160-173.
16. Lei Y. et al. Comparison of torsional damage and size effects of BFRP- and steel-reinforced concrete beams with different stirrup ratios. *Eng Struct*. 2023; 285:116042.
17. Deng J., Cao S., Peng Z. Crack-based model for seismic behaviour of concrete columns under combined compression-bending and torsion. *Structures*. 2023; 56:104998.
18. Chen Y. et al. Bending restoring force model of angle-steel reinforced concrete columns under combined torsion. *Structures*. 2023; 55:2186-2198.

19. Selmy Y.M., El-Salakawy E.F. Behaviour of circular concrete bridge columns internally rein-forced with GFRP under reversed-cyclic loading including torsion. *Structures*. 2024; 59:105680.
20. Beglov A.D., Sanzharovsky R.S. Theory of calculation of reinforced concrete structures for strength and stability. *Modern Norms and Eurostandards*. Moscow, ASV, 2006; 218. (in Russian).
21. Sanzharovsky R.S. *Stability of elements of building structures under creep*. Leningrad, Leningrad University Publishing House, 1984; 217. (in Russian).
22. Tamrazyan A.G. To stability of the eccentrically compressed reinforced concrete elements with small eccentricity taking into account the rheological properties of concrete. *Reinforced Concrete Structures*. 2023; 2(2):48-57. (in Russian).
23. Kolchunov V.I., Savin S.Y., Amelina M.A. Stability of a reinforced concrete column under compression with torsion caused by accidental action. *Building and Reconstruction*. 2024; 2:59-73.
24. Bažant Z.P., Kwon Y.W. Failure of slender and stocky reinforced concrete columns: tests of size effect. *Materials and Structures*. 1994; 27:79-90.
25. FIB Model Code 2010. CEB and FIP, 2011.
26. Geniyev G.A., Kisyuk V.N., Tyupin G.A. *Plasticity theory of concrete and reinforced concrete*. Moscow, Stroyizdat, 1974; 316. (in Russian).
27. Volmir A.S. *Stability of deformable systems*. Moscow, Nauka Publishing House, 1967; 984. (in Russian).