

С.О.КУРНАВИНА¹, И.В. ЦАЦУЛИН²¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия²ООО «Институт «Мосинжпроект», г. Москва, Россия

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ГИПОТЕЗА ДЛЯ НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ИЗГИБАЕМЫХ И ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Проведены экспериментальные и численные исследования влияния пластических деформаций арматуры на напряженно-деформированное состояние нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов. Результаты исследований показали, что имеет место излом на эпюре деформаций в зоне нейтральной оси. Предлагается билинейная аппроксимация распределения деформаций по высоте сечения. По результатам расчетов конечно-элементных моделей проведена оценка параметра, характеризующего соотношение деформаций сжатия и растяжения. Проведено сравнение с аналогичной экспериментальной зависимостью, показавшее их удовлетворительное совпадение. Для оценки распределения деформаций по высоте сечения в упругой и пластической стадии работы арматуры при одновременном действии изгибающего момента и продольной силы проведен ряд численных расчетов внецентренно сжатых железобетонных элементов с теми же характеристиками. Анализ результатов расчетов показал близкий характер распределения деформаций по высоте сечения в изгибаемых и внецентренно сжатых элементах для случая больших эксцентриситетов.

Ключевые слова: пластические деформации, продольные силы, геометрическая гипотеза, особые воздействия.

S.O. KURMAVINA¹, I.V. TSATSULIN²¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia²Mosinzhproekt Company group, Moscow Russia

GEOMETRIC HYPOTHESIS FOR NORMAL SECTIONS OF FLEXURAL AND ECCENTRICALLY COMPRESSED REINFORCED CONCRETE MEMBERS

Abstract. Experimental and numerical studies of the influence of plastic deformations of reinforcement on the stress-strain state of normal sections of bent reinforced concrete elements have been carried out. The results of investigations have shown that there is a fracture in the strain diagram in the zone of the neutral axis. A bilinear approximation of strain distribution along the section height is proposed. Based on the results of finite element model calculations, the parameter characterizing the ratio of compression and tension strains is estimated. Comparison with the analogous experimental dependence has been carried out, that showed their satisfactory coincidence. To estimate the distribution of deformations along the section height in the elastic and plastic stages of reinforcement operation under one-temporal action of bending moment and longitudinal force, a number of numerical calculations of off-center compressed reinforced concrete elements with the same characteristics were performed. The analysis of the calculation results showed a close character of deformation distribution along the section height in bending and eccentrically compressed elements for the case of large eccentricities.

Key words: plastic deformations, longitudinal forces, geometric hypothesis, special influences.

Введение

За время своей службы здания и сооружения могут подвергаться особым динамическим воздействиям большой интенсивности: взрывным, ударным и сейсмическим. Это могут быть воздействия аварийного типа (взрывы вследствие аварий на производстве, обрушения, удары транспортных средств, террористические акты, воздействия средств поражения во время конфликтов и т.д.) или эксплуатационные нагрузки от взрывов обычных или ядерных зарядов, если речь идет о защитных сооружениях. Еще одним из особых воздействий являются землетрясения – одно из самых разрушительных природных явлений, не раз приводивших к катастрофическим последствиям и человеческим жертвам.

В современном строительстве широкое распространение получили каркасные здания, в том числе и в сейсмически опасных районах. Анализ данных о последствиях сильных землетрясений, а также численные и экспериментальные исследования, проводившиеся различными авторами [0-8], показывают, что одними из наиболее уязвимых элементов во время землетрясений являются колонны нижних этажей, в которых к максимальным продольным усилиям добавляются значительные изгибающие моменты. В результате возможно образование пластических зон, формирование трещин, приводящее к существенному снижению жесткости каркасного здания [9-13].

В феврале 2023 года произошло сильное землетрясение, которое затронуло юго-восточную Турцию и северную Сирию. Это землетрясение стало одним из самых разрушительных в регионе за последние десятилетия. Оно имело магнитуду около 7,8 балла по шкале Рихтера. Эпицентр находился в районе города Газиантеп. После основного толчка последовало множество афтершоков, некоторые из которых были почти такими же сильными, как и первоначальное землетрясение, что еще больше усугубило ситуацию. В результате землетрясения были разрушены тысячи зданий, включая жилые дома, школы и медицинские учреждения. Общее число погибших в Турции и Сирии превысило 50,000 человек, а сотни тысяч остались без крова. Одной из причин значительных разрушений явилось большое число каркасных зданий с высокими нижними этажами без диафрагм жесткости и с заполнением каркаса легкобетонными блоками (так называемыми «гибкими этажами»), которые оказались уязвимы к сейсмическому воздействию [2, 14].

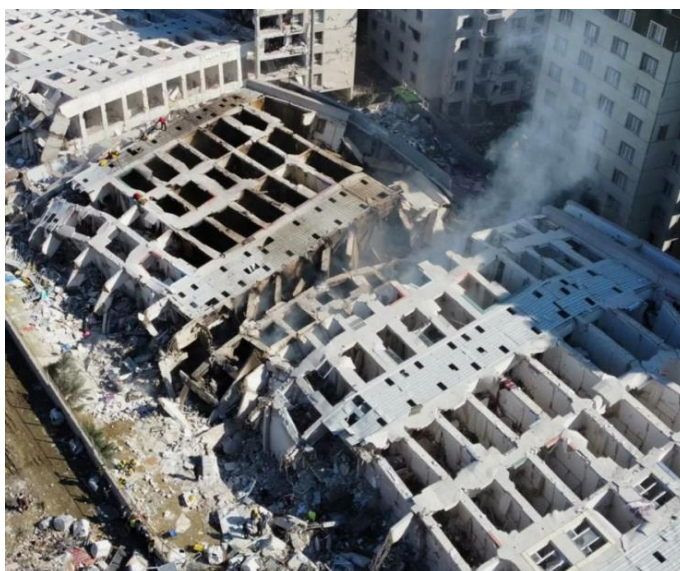


Рисунок 1 – Примеры разрушения железобетонных зданий во время землетрясения в Турции, 2023 г.

Поэтому необходимо совершенствовать методы расчета железобетонных каркасных зданий на сейсмические воздействия и более детально изучать особенности работы изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных конструкций на знакопеременную нагрузку большой интенсивности.

В действующих нормах по расчету бетонных и железобетонных конструкций одной из основополагающих предпосылок расчетов по нелинейной деформационной модели является гипотеза плоских сечений. Однако согласно экспериментальным данным по мере развития пластических деформаций в бетоне и арматуре гипотеза плоских сечений не соблюдается [15-17], что необходимо учитывать при оценке напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций, особенно при особых воздействиях, в тех случаях, когда в расчете по предельным состояниям первой группы определяющими являются деформационные критерии.

Величина пластических деформаций арматуры играет ключевую роль и при и сейсмических воздействиях, поскольку она в значительной степени влияет на несущую способность конструкций, предельные значения коэффициента пластичности и механизм разрушения элементов при изменении направления усилий [15, 16, 18]. Понимание и учет этих факторов являются важными для разработки эффективных сейсмостойких конструкций. Проведение комплексных экспериментальных и численных исследований в данной области может способствовать созданию более надежных и долговечных строительных решений.

В связи с этим представляет интерес численное исследование влияния величины пластических деформаций арматуры на деформированное состояние как изгибаемых, так и внецентренно сжатых железобетонных элементов.

Метод

На базе экспертно-диагностической испытательной лаборатории строительных конструкций НИУ МГСУ было проведены испытания 15 идентичных железобетонных балок длиной 1,5 м на действие двух сосредоточенных сил, приложенных на расстоянии 450 мм от опор [15, 16, 18].

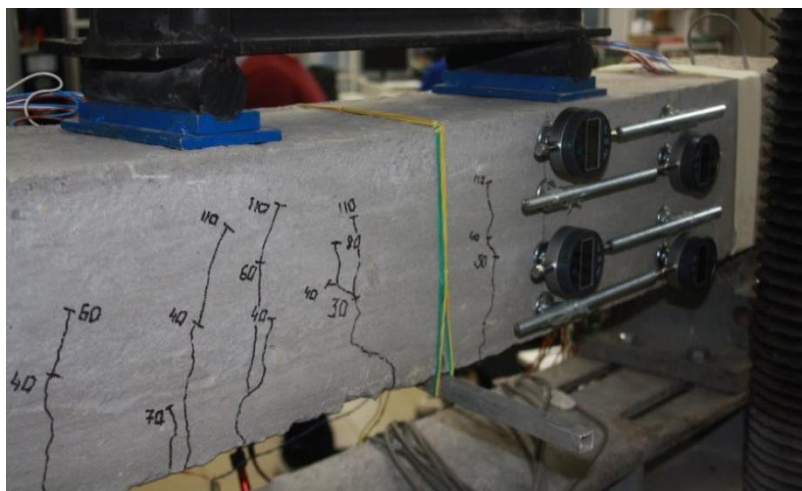


Рисунок 2 – Схема испытаний балок I серии

Размеры поперечного сечения балок составили 200×200 мм. Армирование балок симметричное, с коэффициентом армирования $\mu = 0,426\%$. Продольная арматура балок представляла собой 4 стержня диаметром $\varnothing 10$ A500С, с приваренными по торцам поперечными пластинами размером 150×150×4 мм для обеспечения необходимой анкеровки. В качестве поперечной арматуры были установлены стержни $\varnothing 6$ A500С с шагом 70 мм.

В процессе испытаний исследовалось напряженно-деформированное состояние балок, включая состояние после достижения предела текучести растянутой арматуры.

Результаты и обсуждение

На рис.3 представлены эпюры деформаций по высоте нормального сечения с трещиной для одного из образцов первой серии, на которых хорошо виден излом в зоне нейтральной оси, что не соответствует общепринятой гипотезе плоских сечений. Аналогичная картина наблюдалась и для других образцов. Распределение деформаций по высоте сечения может быть, с достаточной точностью, аппроксимировано двумя прямыми. Характер и степень излома эпюр деформаций меняется в процессе нагружения.

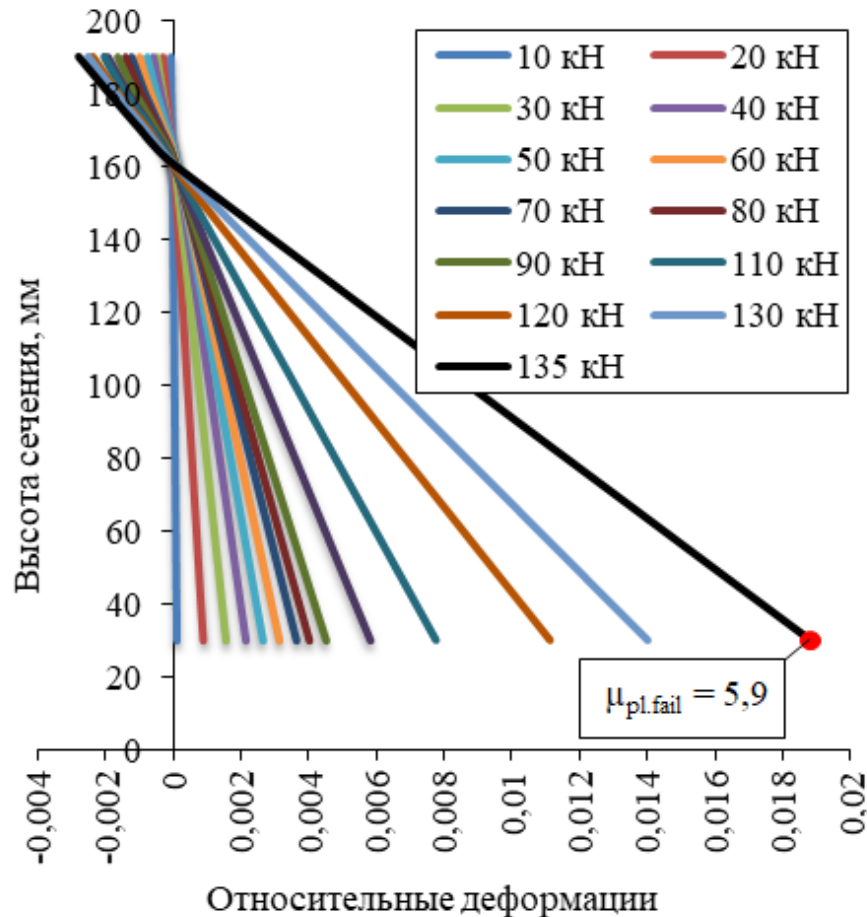


Рисунок 3 – Эпюры деформаций нормального сечения образца БО-I-02 в процессе нагружения

Для их аппроксимации может быть применена так называемая гипотеза билинейных сечений, предложенная в свое время В.И. Жарницким [19]. Для изгибаемых элементов она может быть выражена формулой (1)

$$\begin{cases} \varepsilon_x(y) = A \cdot (h_b - y) \cdot \chi & \text{при } (0 \leq y \leq h_b) \\ \varepsilon_x(y) = (h_b - y) \cdot \chi & \text{при } (h_b \leq y \leq h) \end{cases} \quad (1)$$

где A - коэффициент, зависящий от величины деформаций бетона и арматуры, χ - кривизна, h_b - высота сжатой зоны.

Проведен ряд численных расчетов моделей железобетонной балки на действие двух сосредоточенных сил в вычислительном комплексе SIMULIA Abaqus. Бетон и арматурные стержни моделировались объемными конечными элементами (рис. 4). Для бетона использована модель «concrete damaged plasticity» (CDP, модель бетона с повреждениями). Работа арматурной стали была смоделирована билинейной диаграммой с упругим и пластическим участками работы, без учета временного упрочнения в запас прочности.

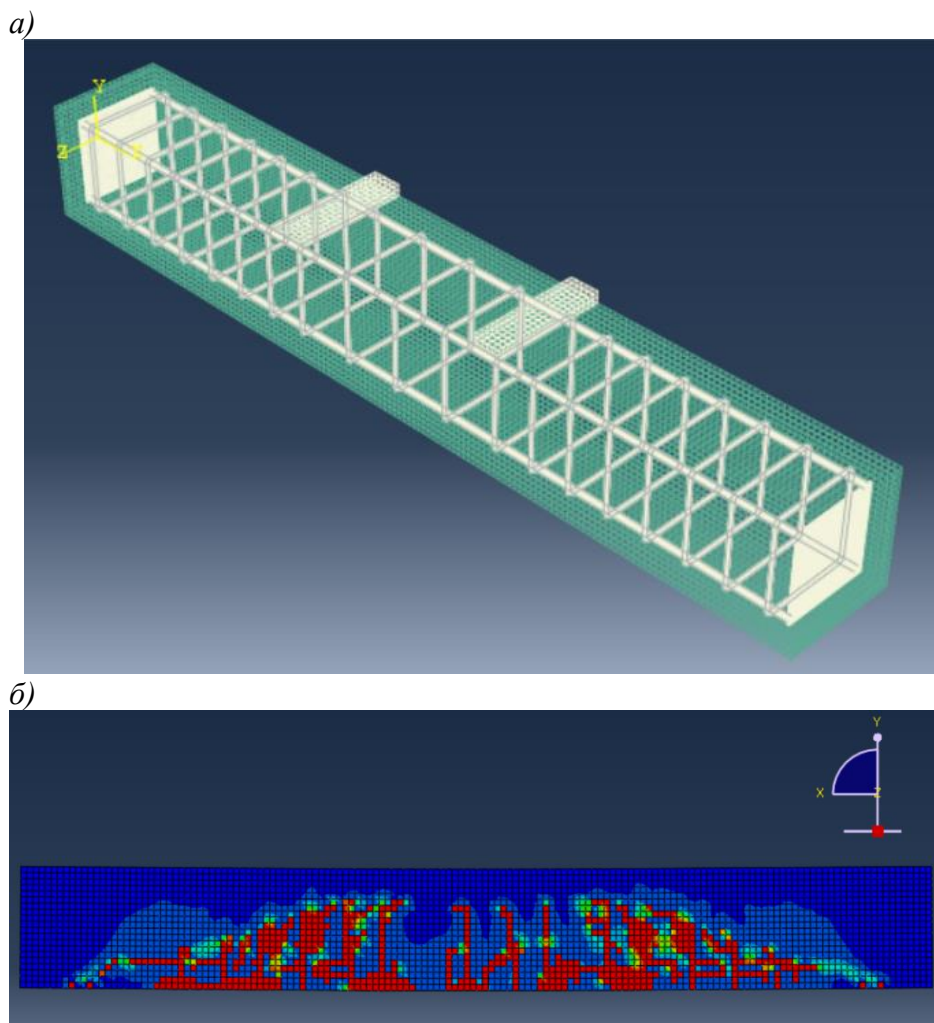


Рисунок 4 – Конечно-элементная модель образца, рассчитанного на внецентренное сжатие с эксцентриситетом 0.218 м: а – изображение конечно-элементной модели, б – схема трещинообразования

Поскольку в рамках численных исследований определяющим фактором является достижение арматурой пластических деформаций для исключения проскальзывания арматуры в теле бетона, на торцах смоделированы стальные пластины, приваренные к концам арматурных стержней (как и в экспериментальных образцах). Геометрические и физико-механические параметры образцов также соответствовали опытным.

По результатам выполненных расчетов построена зависимость влияния пластических деформаций арматуры на величину коэффициента A в формуле (1). Для верификации результатов численных расчетов проведено их сравнение с экспериментальными данными. На рис. 5 представлены зависимости коэффициента A от отношения деформаций растянутой арматуры к деформации, соответствующей началу текучести, по результатам численных расчетов и эксперимента для нормального сечения изгибаемого элемента.

Сопоставив две кривые на рис. 5, можно сделать вывод, что характер экспериментальной зависимости и зависимости, полученной по результатам численных расчетов сходен, и результаты численных расчетов подтверждаются экспериментальными данными [16].

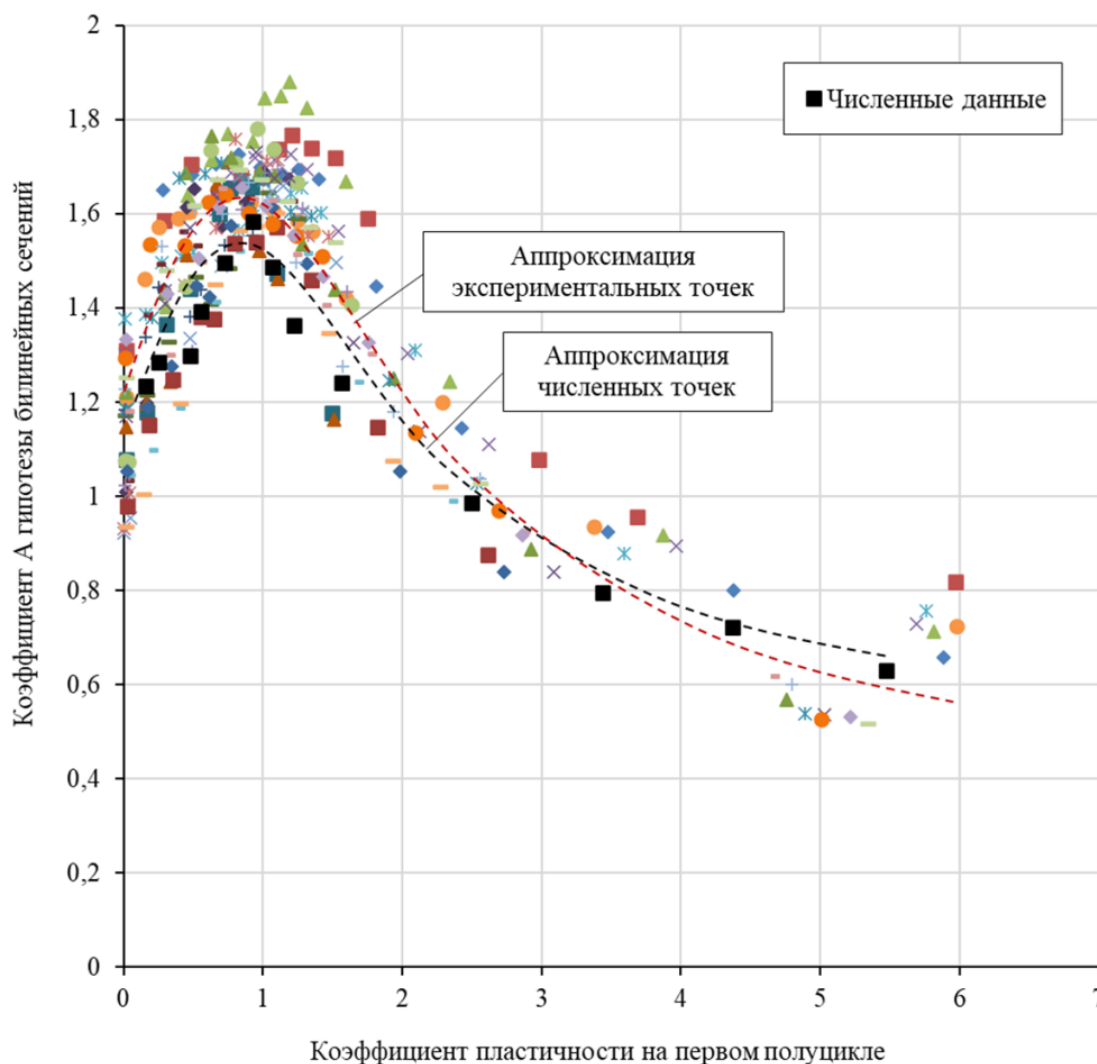


Рисунок 5 – Численная и экспериментальная зависимость коэффициента A гипотезы билинейных сечений от коэффициента пластичности по деформациям арматуры для изгибаемых железобетонных элементов с симметричным армированием

Для оценки влияния продольной силы на характер распределения деформаций по высоте сечения при внецентренном сжатии проведен ряд расчетов тех же самых железобетонных образцов, но при одновременном действии поперечной нагрузки (двух сосредоточенных сил) и продольной силы в виде давления, приложенного по торцам балки. Величина давления задавалась таким образом, чтобы имел место случай больших эксцентриситетов, и растянутая арматура входила в пластическую стадию до начала разрушения бетона от сжатия. Диаграмма арматуры была принята билинейной с пределом текучести, соответствующим нормативному сопротивлению арматуры класса А500. Диаграмма бетона соответствовала классу В25. Характер диаграммы бетона, как на сжатие, так и на растяжение соответствовал зависимостям, представленным в Приложении Г [20].

В случае внецентренного сжатия под действием изгибающего момента сечение приобретает некоторую кривизну χ , вызывающую соответствующие изгибные деформации сечения, а под действием продольной силы некоторые осевые деформации сжатия ε_c (рис. 6).

Тогда уравнение гипотезы билинейных сечений будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \varepsilon_x(y) = A \cdot (h_b - y) \cdot \chi + \varepsilon_c & \text{при } (0 \leq y \leq h_b) \\ \varepsilon_x(y) = (h_b - y) \cdot \chi + \varepsilon_c & \text{при } (h_b \leq y \leq h) \end{cases} \quad (2)$$

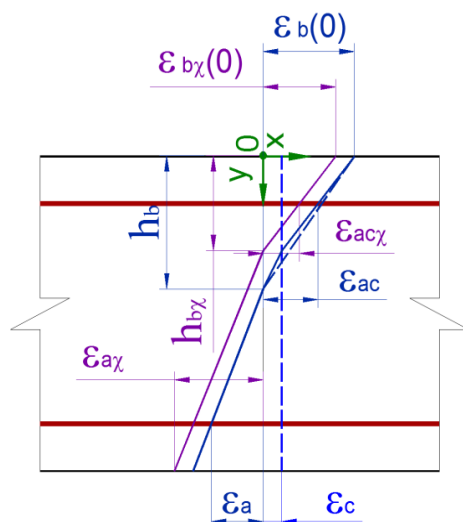


Рисунок 6 – Деформированное состояние сечения внецентренно сжатого

На рис. 7 представлены зависимости коэффициента A от коэффициента пластичности по деформациям арматуры (отношения деформации растянутой арматуры к деформации текучести) для изгибаемого элемента (кривая 1), внецентренно сжатого элемента с эксцентриситетом 0.29 м (кривая 2) и с эксцентриситетом 0.178 м (кривая 3)

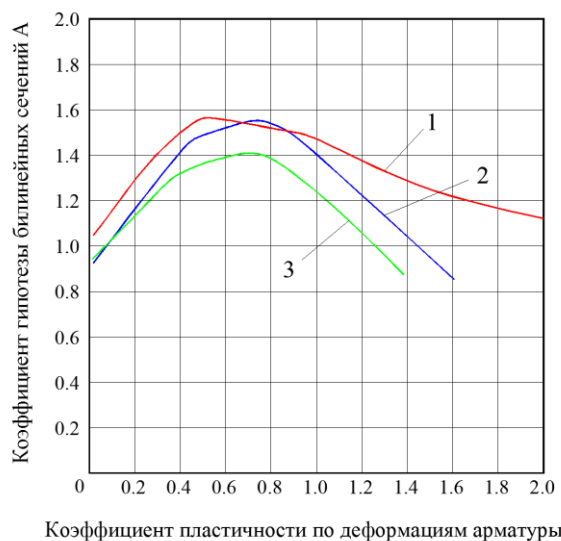


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента A гипотезы билинейных сечений от коэффициента пластичности по результатам численных расчетов для изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов с симметричным армированием: 1 – изгибаемый элемент, 2 – внецентренно сжатый элемент с эксцентриситетом 0.363 м, 3- внецентренно сжатый элемент с эксцентриситетом 0.218

Сопоставление представленных на рисунке кривых показывает, что во внецентренно сжатых элементах ожидаемо сокращается по сравнению с изгибаемым элементом зона пластической работы арматуры, предшествующая разрушению сжатого бетона. Ее сокращение тем больше, чем больше величина сжимающей силы. Предельный коэффициент пластичности, соответствующий разрушению бетона сжатой зоны, ниже из-за влияния продольной сжимающей силы.

Характер зависимости для изгибаемых и внецентренно сжатых элементов сходен, но максимальные значения смещаются в сторону больших деформаций. Максимальные значения

коэффициента A снижаются в пределах 10 %. Как и для изгибаемых элементов, в упругой стадии работы арматуры этот коэффициент больше 1, а с развитием пластических деформаций в растянутой арматуре снижается. Эпюра деформаций во всех случаях меняет характер излома в противоположную сторону, и коэффициент A становится меньше единицы. Однако во внецентренно сжатых элементах снижение происходит более интенсивно.

Получившееся в результате совместного действия момента и сжимающей силы распределение деформаций по высоте сечения тоже можно условно аппроксимировать билинейной зависимостью (рис. 6). Обозначим коэффициент, характеризующий соотношение деформаций бетона сжатой зоны и растянутой арматуры с учетом дополнительного осевого сжатия, как A_1 . На рис. 8 представлена аналогичная зависимость коэффициента A_1 от коэффициента пластичности.

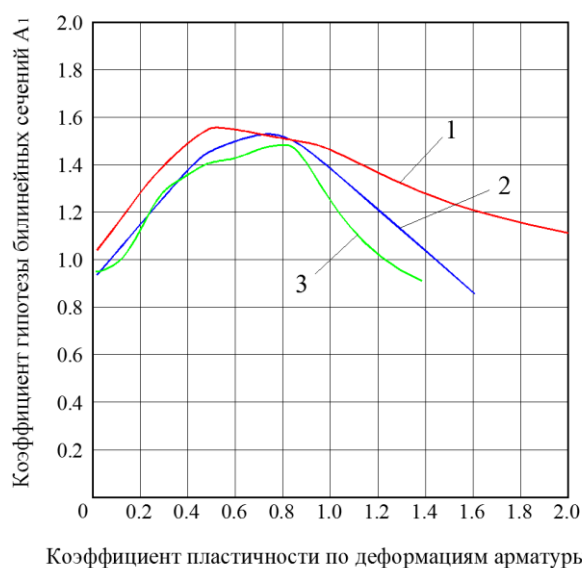


Рисунок 8 – Численная зависимость коэффициента A гипотезы билинейных сечений от коэффициента пластичности для изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов с симметричным армированием: 1 – изгибаемый элемент, 2 – внецентренно сжатый элемент с эксцентриситетом 0.29 м, 3 – внецентренно сжатый элемент с эксцентриситетом 0.178

Характер изменения этого коэффициента по мере роста пластических деформаций близок к кривым, представленным на рис. 7, но разница между максимальными значениями при изгибе и при внецентренном сжатии не превышает 6%. Также наблюдается интенсивное снижение коэффициента A_1 в пластической стадии работы арматуры, более интенсивное при внецентренном сжатии, чем при изгибе.

Заключение

Проанализировав результаты численных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Анализ эпюр деформаций внецентренно сжатых железобетонных элементов показал, что при монотонном нагружении, как и в случае изгиба, имеет место нарушение гипотезы плоских сечений. Изменение деформаций по высоте сечения, можно аппроксимировать билинейной зависимостью.
2. В как в изгибаемых, так и во внецентренно сжатых железобетонных элементах в случае больших эксцентриситетов, коэффициент A гипотезы билинейных сечений уменьшается в процессе нагружения по мере развития пластических деформаций в арматуре. Общий характер зависимости этого коэффициента от коэффициента пластичности сходен, как для сжато-изогнутых, так и для изгибаемых элементов, а величина отклонений незначительна.
3. Значение предельного коэффициента пластичности, соответствующего разрушению бетона сжатой зоны, ниже из-за влияния продольной сжимающей силы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абаканов М.С. Малоцикловая прочность железобетонных конструкций каркасных зданий при действии нагрузок типа сейсмических. Алмаата. АО "КазНИИСА". 2016. 132 с.
2. Акбиев Р.Т., Абаканов М.С. Оперативная оценка последствий разрушительного землетрясения в Турции (по официальным опубликованным данным СМИ и глобальной сети) [Электронный ресурс] / Р.Т. Акбиев, М.С. Абаканов // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 35–51.
3. Мкртычев О.В., Решетов А.А. Обеспечение сейсмостойкости железобетонных зданий // Железобетонные конструкции – 2024 № 1(5) – с. 57-67
4. Мкртычев О.В., Дорожинский В.Б., Сидоров Д.С. Исследование сейсмостойкости железобетонных зданий различных конструктивных схем // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 66-75.
5. Ружич В.В., Бержинская Л.П., Левина Е.А., Пономарева Е.И. О причинах возникновения и последствиях двух разрушительных землетрясений в Турции // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3. № 1. С. 22-34.
6. Areen Aljaafreh, Yazan Alzubi, Eslam Al-Kharabsheh, Bilal Yasin Seismic Performance of Reinforced Concrete Structures with Concrete Deficiency Caused by In-situ Quality Management Issues// Civil Engineering Journal. 2023. Vol. 9. No. 08. pp 1957-1970.
7. Garnitsky V.I., Golda Yu.L., Kurnavina S.O. Damage development process in reinforced concrete frame under the action of seismic loads // Proceedings of the III All Russian (II International) Conference on concrete and reinforced concrete «Concrete and reinforced concrete – glance at future». Moscow. 2014. Volume II. pp.57-67.
8. Бедов А.И., Николенко И.И. Обеспечение эксплуатационных характеристик железобетонных элементов каркасов зданий, подвергшихся сейсмическим воздействиям // Строительство и реконструкция. 2021/ № 1 (93). С. 3-15. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-3-15.
9. Алексейцев А.В. Анализ устойчивости железобетонной колонны при горизонтальных ударных воздействиях // Железобетонные конструкции. 2023. № 2(2). с. 3-12. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.2.3-12.
10. Кабанцев О.В., Усеинов Э.С., Шарипов Ш. О методике определения коэффициента допускаемых повреждений сейсмостойких конструкций // Вестник ТГАСУ. 2016. № 2. С. 117-129.
11. Тамразян А. Г., Черник В. И. Жесткость поврежденной пожаром железобетонной колонны при разгрузке после высокоинтенсивного горизонтального воздействия // Вестник МГСУ. 2023. Том 18. Выпуск 9. С. 1369-1382.
12. Шульгин В.Н., Ларионов В.И. Динамический расчет изгибаемых конструкций защитных сооружений в пластической стадии // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2007. № 4. С. 31-34.
13. Tamrazyan A.G., Kudryavtsev M.V Influence of Damage Level on Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Structures when Assessing their Seismic Resistance // Structural mechanics of engineering constructions and buildings. 2024 . 20(3). pp. 255-264. DOI 10.22363/1815-5235-2024-20-3-255-264.
14. Перельмутер А.В., Кабанцев О.В. О концептуальных положениях норм проектирования сейсмостойкого строительства // Вестник МГСУ. 2010. № 4. С. 238-241.
15. Курнавина С. О., И. В. Цацулин Напряженно-деформированное состояние железобетонных балок при смене знака усилия // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 2. С. 44-52. DOI 10.33622/0869-7019.2023.02.44-52.
16. Курнавина С. О., Цацулин И. В. Особенности деформирования сечений изгибаемых железобетонных элементов при действии нагрузок большой интенсивности // Строительство и реконструкция. 2023. № 3(107). С. 3-16. DOI 10.33979/2073-7416-2023-107-3-3-16.
17. Попов Д.С. Экспериментальные исследования динамических свойств коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов // Строительство и реконструкция. 2022. № 2. С. 55-64. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-100-2-55-64>.
18. Курнавина С. О., Цацулин И. В., Манаенков И. К. Влияние пластических деформаций на работу железобетонных изгибаемых элементов при смене знака усилия // Строительство и реконструкция. 2021 № 6(98). С. 50-62. DOI 10.33979/2073-7416-2021-98-6-50-62.
19. Жарницкий В. И. Прочность железобетонных конструкций по сечениям, совпадающим с фактическим полем направлений трещин (теория и эксперимент) // «Бетон и железобетон – взгляд в будущее» научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах. 2014. Том 1. С. 27-38.
20. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».

REFERENCES

1. Abakanov M.S. *Malotsiklovaya prochnost zhelezobetonnykh konstruksiy karkasnykh zdaniy pri deystvii nagruzok tipa seismicheskikh* [Low-cycle strength of reinforced concrete frame structures under seismic-type loads]. Alma-Ata: AO «KazNIISA», 2016. 132 p. (rus).
2. Akbiyev R.T., Abakanov M.S. Operativnaya otsenka posledstviy razrushitelnogo zemletryaseniya v Turtsii (po ofitsialnym dannym SMI i globalnoy seti) [Operational assessment of the consequences of the destructive earthquake in Turkey (based on official media and global network data)]. *Geologiya i okruzhayushchaya sreda*. 2023. Vol. 3. No. 1. Pp. 35–51. (rus).
3. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. Obespecheniye seismostoykosti zhelezobetonnykh zdaniy [Ensuring seismic resistance of reinforced concrete buildings]. *Zhelezobetonnye konstruksii*. 2024. No. 1(5). Pp. 57–67. (rus).
4. Mkrtychev O.V., Dorozhinskiy V.B., Sidorov D.S. Issledovaniye seismostoykosti zhelezobetonnykh zdaniy razlichnykh konstruktivnykh skhem [Study of seismic resistance of reinforced concrete buildings with different structural schemes]. *Vestnik MGSU*. 2015. No. 12. Pp. 66–75. (rus).
5. Ruzgich V.V., Berzinskaya L.P., Levina E.A., Ponomareva E.I. O prichinakh vozniknoveniya i posledstviyakh dvukh razrushitelnykh zemletryaseniy v Turtsii [On the causes and consequences of two destructive earthquakes in Turkey]. *Geologiya i okruzhayushchaya sreda*. 2023. Vol. 3. No. 1. Pp. 22–34. (rus).
6. Areen Aljaafreh, Yazan Alzubi, Eslam Al-Kharabsheh, Bilal Yasin. Seismic Performance of Reinforced Concrete Structures with Concrete Deficiency Caused by In-situ Quality Management Issues. *Civil Engineering Journal*. 2023. Vol. 9. No. 8. Pp. 1957–1970.
7. Garnitsky V.I., Golda Yu.L., Kurnavina S.O. Damage development process in reinforced concrete frame under the action of seismic loads. *Proceedings of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete «Concrete and Reinforced Concrete — Glance at Future»*. Moscow, 2014. Vol. II. Pp. 57–67.
8. Bedov A.I., Nikolenko I.I. Obespecheniye ekspluatatsionnykh kharakteristik zhelezobetonnykh elementov karkasov zdaniy, podvergshikhsya seismicheskim vozdeystviyam [Ensuring operational characteristics of reinforced concrete frame elements of buildings subjected to seismic impacts]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya*. 2021. No. 1(93). Pp. 3–15. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-3-15. (rus).
9. Alekseytsev A.V. Analiz ustoychivosti zhelezobetonnoy kolonny pri gorizontalnykh udarnykh vozdeystviyakh [Stability analysis of a reinforced concrete column under horizontal shock impacts]. *Zhelezobetonnye konstruksii*. 2023. No. 2(2). Pp. 3–12. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.2.3-12. (rus).
10. Kabanzev O.V., Sharipov S., Useinov E.S. O metodike opredeleniya koeffitsienta dopustimyykh povrezhdeniy seismostoykikh konstruksiy [Determination of allowable damage factor of antiseismic structures]. *Vestnik TGASU*. 2016. No. 2. Pp. 117–126. (rus).
11. Tamrazyan A.G., Chernik V.I. Zhestkost povrezhdennoy pozharom zhelezobetonnoy kolonny pri razgruzke posle vysokointensivnogo vozdeystviya [Stiffness of a fire-damaged reinforced concrete column during unloading after high-intensity impact]. *Vestnik MGSU*. 2023. Vol. 18. No. 9. Pp. 1369–1382. (rus).
12. Shulgin V.N., Larionov V.I. Dinamicheskii raschet izgibaemykh konstruksiy zashchitnykh sooruzheniy v plasticheskoy stadii [Dynamic analysis of flexural structures of protective facilities in the plastic stage]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*. 2007. No. 4. Pp. 31–34. (rus).
13. Tamrazyan Ashot G., Kudryavtsev Maksim V. Influence of Damage Level on Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Structures when Assessing their Seismic Resistance. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024. Vol. 20. No. 3. Pp. 255–264. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-3-255-264.
14. Perelmuter A.V., Kabanzev O.V. O kontseptualnykh polozheniyakh norm proektirovaniya seismostoykogo stroitelstva [On conceptual provisions of seismic design standards]. *Vestnik MGSU*. 2010. No. 4. Pp. 238–241. (rus).
15. Kurnavina S.O., Tsatsulin I.V. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye zhelezobetonnykh balok pri smene znaka usiliya [Stress-strain state of reinforced concrete beams under sign-changing loads]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo*. 2023. No. 2. Pp. 44–52. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.02.44-52. (rus).
16. Kurnavina S.O., Tsatsulin I.V. Osobennosti deformirovaniya izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov pri deystvii nagruzok bolshoy intensivnosti [Features of deformation of flexural reinforced concrete elements under high-intensity loads]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya*. 2023. No. 3(107). Pp. 3–16. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-3-16. (rus).
17. Popov D.S. Eksperimentalnyye issledovaniya dinamicheskikh svoystv korrozionno povrezhdennykh szhatykh zhelezobetonnykh elementov [Experimental study of dynamic properties of corrosion-damaged compressed reinforced concrete elements]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya*. 2022. No. 2. Pp. 55–64. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-55-64. (rus).
18. Kurnavina S.O., Tsatsulin I.V., Manaenkov I.K. Vliyaniye plasticheskikh deformatsiy na rabotu zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov pri smene znaka usiliya [Influence of plastic deformations on the behavior of reinforced concrete flexural elements under sign-changing loads]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya*. 2021. No. 6(98). Pp. 50–62. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-98-6-50-62. (rus).

19. Garnitsky V.I. Prochnost zhelezobetonnykh konstruksiy po secheniyam, sovpadayushchim s fakticheskim polem napravleniy treshchin (teoriya i eksperiment) [Strength of reinforced concrete structures in sections coinciding with the actual crack direction field (theory and experiment)]. *Proceedings of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete «Concrete and Reinforced Concrete — Glance at Future»*. 2014. Vol. 1. Pp. 27–38. (rus).

20. SP 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions]. Moscow, 2018.

Информация об авторах:

Курнавина Софья Олеговна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, к.т.н., доц., доц. кафедры Железобетонных и каменных конструкций

E-mail: sofyK@yandex.ru

Цацулин Илья Владимирович

ООО «Институт «Мосинжпроект», г. Москва, Россия

к.т.н., руководитель группы

E-mail: ilya.vladimirovich.t@mail.ru

Information about authors:

Kurnavina Sofya O.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

candidate in tech. sc., docent, associated prof. of the dep. of reinforced concrete and stone structures

E-mail: sofyK@yandex.ru

Tsatsulin Ilya V.

Mosinzhproekt Company group, Moscow Russia

candidate in tech. sc, team leader

E-mail: ilya.vladimirovich.t@mail.ru