



УДК 624.3.019.32

DOI: 10.22227/2949-1622.2024.4.5-13

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

Перераспределения усилий в статически неопределимых корродированных железобетонных балках

А.Г. Тамразян^{1*}

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация*

* tamrazian@mail.ru

Ключевые слова: железобетонные балки, перераспределения усилий, коррозия, пластический шарнир, кривизна

История статьи

Поступила в редакцию: 02.09.2024

Доработана: 22.09.2024

Принята к публикации: 27.09.2024

Для цитирования

Тамразян А.Г. Перераспределения усилий в статически неопределимых корродированных железобетонных балках // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 8. № 4. С. 5–13.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы перераспределения изгибающих моментов в статически неопределимых корродированных железобетонных балках. Отмечено, что способность железобетонной балки поворачиваться имеет решающее значение как для эксплуатационных, так и для предельных состояний, поскольку она влияет на прогиб, перераспределение моментов и поглощение энергии. Разработана математическая модель, прогнозирующая коэффициент перераспределения моментов. Перераспределение моментов позволяет балке приспособляться к изменяющимся условиям, вызванным коррозией, и обеспечивает ее структурную устойчивость. Приведен метод расчета перераспределения моментов в корродированной статически неопределимой железобетонной балке. Этот метод предполагает использование механизма поворота жесткого тела (RB), который позволяет рассчитать момент на основе сил и локального поворота сечения, что подходит для определения фактического момента в корродированном сечении балки.

Stress Redistribution in Statically Indeterminate Corroded Reinforced Concrete Beams

A.G. Tamrazyan^{1*}

¹ *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation*

* tamrazian@mail.ru

Keywords: reinforced concrete beams, stress redistribution, corrosion plastic hinge, curvature

Article history

Received: 02.09.2024

Revised: 22.09.2024

Accepted: 27.09.2024

Abstract. The paper deals with the issues of bending moment redistribution in statically indeterminate corroded reinforced concrete beams. It is noted that the ability of a reinforced concrete beam to rotate is crucial for both operational and limit states, as it affects the deflection, moment redistribution and energy absorption. A mathematical model that predicts the moment redistribution factor is developed. The redistribution of moments allows the beam to adapt to the changing conditions caused by corrosion and ensures its structural stability.

Аннот. Георгиевич Тамразян, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2636-2447, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788, E-mail: Tamrazian@mail.ru

© Тамразян А.Г., 2024



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

For citation

Tamrazyan A.G. Stress Redistribution in Statically Indeterminate Corroded Reinforced Concrete Beams. *Reinforced concrete structures*. 2024; 4(8):5-13.

A method for calculating the redistribution of moments in a corroded statically indeterminate reinforced concrete beam is presented. This method involves the use of rigid body (RB) rotation mechanism, which allows the calculation of moment based on forces and local section rotation, which is suitable for determining the actual moment in the corroded beam section.

ВВЕДЕНИЕ

В [1–12] изучены теоретические модели для расчета перераспределения моментов в корродированных балках. Используются данные из экспериментальной программы для разработки математической модели, прогнозирующей коэффициент перераспределения моментов в корродированных статически неопределимых железобетонных балках. Данная модель разработана на основе исходных параметров некорродированной балки:

$$\beta_{расч} = \left(\alpha_1 \frac{R_{sy}}{R_b} + \alpha_2 (\mu_w, \%) + \alpha_3 \frac{L}{h} \right) - \left(\alpha_4 \frac{x}{h_0} + \alpha_5 \frac{\mu_{s1}}{\mu_{s2}} \right) + K, \quad (1)$$

где $\alpha_1 = 9,372 \cdot 10^{-4}$; $\alpha_2 = 0,05$; $\alpha_3 = 0,0035$; $\alpha_4 = 0,74$; $\alpha_5 = 0,13$; $K = 0,4612$.

В предлагаемой модели коэффициенты параметров, влияющих на перераспределение моментов в корродированных статически неопределимых железобетонных балках, корректируются следующим образом.

Коэффициент перераспределения моментов после коррозии $(\beta_{расч})_{cor}$ может быть рассчитан в зависимости от статистического анализа проектных данных [13] по следующей формуле:

$$(\beta_{расч})_{cor} = \left(\alpha_1 \frac{R_{sy}}{R_b} + \alpha_2 (\mu_w, \%) + \alpha_3 \frac{L}{h} \right) - \left(\alpha_4 \frac{x}{h_0} + \alpha_5 \frac{\mu_{s1}}{\mu_{s2}} \right) + 2,5 C, \quad (2)$$

где $\alpha_1 = 7,497 \cdot 10^{-4}$; $\alpha_2 = 0,05$; $\alpha_3 = 0,0035$; $\alpha_4 = 0,6$; $\alpha_5 = 0,08$.

В (2) C представляет собой процент коррозии арматурной стали и определяется потерей площади поперечного сечения арматуры:

$$C = \frac{A_s - A_{s,cor}}{A_s}, \quad (3)$$

где A_s и $A_{s,cor}$ — площади сечения арматуры до и после коррозии, соответственно.

Разница между формулами (1) и (2) заключается в том, что формула (2) учитывает влияние коррозии на поведение конструкции. В нее вводятся дополнительные коэффициенты, связанные с изменением свойств материала под воздействием коррозии. Коэффициенты при параметрах R_{sy}/R_b , x/h_0 и μ_{s1}/μ_{s2} скорректированы для прямого учета коррозионных эффектов, что потенциально может привести к увеличению перераспределения моментов после возникновения коррозии.

Рассматривая состояние балок после воздействия коррозии, можно определить процент коррозии (C) и начальные значения параметров железобетонного сечения. Сюда входят все размеры балки, физические и механические свойства бетона и арматуры, а также распределение арматуры по всему сечению. С учетом этой информации можно рассчитать перераспределение моментов по формуле (2).

МЕТОД

Для построения более точного расчета перераспределения моментов деградация из-за воздействия коррозии может быть рассчитана следующим образом.

В Lee et al. [14] показано, как происходит снижение характеристик арматуры с уровнем коррозии C :

Ashot G. Tamrazyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN- code: 2636-2447, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788, E-mail: Tamrazian@mail.ru

$$(R_{sy})_{cor} = (1 - 1,24 C) \cdot R_{sy} \Rightarrow 0,0 < C > 0,5; \quad (4)$$

$$(R_{su})_{cor} = (1 - 1,24 C) \cdot R_{su} \Rightarrow 0,0 < C > 0,5; \quad (5)$$

$$(E_s)_{cor} = (1 - 1,24 C) \cdot E_s \Rightarrow 0,0 < C > 0,5, \quad (6)$$

где $(R_{sy})_{cor}$, $(R_{su})_{cor}$ и $(E_s)_{cor}$ — предел текучести, предел прочности и модуль упругости арматурной стали после коррозии соответственно.

С учетом этих данных можно пересчитать значение $(x/h_o)_{cor}$ в зависимости от зоны возникновения коррозии. Тогда формула (1) в условиях коррозии будет выглядеть следующим образом: В формуле (7) коэффициенты при параметрах остаются такими же, как и в формуле (1):

$$\begin{aligned} (\beta_{расч})_{cor} = & \left(9,372 \cdot 10^{-4} \frac{(R_{sy})_{cor}}{R_b} + 0,05 (\mu_w, \%) + 0,0035 \frac{L}{h} \right) - \\ & - \left((0,74 + 1,9e^C) \left(\frac{x}{h_o} \right)_{cor} + (0,13 - 0,75\sqrt{C}) \frac{(\mu_{s1})_{cor}}{(\mu_{s2})_{cor}} \right) + 0,4612 \end{aligned} \quad (7)$$

Однако для учета коррозии арматуры были внесены следующие изменения:

1. В соответствии с формулой (4) вносятся измененные значения предела текучести арматуры $(R_{sy})_{cor}$.
2. Величина $(x/h_o)_{cor}$ пересчитывается на основе новой площади арматуры после коррозии. При этом также учитывается снижение предела текучести арматуры по формуле (4).
3. Соотношение $(\mu_{s1}/\mu_{s2})_{cor}$ определяется на основе новой площади арматурной стали после коррозии.
4. Для повышения точности вычисления коэффициента перераспределения моментов в формуле (7) коэффициент при параметре (x/h_o) 0,74 заменяется на $(0,74 + 1,9e^C)$.
5. Учитывая влияние коррозии арматуры из формулы (3), предлагается изменить коэффициент при параметре (μ_{s1}/μ_{s2}) с 0,13 на $(0,13 - 0,75\sqrt{C})$.

Эти модификации повышают точность расчетов перераспределения моментов.

В статически неопределимых железобетонных балках коррозия определенных зон может привести к перераспределению моментов. Когда определенные участки железобетонной балки ослабляются из-за коррозии, несущая способность этих участков оказывается недостаточной. С другой стороны, более прочные, не подвергшиеся коррозии участки, могут принять на себя дополнительную нагрузку, чтобы предотвратить общее разрушение балки.

При этом происходит перераспределение моментов, поскольку не подвергшиеся коррозии участки воспринимают повышенные изгибающие моменты, компенсирующие снижение прочности корродированных участков. Этот механизм помогает поддерживать равновесие в конструкции и предотвращает преждевременное разрушение. Перераспределение моментов позволяет балке приспособляться к изменяющимся условиям, вызванным коррозией, и обеспечивает ее структурную устойчивость. Для увеличения изгибающего момента относительная высота сжатой зоны в этом случае уменьшается (ξ'), что можно рассчитать по формуле:

$$\xi' = (1 - 1,24 C)\xi. \quad (8)$$

Существует третий метод расчета перераспределения моментов в корродированной статически неопределимой железобетонной балке. Этот метод предполагает использование механизма поворота жесткого тела (RB). Сначала покажем механизм RB. Предположим, что на железобетонную балку действует равномерная нагрузка (w), как показано на рис. 1, а.

Под действием нагрузки железобетонная балка поворачивается, что позволяет ей приспособиться к текущей ситуации и предотвратить разрушение балки. Способность железобетонной балки поворачиваться имеет решающее значение как для эксплуатационных, так и для предельных состояний, поскольку она влияет на прогиб, перераспределение моментов и поглощение энергии. Поворот в железобетонной балке можно разделить на две составляющие: непрерывный поворот, который происходит в однородных сечениях балки и может быть

определен путем прямого интегрирования кривизны, показанной на рисунке 1, *b*; и внутренний поворот, возникающий в результате скольжения РВ в местах расположения трещин. Поэтому область, где происходит внутренний поворот и скольжение жесткого тела, называется «пластическим шарниром» (рис. 1, *c, d*).

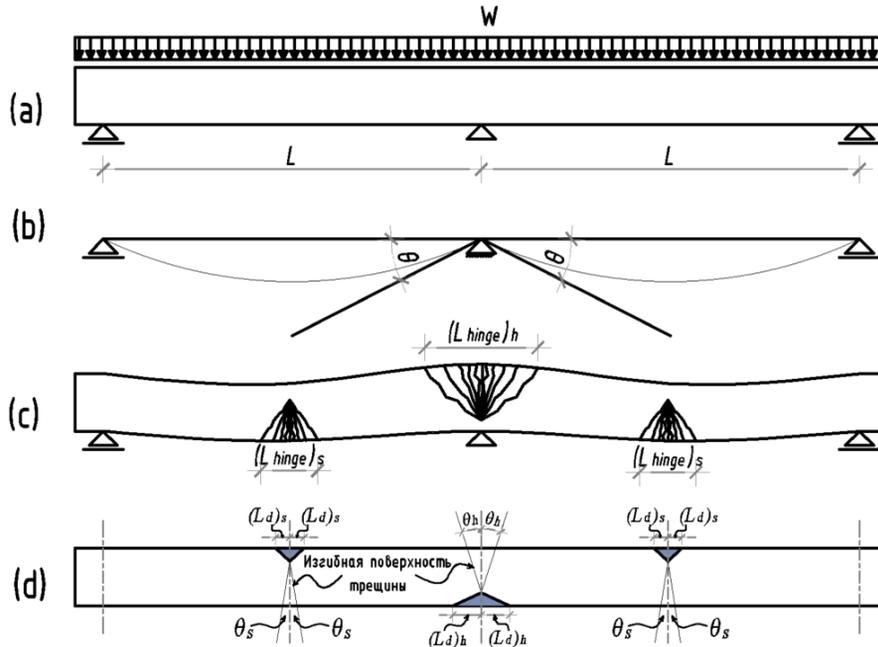


Рис. 1. Поведение железобетонной балки под приложенной нагрузкой

Fig. 1. Behavior of reinforced concrete beam under applied load

Пластический шарнир, изображенный на рис. 1, показан на испытанной железобетонной балке (рис. 2).

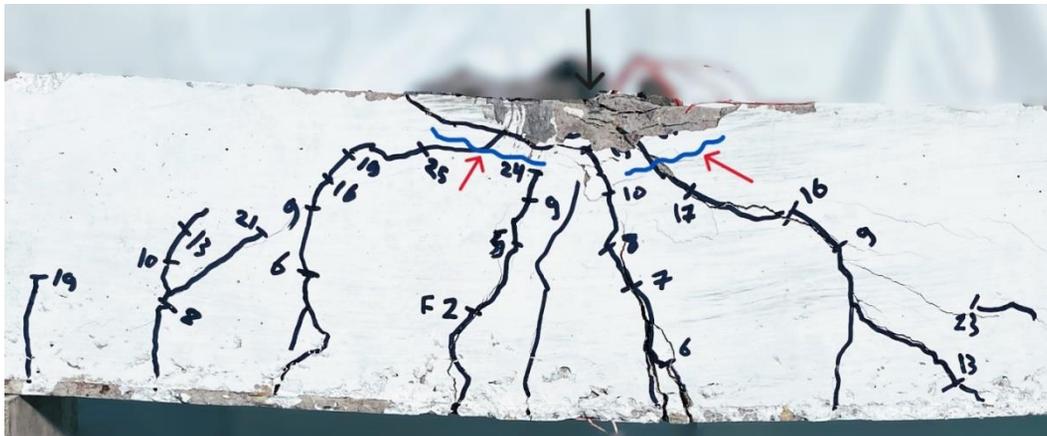


Рис. 2. Пластический шарнир в пролете испытанной железобетонной балки

Fig. 2. Plastic hinge in the span of the tested reinforced concrete beam

Для того чтобы представить пластический шарнир в области пролета балки, показанной на рис. 2, пластический шарнир на рис. 3 можно разделить на следующие компоненты:

1. Зона растяжения — от точки А до вершины трещины в точке В.
2. Зона подъема бетона — от пика трещины в точке В до точки С, где бетон находится под сжатием и следует восходящей части своей зависимости «напряжение – деформация» (как показано на рисунке).

3. Зона повреждения жесткого тела бетона (RBD) — от точки С до точки D, где бетон получил повреждения из-за образования RB.

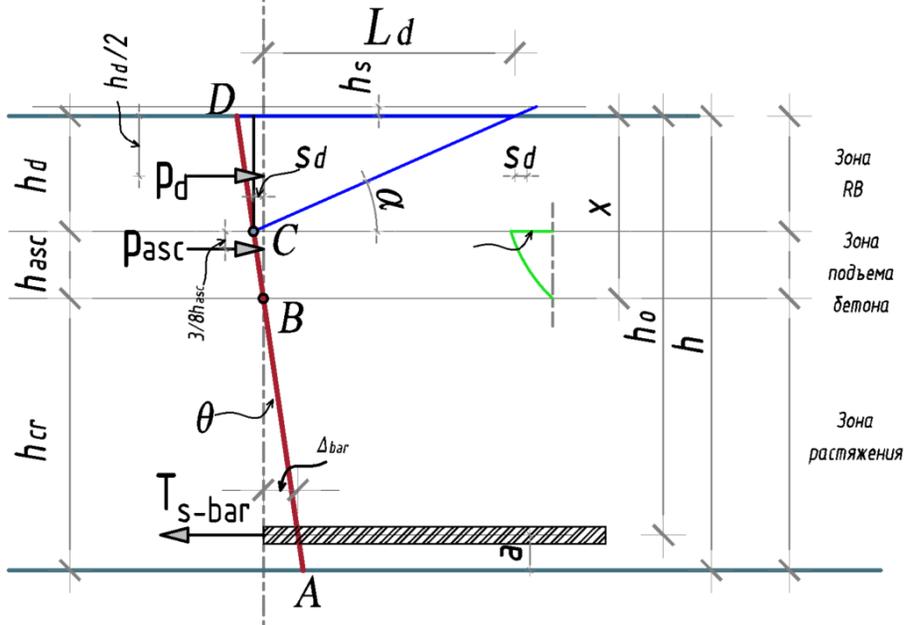


Рис. 3. Поворот жесткого тела (RB) пластического шарнира

Fig. 3. Rigid body (RB) rotation of the plastic hinge

Механизм поворота RB также упоминается в [15–19]. Подробный анализ приведен ниже. Анализ поворота жесткого тела, показанный на рис. 4, включает в себя вычисление зависимости момента от поворота для возрастающих значений h_d .

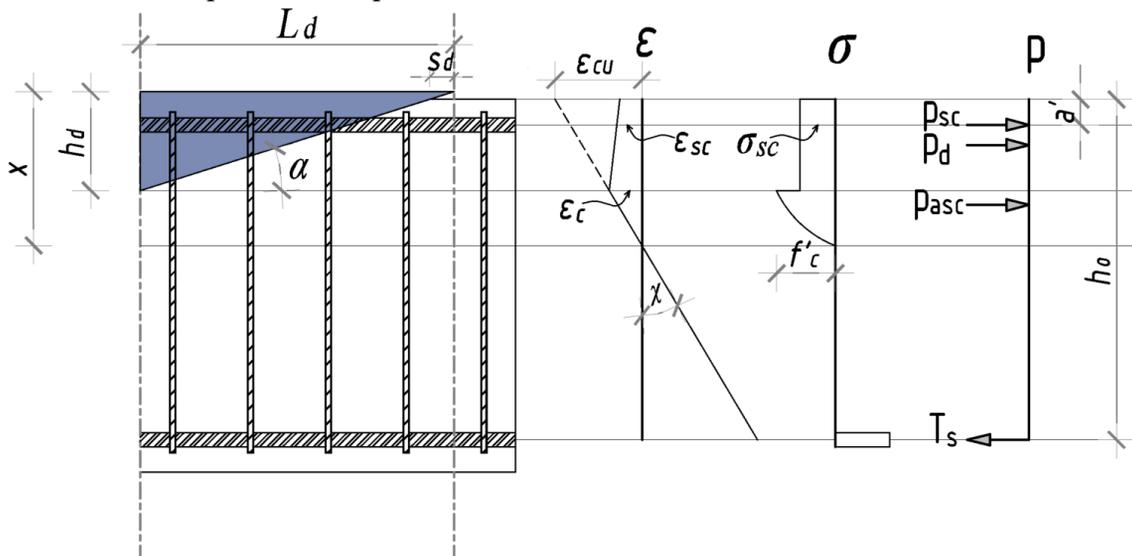


Рис. 4. Схема приложения усилий в поперечном сечении железобетонной балки

Fig. 4. Scheme of stress application in the cross-section of reinforced concrete beam

Для заданного значения h_d определяется S_d , которая служит точкой опоры для поворота линии A–D до тех пор, пока не будет достигнуто продольное равновесие сил P . Исходя из этого равновесия, можно определить момент:

$$S_d = L_d \epsilon_c; \quad (9)$$

$$S_d = \frac{d_d \epsilon_c}{\tan \alpha}; \quad (10)$$

$$\varepsilon_c = \frac{f'_c}{E_c}; \tag{11}$$

$$\alpha = \tan^{-1}(-m + (m^2 + 1)^{0,5}). \tag{12}$$

Переменная m представляет собой фрикционную составляющую плоскости разрушения Мора – Кулона. Для бетона она обычно принимает значение 0,8, в результате чего α в уравнении (12) составляет около 26°. По мере увеличения параметра скольжения S_d в конечном итоге достигается способность скольжения S_{slide} . Когда S_d достигает S_{slide} , RB разрушается в результате скольжения.

Усилие в RB определяется:

$$P_d = bh_d \left(\frac{Coh + \sigma_{хомуты} \cos \alpha (\sin \alpha + m \cos \alpha)}{\sin \alpha (\cos \alpha - m \sin \alpha)} \right); \tag{13}$$

$$Coh = 0,17 f'_c; \tag{14}$$

$$\sigma_{хомуты} = \frac{2 R_{yx} A_{sx}}{bs}, \tag{15}$$

где b — ширина балки;

C — параметр сцепления плоскости разрушения Мора – Кулона, который может быть рассчитан по уравнению (14);

$\sigma_{хомуты}$ — боковое ограничение, действующее на RB, которое может быть вызвано хомутами, как показано в формуле (15) (рис. 5);

R_{yx} соответствует пределу текучести хомутов;

A_{sx} представляет собой площадь поперечного сечения хомутов;

s — расстояние между хомутами.

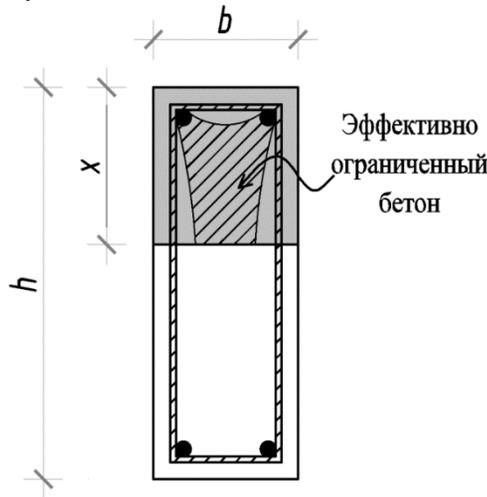


Рис. 5. Эффективно ограниченный сжатый бетон в сечении железобетонной балки

Fig. 5. Effectively confined compressed concrete in the cross section of a reinforced concrete beam

Предполагается, что сила, действующая на RB, представляет собой равномерный сдвиг вдоль границы раздела RB и прикладывается в точке $hd/2$. Усилие в сжатой зоне бетона приложено на расстоянии $(3/8)h_{asc}$ от верхнего края RB:

$$P_{asc} = \frac{2}{3} f'_c bh_{asc}. \tag{16}$$

Усилие в арматуре в сжатой зоне, находящейся на расстоянии a' от края волокна:

$$P_{sc} = \frac{2}{3} A_{sc} \varepsilon_c E_s. \tag{17}$$

Скольжение по грани трещины, необходимое для выхода отдельного арматурного стержня из текучести (Δ_y), определяется по формуле:

$$\Delta_y = \delta_{\max} (1 - \cos(\lambda_{el} a_{el})); \tag{18}$$

$$\lambda_{el} = \left(\frac{4 \tau_{\max}}{\delta_{\max} d_s E_s} \right)^{0,5}; \tag{19}$$

$$\tau_{\max} = 1,25\sqrt{f'_c}; \quad (20)$$

$$a_{el} = \frac{\sin^{-1}\left(\frac{\lambda_{el} d_s R_{sy}}{4 \tau_{\max}}\right)}{\lambda_{el}}, \quad (21)$$

где $\delta_{\max} = 15$ мм — предел скольжения арматуры;

τ_{\max} — прочность сцепления;

d_s — диаметр отдельного стержня;

E_s — модуль упругости арматуры, как показано на рис. 6.

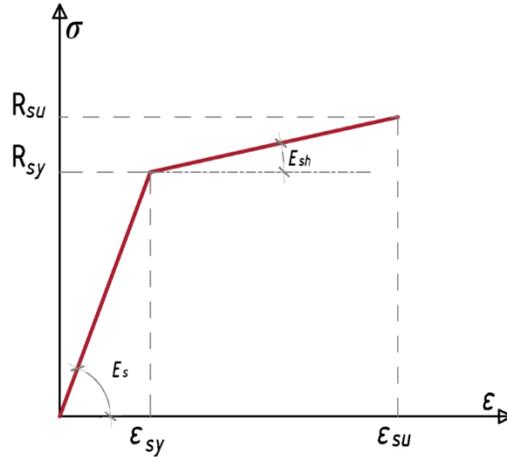


Рис. 6. Диаграмма арматуры с деформационным упрочнением

Fig. 6. Diagram of reinforcement with strain hardening

Таким образом, усилие в арматуре можно выразить следующим образом:

$$T_{sy-bar} = \frac{\tau_{\max} \pi d_s}{\lambda_{el}} \sin\left(\cos^{-1}\left(1 - \frac{\Delta_y}{\delta_{\max}}\right)\right). \quad (22)$$

Скольжение, вызывающее разрушение отдельной арматуры (Δ_{ult}), определяется следующим образом:

$$\Delta_{ult} = \delta_{\max}(1 - \cos(\lambda_{sh} a_{ult})); \quad (23)$$

$$\lambda_{sh} = \left(\frac{4 \tau_{\max}}{\delta_{\max} d_s E_{sh}}\right)^{0,5}; \quad (24)$$

$$a_{ult} = \frac{\sin^{-1}\left(\frac{\lambda_{sh} d_s (R_{su} - R_{sy})}{4 \tau_{\max}}\right)}{\lambda_{sh}}, \quad (25)$$

где E_{sh} — модуль деформационного упрочнения арматуры (рис. 6);

R_{su} — предельное напряжение арматуры.

Следовательно, полное скольжение при разрыве арматуры:

$$\Delta_{y-ult} = \Delta_y + \Delta_{ult} = \delta_{\max}(1 - \cos(\lambda_{el} a_{el})) + \delta_{\max}(1 - \cos(\lambda_{sh} a_{ult})). \quad (26)$$

Реакция нагрузки и скольжения после текучести — это нагрузка, при которой происходит текучесть, плюс увеличение нагрузки, вызванное деформационным упрочнением:

$$T_{sh-bar} = \frac{\tau_{\max} \pi d_s}{\lambda_{sh}} \sin\left(\cos^{-1}\left(1 - \frac{\Delta_{ult} - \Delta_y}{\delta_{\max}}\right)\right) + \frac{\pi d_s^2 R_{sy}}{4}. \quad (27)$$

С точки зрения подхода RB поворот при разрушении ($\theta_{ult-limt}$) — это скольжение при разрушении (Δ_{y-ult}), деленное на высоту трещины h_{cr} :

$$\theta_{ult-limt} = \frac{\Delta_{y-ult}}{h_{cr}}. \quad (28)$$

В предположении линейного распределения деформаций кривизна при разрушении арматуры (χ_{ult}) составляет:

$$\chi_{ult} = \frac{\varepsilon_{su}}{h_{cr}}, \quad (29)$$

где ε_{su} — деформация при разрушении арматуры (рис. 6).

Согласно подходу, поворот для данной эмпирической длины шарнира — это длина пластического шарнира, умноженная на кривизну:

$$\theta_{emp} = L_{hinge} \frac{\varepsilon_{su}}{h_{cr}}. \quad (30)$$

«Эквивалентная» длина пластического шарнира (L_{hinge}) составляет:

$$L_{hinge} = \frac{\Delta y - ult}{\varepsilon_{su}}. \quad (31)$$

Наконец, в случае балок с хомутами скольжение S_{slide} составляет:

$$S_{slide} = 2,51 \frac{\sigma_{хомуты}}{f'_c} + 0,61. \quad (32)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод RB позволяет рассчитать момент на основе сил и локального поворота сечения, что подходит для определения фактического момента в корродированном сечении балки. Для этого необходимо использовать снижение характеристик арматуры из-за коррозии. Кроме того, увеличение прочности сцепления уменьшает перераспределение моментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арленинов П.Д., Крылов С.Б. Современное состояние нелинейных расчетов железобетонных конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 3. С. 50–53.
2. Берлинов М.В. и др. Учет коррозионных повреждений эксплуатируемых железобетонных конструкций в условиях трехосного напряженно-деформированного состояния // Строительство и архитектура. 2020. № 3. Т. 8. С. 40–46.
3. Колчунов В.И. Модель пластичности железобетонных конструкций // Строительство и реконструкция. 2023. № 2. С. 39–58.
4. Король Е.А. и др. К расчету трещиностойкости коррозионно-повреждаемого железобетонного элемента в зоне наклонного сечения // Вестник МГСУ. 2009. № 2. С. 164–168.
5. Ксенофонтова Т.К. Методика расчета статически неопределимых железобетонных конструкций с учетом перераспределения усилий при трещинообразовании // Природообустройство. 2008. № 4. С. 88–95.
6. Тамразян А.Г. и др. Несущая способность коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов при поперечном нагружении // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 9. С. 5–11.
7. Тамразян А.Г., Мацевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой // Строительство и реконструкция. 2022. № 1. С. 89–98.
8. Тамразян А.Г., Попов Д.С. Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 19–26.
9. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 5–18.
10. Тамразян А.Г. К расчету железобетонных элементов с учетом ползучести и старения на основе реологической модели бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 7. С. 26–27.
11. Тамразян А.Г., Фаликман В.Р. Основные требования к проектированию железобетонных конструкций по модельному кодексу ФИБ // Строительство и реконструкция. 2016. № 3 (65). С. 71–77.
12. Тамразян А.Г., Филимонова Е.А. Метод поиска резерва несущей способности железобетонных плит перекрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 3. С. 23–25.
13. Тамразян А.Г., Сайед Й.А.К. Сравнение перераспределения моментов в корродированных и некорродированных статически неопределимых железобетонных балках // Вестник МГСУ. 2024. № 1.
14. Lee H. et al. The evaluation of flexural strength of RC beams damaged by rebar corrosion. 1999. Pp. 320–330.
15. Ali M.M., Oehlers D., Griffith M. The residual strength of confined concrete // Advances in Structural Engineering. 2010. No. 4 (13). Pp. 603–618.

16. Haskett M. et al. Rigid body moment–rotation mechanism for reinforced concrete beam hinges // *Engineering structures*. 2009. No. 5 (31). Pp. 1032–1041.
17. Oehlers D. et al. Moment redistribution in continuous plated RC flexural members. Part 2: Flexural rigidity approach // *Engineering structures*. 2004. No. 14 (26). Pp. 2209–2218.
18. Oehlers D.J., Ali M.M., Griffith M.C. Concrete component of the rotational ductility of reinforced concrete flexural members // *Advances in Structural Engineering*. 2008. No. 3 (11). Pp. 281–291.
19. Visintin P., Oehlers D.J. Mechanics-based closed-form solutions for moment redistribution in RC beams // *Structural Concrete*. 2016. No. 3 (17). Pp. 377–389.

REFERENCES

1. Arleninov P.D., Krylov S.B. Modern state of nonlinear calculations of reinforced concrete structures. *Earthquake Engineering. Safety of constructions*. 2017; 3:50-53. (in Russian).
2. Berlinov M.V. et al. Accounting of corrosion damage of the exploited reinforced concrete structures in conditions of triaxial stress-strain state. *Construction and Architecture*. 2020; 3(8):40-46. (in Russian).
3. Kolchunov V.I. Model of plasticity of reinforced concrete structures. *Construction and Reconstruction*. 2023; 2:39-58. (in Russian).
4. Korol E.A. et al. To calculation of crack resistance of corrosion-damaged reinforced concrete element in the zone of inclined section. *Vestnik MGSU*. 2009; 2:164-168. (in Russian).
5. Ksenofontova T.K. Calculation methodology of the statically indeterminate reinforced concrete structures taking into account the redistribution of forces at cracking. *Nature Management*. 2008; 4:88-95. (in Russian).
6. Tamrazyan A.G. et al. Bearing capacity of corrosion-damaged compressed reinforced concrete elements under transverse loading. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 9:5-11. (in Russian).
7. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Reliability analysis of reinforced concrete slab with corroded reinforcement. *Construction and Reconstruction*. 2022; 1:89-98. (in Russian).
8. Tamrazyan A.G., Popov D.S. Stress-strain state of corrosion-damaged reinforced concrete elements under dynamic loading. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 2:19-26. (in Russian).
9. Tamrazyan A.G. Methodology of Analysis and Assessment of State Reliability and Service Life Forecasting of Reinforced Concrete Structures. *Reinforced Concrete Structures*. 2023; 1(1):5-18. (in Russian).
10. Tamrazyan A.G. To calculation of reinforced concrete elements taking into account creep and aging on the basis of rheological model of concrete. *Industrial and civil construction*. 2012; 7:26-27. (in Russian).
11. Tamrazyan A.G., Falikman V.R. Basic requirements for the design of reinforced concrete structures according to the FIB model code. *Construction and Reconstruction*. 2016; 3(65):71-77. (in Russian).
12. Tamrazyan A.G., Filimonova E.A. Method of search for the reserve of the bearing capacity of reinforced concrete floor slabs. *Industrial and civil construction*. 2011; 3:23-25. (in Russian).
13. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. Comparison of moment redistribution in corroded and non-corroded statically indeterminate reinforced concrete beams. *Vestnik MGSU*. 2024; 1. (in Russian).
14. Lee H. et al. *The evaluation of flexural strength of RC beams damaged by rebar corrosion*. 1999; 320-330.
15. Ali M.M., Oehlers D., Griffith M. The residual strength of confined concrete. *Advances in Structural Engineering*. 2010; 4(13):603-618.
16. Haskett M. et al. Rigid body moment-rotation mechanism for reinforced concrete beam hinges. *Engineering structures*. 2009; 5(31):1032-1041.
17. Oehlers D. et al. Moment redistribution in continuous plated RC flexural members. Part 2: Flexural rigidity approach. *Engineering structures*. 2004; 14(26):2209-2218.
18. Oehlers D.J., Ali M.M., Griffith M.C. Concrete component of the rotational ductility of reinforced concrete flexural members. *Advances in Structural Engineering*. 2008; 3(11):281-291.
19. Visintin P., Oehlers D.J. Mechanics-based closed-form solutions for moment redistribution in RC beams. *Structural Concrete*. 2016; 3(17):377-389.