

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО БАЛОЧНОГО ЭЛЕМЕНТА В УСЛОВИЯХ ПРИЛОЖЕНИЯ МЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ РАСТЯГИВАЮЩИХ УСИЛИЙ

Н. Н. ШАЛОБЫТА¹, Е. С. МАТВЕЕНКО², Н. В. МАТВЕЕНКО³

¹ к.т.н., доцент, проректор по научной работе,

² м.т.н., аспирант кафедры строительных конструкций,

³ м.т.н., научный сотрудник отраслевой лаборатории

«Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве»

Учреждение образования «Брестский государственный технический университет»

г. Брест, Республика Беларусь

Аннотация. В области научных исследований строительных конструкций на этапе постановки натурных испытаний все чаще прибегают к численному моделированию. Применительно к железобетонным конструкциям, программные комплексы, реализующие метод конечных элементов, позволяют оценить напряженно-деформированное состояние опытных образцов даже в тех случаях, когда физический эксперимент сложно осуществить или его реализация сопряжена с большими финансовыми вложениями. Вычислительный эксперимент получил широкое распространение благодаря возможности изучения влияния различных факторов на предмет исследования с минимальными затратами труда и времени.

По этой причине для оценки напряженно-деформированного состояния элементов железобетонной конструкции, подверженных местному действию растягивающих усилий, выполнено численное моделирование при помощи конечно-элементного анализа в одном из наиболее используемых в настоящее время комплексов конечно-элементного моделирования «Abaqus/CAE». Получены данные о характере образования и развития трещин отрыва, зоны отрыва бетона, в зависимости от точки приложения отрывающего усилия.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, растягивающее усилие, напряженно-деформированное состояние, моделирование, метод конечных элементов, программный комплекс, главная балка, второстепенная балка, зона отрыва, наклонные трещины.

NUMERICAL STUDY OF THE BEHAVIOR OF A REINFORCED CONCRETE BEAM ELEMENT IN CONDITIONS OF APPLICATION OF LOCAL ACTION OF TENSILE FORCES

N. N. SHALOBYTA¹, E. S. MATVEENKO², N. V. MATVEENKO³

¹ PhD in engineering, associate professor, Vice-rector for scientific work,

² M.T.n., postgraduate student of the Department of Building Structures,

³ M.T.n., researcher at the industry laboratory "Research Center for Innovations in Construction"
Educational institution "Brest State Technical University"

Brest, Republic of Belarus

Abstract. In the field of scientific research of building structures at the stage of setting full-scale tests, numerical modeling is increasingly resorted to. With regard to reinforced concrete structures, software packages implementing the finite element method allow us to assess the stress-strain state of prototypes even in cases when a physical experiment is difficult to implement or its implementation involves large financial investments. The computational experiment has become widespread due to the possibility of studying the influence of various factors on the subject of research with minimal labor and time.

For this reason, numerical simulation using finite element analysis in one of the most currently used finite element modeling complexes "Abaqus/CAE" was performed to assess the stress-strain state of reinforced concrete structural elements exposed to local tensile forces. Data were obtained on the nature of the formation and development of separation cracks, the separation zone of concrete, depending on the point of application of the tearing force.

Keywords: reinforced concrete structures, tensile force, stress-strain state, modeling, finite element method, software package, main beam, secondary beam, separation zone, inclined cracks.

Введение.

В современной теории железобетона вопрос сопротивления местному действию растягивающих усилий до сих пор является одним из наиболее дискуссионных. В научном сообществе нет единого мнения о параметрах, влияющих на сопротивление местному действию растягивающих усилий, модели сопротивления отрыву, а так же методике расчета. Все известные методики расчета железобетонных конструкций на отрыв содержат в основном эмпирические зависимости для расчетных моделей, основанных на теориях сопротивления упругих материалов.

В настоящее время для оценки напряженно-деформированного состояния наиболее целесообразно моделирование железобетонных конструкций конечными элементами (КЭ), что позволяет выполнять оценку опираясь на отдельные КЭ, находящихся под воздействием полного комплекса силовых факторов. Решить данную задачу позволяют программные комплексы, реализующие метод конечных элементов (МКЭ) хорошо известные в нашей стране, такие как NASTRAN, ANSYS, ABAQUS, COSMOS (США), DIANA (Голландия), ROBOT (Франция) и т. д. Численное моделирование становится неотъемлемой частью при разработке, совершенствовании и исследовании строительных конструкций [1]. Достигнутый на данный момент уровень развития вычислительной техники, как по быстродействию, так и по объему оперативной памяти, и одновременно с этим широкое внедрение многопроцессорных систем позволяют реализовывать более сложные нелинейные математические модели строительных конструкций из различных материалов. Решение подобных задач в нелинейной постановке позволит в конечном итоге реализовать идею сокращения экспериментальных исследований математическим моделированием на ЭВМ. Наряду с этим, в настоящее время изменились приоритеты исследования – главной задачей исследователя становится не получение любой ценой решения в виде аналитического выражения, а преобразование исходных уравнений (в том числе аналитическими методами) к виду, удобному для ЭВМ, и последующий машинный анализ моделируемой системы.

Вычислительный эксперимент во многом аналогичен натурному. Он также состоит из последовательного проведения этапов, таких как планирование экспериментов, создание экспериментальной установки, проведение испытаний, обработка экспериментальных данных, их интерпретация и т. д. Однако, вычислительный эксперимент проводится не над реальным объектом, а над его математической моделью, и роль экспериментальной установки играет оснащенная специально разработанной программой ЭВМ.

Сравнивая численный и физический эксперименты, приходим к выводу, что физический значительно дороже. Численный эксперимент обладает типичной для теории степенью гибкости, которая состоит в способности оценить влияние различных факторов, не прибегая к существенным изменениям в вычислительной модели. В тех случаях, когда физическое явление недостаточно изучено или реальный эксперимент трудно осуществить, математическое моделирование остается практически единственным средством. Математические модели, алгоритмы и программы легко копируются, распространяются и воспроизводятся. Однако, при проведении исследований важно помнить, что численный эксперимент имеет свои ограничения, которые могут привести к неэффективным затратам времени и ресурсов, или даже к получению ошибочных результатов. Применимость результатов вычислительного эксперимента ограничена рамками принятой математической модели. Результаты натурного опыта являются фундаментом для построения теории, на основе которой создается математическая модель. Поэтому к результатам численного эксперимента необходимо подходить с известной осторожностью, особенно если в его основе лежит новая теория либо используемые параметры модели находятся на границе области ее применимости.

Численное исследование.

Для анализа НДС железобетонных элементов при местном действии растягивающих усилий, получения сведений о величине зоны отрыва железобетонных элементов в местах приложения отрывающего усилия, а так же данных об особенностях образования и развития трещин, выполнено численное моделирование при помощи конечно-элементного анализа в программном комплексе «Abaqus/CAE» [2].

Выбор данного программного комплекса обусловлен следующим его преимуществами [1]:

1. Наличие прямого доступа к САД-моделям.
2. Расширенные возможности по построению сетки конечных элементов.
3. Способность учитывать особенности бетона такие как различия в работе на сжатие и растяжение, дилатация и трещинообразование.
4. Широкий выбор моделей деформирования и прочности бетона
5. Возможность обеспечения совместной работы бетона и арматуры.
6. Расширенные возможности по построению сетки конечных элементов.
7. Возможность проведения расчетов неявных и явных систем численного моделирования (система «*ABAQUS Standard*» и явных «*ABAQUS Explicit*»).

Конечно-элементный анализ проводится на узле фрагмента пересечения балок (главной и второстепенной). Железобетонная главная балка запроектирована из условия обеспечения сопротивления изгибу и срезу в соответствии с СП 5.03.01-2020 [3]. Пролет главной балки принят 3000 мм, размеры сечения $b \times h = 220 \times 500$ мм. Принятый класс бетона $C^{20}/_{25}$. В качестве рабочего продольного армирования растянутой зоны используется два стержня диаметрами 14 мм класса S500, в сжатой зоне установлены два стержня диаметрам 8 мм класса S500. Поперечное армирование приопорной зоны балок выполнено из хомутов диаметрами 5 мм класса S500, установленных с шагом 100 мм.

Дополнительное поперечное армирование в месте передачи отрывающего усилия не предусмотрено с целью анализа размеров зоны отрыва в главной балке (отрывающая нагрузка воспринимается только бетоном).

Для определения напряженно-деформированного состояния зоны отрыва в рамках общего нелинейного динамического анализа использовался метод «*Quasi-static*» (квазистатический). Для моделирования искусственного каменного материала (бетона) была использована модель с разрушением (*concrete damage plasticity model*). В программном комплексе *Abaqus/CAE* для моделирования арматуры в теле бетона предусмотрен специальный инструмент *Wire*, который представляет арматурные элементы в виде линейных элементов, соединенных с окружающим бетоном в узлах конечных элементов.

Приложение отрывающего усилия осуществлялось через участок второстепенной железобетонной балки сечением 120x300 мм, расположенной в центре пролета главной балки.

Смоделированы следующие три схемы сопряжения балок (т. е. схемы приложения отрывающего усилия):

- I вариант – верхние грани главной и второстепенной балок совпадают (рис. 1, а);
- II вариант – второстепенная балка располагается в пределах высоты сечения главной балки (рис. 1, б);
- III вариант – нижние грани главной и второстепенной балок совпадают (рис. 1, в).

По результатам численных экспериментов получена картина распределения трещин отрыва по высоте сечения главной балки, установлена длина зоны отрыва для каждого из вариантов сопряжения, а так же угол наклона трещин отрыва (рис. 2).

Анализ результатов численных исследований показал, что для первых двух вариантов сопряжения при приложении отрывающей нагрузки в пределах 2/3 высоты сечения главной балки имеет место возникновение вертикальных трещин строго под действующей нагрузкой. При увеличении нагрузки возникают нормальные трещины ближе к опорам, которые, впоследствии, отклонятся в направлении точки приложения нагрузки (центра тяжести второстепенной балки). В третьем варианте нормальные трещины возникают по граням второстепенной балки и далее развиваются по контуру ее поперечного сечения, что и приводит в конечном счете к отрыву.

Установлено, что угол наклона трещин отрыва составил 36° к вертикали для I варианта сопряжения (рис. 2, а), для II – 31° (рис. 2, б), для III – 0° (рис. 2, в). Размер зоны распространения наклонных трещин для рассмотренных вариантов получился равным 660 мм, 510 мм и 150 мм соответственно.

Следует отдельно отметить, что разрушение образцов происходило при образовании горизонтальных трещин вдоль продольной рабочей арматуры главной балки.

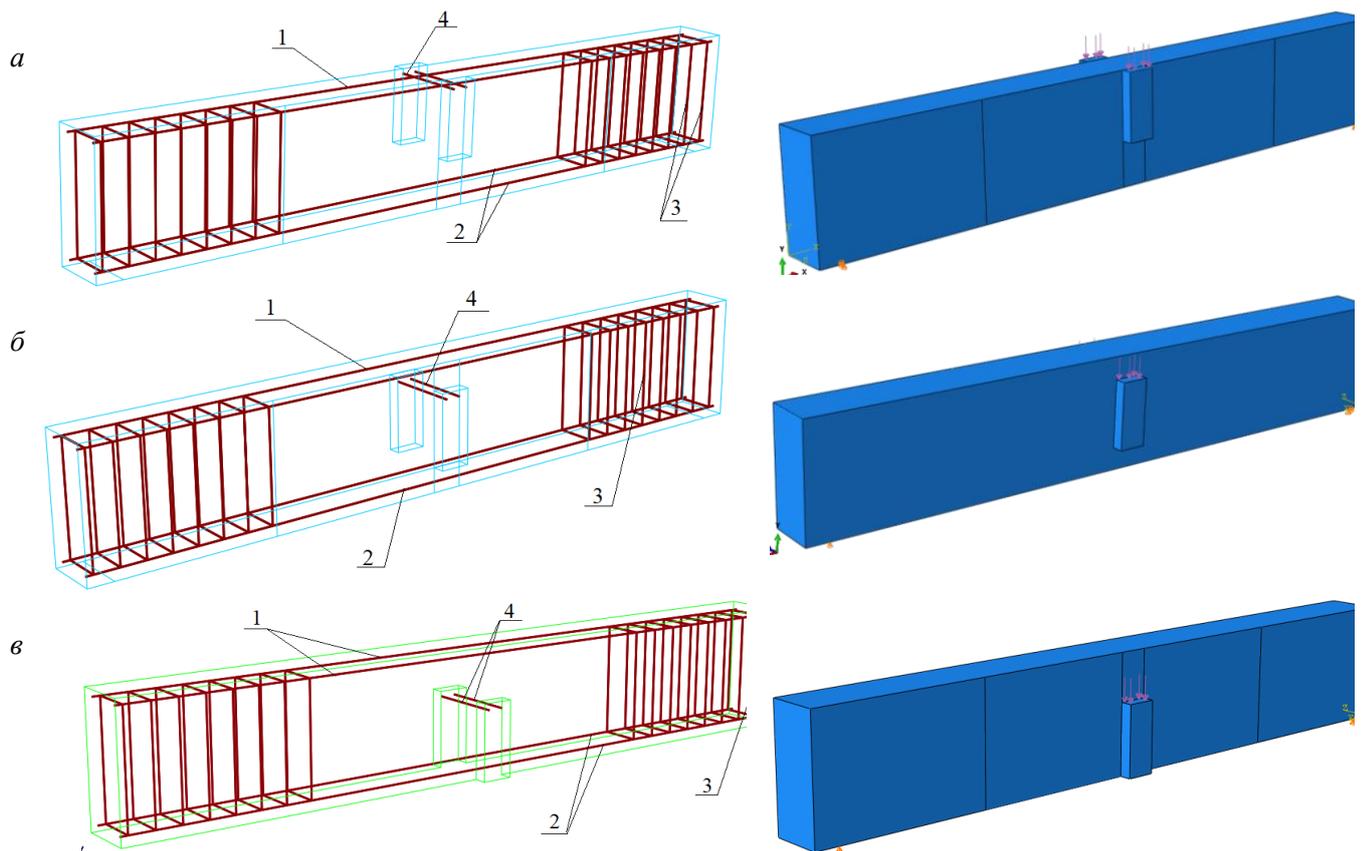


Рисунок 1 – Общий вид исследуемых балок: 1 – стержневая арматура $\varnothing 8$ S500; 2 – стержневая арматура $\varnothing 14$ S500; 3 – хомуты $\varnothing 5$ мм S500; 4 – стержневая арматура второстепенной балки $\varnothing 14$ S500

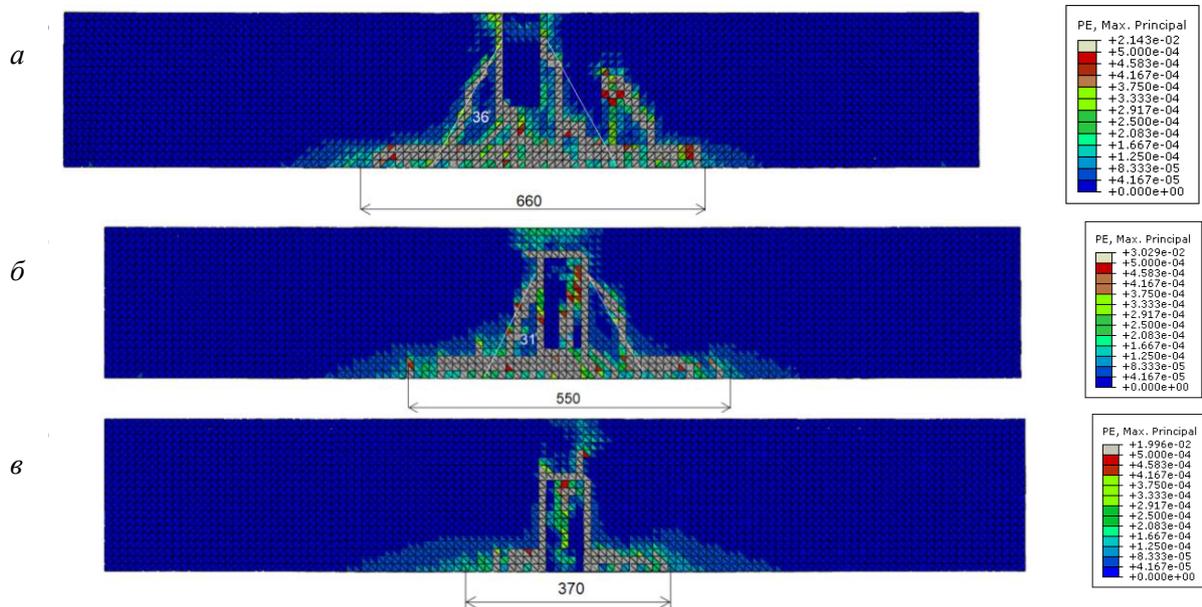


Рисунок 2 – Распределение трещин в зоне отрыва моделируемых балках

Выводы.

По результатам численного моделирования установлено изменение характера разрушения железобетонного элемента при местном действии растягивающих усилий, в том числе угла наклона трещин отрыва, при смещении точки приложения отрывающего усилия к нижней грани элемента.

Литература:

1. Лукин, А. В. Конечно-элементное моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций и элементов АЭС / А. В. Лукин, А. М. Лобачев, В. С. Модестов, А. И. Боровков, И. А. Попов // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР : 8-ая междунар. науч.-тех. конф., Подольск, 28–31 мая 2013 г. : сборник трудов / ОКБ «ГИДРОПРЕСС». – Подольск, 2013.

2. Abaqus 6.13. Analysis User's Guide. Volume III : Materials. – Dassault Systemes Simulia Corp., Providence : RI, 2013. – 699 p.

3. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введ. 16.09.2020. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. – 244 с.

References:

1. Lukin, A. V. Konechno-jelementnoe modelirovanie i issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija zhelezobetonnyh konstrukcij i jelementov AJeS [Finite element modeling and investigation of the stress-strain state of reinforced concrete structures and elements of nuclear power plants] / A. V. Lukin, A. M. Lobachev, V. S. Modestov, A. I. Borovkov, I. A. Popov // Obespechenie bezopasnosti AJeS s VVJeR : 8-aja mezhdunar. nauch.-tehnik. konf., Podol'sk, 28–31 maja 2013 g. : sbornik trudov / OKB "GIDROPRESS". – Podol'sk, 2013. (ru).

2. Abaqus 6.13. Analysis User's Guide. Volume III : Materials. – Dassault Systemes Simulia Corp., Providence : RI, 2013. – 699 p.

3. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SP 5.03.01-2020. – Vved. 16.09.2020. – Minsk : Ministerstvo arhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus, 2020. – 244 p. (ru).