

Д.С. ПОПОВ¹¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОРРОЗИОННО-ПОВРЕЖДЕННЫХ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. В научной литературе практически отсутствуют результаты экспериментальных исследований коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов. Как результат достоверно оценить напряженно-деформированное состояние данных конструкций особенно при динамических нагрузках практически невозможно. Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено 37 железобетонных образцов – колонн квадратного сечения размерами 100x100 мм, высотой 700 мм. В железобетонных образцах создавались локальные коррозионные повреждения бетона и арматуры при этом для ускоренного корродирования элементов в качестве агрессора использовался концентрированный раствор (37%) соляной кислоты (HCL). В статье описаны экспериментальные исследования изменения динамических свойств внецентренно сжатых коррозионно-поврежденных железобетонных элементов. На основании данных тензометрии установлено, что коррозионные повреждения приводят к уменьшению высоты сжатой зоны бетона за счет уменьшения сечения растянутой арматуры, а также отсутствия совместной работы арматуры с бетоном. По данным тензометрии получены деформации внецентренно сжатых коррозионно-поврежденных и неповрежденных сечений, которые показали, что эпюры деформаций принципиально различаются очертанием. Полученные в результате натурного исследования деформации арматуры и бетона, позволили оценить напряженно-деформированное состояние поврежденных и не поврежденных коррозией конструкций по параметру $\eta - 1/r$ (кривизна). Установлено влияние коррозионных повреждений на характер разрушения внецентренно сжатых элементов.

Ключевые слова: внецентренно сжатые элементы, коррозионные повреждения, динамическое нагружение, экспериментальные исследования.

D.S. POPOV¹¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia.

EXPERIMENTAL STUDIES OF DYNAMIC PROPERTIES OF CORROSION-DAMAGED COMPRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Abstract. There are practically no results of experimental studies of elements made of compressed reinforced concrete damaged by corrosion in the scientific literature. As a result, it is almost impossible to reliably assess the state of deformation-deformation of these structures, especially under dynamic loads. For experimental studies, 37 samples of reinforced concrete were made – columns of square cross-section with dimensions of 100x100 mm, height of 700 mm. Local corrosion damages of concrete and reinforcement were created in reinforced concrete samples, while a concentrated (37%) hydrochloric acid (HCL) solution was used as an aggressor to accelerate the corrosion of elements. The article describes experimental studies on changing the dynamic properties of reinforced concrete elements that undergo corrosion during eccentrically compression. Based on strain gauge data, it was found that corrosion damage leads to a decrease in the height of the compressed concrete section by reducing the cross-section of the stretched reinforcing bars, as well as to the lack of joint work of reinforcing bars with concrete. According to strain measurement data, deformations of uncompressed and undamaged sections were obtained, which showed that the deformation diagrams fundamentally

differ in their contour. The results obtained as a result of the study of the nature of deformation of reinforcement and concrete allowed us to assess the state of deformation stress of damaged and non-corroded structures according to the parameter $\eta\epsilon - 1 / r$ (curvature). The effect of corrosion damage on the nature of destruction of eccentrically compressed elements has been established.

Keywords: *eccentrically compressed elements, corrosion damage, dynamic loading, experimental studies.*

Введение

Бетонные и железобетонные конструкции могут подвергаться воздействию как эксплуатационных нагрузок, так и различных агрессивных сред. Это может приводить к изменениям прочностных и деформационных свойств материалов, образованию продольных трещин в бетоне, вызванных продуктами коррозии арматуры, а также накоплению повреждений в конструкциях [1,2,3,4,5,6].

Многими учеными выполнялись и выполняются экспериментальные исследования, связанные с диффузией агрессивных сред, кинетикой коррозионных процессов, которые направлены на изучение скорости протекания коррозионных процессов в бетоне и арматуре [7,8].

Экспериментальные исследования Abosrra L, Ashour AF, Youseffi M [9] доказали, что более высокий класс бетона снижает скорость коррозии арматуры в теле конструкции. Кроме этого, выявлены зависимости сил сопротивления сцепления коррозионно-поврежденной арматуры от класса бетона.

Коррозионные повреждения приводят к нарушению сцепления арматуры с бетоном, что требует изменения и адаптации существующих методов расчета железобетонных конструкций, учитывающих особенность работы таких элементов [10,11].

В работе [12] выполнены исследования влияния коррозионных повреждений арматуры на ее анкеровку, проведен анализ растрескивания и отслоения защитного слоя бетона в зависимости от процента повреждений, установлено влияние коррозии поперечной арматуры на сцепление бетона с продольной анкеруемой арматурой.

При воздействии агрессивной среды разного характера на железобетонные элементы происходит не только деградация бетона и арматуры, но и снижаются силы сцепления, авторами в работе [13] проведены экспериментальные испытания железобетонных балок с переменным сцеплением продольной арматуры с бетоном, потеря сцепления моделировалась с помощью пластиковых трубок, надетых на продольные стержни. Результаты данных исследований показали отрицательное влияние отсутствия сцепления арматуры с бетоном на несущую способность, момент образования трещин, ширину раскрытия трещин и прогиб железобетонных балок.

При проведении учеными экспериментальных исследований коррозионно-поврежденных железобетонных элементов в большинстве случаев опытными образцами являются железобетонные балки [14,15,16,17], при этом исследований внецентренно сжатых конструкций с коррозионными повреждениями при действии динамических нагрузок практически нет. В этой связи, анализ особенностей работы конструкций в таких условиях приводит к необходимости экспериментально-теоретических исследований.

Модели и методы исследования

Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено 37 железобетонных образцов – колонн квадратного сечения размерами 100x100 мм, высотой 700 мм. Для создания внецентренного сжатия выполнены уширения в опорных частях размером 100x200 мм (рисунок 1).

Целью проведения экспериментальных исследований является анализ зависимостей прогиба внецентренно сжатых коррозионно-поврежденных железобетонных элементов от приложенных статических и динамических нагрузок с учетом коррозионных повреждений бетона и арматуры.

Для сопоставления результатов при испытании на статическую и динамическую нагрузку внецентренно сжатых железобетонных элементов армирование опытных образцов принималось идентичным ($4\varnothing 8$ A500, $A_s=2.01 \text{ см}^2$).

а)



б)



Рисунок 1 - Железобетонные образцы: а) каркас образца в опалубке; б) изготовленный железобетонный образец

Ввиду разной скорости корродирования бетона и арматуры в раствор концентрированной соляной кислоты они погружались раздельно. Так, арматурные стержни покрывались антикоррозийной краской, за исключением участков, на которых требовалось создать коррозионные повреждения. Далее стержни погружались в ванны с раствором концентрированной (37 %) соляной кислоты и выдерживались 3–5 суток (рисунок 2). Данное количество времени требовалось для уменьшения диаметра стержня с 8 мм до 6 мм.

Для проведения экспериментальных исследований было предусмотрено два типа локальных коррозионных повреждений (рисунок 3). Локальные места расположения коррозионных повреждений выбраны исходя из наиболее нагруженных зон внецентренно сжатых элементов.

Изготовленные железобетонные образцы с коррозионно-поврежденной арматурой покрывались антикоррозийной краской согласно типу повреждения (рисунок 3). Далее образцы погружались в ванны с раствором концентрированной (37%) соляной кислоты и выдерживались 1–2 суток. Указанного времени было достаточно для коррозионного повреждения образца в незащищенных краской местах, процесс выдержки продолжался до полного удаления слоя бетона, который обеспечивает сцепление с арматурой.

а)



б)



Рисунок 2 – Корродирование элементов: а) арматурные стержни, погруженные в раствор кислоты; б) ЖБ образцы, погруженные в раствор кислоты

Испытание образцов при статическом нагружении проводилось на установке Instron 1000 HDX, при динамическом нагружении на машине Instron 8802, по схемам, показанным на рисунке 3. Образец устанавливался в пресс, на металлические пластины с полусферой для обеспечения шарнирного опирания и не допущения местного разрушения бетона. Далее прикладывалась нагрузка 0,5-2кН и по показаниям тензорезисторов наклеенных по граням выполнялось центрирование образца. После устанавливались прогибомеры. Для оценки возникающих деформаций в процессе испытания и в момент разрушения образцов использовались тензорезисторы FLA-3-11 для арматуры и бетона PL-60-11 с сопротивлением 120 Ом.

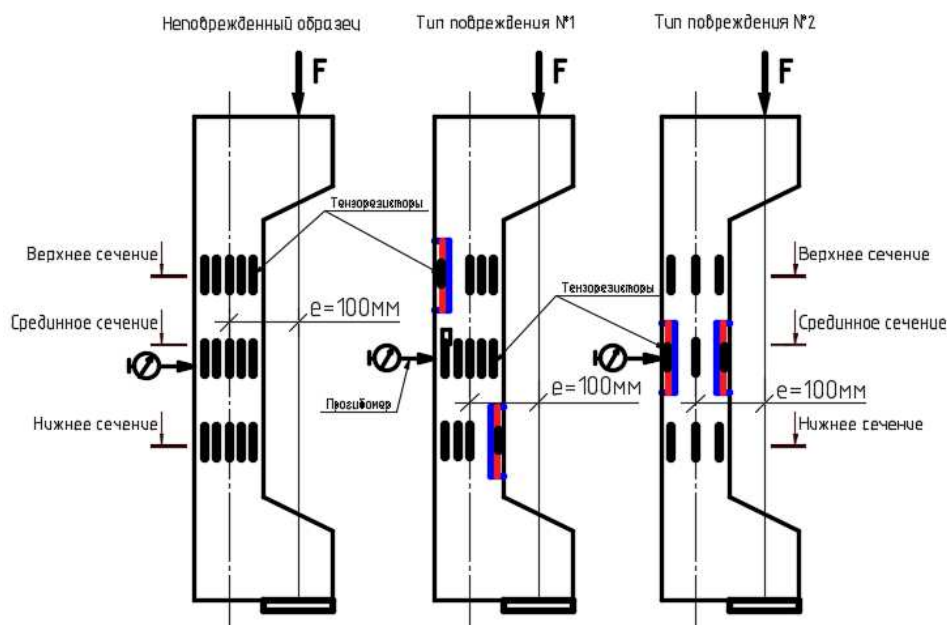


Рисунок 3 - Схема расположения тензорезисторов на поверхности бетона и арматуры поврежденных образцов (тип №1 и тип №2) и неповрежденных образцов

При динамических испытаниях среднее время приложения разрушающей нагрузки составляло 0,1 сек (рисунок 4). При статическом приложении нагрузки осуществлялось ступенчатое нагружение образца с пятиминутными выдержками между ступенями. Нагружение на последней ступени выполнялось до полного разрушения образца (рисунок 5).

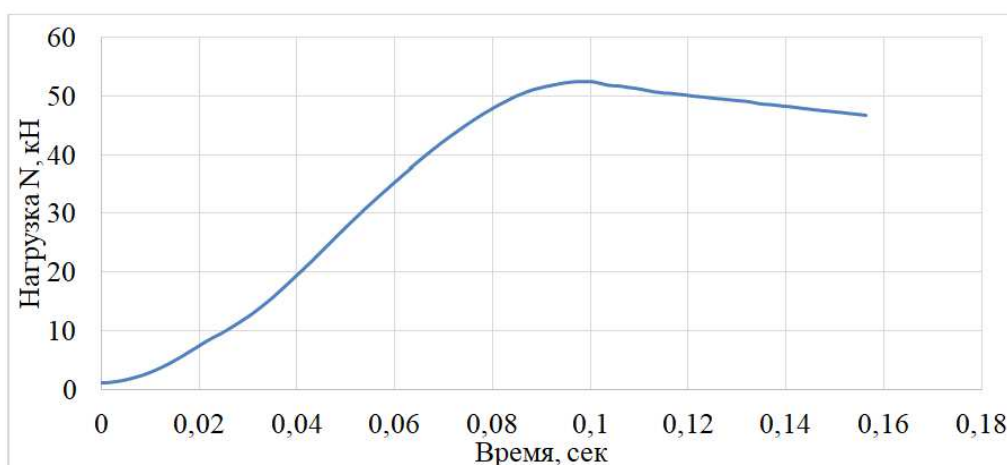


Рисунок 4 - График приложения нагрузки при динамическом испытании

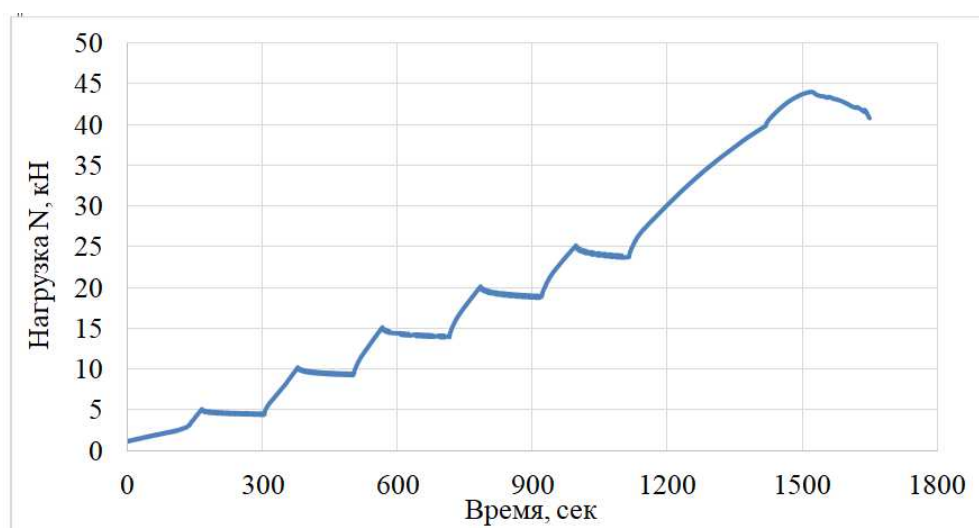


Рисунок 5 - График приложения нагрузки при статическом испытании

Результаты

На рисунках 6,7 представлены полученные эпюры деформаций для неповрежденного и коррозионно-поврежденного сечения, где по горизонтали за единицу длины принимается ширина сечения элемента, по вертикали отражены относительные деформации сжатого бетона и растянутой арматуры.

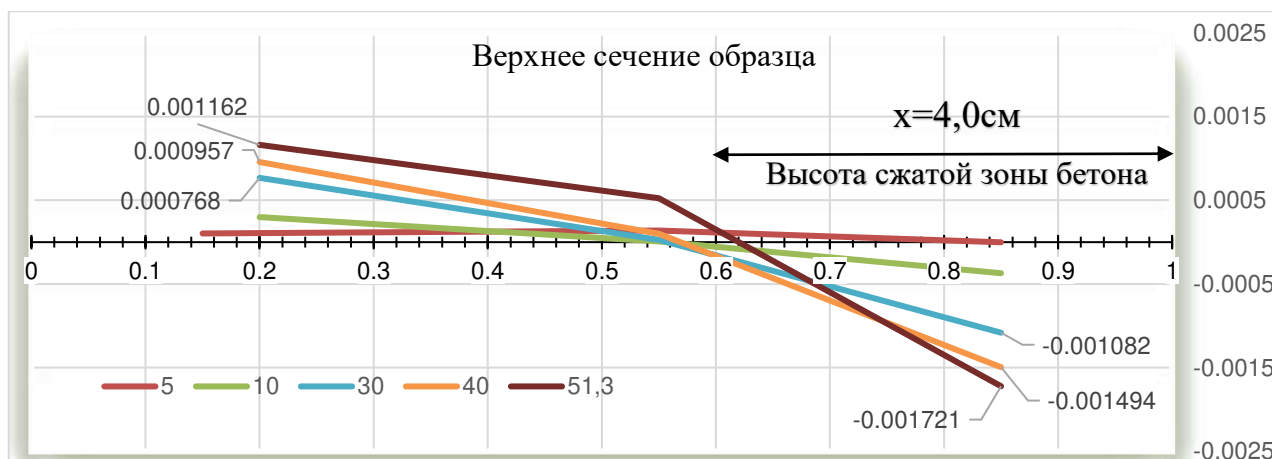


Рисунок 6 - Эпюра деформаций бетона верхнего сечения внецентренно сжатого неповрежденного образца при динамическом нагружении от 5 до 51,3 кН

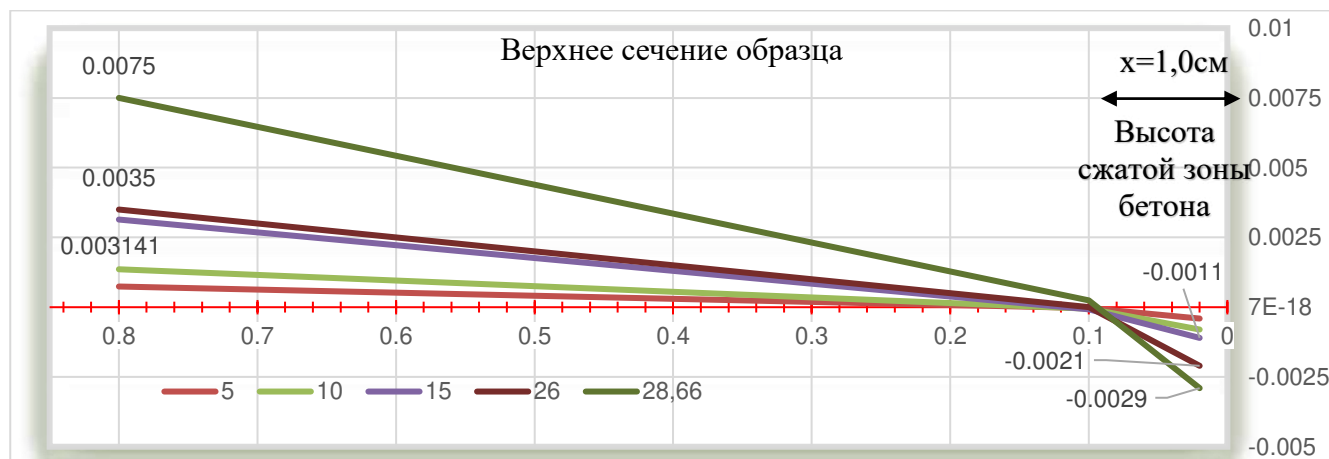


Рисунок 7 - Эпюра деформаций бетона верхнего сечения внецентренно сжатого коррозионно-поврежденного образца (тип №1) при динамическом нагружении от 5 до 28,6 кН

Полученные эпюры деформаций сечений (рисунки 6, 7), внецентренно сжатых коррозионно-поврежденных и неповрежденных образцов показали, что данные эпюры принципиально различаются очертанием. Так, в сечениях с нарушенным сцеплением растянутой арматуры с бетоном угол наклона эпюры деформаций в сжатой зоне, больше угла наклона эпюры деформаций в растянутой зоне. При этом особенностью является нарушение гипотезы плоских сечений, которая наблюдается в неповрежденных сечениях.

Полученные опытным путем значения высоты сжатой зоны для неповрежденных элементов и элементов, имеющих тип повреждения №1 и №2, усреднены и представлены в таблице 1.

Исходя из представленных результатов, характерной особенностью внецентренно сжатых элементов, испытанных динамической нагрузкой является, однозначное уменьшение высоты сжатой зоны от 9% до 30%.

Кроме этого, в поврежденном сечении высота сжатой зоны при динамическом нагружении составила 1,0 см, а в неповрежденном сечении 4,0 см, что соответствует разницы в 75%. При этом уменьшение диаметра растянутой коррозионно-поврежденной арматуры составляет 25% (с 8 мм до 6мм).

Таблица 1 - Высоты сжатых зон внецентренно сжатых неповрежденных и коррозионно-поврежденных образцов при статической и динамической нагрузке

Вид нагружения / сечение	Верхнее сечение	Срединное сечение	Нижнее сечение
Неповрежденные образцы			
Динамическое нагружение	4,0см	4,3	4,3
Статическое нагружение	4,5см	3,5см	3,5см
Тип повреждения №1			
Динамическое нагружение	1,0см	3,8см	2,0см
Статическое нагружение	1,1см	4,4см	2,2см
Тип повреждения №2			
Динамическое нагружение	3,5	-	6,0
Статическое нагружение	5,0	-	6,5

Данная разница в значениях высот сжатых зон обуславливается перераспределением усилий за счет неоднородности бетона в сечении (поврежденный и неповрежденный бетон), а также работой коррозионно-поврежденных растянутых стержней арматуры без сцепления с бетоном.

Для определения влияния коррозионных повреждений на характер разрушения экспериментальных внецентренно сжатых образцов (хрупкое или пластическое) с относительным эксцентриситетом $e_0/h_0 = 1$, построены графические зависимости «момент - кривизна» и представлены на рисунке 8.

Значения кривизн получены на основании опытных данных деформаций крайнего волокна бетона сжатой зоны ε_b и деформаций растянутой арматуры ε_s в каждом исследуемом сечении по формуле (1):

$$\frac{1}{r} = \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_b}{h_0} \quad (1)$$

где h_0 - рабочая высота сечения внецентренно сжатого элемента.

Экспериментальные исследования, направленные на изучения изменения характера разрушения поврежденных внецентренно сжатых образцов с помощью анализа полученных кривизн, показали, что характер графиков кривизны при динамическом и статическом нагружениях неповрежденных и коррозионно-поврежденных образцов аналогичен, при этом разрушение неповрежденных образцов носит хрупкий характер разрушения (графики деформирования с нарастающими и резко обрывающимися участками на рисунке 8) по причине отсутствия в растянутой арматуре пластических деформаций, при этом образцы,

имеющие первый тип коррозионного повреждения разрушаются после достижения пластических деформаций в растянутой арматуре, о чем свидетельствуют горизонтальные участки на графиках N_e-1/γ (рисунок 8). Причиной достижения пластических деформаций в растянутой коррозионно-поврежденной арматуре являются уменьшение площади ее сечения, а также уменьшение жесткости элемента вследствие коррозионных повреждений бетона (рисунок 9). Следовательно, образование локальных коррозионных повреждений приводит не только к снижению несущей способности, но и к изменению напряженно-деформированного состояния элементов.

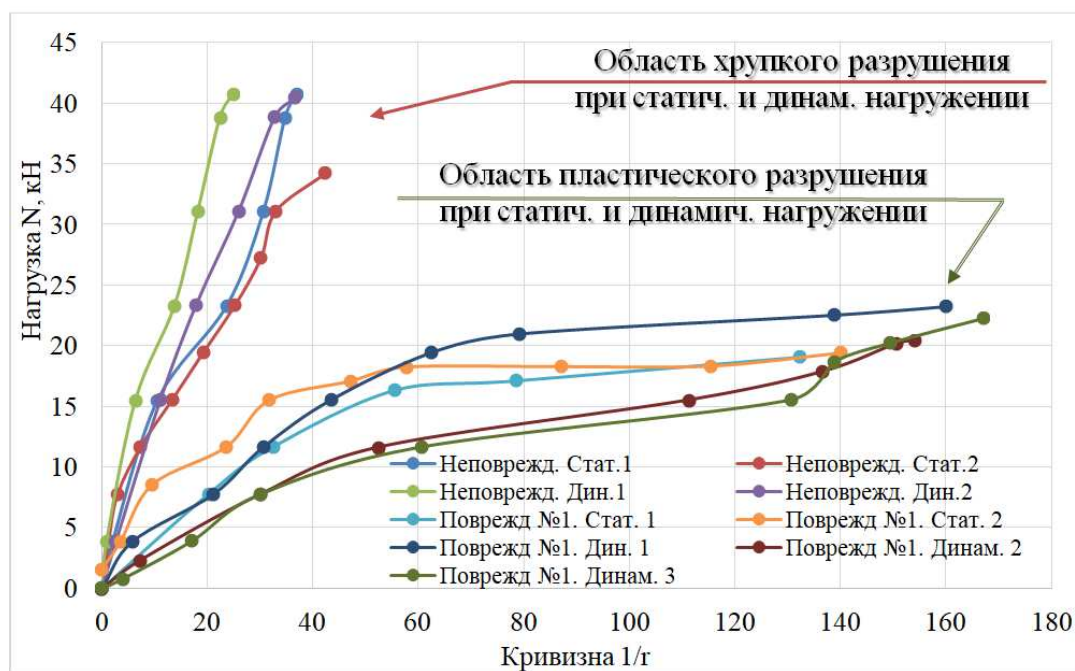


Рисунок 8 - График зависимости кривизны от изгибающего момента неповрежденных и коррозионно-поврежденных (тип №1) образцов при статическом и динамическом нагружениях

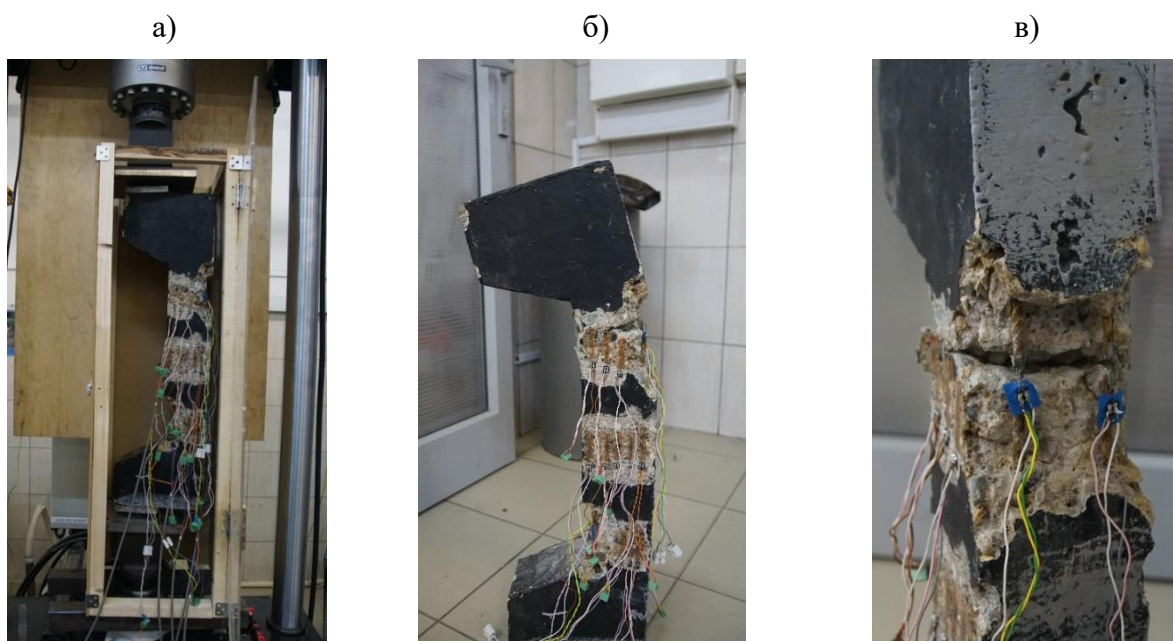


Рисунок 9 – Железобетонный коррозионно-поврежденный внецентренно сжатый образец: а) перед испытанием, б) после испытания, в) коррозионно-поврежденный участок образца

Выполненные экспериментальные исследования имеют важное значение для анализа напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций, так как работы в этом направлении практически отсутствуют. Поэтому данные о высоте сжатой зоны бетона и кривизне коррозионно-поврежденных элементов при динамическом нагружении позволят более точно оценить работу внецентренно сжатых элементов, и как результат, разработать новые или адаптировать существующие методики расчета таких конструкций.

Выводы

На основании проведенных экспериментальных исследований коррозионно-поврежденных и неповрежденных внецентренно сжатых железобетонных элементов на статическую и динамическую нагрузку можно сделать следующие выводы:

1. Эпюры деформаций в сечениях внецентренно сжатых коррозионно-поврежденных элементов с нарушенным сцеплением растянутой арматуры с бетоном принципиально различаются очертанием от эпюр деформаций в сечениях неповрежденных элементов.
2. Высота сжатой зоны бетона внецентренно сжатых элементов при влиянии агрессивной среды может значительно изменяться, так при 25% коррозионного повреждения растянутой арматуры значение высоты сжатой зоны уменьшится на 75%;
3. При испытании внецентренно сжатых неповрежденных и коррозионно-поврежденных элементов динамической нагрузкой в сечениях проявляется уменьшение высоты сжатой зоны от 9% до 30% относительно испытаний на статическое нагружение;
4. Характер очертания графиков «момент–кривизна» свидетельствует о том, что коррозионные повреждения внецентренно сжатых железобетонных элементов приводят не только к снижению несущей способности, но и к смене случая разрушения с хрупкого на пластический, что происходит в результате уменьшения жесткости элемента вследствие коррозионных повреждений бетона и арматуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамразян А.Г. К возникновению трещин в модели толстостенного бетонного цилиндра при коррозии с учетом пористой зоны на границе раздела арматуры и бетона / А.Г. Тамразян, М.С. Минеев // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 3(393). С. 159-165. DOI 10.47367/0021-3497_2021_3_159.
2. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов на кратковременную динамическую нагрузку. Строительство: наука и образование. 2013. № 4. С. 2.
3. Пахомова Е.Г., Кретьева В.М., Гордеев А.В., Маяков А.С. К методике оценки работоспособности железобетонных конструкций при нарушении сцепления арматуры с бетоном при коррозионных повреждениях // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 8. С. 28-29.
4. Tamrazyan A.G., Popov D.S., Ubysz A. To the dynamically loaded reinforced-concrete elements' calculation in the absence of adhesion between concrete and reinforcement // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 913. P. 022012. DOI: 10.1088/1757-899x/913/2/022012.
5. Ставская И.С., Марков С.В., Морозова О.В. Продольные трещины в защитном слое бетона в условиях коррозионных повреждений // Строительство и реконструкция. 2012. № 3(41). С. 35-41.
6. Смоляго Г.А. Моделирование величины коррозионных повреждений арматуры железобетонных конструкций в условиях хлоридной агрессивной среды // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. № 1(70). С. 43-49. DOI 10.21869/2223-1560-2017-21-1-43-49.
7. Бондаренко В.М., Ключева Н.В., Колчунов В.И., Андросова Н.Б. Некоторые результаты анализа и обобщения научных исследований по теории конструктивной безопасности и живучести // Строительство и реконструкция. 2012. № 4(42). С. 3-16.
8. Фаликман В.Р., Степанова В.Ф. Новое методическое пособие по назначению срока службы бетонных и железобетонных конструкций с учетом воздействия среды эксплуатации на их жизненный цикл // Вестник НИЦ Строительство. 2020. № 4(27). С. 126-134. DOI 10.37538/2224-9494-2020-4(27)-126-134.
9. Abosrra L, Ashour AF, Youseffi M. Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths // Construction and Building Materials. 2011;25(10):3915-3925.
10. Apostolopoulos Ch, Koulouris Konstantinos. Corrosion Effect on Bond Loss between Steel and Concrete // Structural Integrity and Failure. 2020. DOI: 10.5772/intechopen.94166

11. Лушникова В.Ю., Тамразян А.Г. Влияние коррозии арматуры на сцепление между арматурой и бетоном // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 4(80). С. 128–137.
12. Zandi K, Coronelli D. Anchorage capacity of corroded reinforcement: Eccentric pull-out tests on beam-end specimens. In: Report No. 2010-06, Department of Civil and Environmental Engineering. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology.
13. Magda I. Mousa. Effect of bond loss of tension reinforcement on the flexural behaviour of reinforced concrete beams // HBRC Journal, 2016, 12:3, 235-241, DOI: 10.1016/j.hbrj.2015.01.003.
14. Raoul François, Wulong Zhangab, Ruiyan Wanga Yuxin Cai, Linwen Yuc. Corrosion behavior of stirrups in corroded concrete beams exposed to chloride environment under sustained loading // Construction and Building Materials. Volume 274, 8 March 2021, 121987. //doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121987
15. Almassri Bélal, Barros Joaquim, Al-Mahmoud Firas, Francois Raoul. A FEM-based model to study the behaviour of corroded RC beams shear repaired by NSM CFRP rods technique // Composite Structures. Volume 131. 2015. Pages 731-741. doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.030.
16. Song L., Fan Z., Hou J. Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams // International Journal of Concrete Structures and Materials 13(1):24 (2019). https://doi.org/10.1186/s40069-019-0340-5
17. Прокопович А.А. Сопротивление изгибу железобетонных конструкций с различными условиями сцепления продольной арматуры с бетоном. Самара, НВФ «Сенсоры, Модули, Системы», 2000.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Mineev M.S. On the appearance of cracks in a model of a thick-walled concrete cylinder during corrosion, taking into account the porous zone at the interface between reinforcement and concrete. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2021. No. 3 (393). P. 159-165. DOI 10.47367/0021-3497_2021_3_159.
2. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Calculation of eccentrically compressed reinforced concrete elements for short-term dynamic load. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovaniye*. 2013. No. 4. P. 2.
3. Pakhomova E.G., Kretova V.M., Gordeev A.V., Mayakov A.S. On the methodology for assessing the performance of reinforced concrete structures in case of violation of the adhesion of reinforcement with concrete in case of corrosion damage. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2011. No. 8. P. 28-29.
4. Tamrazyan A.G., Popov D.S., Ubysz A. To the dynamically loaded reinforced-concrete elements' calculation in the absence of adhesion between concrete and reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 913. P. 022012. DOI: 10.1088/1757-899x/913/2/022012.
5. Stavskaya I.S., Markov S.V., Morozova O.V. Longitudinal cracks in the protective layer of concrete under conditions of corrosion damage. *Building and reconstruction*. 2012. No. 3 (41). P. 35-41.
6. Smolyago G.A. Modeling the magnitude of corrosion damage to reinforcement of reinforced concrete structures in a chloride aggressive environment. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017. No. 1(70). P. 43-49. DOI 10.21869/2223-1560-2017-21-1-43-49.
7. Bondarenko V.M., Klyueva N.V., Kolchunov V.I., Androsova N.B. Some results of the analysis and generalization of scientific research on the theory of constructive safety and survivability // Building and Reconstruction. 2012. No. 4 (42). Pp. 3-16.
8. Falikman V.R. Stepanova V.F. A new methodological manual on the appointment of the service life of concrete and reinforced concrete structures, taking into account the impact of the operating environment on their life cycle. *Vestnik NIC Stroitel'stvo*. 2020. No. 4 (27). P. 126-134. DOI 10.37538/2224-9494-2020-4(27)-126-134.
9. Abosrra L, Ashour AF, Youseffi M. Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths. *Construction and Building Materials*. 2011;25(10):3915-3925.
10. Apostolopoulos Ch, Koulouris Konstantinos. Corrosion Effect on Bond Loss between Steel and Concrete. *Structural Integrity and Failure*. 2020. DOI: 10.5772/intechopen.94166
11. Lushnikova V.Yu., Tamrazyan A.G. The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 4(80). Pp. 128–137.
12. Zandi K, Coronelli D. Anchorage capacity of corroded reinforcement: Eccentric pull-out tests on beam-end specimens. In: Report No. 2010-06, Department of Civil and Environmental Engineering. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology.
13. Magda I. Mousa. Effect of bond loss of tension reinforcement on the flexural behavior of reinforced concrete beams. *HBRC Journal*, 2016, 12:3, 235-241, DOI: 10.1016/j.hbrj.2015.01.003.
14. Raoul François, Wulong Zhangab, Ruiyan Wanga Yuxin Cai, Linwen Yuc. Corrosion behavior of stirrups in corroded concrete beams exposed to chloride environment under sustained loading. *Construction and Building Materials*. Volume 274, 8 March 2021, 121987. //doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121987

15. Almassri Belal, Barros Joaquim, Al-Mahmoud Firas, Francois Raoul. A FEM-based model to study the behavior of corroded RC beams shear repaired by NSM CFRP rods technique. *Composite Structures*. Volume 131. 2015. Pages 731-741. doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.030.

16. Song L., Fan Z., Hou J. Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 13(1):24 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0340-5>

17. Prokopovich A.A. Resistance to bending of reinforced concrete structures with different conditions of adhesion of longitudinal reinforcement to concrete. Samara, NVF "Sensors, Modules, Systems", 2000.

Информация об авторе:

Попов Дмитрий Сергеевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: popovds89@mail.ru

Information about author:

Popov Dmitry S.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

candidate of technical sciences, senior lecturer of the department of Reinforced Concrete and Masonry Structures.

E-mail: popovds89@mail.ru