

ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТРОИТЕЛЬСТВА / CONSTRUCTION ENGINEERING

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2019.13.4>

**ЖЕСТКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК В КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЯХ
КАРКАСНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Научная статья

Иванова Е.И.¹, Котов А.А.^{2,*}

²ORCID: 0000-0003-4052-6376

^{1,2}Мурманский государственный технический университет, Мурманск, Россия

* Корреспондирующий автор (akot53[at]yandex.ru)

Аннотация

При расчетах статически неопределимых стержневых систем распределение усилий по их элементам существенно зависит от соотношений их жесткостей, которые назначаются им до выполнения расчета. Железобетонные изгибаемые стержни в сооружениях эффективны, если они работают с поперечными трещинами в растянутой зоне, иначе они неэкономичны. Ясно, что изгибная жесткость железобетонной балки с трещинами существенно меньше, чем без трещин. Следовательно, еще до выполнения расчета сооружения необходимо знать, насколько трещины уменьшают изгибную жесткость железобетонной балки. Исследованию этого вопроса и посвящена настоящая работа.

Ключевые слова: статически неопределимая система, расчетная модель сооружения, железобетонная балка, метод конечных элементов, интегральная жесткость.

**THE STIFFNESS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS IN FINITE ELEMENT ANALYSIS MODELS OF
PREFABRICATED BUILDINGS**

Research article

Ivanova E.I.¹, Kotov A.A.^{2,*}

²ORCID: 0000-0003-4052-6376

^{1,2}Murmansk state technical University, Murmansk, Russia

* Corresponding author (akot53[at]yandex.ru)

Abstract

In the calculation of statically indeterminate rod systems, the distribution of forces on their elements significantly depends on the ratio of their stiffness, which are assigned to them before the calculation. Reinforced concrete curving rods in structures are effective if they work with transverse cracks in the stretched zone, otherwise they are uneconomical. It is clear that the bending stiffness of a reinforced concrete beam with cracks is significantly less than without cracks. Therefore, even before the calculation of the structure, it is necessary to know how the cracks reduce the bending stiffness of the reinforced concrete beam. This work is devoted to the study of this issue.

Keywords: statically indefinable system, calculation model of building, reinforce-concrete beam, method of eventual elements, integral inflexibility.

Введение

Современная практика проектирования в строительстве предусматривает для каждого достаточно сложного сооружения создание пространственной конечноэлементной расчетной модели с целью оценки пространственной жесткости, устойчивости и прочности по отношению к воздействиям различного вида. Такие расчетные модели практически всегда являются статически неопределимыми, и распределение усилий между их элементами существенно зависит от соотношения жесткостей их элементов. Поскольку оптимальные сечения для всех элементов априори назначить совершенно невозможно, то расчет любой пространственной модели осуществляется в несколько приемов, в процессе которых размеры сечений уточняются. В отношении сооружений с железобетонным стержневым каркасом задача усложняется тем, что изгибаемые железобетонные стержни экономически эффективны только в том случае, если они работают с трещинами в растянутой зоне, и нужно уметь оценивать не только их исходную, номинальную изгибную жесткость, но также и реальную эксплуатационную жесткость при их работе с трещинами. То есть нужно заранее знать, насколько образование трещин в растянутой зоне уменьшает исходную изгибную жесткость железобетонного элемента.

В отношении величины понижающих коэффициентов исходной жесткости железобетонных изгибаемых элементов имеются рекомендации, изложенные в своде правил [1 С. 22]. Эти рекомендации обобщают опыт предшествующих экспериментальных и теоретических исследований данного вопроса. Однако любые обобщения с течением времени и по мере накопления новой информации могут уточняться. С этой целью в настоящей работе

сделана попытка подойти к вопросу о жесткости железобетонной балки с трещинами через детальное моделирование процесса образования трещин при увеличении интенсивности распределенной нагрузки вплоть до разрушения.

Постановка задачи

Жесткость железобетонных балок с трещинами логично назначать в долях от номинальной жесткости этих же балок без трещин, т. е. использовать понятие относительной интегральной жесткости балки с трещинами. Для этого нужно иметь ответ на вопрос, насколько трещины уменьшают жесткость железобетонной балки, т. е. какова величина этой относительной интегральной жесткости, а также от каких параметров балок она зависит. Прямой путь получения ответа на первый из этих вопросов состоит в том, чтобы сравнить прогибы при одинаковой нагрузке балки с трещинами и балки без трещин. При этом ясно, что балка без трещин может быть рассмотрена только как виртуальная. Для решения же вопроса о детальном моделировании процесса образования трещин в современной действительности нет более совершенного способа, нежели метод конечных элементов [2 С. 16–20], [3, С. 66–71], [4, С. 2–5] - [5, С. 37–87], который и используется в настоящей работе.

В качестве главного фактора, определяющего величину относительной интегральной жесткости, рассмотрен основной параметр железобетонной балки: коэффициент армирования.

Процесс решения

Конкретно для решения поставленной задачи здесь применяется конечноэлементный компьютерный комплекс SCAD. Исследуются балки с коэффициентами армирования в практически значимом диапазоне от 0,00262 до 0,00990. При этом для всех рассматриваемых балок физические свойства арматуры и бетона, а также внешние габариты сохраняются одинаковыми. В качестве коэффициента армирования принято отношение площади сечения растянутой арматуры к площади железобетонного сечения без трещин:

$$\mu = A_s / bh.$$

Конструкция и схема нагружения всех рассмотренных балок представлена на рис. 1. В зависимости от степени армирования может меняться количество стержневых стержней в растянутой зоне. Опорные зоны балки занимают 150 мм нижней грани в окрестности каждого торца и моделируются пластинами на упругом основании. Для всех балок бетон принят класса B25, арматура продольная - A500, поперечная - A240.

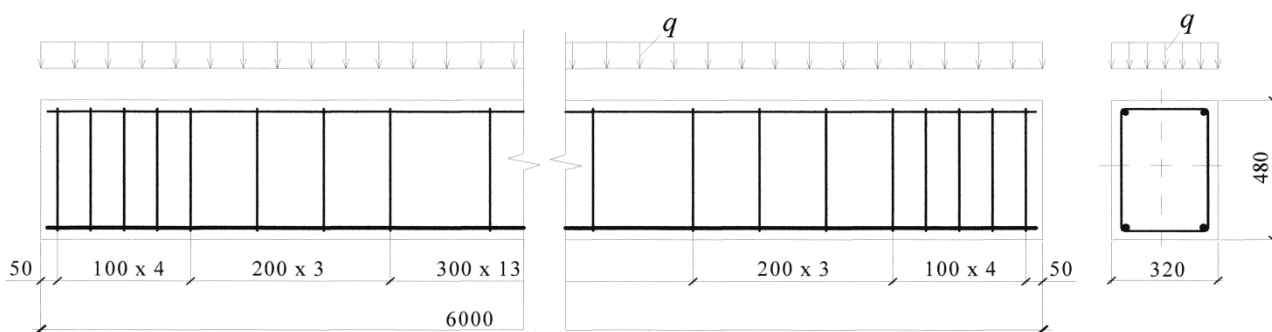


Рис. 1 - Исследуемый стержневой железобетонный элемент

В конечноэлементной расчетной схеме бетон моделируется объемными восьмиузловыми элементами размерами 50×40×40 мм, арматура – стержневыми длиной 40 и 50 мм. Полезная нагрузка, равномерно распределенная по верхней грани, реализована в виде малых сосредоточенных сил, приложенных к узлам этой грани, а собственный вес элементов учитывается автоматически.

Состояние каждой балки рассматривается во всем диапазоне увеличения нагрузки от нулевой до разрушающей. Поскольку изначально оба составляющих конструкцию материала рассматриваются как линейно упругие, то на начальном этапе нагружения напряжения в элементах возрастают пропорционально нагрузке, до тех пор, пока наиболее растянутые бетонные элементы не исчерпают своего нормативного сопротивления растяжению при изгибе. В качестве такой величины для бетона B25 с нормативным сопротивлением растяжению 1,55 МПа в соответствии с исследованиями [6, С. 17] принято 2,64 МПа = 2640 кПа. На рис. 2 показано состояние средней части одной из балок в момент исчерпания сопротивления растяжению при изгибе.

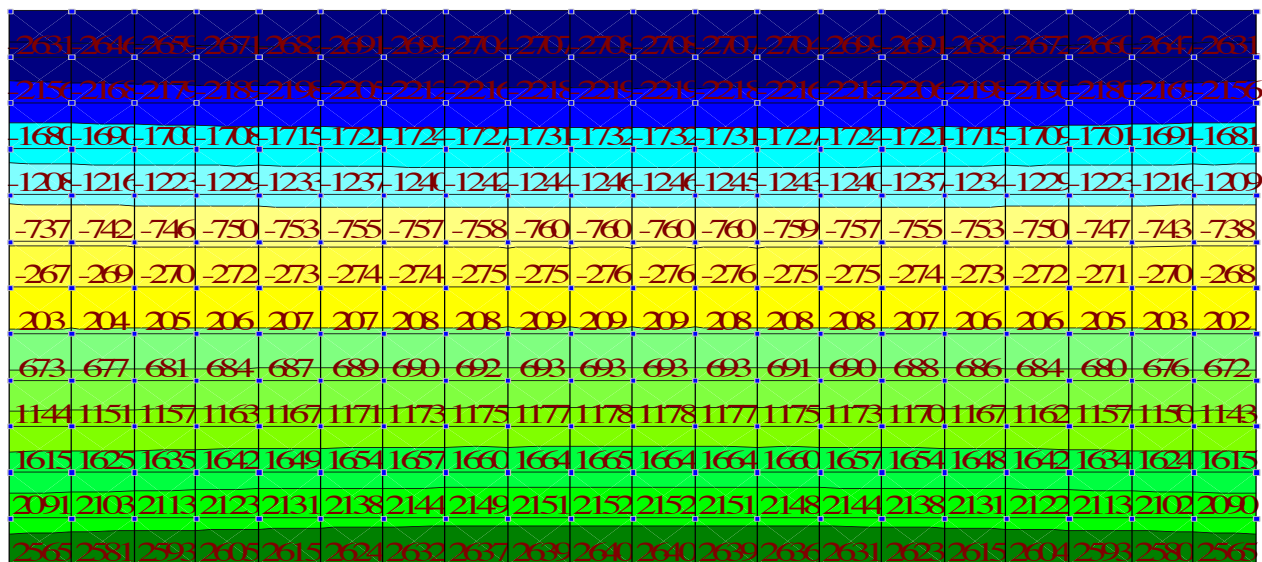


Рис. 2 - Нормальные напряжения, кПа, в бетоне перед началом образования первой трещины

По достижении напряжениями в наиболее растянутых элементах предельного сопротивления в них должно происходить разрушение, т. е. должно начаться образование нормальной трещины. По напряжениям видно, что трещина образуется сначала только одна, в центральном сечении. Образуется ли она сразу на некоторую конечную высоту или растет постепенно с увеличением нагрузки? Во многих исследованиях [7, С. 116–122], [8, С. 17], [9, С. 106–156], [10, С. 116–122] отмечается динамический, скачкообразный характер образования трещин, что свидетельствует в пользу первого варианта. Однако, не принимая априори ни того, ни другого, попытаемся действовать в конечноэлементном моделировании происходящего в соответствии с конкретной ситуацией. Исчерпание прочности наиболее растянутыми элементами при данной нагрузке означает наступление нестабильного состояния конструкции. Увеличивать нагрузку при нестабильном состоянии совершенно нелогично, необходимо сначала достичь стабилизации, т. е. выяснить, какое состояние конструкции станет стабильным при данной величине нагрузки. Поэтому сначала при неизменной нагрузке поднимаем трещину на минимально возможную высоту - на высоту одного нижнего слоя бетонных конечных элементов, изменяя тем самым расчетную схему конструкции. Выполняем расчет по этому новому состоянию и получаем результат, показанный на следующем рисунке.

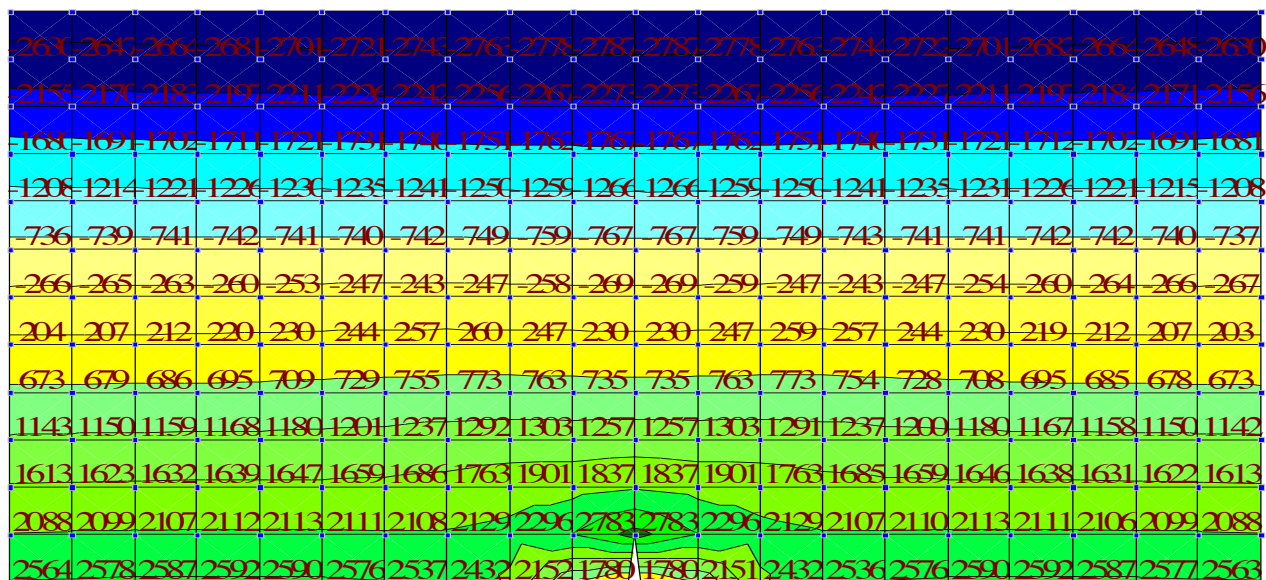


Рис. 3 - Нормальные напряжения в бетоне с трещиной на высоту одного конечного элемента

По рис. 3 видно, что напряжения над вершиной трещины по-прежнему превышают предельное сопротивление 2640 кПа. Поэтому состояние с трещиной на высоту одного нижнего слоя бетонных конечных элементов также нестабильно, и нужно снова менять расчетную схему, увеличивая трещину вверх. Аналогичная ситуация наблюдается и в состоянии с трещиной на два нижних слоя. Следовательно, при неизменной нагрузке трещина движется вверх на

некоторую конечную высоту. При этом, естественно, двигается не только вершина трещины, но с ее движением вверх происходит движение материальных точек балки вниз, поскольку с ростом трещины жесткость балки уменьшается, и прогибы увеличиваются. Таким образом, происходит динамический процесс образования первой трещины. Ясно, что он может быть остановлен только некоторым встречным процессом, т. е. достижением балкой такого состояния, которое будет препятствовать дальнейшему росту трещины. Очевидно, это может произойти только при том условии, что напряжения в бетоне над трещиной приобретут характер, качественно противоположный тому, который провоцирует рост трещины, т. е. вместо растягивающих станут сжимающими. Исходя из этих соображений, подъем трещины вверх останавливаем только тогда, когда напряжения в бетоне над трещиной станут сжимающими. Для представленного здесь примера это происходит тогда, когда от вершины трещины до верхней грани балки остается два слоя конечных элементов. Это состояние балки показано на рис. 4.

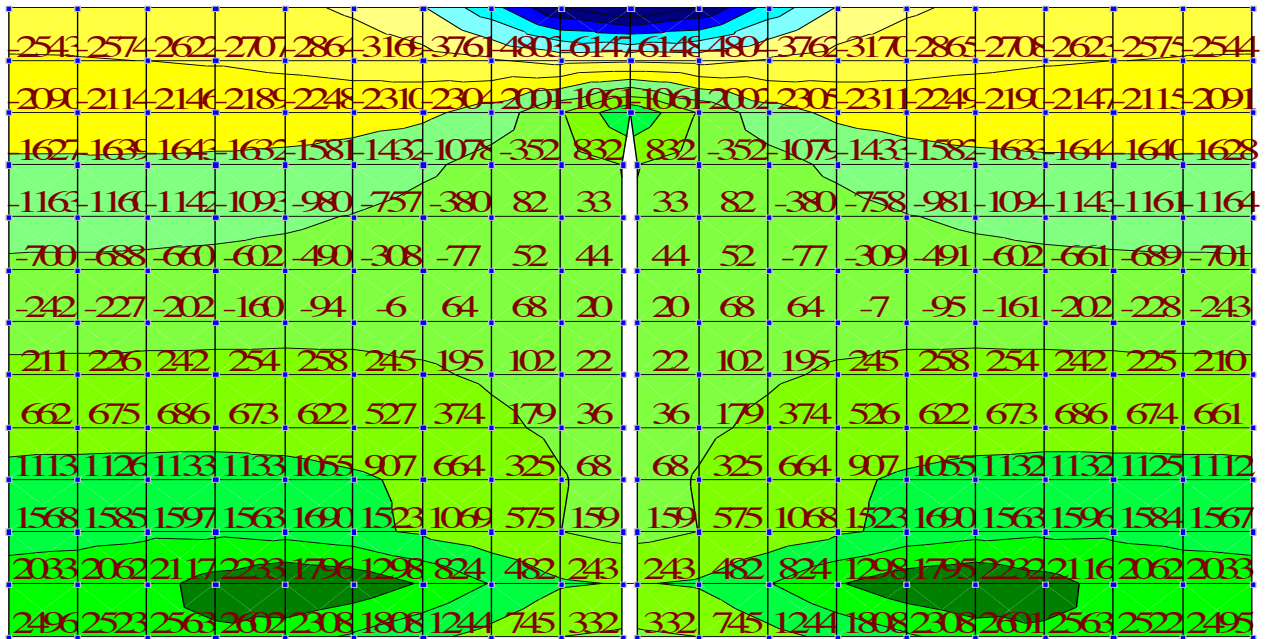


Рис. 4 - Нормальные напряжения в бетоне после завершения образования первой трещины

В процессе подъема центральной трещины вверх при неизменной нагрузке расчетную схему балки приходится менять не только из-за изменения высоты трещины. На некотором очередном шаге ее подъема напряжения в бетоне в зоне сцепления бетона с арматурой становятся превышающими предельное сопротивление растяжению. Это означает, что бетон у берегов трещины находится в запределном состоянии, т. е. он должен испытывать локальные микроразрушения. Эти изменения в бетоне должны быть отражены в расчетной схеме. Осуществляем это путем уменьшения модуля деформации бетонных конечных элементов в зоне сцепления бетона с арматурой: снижаем его вдвое при каждом наступлении запределного состояния.

Меняя указанными способами расчетную схему балки при неизменной нагрузке, в результате нескольких итераций (в данном примере - 11) получаем стабильное состояние конструкции, при котором напряжения в бетоне над вершиной трещины становятся сжимающими, а в зоне сцепления, как и во всей растянутой зоне бетона, они не достигают предельного сопротивления (рис. 4).

Таким образом, из состояния, показанного на рис. 2, в результате образования центральной трещины балка при одной и той же нагрузке переходит в состояние, показанное на рис. 4. Поскольку последнее состояние является стабильным, то балка способна воспринимать дальнейшее увеличение нагрузки. Выполняем это увеличение до тех пор, пока напряжения в наиболее растянутых бетонных элементах не достигнут предельного сопротивления растяжению при изгибе. После этого осуществляем моделирование двух трещин второго уровня путем корректировки расчетной схемы, как это было описано для трещины первого уровня. После достижения стабильного состояния с трещинами двух уровней снова производим догружение до начала образования трещин третьего уровня, и так далее.

На всех этапах догружения балки контролируются напряжения в бетоне сжатой зоны и напряжения в арматуре. Момент исчерпания прочности либо сжатым бетоном, либо растянутой арматурой, считается предельным состоянием балки, и на этом процедура ее исследования под нагрузкой завершается. Эксплуатационным состоянием балки считается ее состояние, наблюдаемое в промежутке от момента завершения образования трещин последнего уровня до ее предельного состояния. На рис. 5 показано эксплуатационное состояние с трещинами одной из рассмотренных балок.

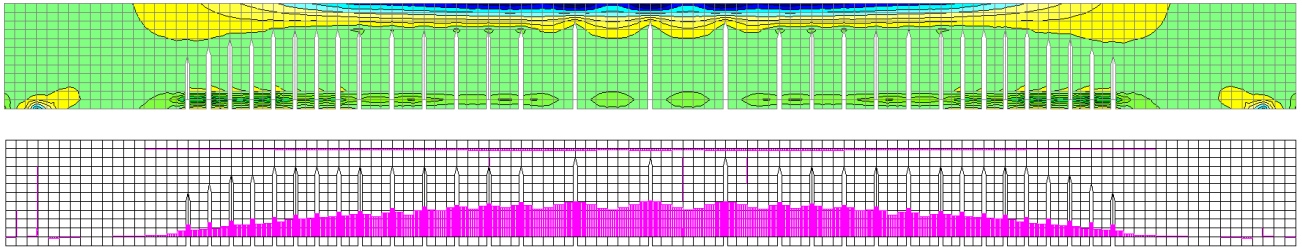


Рис. 5 - Эксплуатационное состояние балки: нормальные напряжения в бетоне и продольные усилия в арматуре

В эксплуатационном состоянии с трещинами при нагрузке, имеющей некоторый запас прочности по отношению к предельной, фиксируются прогибы геометрической оси балки. Эти прогибы сравниваются с прогибами при той же самой нагрузке аналогичной виртуальной балки без трещин, анализируемой в предположении, что бетон сопротивляется растяжению неограниченно. В качестве относительной интегральной жесткости β балки с трещинами принимаем отношение максимального прогиба в балке без трещин к максимальному прогибу в балке с трещинами:

$$\beta = w_{\sigma_T} / w_T.$$

Например, для балки с армированием 4Ø16 ($\mu = 0,00524$) максимальный прогиб в виртуальном состоянии без трещин составил $w_{\sigma_T} = 7,44$ мм, а в реальном состоянии трещинами при той же нагрузке - $w_T = 19,34$ мм. Таким образом ее относительная интегральная жесткость составила $\beta = 7,44 / 19,34 = 0,385$.

Основные результаты

После исследования нескольких по-разному армированных балок построена зависимость относительной интегральной жесткости от коэффициента армирования; она представлена на рис. 6.

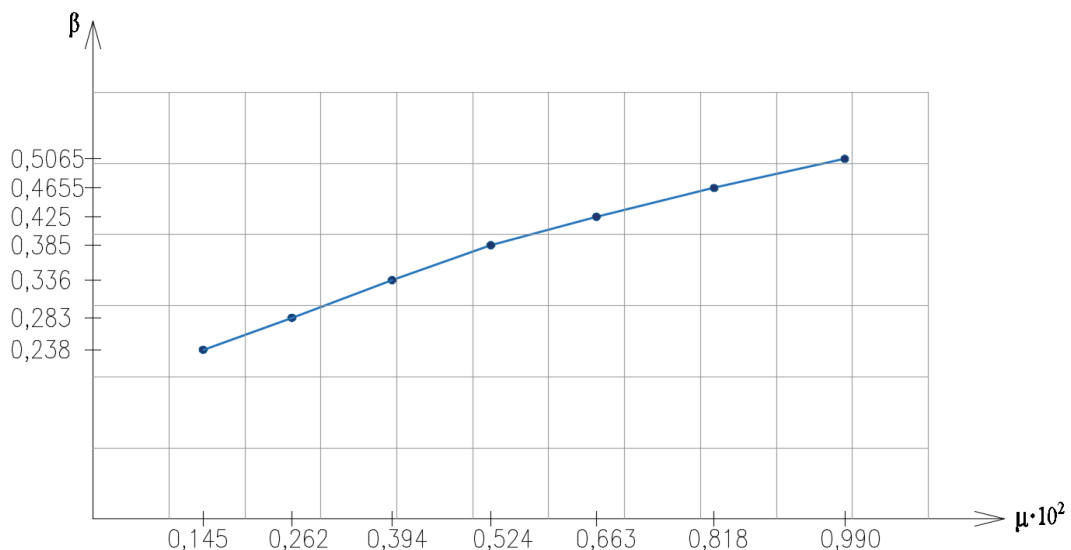


Рис. 6 - График зависимости относительной интегральной жесткости от коэффициента армирования

Среднее значение интегральной жесткости в данном исследовании составило величину 0,377. При этом в трех балках с наибольшим армированием разрушение произошло по сжатию бетону, а не по растянутой арматуре. Если исключить из рассмотрения эти три «переармированные» балки, то средняя относительная интегральная жесткость уменьшается до величины 0,311. Эти результаты в цифровом выражении перекликаются с рекомендациями, которые содержатся в своде правил [1]. Однако если учесть, что последние учитывают не только трещинообразование, но и ползучесть, то результаты настоящей работы свидетельствуют о несколько большем влиянии трещинообразования на снижении изгибной жесткости железобетонных балок, нежели это принято в СП.

Выводы

Путем оригинального подробного конечноэлементного моделирования процесса образования трещин в железобетонных балках с разными практически значимыми коэффициентами армирования получен ответ на вопрос, насколько образование трещин в подобных конструкциях уменьшает их начальную изгибную жесткость. Эти результаты могут быть использованы для прогнозирования эксплуатационной жесткости изгибаемых железобетонных элементов при компьютерном моделировании сложных пространственных статически неопределимых каркасных сооружений.

Список литературы / References

1. СП 52-2007. Железобетонные монолитные конструкции зданий. - М. : ФГУП «НИЦ Строительство», 2007. - 22 с.
2. Бенин А. В. Конечно-элементное моделирование процессов разрушения элементов железобетонных конструкций / А. В. Бенин // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. - № 5. - С. 16–20.
3. Залесов А. С., Пащанин А. А. Расчет прочности железобетонных балок с использованием объемных конечных элементов в развитие норм по проектированию железобетонных конструкций / А. С. Залесов, А. А. Пащанин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. - № 4. - С. 66–71.
4. Безгодов И. М. О соотношениях прочностных и деформативных характеристик бетона при сжатии, растяжении и растяжении при изгибе / И. М. Безгодов // Бетон и железобетон. – 2012. - № 2. - С. 2–5.
5. Белобров И. К., Щербина В. И. Влияние быстрых нагружений на прочность железобетонных балок / И. К. Белобров, В. И. Щербина // Влияние скорости нагружения, гибкости и крутящих моментов на прочность железобетонных конструкций. – М. : Стройиздат, 1970. - С. 37–87.
6. Карабаш В. Г. Экспериментально-теоретическое исследование работы арматуры изгибаемых железобетонных элементов : автореферат дис. ... канд. тех. наук. / В. Г. Карабаш. - М : 1953. – 17 с.
7. Яковленко Г. П. Внутренняя неустойчивость и жесткость в сечении армированной балки с трещинами / Г. П. Яковленко // Статика и динамика сложных механических систем и строительных конструкций : межвуз. тематич. сб. тр. – Л : ЛИСИ, 1981. - С. 116–122.
8. Карабаш В. Г. Экспериментально-теоретическое исследование работы арматуры изгибаемых железобетонных элементов : автореферат дис. ... канд. тех. наук. / В. Г. Карабаш. - М : 1953. – 17 с.
9. Немировский, Я. М., Кочетков, О. И. Влияние работы растянутой и сжатой зон бетона на деформации обычных изгибаемых железобетонных элементов. / Я. М. Немировский, О. И. Кочетков // Особенности деформаций бетона и железобетона и использование ЭВМ для оценки их влияния на поведение конструкций. - М: Стройиздат, 1969. - С. 106 – 156.
10. Яковленко Г. П. Внутренняя неустойчивость и жесткость в сечении армированной балки с трещинами / Г. П. Яковленко // Статика и динамика сложных механических систем и строительных конструкций : межвуз. тематич. сб. тр. – Л : ЛИСИ, 1981. - С. 116–122.

Список литературы на английском языке / References in English

1. SP 52-2007. Zhelezobetonnye monolitnye konstrukcii zdaniy [SP 52-2007. Reinforced concrete monolithic structures of buildings]. - М. : FGUP «NIC Stroitel'stvo», 2007. - 22 P. [in Russian]
2. Benin A. V. Konechno-jelementnoe modelirovanie processov razrusheniya jelementov zhelezobetonnyh konstrukcij [Finite element modeling of processes of destruction of reinforced concrete structures] / A. V. Benin // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil engineering]. – 2011. - № 5. - P. 16–20. [in Russian]
3. Zalesov A. S., Pashhanin A. A. Raschet prochnosti zhelezobetonnyh balok s ispol'zovaniem ob#emnyh konechnyh jelementov v razvitie norm po proektirovaniyu zhelezobetonnyh konstrukcij [Calculation of strength of reinforced concrete beams using volumetric finite elements in the development of standards for the design of reinforced concrete structures] / A. S. Zalesov, A. A. Pashhanin // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij [Construction mechanics and calculation of structures]. – 2011. - № 4. - P. 66–71. [in Russian]
4. Bezgodov I. M. O sootnoshenijah prochnostnyh i deformativnyh ha-rakteristik betona pri szhatii, rastjazhenii i rastjazhenii pri izgibem [On the relations of strength and deformation characteristics of concrete under compression, tensile and tensile bending] / I. M. Bezgodov // Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. – 2012. - № 2. - P. 2–5. [in Russian]
5. Belobrov I. K., Shherbina V. I. Vlijanie bystryh zagruzhenij na prochnost' zhelezobetonnyh balok [The effect of rapid loading on the strength of reinforced concrete beams] / I. K. Belobrov, V. I. Shherbina // Vlijanie skorosti nagruzhenija, gibkosti i krutjashhih momentov na prochnost' zhelezobetonnyh konstrukcij [Influence of loading speed, flexibility and torques on the strength of reinforced concrete structures]. – М. : Strojizdat, 1970. - P. 37–87. [in Russian]
6. Karabash V. G. Jeksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie raboty armatury izgibaemyh zhelezobetonnyh jelementov : avtoreferat dis. ... kand. teh. nauk [Experimental and theoretical study of valve bending reinforced concrete elements : the author's abstract dis. ... kand. tech. sciences']. / V. G. Karabash. - М : 1953. – 17 P. [in Russian]
7. Jakovlenko G. P. Vnutrennjaja neustojchivost' i zhestkost' v sechenii armirovannoj balki s treshhinami [Internal instability and stiffness in the cross section of the reinforced beams with cracks] / G. P. Jakovlenko // Statika i dinamika slozhnyh mehanicheskikh sistem i stroitel'nyh konstrukcij : mezhvuz. tema-tich. sb. tr. [Statics and dynamics of complex mechanical systems and building structures : Intercollegiate. thematically. sat. tr.] – L : LISI, 1981. - P. 116–122. [in Russian]
8. Karabash V. G. Jeksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie raboty armatury izgibaemyh zhelezobetonnyh jelementov : avtoreferat dis. ... kand. teh. nauk [Experimental and theoretical study of valve bending reinforced concrete elements : the author's abstract dis. ... kand. tech. sciences']. / V. G. Karabash. - М : 1953. – 17 P. [in Russian]
9. Nemirovsky, Y. M., Kochetkov, O. I. Vliyanie raboty rastyanutoy i szhatoy zon betona na deformatsii obychnykh izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov. [The influence of the stretched and compressed areas of the concrete strain normal bending reinforced concrete elements] / Y. M. Nemirovsky, O. I. Kochetkov // Features of concrete and reinforced concrete deformations and the use of computers to assess their impact on the behavior of structures. – М. : Strojizdat, 1969. - P. 106 – 156. [in Russian]

10. Jakovlenko G. P. Vnutrennjaja neustojchivost' i zhestkost' v sechenii armirovannoj balki s treshhinami [Internal instability and stiffness in the cross section of the reinforced beams with cracks] / G. P. Jakovlenko // Statika i dinamika slozhnyh mehanicheskikh sistem i stroitel'nyh konstrukcij : mezhvuz. tema-tich. sb. tr. [Statics and dynamics of complex mechanical systems and building structures : Intercollegiate. thematically. sat. tr.] – L : LISI, 1981. - P. 116–122. [in Russian]
