

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Марковича Алексея Семеновича

«Развитие нелинейных моделей бетонных и железобетонных конструкций на основе метода конечных элементов»,

представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что на основании экспериментальных данных, в том числе полученных автором, разработаны различные нелинейные модели деформирования бетона, включающие в себя как модели хрупкого разрушения сжатого бетона, так и упругопластические модели. Указанные нелинейные модели бетона предназначены для прочностных расчетов массивных железобетонных конструкций и реализованы в программе ПРИНС.

Вместе с тем, строительные нормы и правила предписывают проводить расчеты железобетонных конструкций в нелинейной постановке с учетом реальных свойств бетона и арматуры. Характерно, что при этом отечественные нормы ограничиваются сведениями о прочности бетонов разных классов только на одноосное растяжение и сжатие, и не содержат данных о прочности бетонов в случае двух- и трехосного сжатия и растяжения. Ввиду этого, разработка расчетных моделей железобетонных конструкций с учетом действительного трехосного напряженного состояния является актуальной задачей.

Содержание диссертации. В рассматриваемой диссертации материал изложен в шести главах.

Первая глава посвящена вопросам тензорного представления напряженного состояния в точке твердого тела. Для этого выработана единая форма записи уравнений для главных и октаэдрических напряжений, инвариантов напряженного состояния, интенсивности напряжений и т.д. Сформулирована геометрическая интерпретация напряженного состояния в точке, используемая в последующих главах работы.

Во второй главе приводятся предпосылки для построения расчетных моделей бетонных и железобетонных конструкций с использованием четырех- и восьмиузловых объемных конечных элементов.

Приведены результаты выполненных автором экспериментальных исследований бетонных образцов на трехосное сжатие, в ходе которых установлено, что в условиях неравномерного трехосного сжатия бетону присущ явно выраженный пластический характер деформирования. В зависимости от соотношения главных напряжений получены координаты точек поверхности разрушения, представляющие собой нормируемые значения прочности бетона, выраженные через напряжения на октаэдрических площадках.

При этом для верификации разработанных нелинейных моделей бетона и сравнения механизма разрушения элементов при изгибе было выполнено исследование напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных балок в процессе их нагружения. Для этого образцы – балки испытывались в условиях трехточечного изгиба. В ходе экспериментов определялись усредненные значения разрушающей нагрузки, нагрузки трещинообразования, прогибы балок. Кроме того, с использованием тензометрического оборудования были получены поля главных деформаций и эпюры напряжений в продольной арматуре.

В третьей главе представлены наиболее достоверные феноменологические критерии прочности бетона и критерии текучести для арматурной стали, приведенные автором в виде, удобном для практической реализации методом конечных элементов.

Так, на основании экспериментальных данных, в том числе полученных автором, сформулирован модифицированный критерий Друкера – Прагера, дополненный параметрами критерия Мора – Кулона для бетонов. Приведены, адаптированные к методу конечных элементов, критерии разрушения бетона Бреслера – Пистера, Виллама – Варнке, Чена – Чена, Отозенна, Реймана, Се – Тин – Чена.

Вместе с тем, сформулирован пятипараметрический критерий для бетона, который является вариантом усовершенствования критерия разрушения Виллама – Варнке для хрупких материалов путем добавления двух дополнительных параметров для описания искривленных меридианов растяжения и сжатия предельной поверхности; предложен и экспериментально подтвержден шестипараметрический критерий разрушения бетона для случая двух- и трехосного сжатия, который обобщает наиболее удачные формулировки известных критериев прочности, является универсальным и позволяет получать достоверные показатели прочности различных видов бетонов при трехосном нагружении в режимах низкой и высокой боковой компрессии.

В четвертой главе диссертации представлены теоретические положения, направленные на получение физических уравнений пластического течения бетона. В работе выделены следующие концепции для построения общих моделей деформирования бетона: теория бетона как идеально пластического материала и теория бетона с учетом деформационного упрочнения.

Ввиду этого сформулирован общий подход к построению идеальной упругопластической модели бетона. Так, в работе предложена модифицированная модель течения Мизеса – Губера для арматурной стали и бетона при высоких гидростатических напряжениях; получила развитие модель течения Друкера – Прагера (с постоянными критерия Мора – Кулона c и φ для бетонов). На основе критерия разрушения Виллама – Варнке для хрупких материалов построена пятипараметрическая модель идеально упругопластического бетона.

Кроме того, сформулирован общий подход к построению упругопластической модели деформирования бетона с упрочнением. Так, в диссертации предложена модифицированная модель Друкера – Прагера с учетом изотропного упрочнения и разупрочнения, позволяющая учесть дилатацию бетона; на основе критерия разрушения Виллама – Варнке для хрупких материалов построена модифицированная пятипараметрическая модель бетона с учетом изотропного упрочнения.

Также для стальной арматуры и жесткого армирования приведена модель течения Мизеса – Губера с учетом смешанного упрочнения, позволяющая учесть эффект Баушингера.

В пятой главе рассмотрены сопряженные с явлением ползучести вопросы теории железобетона – выводы уравнений механического состояния для идеального и стареющего бетона в приращениях путем наложения приращений мгновенных и запаздывающих деформаций.

Получены уравнения релаксации напряжений в приращениях, отвечающие наследственной теории старения Маслова – Арутюняна.

Приведены уравнения ползучести бетона в приращениях для случая одномерного и объемного напряженного состояния элемента. Для учета ползучести в алгоритм статического расчета в систему уравнений равновесия включено дополнительное слагаемое ΔP_n^{cr} – эквивалентное приращение нагрузки вследствие деформаций ползучести, обусловленное изменением физической матрицы бетона на рассматриваемом временном интервале.

Помимо этого, сформулированы основные предпосылки для разработки трехмерных моделей ползучести бетона на основе механических моделей вязкоупругих и упруго-вязкопластических тел.

Шестая глава посвящена процедурам, связанным с реализацией расчета массивных железобетонных конструкций методом конечных элементов. Для сформулированных выше критериев разрушения и упругопластичности бетона приведена методика и алгоритм нелинейного расчета конструкций, находящихся в условиях объемного напряженного состояния.

Для учета изменения жесткости бетона при разгрузке из сжатой зоны с переходом в растянутую (и наоборот) разработана единая методика определения приведенного модуля упругости, для реализации которой производится анализ путей нагружения материала на основе определения признака схемы в зависимости от значений и знака главных деформаций на текущем и предшествующем шаге. Всего, в общей сложности, выделено 16 возможных случаев поведения материала, которые позволяют однозначно установить в характерной точке твердого тела

признаки переходы материала от «растяжения к сжатию» или от «сжатия к растяжению», что особенно важно для корректного определения модуля упругости бетона с инициированными трещинами.

Условием возникновения трещины в растянутом бетоне является достижение главным напряжением по одному из главных направлений предельной величины сопротивления трещинообразованию. Учитывая это, в работе приведена методика построения физической матрицы для бетона с одной, двумя и тремя инициированными трещинами.

Для отладки разработанных подпрограмм, реализующих приведенные выше положения, выполнены верификационные расчеты бетонных и железобетонных конструкций с учетом трехосного напряженного состояния бетона. Полученные результаты сопоставлялись с опытными данными и показали схожий механизм разрушения испытанных балок при изгибе, приемлемую точность и достоверность полученных результатов.

Достоверность и новизна полученных результатов обеспечивается верификацией разработанного конечного элемента сплошной среды, реализующего предлагаемые модели деформирования бетона, которая проводилась на основе полученных автором экспериментальных данных в лаборатории строительных конструкций и материалов инженерной академии РУДН с применением современного аттестованного испытательного оборудования и поверенных средств измерений, а также путем сравнения результатов, полученных с применением альтернативных коммерческих программ, реализующих расчеты данного класса конструкций.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. На основании критериев Друкера – Прагера и Мора – Кулона сформулирован общий критерий прочности применительно к бетону; модифицирован критерий разрушения Виллама – Варнке для хрупких материалов, отвечающий испытаниям бетона на трехосное сжатие.

2. Разработан и экспериментально подтвержден шестипараметрический критерий разрушения бетона для случая двух- и трехосного сжатия;

3. На основании ассоциированного и неассоциированного законов течения получены физические уравнения для идеально упругопластической модели бетона и упругопластической модели бетона с упрочнением.

4. Предложена новая формулировка идеально упругопластической модели Мизеса – Губера для арматурной стали и бетона при высоких гидростатических напряжениях, а также идеально упругопластической модели Друкера – Прагера, дополненной постоянными Мора – Кулона для бетонов и условием растрескивания бетона при растяжении.

5. На основе усовершенствованного критерия разрушения Виллама – Варнке для хрупких материалов построена достоверная и эффективная модель идеально упругопластического бетона.

6. Предложена модифицированная упругопластическая модель Друкера – Прагера (с параметрами критерия Мора – Кулона для бетонов) с учетом изотропного упрочнения и разупрочнения, позволяющая учитывать дилатацию бетона.

7. На основе усовершенствованного критерия разрушения Виллама – Варнке для хрупких материалов разработана модель упругопластического деформирования бетона с учетом изотропного упрочнения.

8. Получены уравнения механического состояния для идеального и стареющего бетона в приращениях путем наложения приращений мгновенных и запаздывающих деформаций.

9. Получены уравнения релаксации и ползучести бетона в приращениях для случая одномерного и объемного напряженного состояния элемента, а также сопряженные с ними физические матрицы, учитывающие влияние мгновенных и запаздывающих деформаций.

Ценность для науки и практики полученных результатов и рекомендации по их использованию. Результаты, полученные в диссертации, могут внести существенный вклад в развитие нелинейных методов расчета

массивных железобетонных конструкций, имеющий важное научно-техническое значение для строительной отрасли, в целом.

Разработанные нелинейные модели бетонных и железобетонных конструкций адаптированы под метод конечных элементов, алгоритмизированы и интегрированы в нелинейный решатель программы ПРИНС. На основе этих моделей построен объемный конечный элемент. Указанные модели прошли экспериментальную проверку и позволяют получить достоверное значение прочности железобетонных конструкций, находящихся в условиях одно, двух- и трехосного напряженного состояния.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обусловлена корректной постановкой задачи с использованием общепринятых гипотез и допущений, применением классических положений теории железобетона, методов строительной механики, механики деформируемого твердого тела и положений, установленных на основе обширного анализа существующих феноменологических критериев прочности и пластичности железобетона.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати и их апробация. По материалам диссертации опубликовано 20 научных работ. Из них: 1 монография, 10 статей в журналах, включенных в Перечень ВАК РФ / РУДН и 9 статей в журналах, представленных в международных базах цитирования Scopus и Web of Science. Результаты работы докладывались и обсуждались на 10 российских и международных конференциях.

Соответствие работы паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.1.9. Строительная механика: п. 2. «Линейная и нелинейная механика конструкций, зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчета», п. 4. «Численные и численно-аналитические методы расчета зданий, сооружений и их элементов на прочность, жесткость, устойчивость при статических, динамических, температурных нагрузках и других воздействиях», п. 6. «Теория и методы расчета зданий, сооружений и их элементов на надежность (безотказность, долговечность,

ремонтпригодность, сохраняемость)», п. 9. «Теория и методы оценки ресурса несущей способности зданий, сооружений и их элементов», п. 11. «Экспериментальные методы исследования зданий, сооружений и их элементов».

Соответствие автореферата основным положениям диссертации.

Автореферат составлен по общепринятой форме и полностью отражает основные положения диссертации.

Замечания по работе

1. В разработанном т.н. шестипараметрическом критерии разрушения бетона для определения параметров указанного критерия требуется проведение испытаний бетонных образцов на равномерное двухосное сжатие и растяжение, трехосное сжатие, которые не регламентируются действующими нормами.

2. В модифицированной модели Мора – Кулона используются не регламентируемые нормативными документами для бетона такие физико-механические характеристика как сцепление и угол внутреннего трения.

3. В работе не указано отвечает ли расчет железобетонных конструкций согласно приведенным нелинейным моделям действующим нормам, в частности СП 63.13330.2018. Следовало бы привести результаты сравнительных расчетов какой-либо конструкции для установления такого соответствия.

4. В диссертации не обосновано могут ли быть адаптированы разработанные для конечного элемента сплошной среды нелинейные модели деформирования бетона применительно к конечным элементам, реализующим плоское напряженное состояние, плоскую деформацию, а также к конечным элементам пластин и оболочек.

5. В результате решения тестовой задачи, приведенной в главе 6 диссертации, предельная нагрузка, воспринимаемая фундаментным блоком в условиях трехосного сжатия, по модели хрупкого разрушения бетона оказалась ниже, чем согласно моделями, учитывающим упругопластическое деформирование материала. При этом не ясно как следует интерпретировать полученные результаты.

6. На стр. 272 диссертации, судя по фотографии одной из испытанных балок, разрушение происходит по наклонной трещине, идущей от опоры к месту приложения силы. Причем трещина наблюдается только с левой стороны, с правой стороны трещины отсутствуют. Полученные в ВК ПРИНС и Abaqus для этой балки схемы разрушения имеют симметричный характер, и разрушение, судя по представленным изополям и мозаикам, начинается с нормальной трещины в середине пролета. Не ясно, почему схема разрушения, полученная в эксперименте, имеет несимметричный характер и отличается от полученных путем конечно-элементного моделирования.

7. При проведении экспериментов с трубобетонными образцами не совсем понятно, почему нагрузка прикладывалась только на бетонное ядро, причем не ко всей его площади. Это могло привести к неравномерному распределению напряжений по z в бетонном ядре и несколько затруднить интерпретацию результатов эксперимента.

8. При анализе существующих критериев прочности бетона в главе 3 автор в основном рассматривает критерии, предложенные зарубежными учеными: критерий Друкера-Прагера, Бреслера – Пистера, Виллама – Варнке и др. Помимо зарубежных ученых, большой вклад в разработку критериев прочности бетона внесли такие отечественные ученые, как Л.К. Лукша, П.П. Баландин, Г.А. Гениев и др. Критерии указанных авторов, к сожалению, в главе 3 не рассмотрены.

В целом, указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение

Диссертационное исследование Марковича Алексея Семеновича «Развитие нелинейных моделей бетонных и железобетонных конструкций на основе метода конечных элементов» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной проблемы в области нелинейных методов расчета массивных железобетонных конструкций, имеющей важное научно-техническое значение для строительной отрасли.

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на

соискание ученой степени доктора технических наук, согласно п. 2.1 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утвержденного Ученым советом РУДН протокол № УС-1 от 22.01.2024 г., а её автор, Маркович Алексей Семенович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Официальный оппонент:

Чепурненко Антон Сергеевич,
профессор кафедры «Строительная механика и теория
сооружений» ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет»,
доктор технических наук (специальность – 05.23.17),
доцент


(подпись)

Подпись А.С. Чепурненко заверяю

Ученый секретарь ученого совета ДГТУ



В.Н. Анисимов

344003, Ростовская область,
г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
Тел.: +7 (800) 100-19-30
E-mail: anton_chepurnenk@mail.ru

«22» 05 2024 г.