

УДК 624.012

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Несущая способность железобетонных внецентренно сжатых элементов каркасов зданий при коррозионных повреждениях в условиях особых воздействий

С.Ю. Савин^{1*}, В.И. Колчунов¹, Н.В. Федорова¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация
*suwin@yandex.ru

Ключевые слова: железобетон, колонна, коррозия, несущая способность, несущая способность, экспозиция, гибкость

История статьи

Поступила в редакцию: 07.11.2022

Доработана: 19.11.2022

Принята к публикации: 26.11.2022

Для цитирования

Савин С.Ю., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Несущая способность железобетонных внецентренно сжатых элементов каркасов зданий при коррозионных повреждениях в условиях особых воздействий // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 46–54.

Аннотация. Воздействия агрессивных сред и, соответственно, коррозионное повреждение бетона и арматурной стали, нарушение сцепления между ними на отдельных участках приводят к изменению значений предельной высоты сжатой зоны, определяющих пластический или хрупкий механизм разрушения конструкций колонн железобетонных каркасов зданий. Целью представленного исследования являлась оценка влияния глубины коррозионного повреждения на предельную высоту сжатой зоны сечения внецентренно сжатых элементов железобетонных каркасов зданий, а также оценка несущей способности указанных элементов. В статье приведены аналитические зависимости для оценки предельного значения высоты сжатой зоны сечения коррозионно поврежденного железобетонного элемента каркаса здания при двухлинейной аппроксимации диаграммы состояния бетона.

Установлено, что рост глубины коррозионного повреждения приводит к снижению высоты сжатой зоны сечения относительно части рабочей высоты сечения, сохранившей ресурс силового сопротивления, а также к снижению несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов вследствие уменьшения эффективной рабочей высоты сечения и увеличения их гибкости. Увеличению гибкости элементов приводит к снижению величины предельной продольной силы, воспринимаемой внецентренно сжатыми железобетонными элементами. При этом увеличение относительной глубины коррозионного повреждения усиливает этот эффект вследствие увеличения эффективной гибкости таких элементов по сравнению с элементами без повреждений.

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; eLIBRARY SPIN-код: 1301-4838, Scopus: 57052453700, ResearcherID: M-8375-2016, ORCID: 0000-0002-6697-3388, E-mail: suwin@yandex.ru.

Колчунов Виталий Иванович, академик РААСН, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), заведующий кафедрой уникальных зданий и сооружений Юго-Западного государственного университета; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-code: 4512-6499, Scopus ID: 55534147800, ResearcherID: J-9152-2013, ORCID: 0000-0001-5290-3429, E-mail: asiorel@mail.ru.

Федорова Наталья Витальевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой архитектурно-строительного проектирования, директор филиала НИУ МГСУ в г. Мытищи, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 3365-8320, Scopus: 57196437054, ResearcherID: O-8119-2015, ORCID: 0000-0002-5392-9150, E-mail: fedorovanv@mgsu.ru

© Савин С.Ю., Колчунов В.И., Федорова Н.В., 2023



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

Ductility of Eccentrically Compressed Elements of RC Frame Damaged by Corrosion under Accidental Impacts

Sergey Yu. Savin^{1*}, Vitaly I. Kolchunov¹, Natalia V. Fedorova¹

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

*suwin@yandex.ru

Keywords: reinforced concrete, column, corrosion, load capacity, exposure, slenderness ratio

Article history

Received: 07.11.2022

Revised: 19.11.2022

Accepted: 26.11.2022

For citation

Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Ductility of Eccentrically Compressed Elements of RC Frame Damaged by Corrosion under Accidental Impacts. *Reinforced Concrete Structures*. 2023;1(1):46–54.

Abstract. The impact of aggressive environments and, accordingly, the corrosion damage of concrete and reinforcing steel, the violation of adhesion between them in some areas lead to a change in the values of the limiting height of the compressed zone, which determine the plastic or brittle mechanism for the destruction of structures of reinforced concrete frame buildings. The purpose of the presented study was to assess the influence of the depth of corrosion damage on the ultimate height of the compressed zone of the section of eccentrically compressed elements of reinforced concrete frames of buildings, as well as to assess the bearing capacity of these elements. The article presents analytical dependences for estimating the limit value of the height of the compressed zone of the section of a corrosion-damaged reinforced concrete element of the building frame with a two-line approximation of the state diagram of concrete.

It has been established that an increase in the depth of corrosion damage leads to a decrease in the height of the compressed section zone relative to the part of the working height of the section that retained the resource of force resistance, as well as to a decrease in the bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements due to a decrease in the effective working height of the section and an increase in their flexibility. An increase in the flexibility of the elements leads to a decrease in the magnitude of the limiting longitudinal force perceived by eccentrically compressed reinforced concrete elements. At the same time, an increase in the relative depth of corrosion damage enhances this effect due to an increase in the effective flexibility of such elements compared to elements without damage.

ВВЕДЕНИЕ

Серия аварий и разрушений зданий и сооружений, произошедших в XX – начале XXI века, такие как разрушение башен ВТЦ в Нью-Йорке, панельных многоэтажных зданий в России от взрывов природного газа и т.д., дали мощный импульс развитию нового направления в строительной науке – расчету зданий и сооружений на прогрессирующее обрушение. Разработанные к настоящему моменту нормативные документы ряда стран, в частности США, Великобритании, ЕС, России [1-7] содержат базовые положения, позволяющие выполнять проектирование с учетом требований обеспечения защиты от прогрессирующего обрушения конструктивных систем зданий и сооружений. Однако количество новых научных публикаций по данной тематике позволяет сделать вывод, что многие аспекты еще требуют дополнительного изучения. Значительное число публикаций последнего времени посвящено изучению прогрессирующего обрушения, вызван-

Sergey 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.

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), head of the department of Southwest State University; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 4512-6499, Scopus ID: 55534147800, ResearcherID: J-9152-2013, ORCID: 0000-0001-5290-3429; E-mail: asiorel@mail.ru.

Natalia V. Fedorova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Architectural and Construction Design, Director of the branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) in Mytishchi; Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 3365-8320, Scopus: 57196437054, ResearcherID: O-8119-2015, ORCID: 0000-0002-5392-9150, E-mail: fedorovaNV@mgsu.ru

ного взрывными нагрузками [8-12]. Уместно заметить, что отправной точкой для начала лавинообразного разрушения конструктивной системы может стать накопление критического уровня повреждений, вызванных воздействиями иной природы [13-14], в частности коррозионного характера [15 – 17]. При этом в подавляющем числе научных публикаций, посвященных оценке сопротивляемости каркасов зданий и сооружений прогрессирующему обрушению, в качестве критерия такого процесса рассматривается потеря прочности сечений несущих элементов системы. Однако применительно к внецентренно сжатым элементам каркасов зданий на процесс их деформирования и разрушения оказывают эффекты, вызванные явлением продольного изгиба, при оценке которых могут быть прямо или косвенно использованы критерии, связанные с устойчивостью.

Воздействия агрессивных сред и, соответственно, коррозионное повреждение бетона и арматурной стали, нарушение сцепления между ними на отдельных участках приводят к изменению значений предельной высоты сжатой зоны, определяющих пластический или хрупкий механизм разрушения конструкций колонн железобетонных каркасов зданий.

В связи с этим целью представленного исследования являлась оценка влияния глубины коррозионного повреждения на предельную высоту сжатой зоны сечения внецентренно сжатых элементов железобетонных каркасов зданий, а также оценка несущей способности указанных элементов.

МЕТОД

Для описания изменения параметров силового сопротивления по глубине коррозионно поврежденного слоя бетона примем эмпирически устанавливаемую деградационную функцию вида (рис. 1) [15, 18]:

$$K(z) = \sum_0^2 a_i z^i.$$

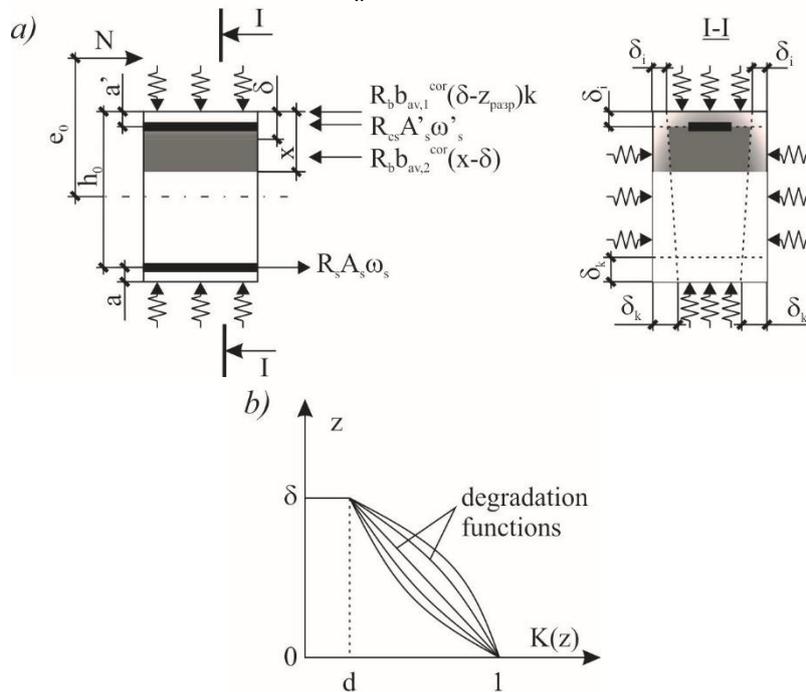


Рис. 1. Схема к расчету внецентренно сжатого коррозионно поврежденного железобетонного элемента (а), общий вид деградационных функций коррозионно поврежденного слоя (б)

Figure 1. Scheme for the calculation of an eccentrically compressed corrosion-damaged reinforced concrete element (а), a general view of the degradation functions of the corrosion-damaged layer (б)

Предельное значение высоты сжатой зоны x_R коррозионно поврежденного сечения при двухлинейной аппроксимации диаграммы состояния бетона (рис. 2) определяется выражением:

$$x_R = \frac{\alpha(h_0 - z_{\text{разр}})}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b2}K(z_{\text{разр}})}}$$

где α определяется в зависимости от деформации на глубине δ коррозионно поврежденного элемента по формуле:

- при $\varepsilon(\delta) > \varepsilon_{b1,red}$:

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{b1,red}}{2 \cdot \varepsilon_{b2}K(z_{\text{разр}})}$$

- при $\varepsilon(\delta) \leq \varepsilon_{b1,red}$ $\alpha = 0.5$.

С учетом названных допущений несущая способность внецентренно сжатого коррозионно поврежденного элемента прямоугольного элемента определяется выражениями:

- при $x \geq \delta$:

$$(N \cdot e_0 \cdot \eta)_{ult} = R_b \cdot \left[b_{av,1}^{cor} \cdot (\delta - z_{\text{разр}}) \cdot k \cdot (h_0 - \delta + z_{ц.т.,1}) + b_{av,2}^{cor} \cdot (x - \delta) \left(h_0 - \frac{x + \delta}{2} \right) \right] + \left(R_{sc} \cdot A'_s \cdot \omega'_s - \frac{N}{2} \right) (h_0 - a'), \quad (1)$$

- при $x < \delta$:

$$(N \cdot e_0 \cdot \eta)_{ult} = R_b \cdot b_{av,1}^{cor} \cdot (x - z_{\text{разр}}) \cdot k \cdot (h_0 - x + z_{ц.т.,1}) + \left(R_{sc} \cdot A'_s \cdot \omega'_s - \frac{N}{2} \right) (h_0 - a'). \quad (2)$$

В выражениях (1), (2): $\eta = 1 / \left(1 - \frac{N}{N_{cr}} \right)$ – коэффициент, учитывающий влияние продольного изгиба, который может быть определен в соответствии с действующими нормативными документами [3, 19];

N, N_{cr} – расчетное значение продольной силы, определяемое статическим расчетом несущей системы на основное сочетание нагрузок, и величина условной критической силы при потере устойчивости;

R_b, R_{sc}, R_s – расчетное сопротивление бетона сжатию, арматурной стали сжатию и растяжению соответственно;

A_s, A'_s – площадь растянутой (наименее сжатой) и сжатой продольной арматуры;

h_0 – рабочая высота сечения;

δ – глубина коррозионного повреждения элемента;

ω_s, ω'_s – коэффициенты, учитывающие снижение эффективного поперечного сечения стержней продольной растянутой и сжатой арматуры и(или) снижение сопротивления сцепления вследствие коррозионного повреждения арматуры и бетона;

$b_{av,1}^{cor}, b_{av,2}^{cor}$ – средняя приведенная ширина поперечного сечения в пределах глубины коррозионно поврежденного слоя δ и в пределах от δ до $(x - \delta)$ соответственно, определяемые из выражения.

k – коэффициент приведения площади коррозионно поврежденной части сечения.

x – высота сжатой зоны сечения, определяемая при $x \leq x_R$ по формуле:

$$x = \delta + \frac{N + R_s \cdot A_s \cdot \omega_s - R_{sc} \cdot A'_s \cdot \omega'_s - R_b \cdot b_{av,1}^{cor} \cdot (\delta - z_{\text{разр}}) \cdot k}{R_b \cdot b_{av,2}^{cor}}$$

- при $x > x_R$ по формуле:

$$x = \delta + \frac{N + R_s \cdot A_s \cdot \omega_s \cdot \frac{1+\xi_R}{1-\xi_R} - R_{sc} \cdot A'_s \cdot \omega'_s - R_b \cdot b_{av,1}^{cor} \cdot (\delta - z_{разр}) \cdot k}{R_b \cdot b_{av,2}^{cor} + \frac{2 \cdot R_s \cdot A_s \cdot \omega_s}{h_0 \cdot (1-\xi_R)}}$$

$z_{разр}$ – толщина коррозионно поврежденного слоя, отсчитываемая от наиболее сжатой грани, для которого не выполняется условие $\varepsilon \leq \varepsilon_{b2} \cdot K(z_{разр})$, т.е. исчерпан ресурс силового сопротивления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполним оценку изменения параметров силового сопротивления колонны сечением 400 x 400 мм железобетонного каркаса многоэтажного здания, подверженной воздействию агрессивной среды по всем четырем граням. Материалы конструкции колонны: бетон класса В30 (нормативное сопротивление бетона осевому сжатию $R_{b,n} = 22$ МПа, $E_b = 32500$ МПа), продольная рабочая арматура – 4 $\Phi 32$ А500 ($R_{s,n} = R_{sc,n} = 500$ МПа, $E_s = 200000$ МПа), $a = a' = 50$ мм. Варьируя параметрами глубины коррозионного повреждения $\delta(t, t_0)$; толщины коррозионно поврежденного слоя $z_{разр}$, исчерпанного ресурс силового сопротивления, и гибкостью элемента λ_l , выполним оценку изменения относительной предельной высоты сжатой зоны и определим границы областей несущей способности таких элементов в координатных осях $N - M$, соответствующие особому предельному состоянию [20]. При этом при построении диаграмм $N - M$ для учета влияния гибкости железобетонных коррозионно повреждаемых элементов на их несущую способность разделим правые и левые части выражений (1) и (2) на коэффициент влияния продольного изгиба η . Диаграммы несущей способности внецентренно сжатых коррозионно поврежденных железобетонных элементов в координатных осях $N - M$ представлены на рис. 3.

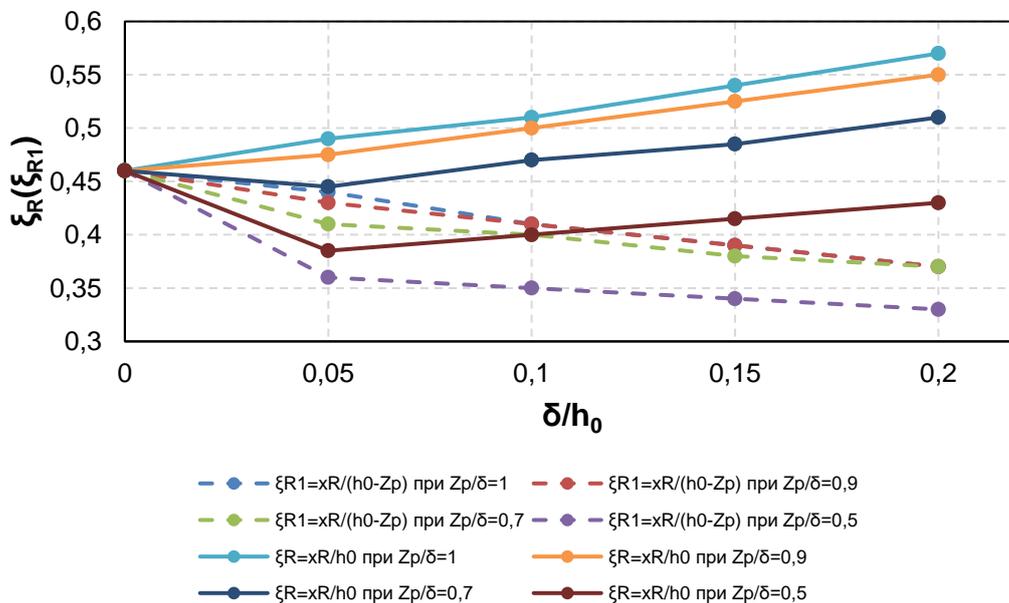


Рис. 2. Изменение относительной предельной высоты сжатой зоны коррозионно повреждаемых элементов в зависимости от глубины коррозионного повреждения и толщины слоя исчерпанного ресурс силового сопротивления

Figure 2. Change in the relative limiting height of the compressed zone of corrosion-damaged elements depending on the depth of corrosion damage and the thickness of the layer of power resistance that has exhausted its resource

Анализ графиков, приведенных на рис. 2, показывает, что увеличение глубины коррозионного повреждения сечения железобетонного элемента приводит к снижению высоты сжатой зоны сечения относительно части рабочей высоты сечения, сохранившей ресурс силового сопротивления - $(h_0 - z_{разр})$. Применительно к рабочей высоты сечения, не поврежденного коррозией, напротив, наблюдается увеличение относительной предельной высоты сжатой зоны сечения для $z_{разр}/\delta = 0,7 \dots 1$. Для $z_{разр}/\delta = 0,5$ наблюдается резкое снижение относительной предельной высоты сжатой зоны в интервале $\delta/h_0 = 0 \dots 0.05$, которое затем сменяется ростом по мере увеличения относительной глубины коррозионного повреждения.

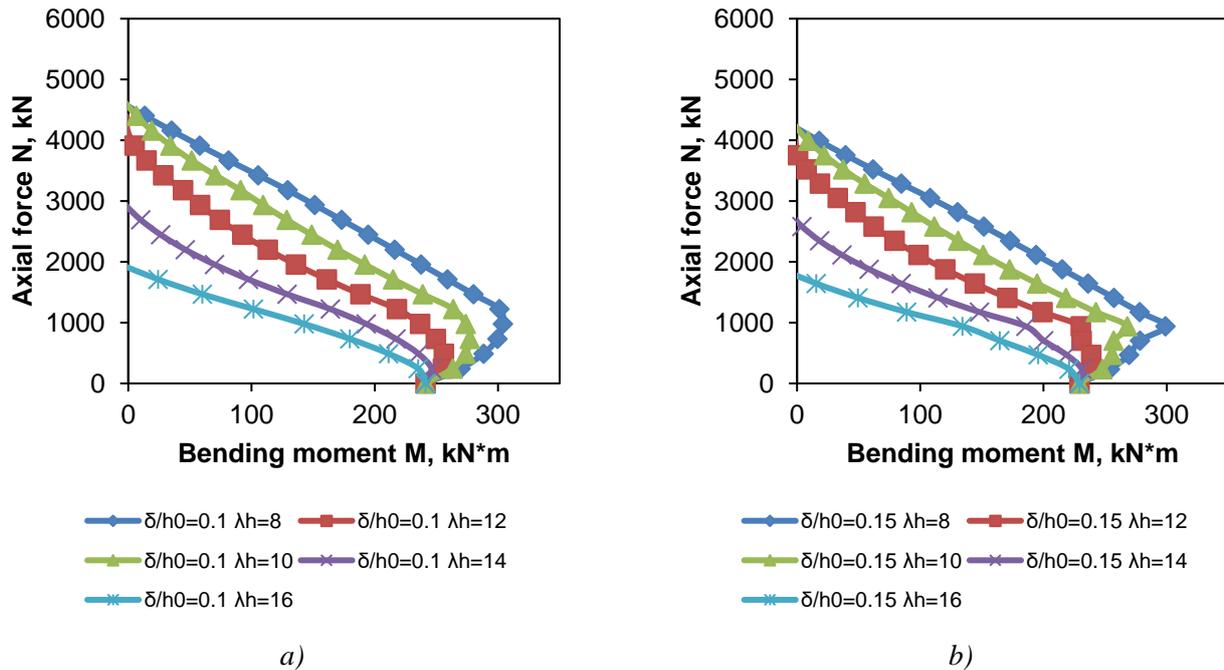


Рис. 3. Диаграммы $M - N$ в зависимости от гибкости λ_h внецентренно сжатых железобетонных элементов при $z_{разр}/\delta = 0.6$: а) $\delta/h_0 = 0.1$, б) $\delta/h_0 = 0.15$

Figure 3. Diagrams $M - N$ depending on the flexibility λ_h of eccentrically compressed reinforced concrete elements at $z_{разр}/\delta = 0.6$: а) $\delta/h_0 = 0.1$, б) $\delta/h_0 = 0.15$

С ростом глубины коррозионного повреждения (рис. 3) происходит снижение несущей способности вследствие уменьшения эффективной рабочей высоты сечения и гибкости элемента. При этом снижение предельного момента для изгибаемых элементов ($N = 0$) наступает лишь в том случае, когда стержни продольной арматуры оказываются в пределах коррозионно поврежденного слоя δ и уменьшается эффективная площадь их поперечного сечения, а также снижается сопротивление сцепления. Следует заметить, что уменьшение вводимой в расчет относительной глубины разрушенного слоя приводит к увеличению предельного значения продольной силы для фиксированной относительной глубины коррозионного повреждения δ/h_0 , что связано с перераспределением усилий на неповрежденные коррозией участки сечения в элементах со случайными и малыми эксцентриситетами продольной силы. В то же время наблюдается смещение вниз точки предельного изгибающего момента на диаграмме, что обусловлено снижением предельных деформаций сжатия $\varepsilon_{b2(bt2)}^{cor}(t)$. Уместно заметить, что относительная глубина разрушенного слоя $z_{разр}/\delta$, принятая фиксированной при построении диаграмм, в действительности будет изменяться

в процессе нагружения конструктивного элемента, реализуя механизм приспособления конструкции.

При увеличении гибкости элементов λ_h свыше 12 происходит снижение величины предельной продольной силы, воспринимаемой внецентренно сжатыми элементами со случайными и малыми эксцентриситетами. При гибкости $\lambda_h = 16$ наблюдается практически двухкратное снижение предельной продольной силы, воспринимаемой сечением, а предельный изгибающий момент соответствует случаю поперечного изгиба ($N = 0$). При этом увеличение относительной глубины коррозионного повреждения усиливает этот эффект вследствие увеличения эффективной гибкости коррозионно поврежденных элементов по сравнению с элементами без повреждений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ влияния глубины коррозионного повреждения на предельную высоту сжатой зоны сечения внецентренно сжатых элементов железобетонных каркасов зданий, а также несущую способность указанных элементов позволяет сделать следующие выводы:

1. Рост глубины коррозионного повреждения приводит к снижению высоты сжатой зоны сечения относительно части рабочей высоты сечения, сохранившей ресурс силового сопротивления, а также к снижению несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов вследствие уменьшения эффективной рабочей высоты сечения и увеличения их гибкости. При этом относительная глубина разрушенного слоя $z_{разр}/\delta$, не учитываемого в расчете, меняется в зависимости от текущего напряженно-деформированного состояния, реализуя механизм приспособления конструкции к меняющимся во времени параметрам воздействий.

2. Увеличении гибкости элементов λ_h приводит к снижению величины предельной продольной силы, воспринимаемой внецентренно сжатыми железобетонными элементами. При этом увеличение относительной глубины коррозионного повреждения усиливает этот эффект вследствие увеличения эффективной гибкости таких элементов по сравнению с элементами без повреждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. UFC 4-023-03 (Including Change 3, 2016) Unified facilities criteria. Design of buildings to resist progressive collapse. URL: https://wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc_4_023_03_2009_c3.pdf (дата обращения 18.10.2022)
2. BS 8110-1:1997 Structural use of concrete. URL: <https://csrcrecruits.files.wordpress.com/2014/04/bs8110-1-1997-structural-use-of-concrete-design-construction.pdf> (дата обращения 18.10.2022)
3. EN 1992-1-1:2009 Eurocode 2: Design of concrete structures. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf> (дата обращения 18.10.2022)
4. EN 1991-1-7:2009 General Actions – Accidental Actions. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.7.2006.pdf> (дата обращения 18.10.2022)
5. ДБН В.1.2-14:2018 Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений строительных конструкций и оснований. Киев: Министерство регионального развития, строительства и жилищно-коммунального хозяйства, 2018. URL: <https://armis.com.ua/blog/library/dbn/155-dbn-v-1-2-14-2018> (дата обращения 18.10.2022)
6. SP 296.132580.2017 Buildings and structures. Accidental actions. Moscow: Minstroy RF, 2017. URL: <https://docs.cntd.ru/document/555600219> (дата обращения 18.10.2022)
7. SP 385.132580.2018 Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic statements. Moscow: Minstroy RF, 2018. URL: <https://docs.cntd.ru/document/551394640> (дата обращения 18.10.2022)
8. Phama A.T., Tana K.H., Jun Yu J. Numerical investigations on static and dynamic responses of reinforced concrete sub-assemblages under progressive collapse // Engineering Structures. 2017. Vol. 149. Pp. 2-20. doi: 10.1016/j.eng-struct.2016.07.042
9. Al-Salloum Y. A., Abbas H., Almusallam T. H., Ngo T., Mendis P. Progressive collapse analysis of a typical RC high-rise tower // Journal of King Saud University - Engineering Sciences. 2017. Vol. 29. Pp. 313-320. doi: 10.1016/j.jksues.2017.06.005

10. Dinua F., Marginean I., Dubina D., Kovacs A., Ghicioi E. Experimental testing and numerical modeling of steel frames under close-in detonations // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 210, pp. 377-385. Doi: 10.1016/j.proeng.2017.11.091
11. Goel M. D., Agrawal D., Choubey A. Collapse Behavior of RCC Building under Blast Load // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 173, pp. 1943-1950. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.12.256
12. Elsanadedy H. M., Almusallam T. H., Alharbi Y. R., Al-Salloum Y. A., Abbas H. Progressive collapse potential of a typical steel building due to blast attacks // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 101, pp. 143-157. Doi: 10.1016/j.jcsr.2014.05.005
13. Шапиро Г.И., Обухова Л.В., Эйсман Ю.А., Сиротина Е.В. Защита от прогрессирующего обрушения жилых домов первого периода индустриального домостроения серий 1-510, 1-511, 1-515 // *Промышленное и гражданское строительство*. 2006. №4. С.32-35.
14. Kolchunov V.I., Savin S.Y. Dynamic effects in a composite two-component rods which appear when local fracture of the matrix is occurred // *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol 15, No 3, pp: 325-331. doi:10.5937/jaes15-14602
15. Бондаренко В.М., Клюева Н.В. К расчету сооружений, меняющих расчетную схему вследствие коррозионного повреждения. *Известия вузов. Строительство*. 2008. №1, С. 4-12.
16. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Экспозиция живучести железобетона // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2007. №5, С. 4-8.
17. Селяев В. П., Селяев П. В., Алимов М. Ф., Сорокин Е. В. Оценка остаточного ресурса железобетонных изгибаемых элементов, подверженных действию хлоридной коррозии // *Строительство и реконструкция*. 2017. №6. С. 49-58.
18. Чутичев О.Б. Модели расчета силового сопротивления поврежденного коррозией железо-бетонного элемента // *Строительство и реконструкция*. 2010. № 1. С. 55–59.
19. СП 63.13330.2018 "СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: Минстрой РФ, 2020. 150 с.
20. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: ОАО «НИЦ «Строительство»», 2019. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115736> (дата обращения 18.10.2022)

REFERENCES

1. UFC 4-023-03 (Including Change 3, 2016) Unified facilities criteria. Design of buildings to resist progressive collapse. URL: https://wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc_4_023_03_2009_c3.pdf (Accessed on 18.10.2022)
2. BS 8110-1:1997 Structural use of concrete. URL: <https://csrcrecruits.files.wordpress.com/2014/04/bs8110-1-1997-structural-use-of-concrete-design-construction.pdf> (Accessed on 18.10.2022)
3. EN 1992-1-1:2009 Eurocode 2: Design of concrete structures. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf> (Accessed on 18.10.2022)
4. EN 1991-1-7:2009 General Actions – Accidental Actions. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.7.2006.pdf> (Accessed on 18.10.2022)
5. ДБН В.1.2-14:2018 Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений строительных конструкций и оснований. Киев: Министерство регионального развития, строительства и жилищно-коммунального хозяйства, 2018. URL: <https://armis.com.ua/blog/library/dbn/155-dbn-v-1-2-14-2018> (Accessed on 18.10.2022)
6. SP 296.1325800.2017 Buildings and structures. Accidental actions. Moscow: Minstroy RF, 2017. URL: <https://docs.cntd.ru/document/555600219> (Accessed on 18.10.2022)
7. SP 385.132580.2018 Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic statements. Moscow: Minstroy RF, 2018. URL: <https://docs.cntd.ru/document/551394640> (Accessed on 18.10.2022)
8. Phama A.T., Tana K.H., Jun Yu J. Numerical investigations on static and dynamic responses of reinforced concrete sub-assemblages under progressive collapse. *Engineering Structures*. 2017. Vol. 149. Pp. 2-20. doi: 10.1016/j.eng-struct.2016.07.042
9. Al-Salloum Y. A., Abbas H., Almusallam T. H., Ngo T., Mendis P. Progressive collapse analysis of a typical RC high-rise tower. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 2017. Vol. 29. Pp. 313-320. doi: 10.1016/j.jksues.2017.06.005
10. Dinua F., Marginean I., Dubina D., Kovacs A., Ghicioi E. Experimental testing and numerical modeling of steel frames under close-in detonations. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 210, pp. 377-385. Doi: 10.1016/j.proeng.2017.11.091
11. Goel M. D., Agrawal D., Choubey A. Collapse Behavior of RCC Building under Blast Load. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 173, pp. 1943-1950. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.12.256
12. Elsanadedy H. M., Almusallam T. H., Alharbi Y. R., Al-Salloum Y. A., Abbas H. Progressive collapse potential of a typical steel building due to blast attacks. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 101, pp. 143-157. Doi: 10.1016/j.jcsr.2014.05.005
13. Shapiro G.I., Obuhova L.V., Eysman Yu.A., Sirotnina E.V. Protection against progressive collapse of residential buildings of the first period of industrial housing construction series 1-510, 1-511, 1-515. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2006. no 4. P.32-35.

14. Kolchunov V.I., Savin S.Y. Dynamic effects in a composite two-component rods which appear when local fracture of the matrix is occurred. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol 15, No 3, pp: 325-331. doi:10.5937/jaes15-14602
15. Bondarenko V.M., Klyueva N.V. To the calculation of structures that change the design scheme due to corrosion damage. *News of higher educational institutions. Construction*. 2008. no. 1, P. 4-12.
16. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Exposition of reinforced concrete robustness. *News of higher educational institutions. Construction*. 2007. No. 5, P. 4-8.
17. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Alimov M.F., Sorokin E.V. Estimation of residual resources of reinforced concrete bending elements subjected to the action of chloride corrosion. *Building and Reconstruction*. 2017. No 6. P. 49-58.
18. Chupichev O.B. Models for calculating the force resistance of a corrosion-damaged reinforced concrete element. *Building and Reconstruction*. 2010. No 1. P. 55–59.
19. SP 63.13330.2018 SNiP 52-01-2003 Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow: Ministry RF, 2020. 150 p.
20. GOST 27751-2014 Reliability of building structures and foundations. Basic provisions. Moscow: JSC “Re-search Center” Construction”, 2019. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115736> (Accessed on 18.10.2022)