

Исследование перераспределения моментов в статически неопределимых корродированных железобетонных балках

Й. А. К. Сайед

Московский государственный строительный университет

Аннотация: В статье исследуется поведение перераспределения моментов в корродированных железобетонных балках. Рассмотрены предыдущие исследования различных авторов, которые проливают свет на поведение корродированных статически неопределимых железобетонных элементов. Рассматривается влияние коррозии на предел прочности, прогиб и коэффициенты перераспределения моментов. Применение осевых нагрузок, а также расположение и степень коррозии позволили всесторонне обсудить поведение перераспределения моментов. Результаты показали, что неразрезные железобетонные балки с корродированной арматурой ведут себя иначе, чем просто подкрепленные железобетонные балки. Процесс коррозии также влияет на перераспределение моментов, обеспечивая дополнительную безопасность железобетонных конструкций. Существующие исследования в этой области ограничены, и необходимы дальнейшие исследования, чтобы устранить этот пробел в знаниях и улучшить понимание механизма перераспределения моментов в неразрезных корродированных железобетонных балках.

Ключевые слова: Корродированные железобетонные балки, статически неопределимые железобетонные балки, перераспределение моментов, коррозия, метод ускоренной коррозии, предел прочности, прогиб, долговечность конструкций.

Введение

Изучение поведения корродированных железобетонных балок имеет важное значение для понимания безопасности и эксплуатационных характеристик разрушенных конструкций. Коррозия арматуры в железобетонных конструкциях является распространенной проблемой, которая существенно влияет на их структурную целостность [1]. Понимание перераспределения моментов в железобетонных балках, подверженных агрессивной окружающей среде, имеет решающее значение для оценки и проектирования разрушенных конструкций [2]. Перераспределение моментов в корродированных статически неопределимых железобетонных балках означает перераспределение внутренних изгибающих моментов внутри балки из-за ее разрушения под воздействием коррозии. Коррозия арматуры может ослабить структурную способность железобетонных балок, а в статически

неопределимых конструкциях перераспределение моментов может повлиять на общее поведение конструкции и ее несущую способность.

Хотя тема перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках широко освещена [3-9], исследования, изучающие эту тему в присутствии коррозии, как численно, так и экспериментально, ограничены. В работе [10] были разработаны численные конечно-элементные модели, учитывающие наличие локальной коррозии как в бетоне, так и в арматуре таких конструкций. Модели учитывали возникновение пластических деформаций и образование пластических шарниров. Исследования, проведенные Feng et al. [11] и Fernandez et al. [12-13], дают ценное представление о поведении корродированных железобетонных балок и плит. В работе [11] изучался эффект усиления цементной матрицы, армированной углеродной тканью (C-FRCM), как на корродированных, так и на некорродированных неразрезных железобетонных балках. Также [14] было посвящено восстановлению неразрезных железобетонных балок в коррозионных средах с использованием двухфункционального метода воздействия, названного катодной защитой и структурным усилением под действием импульсного тока (ICCP-SS). Метод включает применение композитов с цементной матрицей, армированных углеродной тканью (C-FRCM), для обеспечения защиты от коррозии и усиления конструкции.

В работе [15] исследовано влияние коррозии на железобетонные конструкции, в частности, на изгибную жесткость и перераспределение моментов. Авторы предложили формулы для расчета изгибной жесткости корродированных железобетонных балок на основе учета потери сечения из-за коррозии и изменения модуля упругости бетона. Экспериментальные исследования также проводились для оценки влияния коррозии на поведение железобетонных балок [16].

Целью данной статьи является обзор упомянутых исследований и изучение поведения перераспределения моментов в корродированных железобетонных балках. Полученные результаты внесут вклад в понимание реакции конструкции и помогут в проектировании и оценке корродированных железобетонных конструкций.

Методология

Методология данной статьи связана с исследованием поведения перераспределения моментов в корродированных железобетонных балках. Для этого был проанализирован ряд предыдущих работ, посвященных этой проблеме. Изучение перераспределения моментов в корродированных балках требует обобщения выводов и рекомендаций из ограниченных предыдущих исследований, чтобы указать направление для будущих исследований в этой области.

Fernandez et al. [12] провели экспериментальное исследование двенадцати статически неопределимых железобетонных элементов, подвергшихся длительному нагружению и коррозии. В последующей серии экспериментов, проведенных в [13], статически неопределимые железобетонные элементы, являющиеся частью неразрезных железобетонных плит, подвергались испытаниям с различными осевыми статическими нагрузками и степенью коррозии. Кроме того, в работе [13] использовалась методика численного исследования статически неопределимых железобетонных элементов, намеренно исключая хомуты для предотвращения коррозии перекрытий. Приложение осевых нагрузок и различная степень коррозии способствовали всесторонней оценке поведения перераспределения моментов. Для ускорения коррозии использовались расчетная потеря веса арматуры и закон Фарадея, при этом плотность тока оставалась ниже 350 мА/см^2 . Уровень коррозии варьировался от 10 до 20 % для испытанных балок, которые подвергались различным мертвым нагрузкам

для моделирования реальных сценариев, с которыми сталкиваются железобетонные элементы.

Предельная прочность корродированных балок была на 55 % ниже, чем у их некорродированных аналогов. Коррозия не только повлияла на прочность арматуры, но и ослабила всю сечение, нарушив сцепление между арматурой и бетоном. Результаты показали увеличение прогиба и более выраженное перераспределение моментов даже при более низких уровнях нагрузки в результате коррозии. Это перераспределение значительно повлияло на нагрузку при разрушении, способствуя защите и отсроченному разрушению балок. Присутствие коррозии сместило пролетные напряжения на более прочные опоры, защитив балки и отсрочив разрушение сечения. Железобетонные плиты, подвергшиеся коррозии, преждевременно разрушились, что объясняется разрушением анкерных креплений и местным раскалыванием из-за отсутствия поперечной арматуры. Моделирование элементов, подвергшихся коррозии, в рамках КЭ представляло собой сложную задачу из-за многочисленных переменных разрушения. В исследовании делается вывод, что, хотя представленная КЭ-модель точно предсказывает прогиб, ей не хватает способности прогнозировать перераспределение моментов.

В статье [14] девять неразрезных железобетонных балок были отлиты для исследования катодной защиты и усиления конструкции с помощью армированной углеродной тканью цементной матрицы (C-FRCM). Одна из них служила контрольной балкой (без коррозии и без какой-либо защиты или усиления), а другая подвергалась коррозии (без какой-либо защиты или усиления) (см. таблицу №1). Как указано в таблице №2, метод нанесения коррозии имитировал морскую среду; таким образом, хлорид натрия добавлялся в воду для заливки в соотношении 3% к весу цемента. Через 28 дней после заливки балка была помещена на открытый воздух и орошалась

водой в течение целого года. Коррозии подверглось все сечение балки, что привело к потере 5,18 % сечения арматуры из-за коррозии. В результате коррозии жесткость балки снизилась по сравнению с контрольной балкой. Нагрузка при первой текучести арматуры (в средней опоре), нагрузка при второй текучести арматуры (в пролетах) и предельная нагрузка балки снизились на 17%, 15% и 9%, соответственно (Таблица №3). Однако перераспределение моментов значительно увеличилось, в пять раз превысив перераспределение моментов в контрольной балке. Перераспределение моментов действовало как защитный механизм, откладывающий разрушение балки, но это происходило за счет увеличения прогиба балки. Данное исследование не включало в себя всестороннее изучение перераспределения моментов в различных сценариях коррозии.

В исследовании [11] использовались почти те же размеры балок, что и в работе [14]. В работе [11] были отлиты 10 двухпролетных статически неопределимых железобетонных балок (Таблица №1). Цель заключалась в исследовании поведения при изгибе корродированных неразрезных железобетонных балок, усиленных цементной матрицей, армированной углеродной тканью (C-FRCM). Как и в работе [14], исследование включало одну контрольную балку (без коррозии и усиления) и другую корродированную балку (без усиления). Хотя процесс коррозии был таким же, как в [14], и длился два года вместо одного года, потеря сечения арматуры из-за коррозии оставалась стабильной (Таблица №2). Коррозия также привела к снижению несущей способности балки: нагрузка на первую по текучести арматуру (в средней опоре), нагрузка на вторую по текучести арматуру (во втором пролете) и предельная нагрузка на балку снизились на 23 %, 25 % и 13 % соответственно (Таблица №3). Однако нагрузка при третьей текучести арматуры (в первых пролетах) увеличилась на 4 % по сравнению с контрольной балкой. Величина перераспределения моментов

после коррозии в данном исследовании практически не улучшилась, что свидетельствует об общем снижении прочности, пластичности и жесткости балки. Кроме того, в исследовании не было проведено всестороннего изучения перераспределения моментов при различных сценариях коррозии.

Для исследования изгибного поведения неразрезных железобетонных балок, предварительно поврежденных коррозией, Elmezayen et al. (2023) [16] разработали численные модели расчета. Эти модели были направлены на прогнозирование нелинейного поведения балок при различных сценариях коррозии. Для подтверждения точности численных моделей были проведены экспериментальные испытания на реальных образцах балок. В экспериментальной программе рассматривались два типа коррозии: либо коррозия только растянутой арматуры в пролетах (sagging коррозия), либо коррозия только растянутой арматуры в средней опоре (hogging коррозия). Исследователи изучили влияние интенсивности и местоположения коррозии на несущую способность, степень снижения прочности и коэффициент перераспределения моментов балок. Для этого было отлито восемь двухпролетных балок с размерами, указанными в таблице №. Бетонная смесь, использовавшаяся для создания специально выделенного корродированного участка, включала 5% NaCl (соль) от веса цемента, что способствовало депассивации арматурных стержней и ускорению коррозии. В пределах целевого коррозионного участка в продольном направлении располагалась внутренняя труба из нержавеющей стали, которая выполняла функцию катода, а проржавевшие арматурные стержни служили анодом в процессе ускоренной коррозии. Метод ускоренной коррозии был реализован в данном исследовании с помощью контролируемого малого тока, длительностью 240 дней в зависимости от желаемого уровня коррозии (см. таблицу № 2). Балки подвергались циклам "мокрый-сухой", чередуя полусуточные влажные периоды с односуточными сухими периодами. Во время мокрой фазы на

балки наносился водяной туман с помощью туманообразующих форсунок из сжатого воздуха.

Таблица № 1

Детали испытанных балок, приведенные в литературе

Литература	Su et al. (2020)[14]	Feng et al. (2020)[11]	Elmezayen et al. (2023)[16]
№. образцов	2	2	8
b (мм)	150	150	150
h (мм)	250	250	250
a (мм)	20	20	25
L (мм)	1100	1100	2400
$f'c$ МПа	41,1	41,1	29
R_{sy} МПа	480	480	561
R_{su} МПа	602	602	649
A_{s1}	2φ10	2φ10	3φ12
A'_{s1}			2φ6
A_{s2}			3φ12
A'_{s2}			2φ6
A_{sw}	φ8@80 мм ($R_{swy}=412$ МПа)	φ8@80 мм ($R_{swy}=412$ МПа)	φ8@75 мм ($R_{swy}=525$ МПа)

Понимание поведения неразрезных железобетонных балок с несколькими пролетами имеет решающее значение, поскольку их реакция на коррозию отличается от реакции балок с простыми опорами. Непрерывные балки, в отличие от своих просто подкрепленных аналогов, обладают способностью перераспределять моменты между поврежденными и неповрежденными секциями.

Таблица № 2

Подробные описания применяемого метода коррозии для балок,
приведенные в литературе

Литература	Образец №	Метод коррозии	Значение тока	Продолжительность (дни)	Процент коррозии %	Место коррозии
Su et al. [14]	1	-----	Контрольная балка без коррозии			
	2	морская среда (хлорид натрия добавлялся в воду для заливки в соотношении 3% к весу цемента)		365	5,18	Вся балка (арматура+бетон)
Feng et al. [11]	1	-----	Контрольная балка без коррозии			
	2	морская среда (хлорид натрия добавлялся в воду для заливки в соотношении 3% к весу цемента)		730	6	Вся балка (арматура+бетон)
Elmezayen et al. [16]	1	-----	Контрольная балка без коррозии			
	2	метод ускоренной коррозии	165 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	60	10	растянутая арматура на средней опорной зоне
	3			120	20	
	4			180	30	
	5			240	40	
	6			120	20	растянутая арматура в зонах пролетов
	7			180	30	
	8			240	40	

Такое перераспределение может эффективно отсрочить разрушение и обеспечить дополнительный запас прочности. Сочетание этой способности к перераспределению моментов и более высокой жесткости, присущей неразрезным балкам, позволяет им выдерживать более высокие уровни коррозионных повреждений по сравнению с просто подкрепленными балками. Более того, несущая способность неразрезных железобетонных балок линейно снижалась с увеличением интенсивности коррозии, независимо от места коррозии.

Таблица № 3

Результаты испытаний неразрезных железобетонных балок, приведенные в литературе

Литература	Образец №i	первая текучесть арматуры нагрузка (P_{y1}) (кН)	Вторая текучесть арматуры нагрузка (P_{y2}) (кН)	Третья текучесть арматуры нагрузка (P_{y3}) (кН)	P_u (кН)	β %
Su et al. (2020) [14]	1	на середине опоры (151,1)	в пролетах (196,2)	----	240,6	1,33
	2	на середине опоры (125,8)	в пролетах (166,3)	----	219,1	8,14
Feng et al. (2020) [11]	1	на середине опоры (169,81)	во втором пролете (171,49)	в первом пролете (188,10)	250,03	8,98
	2	на середине опоры (129,44)	во втором пролете (129,27)	в первом пролете (196,57)	218,82	9,91
Elmezayen et al. (2023) [16]	1	на середине опоры	в пролетах		244,7	18
	2			251,7	14	
	3			222,3	8	
	4			217,3	2	
	5	в пролетах	на середине опоры		208,7	-4
	6	на середине опоры	в пролетах		247,4	22
	7			231,4	27	
	8			223	32	

Однако скорость снижения прочности зависела от конкретного места коррозии (см. формулу 1-4).

$$\frac{P_{u,cor}}{P_{u,contol}} = \begin{cases} 1 - 0,0034 C & \text{для hogging коррозии} \\ 1 - 0,0057 C & \text{для sagging коррозии,} \\ 1 - 0,0091 C & \text{для hogging и sagging коррозии} \end{cases} \quad (1)$$

$$C = \frac{A_s - A_{s,cor}}{A_s}, \quad (2)$$

$$A_s = \frac{\pi \cdot d_s^2}{4}, \quad (3)$$

$$A_{s,cor} = \frac{\pi \cdot d_{s,cor}^2}{4}, \quad (4)$$

где C : уровень коррозии, A_s и $A_{s,cor}$ - площади сечения арматурной стали до и после коррозии, соответственно. Кроме того, d_s и $d_{s,cor}$ представляют собой диаметры поперечного сечения арматурной стали до и после коррозии, соответственно.

Отмечается, что балки с коррозией в области провисания имеют более высокую степень снижения прочности по сравнению с балками с коррозией в hogging области. В исследовании подчеркивается, что, хотя коррозия в sagging области оказывает более негативное влияние на несущую способность, чем коррозия в hogging области, жесткость на изгиб балок с hogging коррозии была ниже, чем у балок с sagging коррозии. В то время как контрольная балка имела коэффициент перераспределения моментов, равный 18%, балки с sagging коррозии демонстрировали коэффициент перераспределения моментов в диапазоне от 22% до 2% при предельной нагрузке. Однако балки с hogging коррозии имели самый высокий коэффициент перераспределения моментов - от 22 до 32 %. При высоком уровне sagging коррозии (40 % и выше) перераспределение моментов меняло свое направление от пролета к средней опоре (отрицательное перераспределение моментов). Во всех случаях первая текучесть арматуры происходила в средней опоре, затем в пролетах, но в случае отрицательного перераспределения момента первая текучесть арматуры происходила в пролете, затем в средней опоре (Таблица №3). Численно балки с коррозией как в зоне sagging, так и в зоне hogging показали наиболее низкие эксплуатационные результаты.

Данное исследование [15] было посвящено перераспределению моментов, вызванных коррозией, в железобетонных конструкциях при эксплуатационных нагрузках. Авторами были предложены формулы расчета жесткости на изгиб для корродированных железобетонных балок и колонн (рис. 1), подтвержденные испытаниями железобетонных балок и собранными

из литературы испытаниями железобетонных колонн. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показывает приемлемую точность предложенных формул. Эта модель для корродированных железобетонных балок выглядит следующим образом:

$$B_{s,cor} = \frac{E_{s,cor} A_{s,cor} h_{0,cor}^2}{1,15 \psi_{cor} + 0,2 + 6 \frac{E_{s,cor}}{E_b} \mu_{cor}} \quad (5)$$

где $B_{s,cor}$ - изгибная жесткость корродированной железобетонной балки; $E_{s,cor}$ и $A_{s,cor}$ - модуль упругости и площадь растяжения продольных корродированных арматурных стержней; $h_{0,cor}$ - эффективная глубина сечения после коррозии; $E_{s,cor} / E_b$ - отношение модуля упругости корродированной арматуры к модулю упругости бетона; μ_{cor} - коэффициент армирования, определяемый как $A_{s,cor} / (bh_{0,cor})$; ψ_{cor} - коэффициент неравномерности деформации растяжения продольной корродированной арматуры между трещинами, который может быть рассчитан по формуле 6.

$$\psi_{cor} = \psi + \frac{1-\psi}{w_{cr}} \cdot w \quad (6)$$

$$\psi = 1,1 - 0,65 \frac{R_{bt}}{\mu_{et} \cdot R_{sy} A_s} \quad (7)$$

где w_{cr} - критическая ширина трещины = 3,5 мм и 2,5 мм для деформированных и гладких арматурных стержней, соответственно; w - ширина трещины, вызванной коррозией; R_{bt} - прочность бетона на растяжение; μ_{et} - коэффициент армирования стержней продольной арматуры при растяжении, рассчитанный по эффективной площади бетона при растяжении; R_{sy} и A_s - предел текучести и площадь растяжения продольных арматурных стержней.

Железобетонная рама, находящаяся под вертикальной и боковой нагрузкой, спроектирована для исследования влияния коррозии на перераспределение моментов. Результаты показывают, что коррозия арматуры с разных сторон

железобетонного элемента может привести к различному снижению жесткости на изгиб вокруг разных осей.

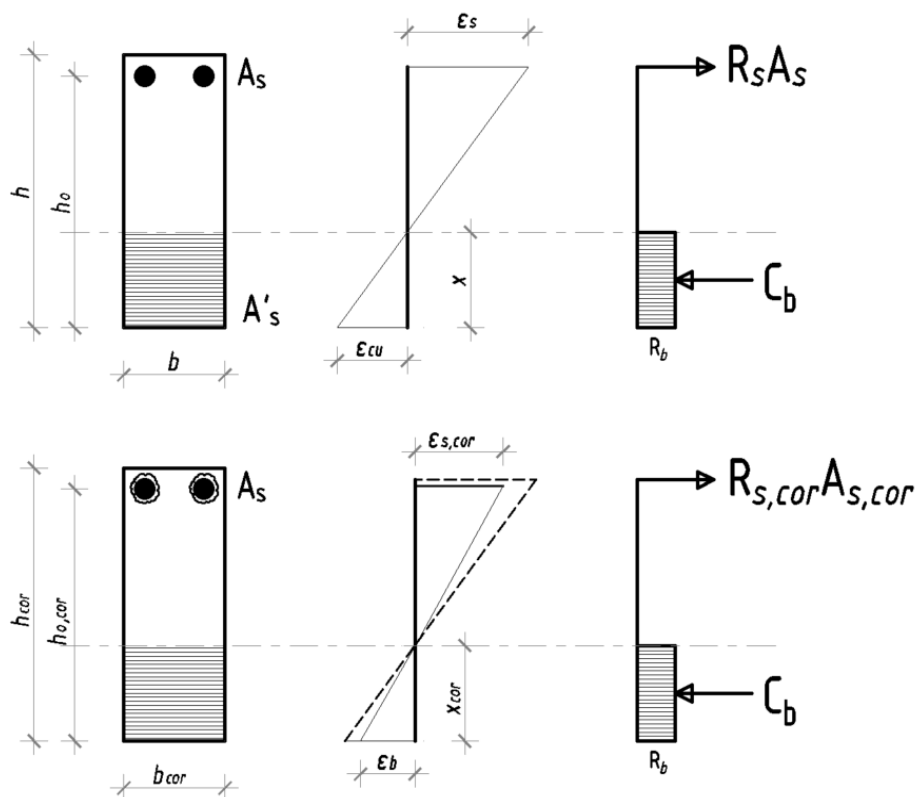


Рис. 1. – Распределение напряжений и деформаций по сечению железобетонной детали: а) до коррозии и б) после коррозии

Перераспределение моментов, вызванное коррозией, может либо увеличить, либо уменьшить моменты на железобетонных элементах, причем изменения не обязательно должны быть монотонными по мере развития коррозии. Увеличение грузоподъемности элемента объясняется механизмом перераспределения момента, а также тем, что потеря прочности и жесткости корродированной арматуры приводит к увеличению несущей способности окружающего бетона. Следовательно, в определенных зонах может увеличиться моментная способность секции, что позволяет конструкции выдерживать приложенные нагрузки. Авторы подчеркивают, что при оценке существующих корродированных конструкций необходимо одновременно учитывать как несущую способность, так и перераспределение внутренних моментов. Упругий анализ, основанный на предложенных формулах расчета

жесткости на изгиб, может быть использован для быстрой оценки безопасности проржавевших железобетонных конструкций при эксплуатационных нагрузках.

В источнике [10] проведено численное КЭ-моделирование двухпролетной железобетонной балки с различными коррозионными повреждениями по длине балки. Также представлена зависимость между увеличением прогибов и процентом коррозионных повреждений на разных этапах нагружения. Исследование позволило сделать несколько ключевых выводов относительно поведения корродированных балок при различных нагрузках и процентах коррозии. До 75% нагрузки разрушения и 20% коррозии, прогибы балки быстро увеличиваются, а затем наступает фаза, когда прогибы остаются почти постоянными между 20% и 70% коррозии. После 70 % коррозии происходит еще одно резкое увеличение прогибов. При предельных нагрузках (90-100% нагрузки) прогибы равномерно увеличиваются и достигают 26% по сравнению с неповрежденной балкой. Балки с разным процентом коррозии разрушаются при одинаковой нагрузке из-за одинакового диаметра арматуры в корродированных зонах. Усилия в растягивающей арматуре пролетного сечения резко возрастают при 1% коррозии и уменьшаются с увеличением процента коррозии, достигая 17-40% по отношению к неповрежденной балке. При нагрузках до 50% растягивающие усилия в арматуре над промежуточной опорой увеличиваются с ростом процента коррозии, стабилизируясь на уровне 11% между 50% и 70% коррозии и уменьшаясь после 70% коррозии. При нагрузках от 75% до 100% растягивающие усилия над промежуточной опорой остаются почти неизменными, составляя 1-4% от усилий в неповрежденной балке. Наиболее значительное перераспределение моментов происходит в растягивающей арматуре над промежуточной опорой при нагрузках до 50 %, сходясь к равному соотношению с неповрежденными

балками на последних стадиях нагружения. Наконец, хотя теоретически эти результаты согласуются с предыдущими исследованиями, значения, полученные в ходе исследования, не имеют экспериментального подтверждения.

Выводы

Данная аналитическая статья посвящена предыдущим исследованиям, в которых изучалось перераспределение моментов в многопролетных корродированных железобетонных балках. В заключение статьи приводятся следующие результаты:

1. Один и тот же элемент может подвергаться воздействию различных условий окружающей среды, которые вызывают коррозию в одних частях, а не в других, что приводит к изменению поведения балки. Этот аспект требует дальнейшего изучения.
2. Среди перечисленных методов коррозии можно выделить эффективный экспериментальный метод воздействия коррозии на определенные зоны балки, который влияет на перераспределение моментов в многопролетных корродированных железобетонных балках.
3. Процесс коррозии также улучшает перераспределение момента, обеспечивая дополнительную безопасность железобетонных конструкций.
4. Коррозия не только снижает предельную нагрузку, но и уменьшает значения нагрузок, при которых происходит выход арматуры.
5. В некоторых случаях коррозии направление перераспределения моментов может измениться. Направление перераспределения моментов сильно связано с местом образования пластических шарниров.

6. В некоторых случаях коррозии нагрузочная способность может увеличиться в зависимости от поведения перераспределения моментов, а также от поддержки арматуры окружающим бетоном.
7. Нагрузочная способность балки в случае коррозии с выпиранием больше, чем в случае коррозии с провисанием.
8. Улучшение понимания перераспределения моментов будет способствовать проектированию и оценке корродированных железобетонных конструкций, обеспечивая их безопасность и работоспособность. В настоящее время исследований в этой области недостаточно.

Литература

1. Тамразян А. Г., Сайед Й. А. К. Влияние коррозии на поведение железобетонных балок // Безопасность строительного фонда России проблемы и решения. 2021. С. 241–249.
2. Тамразян А. Г., Сайед Й. А. К. Исследование влияния агрессивных сред на безопасность статически неопределимых железобетонных балок: фокус на перераспределение моментов // Безопасность строительного фонда России проблемы и решения. 2023. С. 224–231.
3. Тамразян А. Г., Рашидов Б. Т. К уровню перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках // Строительство и реконструкция. 2018. № 6. С. 14–21.
4. Li L., Zheng W., Wang Y. Review of moment redistribution in statically indeterminate RC members // Engineering Structures. 2019. № January (196). С. 109306.
5. Тамразян А. Г., Сайед Й. А. К. Параметры, влияющие на перераспределение моментов в статически неопределимых железобетонных балках // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 6. С. 4–11.

6. Tamrazyan A. G., Sayed Y. A. K. A practical model for moment redistribution in statically indeterminate RC beams //European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2023. – Т. 27. – №. 4. – С. 1503-1511.

7. Aydogan M. S., Aydemir C., Arslan G. An experimental and analytical research on moment redistribution in reinforced concrete continuous beams // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2023. С. 1–24.

8. Тамразян А. Г., Сайед Й. А. К. Экспериментальное исследование коэффициента перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках // Строительство и реконструкция. 2023. № 5. С. 24–35.

9. Дудина И. В., Тамразян А. Г. Обеспечение качества сборных железобетонных конструкций на стадии изготовления // Жилищное строительство. – 2001. – №. 3. – С. 8-10.

10. Попов Д. С. Перераспределение усилий в коррозионно-поврежденных статически неопределимых двухпролетных железобетонных балках // Инженерный вестник Дона. 2022. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7799

11. Feng R. Feng R., Liu Y., Zhu J. H., Xing F. Flexural behaviour of C-FRCM strengthened corroded RC continuous beams // Composite Structures. 2020. (245). С. 112200.

12. Fernandez I., Herrador M. F., Marí A. R., Bairán J. M. Structural effects of steel reinforcement corrosion on statically indeterminate reinforced concrete members // Materials and Structures. 2016. № 12 (49). С. 4959–4973.

13. Fernandez I., Herrador M. F., Marí A. R., Bairán J. M. Ultimate capacity of corroded statically indeterminate reinforced concrete members // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2018. № 1 (12). С. 1–23.

14. Su M. N., Zeng C., Li W. Q., Zhu J. H., Lin W. H., Ueda T., Xing F. Flexural performance of corroded continuous RC beams rehabilitated by ICCP-SS // Composite Structures. 2020. (232). C. 111556.
15. Jiang C., Shang D. F., Gu X. L., Zhang H. F., Zhang W. P. Corrosion-induced moment redistributions of RC frame structures under service loads // Engineering Structures. 2023. (294). C. 116722.
16. Elmezayen Y., Khattak N., El-Maaddawy T. Prediction of Nonlinear Flexural Behavior of Continuous RC Beams Pre-Damaged by Corrosion // Buildings. 2023. № 6 (13). C. 1398.

References

1. Tamrazyan A. G., Sayed Y. A. K. Bezopasnost' stroitel'nogo fonda rossii problemy i resheniya, 2021. pp. 241–249.
2. Tamrazyan A. G., Sayed Y. A. K. Bezopasnost' stroitel'nogo fonda rossii problemy i resheniya, 2023. pp. 224–231.
3. Tamrazyan A.G., Rashidov B.T. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2018;(6): pp.14-21.
4. Li L., Zheng W., Wang Y. Engineering Structures. 2019. № (196). p. 109306.
5. Tamrazyan A. G., Sayed Y. A. K. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo, 2022, no. 6, pp. 4-11.
6. Ashot G. Tamrazyan, Sayed Y. A. K. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2023 27:4, pp.1503-1511.
7. Aydogan M. S., Aydemir C., Arslan G. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2023. p. 1–24.
8. Tamrazyan A.G., Sayed Y. A. K. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2023;(5):pp.24-35.
9. Dudina I. V., Tamrazyan A. Г. Zhilishchnoye stroitel'stvo, 2001. №. 3. pp. 8-10.



10. Popov D. S. Inzhenernyy vestnik Dona, 2022. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7799
11. Feng R. Feng R., Liu Y., Zhu J. H., Xing F. Composite Structures. 2020. (245). p. 112200.
12. Fernandez I., Herrador M. F., Marí A. R., Bairán J. M. Materials and Structures. 2016. № 12 (49). pp. 4959–4973.
13. Fernandez I., Herrador M. F., Marí A. R., Bairán J. M. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2018. № 1 (12). pp. 1–23.
14. Su M. N., Zeng C., Li W. Q., Zhu J. H., Lin W. H., Ueda T., Xing F. Composite Structures. 2020. (232). p. 111556.
15. Jiang C., Shang D. F., Gu X. L., Zhang H. F., Zhang W. P. Engineering Structures. 2023. (294). p. 116722.
16. Elmezayen Y., Khattak N., El-Maaddawy T. Buildings. 2023. № 6 (13). p. 1398.

Дата поступления: 9.12.2023

Дата публикации: 14.01.2024