Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2025, Том 17, № 2 / 2025, Vol. 17, Iss. 2 https://esj.today/issue-2-2025.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/15SAVN225.pdf

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Тамов, М. М. Численное моделирование балок из сверхвысокопрочного бетона средствами объектно-ориентированного программирования / М. М. Тамов // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 2. — URL: https://esj.today/PDF/15SAVN225.pdf.

For citation:
Tamov M.M. Numerical modeling of ultra-high-strength concrete beams using object-oriented programming. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(2): 15SAVN225. Available at: https://esj.today/PDF/15SAVN225.pdf. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 69.07

Тамов Мурат Мухамедович
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар, Россия
Доцент
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: murat.tamov@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8235-2314
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=800695

Численное моделирование балок из сверхвысокопрочного бетона средствами объектно-ориентированного программирования

Аннотация. В статье рассмотрено построение нелинейных численных моделей двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона с использованием инструментов объектно-ориентированного программирования в среде OpenSees. Автором проведен анализ имеющейся экспериментальной базы данных и современных методов моделирования напряженно-деформированного состояния таких балок при действии поперечных сил. Описаны физико-механические характеристики сверхвысокопрочных бетонов и принципы подбора их составов. Дано описание программной платформы OpenSees и разработанной методики конечно-элементных расчетов, включающей создание новых классов материалов, основанных на диаграммах деформирования сверхвысокопрочного бетона, фибробетона и размещенной в них арматуры. Для моделирования поведения под нагрузкой стенок железобетонных балок применена деформационная модель SMM. Проведена калибровка моделей с использованием экспериментальных данных, что позволило уточнить параметры расчетной схемы и достичь высокой сходимости теоретических и опытных результатов. Выполнено сравнение расчетных и экспериментальных значений разрушающих поперечных сил, выявлена высокая точность предложенной конечно-элементной модели. В ходе расчета рассмотрены особенности прочности и деформативности двутавровых балок с фибровым и стержневым поперечным армированием. Сопоставление теоретических и экспериментальных графиков прогибов балок продемонстрировало способность модели корректно оценивать их напряженно-деформированное состояние на всех этапах нагружения. Полученные модели могут быть использованы при проектировании и расчете изгибаемых конструкций из сверхвысокопрочного бетона, а также при совершенствовании методов численного моделирования их поведения под нагрузкой.

Ключевые слова: сверхвысокопрочный бетон; двутавровые балки; работа на поперечную силу; объектно-ориентированное программирование

Введение

Идеи получения бетонов с повышенной прочностью и плотной микроструктурой были выдвинуты в 1980-х годах [1]. Последующими многочисленными исследованиями для сверхвысокопрочных бетонов (СВПБ) разных составов были изучены вопросы технологии изготовления СВПБ и конструкций на его основе [2; 3], ухода за свежеуложенным СВПБ [3], определены прочность СВПБ при различных видах напряженного состояния [4], вязкость разрушения [5], реологические свойства [6], выносливость [7] и огнестойкость [2]. Значительный вклад в развитие технологии и исследование характеристик высокопрочных фибробетонов внесли представители российских научных школ, сформированных в НИИЖБ (Каприелов, Шейнфельд и др.) [8], ПГУАС (Калашников, Кузнецов, Тараканов и др.) [9], СПбГАСУ (Пухаренко, Морозов, Пантелеев, Жаворонков и др.) [10–12].

В сравнении с традиционными тяжелыми бетонами СВПБ обладает следующими важными с инженерной точки зрения преимуществами:

- высокая прочность при сжатии и растяжении (примерно в 4–5 раз выше прочности наиболее часто применяемых классов тяжелого бетона);
- высокое сопротивление проникновению хлоридов антиобледенительных солей и морской воды;
- минимальное число микротрещин и пор в структуре;
- повышенная пластичность при действии сжимающих и растягивающих напряжений (при наличии фибрового армирования).

К настоящему времени сформулированы основные принципы получения СВПБ [13; 14]:

1. Минимизация пористости за счет оптимизации гранулированной смеси посредством применения порошковых заполнителей с широким диапазоном диаметров частиц [15]. Чаще всего из составов СВПБ исключают крупный заполнитель для устранения больших пустот и создания уплотненной межфазной переходной зоны вокруг зерен заполнителей [7]. Таким образом, устраняют наиболее слабые области цементной матрицы [16]. Как правило, смесь СВПБ представляет собой мелкозернистый состав (крупность заполнителей не более 2 мм).
2. Снижение водоцементного отношения (далее — В/Ц) введением в состав смеси водоредуцирующих добавок.
3. Улучшение свойств тепловой обработкой, ускоряющей пуццолановую реакцию и повышающей механические характеристики.
4. Повышение пластичности деформирования и сопротивления растяжению добавлением надлежащего количества мелкой фибры.

Сопротивление железобетонных балок действию поперечных сил зависит от формы их сечения. В этой связи наибольший интерес представляет работа наклонных сечений двутавровых СВПБ-балок. За рубежом на сегодня двутавровые СВПБ-балки главным образом используют в качестве пролетных строений мостов. Кроме того, они могут служить несущими конструкциями промышленных предприятий, эксплуатируемыми в условиях воздействия агрессивных сред. Особенности деформирования СВПБ под нагрузкой и наличие в его составе дисперсного армирования могут оказать влияние на прочность, деформативность и трещиностойкость двутавровых балок при действии поперечных сил. При плоском НДС сопротивление бетона при действии сжимающих напряжений падает с ростом деформаций, вызванных растяжениям в перпендикулярном направлении. Эта закономерность присуща всем

бетонам, но с ростом прочности становится более выраженной. Экспериментальные и численные исследования работы на поперечную силу двутавровых СВПБ-балок на сегодня немногочисленны, их результаты представлены в зарубежных публикациях. Они содержат как опытные данные по испытаниям балок, направленным на оценку влияния на их поведение конструктивных характеристик и параметров нагружения, так и предложения по их расчету. В части влияния на прочность балок пролета среза нагружения, коэффициентов поперечного и продольного армирования отмечены те же закономерности, что и для балок из обычного тяжелого бетона [17–22].

Бэби и др. [17] провели испытания на поперечную силу 9 двутавровых СВПБ-балок длиной 3 м с различными типами поперечной арматуры (хомуты, фибра, их сочетание), с обычным и предварительно напряженным продольным армированием. Экспериментальное исследование Янг и др. [18] включало 12 двутавровых балок без поперечной арматуры, испытанных при двух пролетах среза a/h_0 = 2,5 и 3,4. Половина образцов были предварительно напряженными. Помимо этого, образцы отличались друг от друга концентрацией фибры V_f (1, 1,5 и 2 %). Все образцы продемонстрировали значительный резерв несущей способности по наклонным сечениям после образования первых трещин в стенке — отношение пиковой нагрузки к нагрузке образования первых трещин в среднем составляло около 25 %. В работе Загона и др. [23] исследовано поведение балок с отверстием в стенке, расположенном в зоне действия поперечных сил. Результаты работы показали, что наличие одного отверстия высотой в половину высоты стенки снижает несущую способность балок без поперечной арматуры примерно на 40 %. В то же время при установке вблизи отверстия одного наклонного стержня снижение несущей способности составляет уже 20 %.

Фибровое армирование, как и поперечная арматура, повышает прочность наклонных сечений СВПБ-балок. Однако при высоком содержании стержневой поперечной арматуры положительный эффект от добавления фибр сдерживается препятствованием её равномерному распределению стержнями. Результатом является своего рода диссинергия фибрового и стержневого поперечного армирования, т. е. снижения эффективности их совместного действия в сравнении с работой по отдельности [19; 20; 24].

Хасгул и др. [25] по результатам испытания двутавровых СВПБ-балок заключили, что наличие фибры даже при умеренных концентрациях (до 2,5 %) позволяет отказаться от стержневого поперечного армирования. При достаточно высоком коэффициенте продольного армирования (2,2 %) разрушение балок без хомутов произошло по нормальным сечениям. Особенность опытных двутавровых балок Теллина и др. [26] заключалась в малой толщине стенки, составлявшей лишь 20 мм. По замыслу авторов такая конструкция задействует преимущества СВПБ, позволяющие при проектировании сечений конструкций назначать малую толщину защитного слоя бетона.

Методы

Совершенствование подходов к расчету на поперечные силы СВПБ-балок, главным образом, сосредоточено в двух направлениях: построение конечно-элементных (КЭ) моделей с использованием нелинейных диаграмм деформирования СВПБ и арматуры и уточнение формул для инженерных расчетов прочности балок. В первом случае исследователи производят моделирование балок в трехмерной постановке в распространенных программных комплексах, таких как ANSYS [27], ABAQUS [21] и ATENA [28]. Для уточнения расчетных формул используют методы математической статистики: дисперсионный анализ (ANOVA) [29], нелинейную и множественную линейную регрессии [30], машинное обучение [31]. В ряде работ проведена сравнительная оценка точности расчетных формул, принятых в различных нормах и

руководствах [22]. Росси и др. построили вероятностную численную модель для расчета балок на поперечную силу, приняв случайное пространственное распределение прочности бетона на растяжение и получая картину трещин случайным образованием кинематических неоднородностей [32].

КЭ-модели позволяют описать НДС балок на всех этапах нагружения. Нами были построены КЭ-модели двутавровых СВПБ-балок с применением программной платформы (фреймворка) OpenSees. Впервые она была размещена в открытом доступе в начале 2000-х и к настоящему времени образовала быстро растущее сообщество пользователей и разработчиков, вносящих вклад в развитие ее возможностей [33]. OpenSees представляет собой объектно-ориентированную систему с открытым кодом для разработки приложений, позволяющих производить КЭ расчеты конструкций и оснований. Ключевыми качествами OpenSees являются взаимозаменяемость компонентов и возможность внедрения новых компонентов без изменения существующего кода. Исследователи отмечают способность OpenSees к быстрому, стабильному и эффективному решению нелинейных задач [34].

На рисунке 1 представлена общая структура *OpenSees*. Создание КЭ-моделей осуществляется в модуле *Modelbuilder*, расчет — в модуле *Analysis*. Модуль *Domain* играет роль центрального оператора процесса расчета (фиксирует состояние модели в моментах t и $t + dt$) и вместе с этим отвечает за хранение объектов после их создания в модуле *Modelbuilder*. Последний также определяет свойства элементов и граничные условия. Выбранные для контроля величины в ходе расчета отслеживаются в модуле *Domain*, и в то же время результаты отражаются в модуле *Recorder*. Перечисленные модули взаимосвязаны исходя из лежащих в основе *OpenSees* принципов объектно-ориентированного программирования. Бóльшая часть программного кода *OpenSees* написана на языке *C++* [34].

В исходный код *OpenSees* нами были добавлены классы материалов, реализующие диаграммы деформирования для сверхвысокопрочного бетона и сталефибробетона, а также для размещенной в них арматуры. Новым материалам были присвоены имена *SteelM01* и *ConcreteM01*. В код программы, находящийся в открытом доступе на портале *GitHub*, внесены соответствующие дополнения инструментами интегрированной среды для разработки программного обеспечения *Microsoft Visual Studio*.

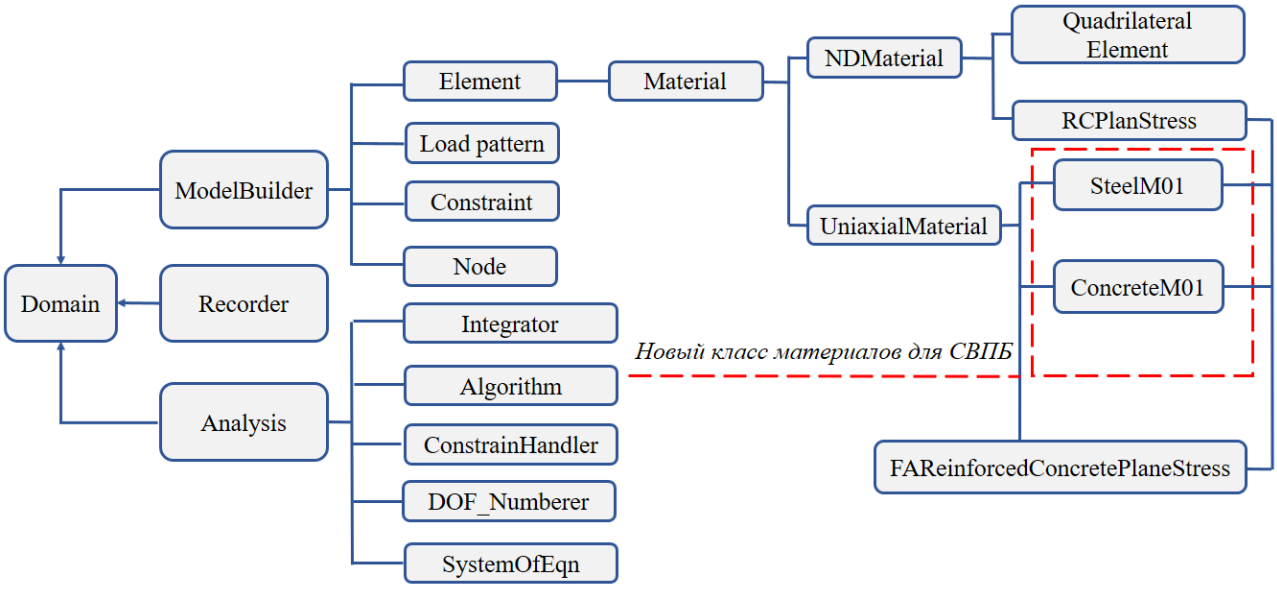

Рисунок 1. *Структура OpenSees с указанием новых классов материалов [34]*

Результаты

Фактические и расчетные поперечные сечения опытных балок приведены на рисунке 2. Стенки балок моделировали четырехугольными изопараметрическими элементами, полки балок — элементами, воспринимающими осевую силу и момент. В двутавровых балках определяющим для несущей способности по поперечной силе является напряженно-деформированное состояние стенки. Она представляет собой мембранный элемент с равномерно распределенным вертикальным армированием, защемленный в относительно жёстких полках и работающий в условиях плоского напряженного состояния. После образования трещин параллельно нарастают напряжения в бетоне и хомутах, а соотношение их прочностных характеристик и пролет среза загружения определяют форму разрушения. Для моделирования поведения под нагрузкой стенок железобетонных балок применена деформационная модель *Softened Membrane Model (SMM)*. Модель разработана по результатам экспериментальных исследований более чем 150 крупноразмерных железобетонных панелей, испытанных на специальном силовом стенде, имитирующем плоское напряженное состояние, и устанавливает напряженно-деформированное состояние железобетонного мембранного элемента, к которому приложены касательные и нормальные напряжения, совокупностью уравнений равновесия и совместности деформаций и законов деформирования материалов [35].

Для калибровки КЭ модели использованы результаты испытаний двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона, представленные в статьях Магуреану [36], Месзоли [24] и Темике [20]. В результате калибровки уточняли густоту КЭ сетки стенок балок и шаг нагружения. Следующий этап численных исследований предусматривал расчеты разработанной методикой КЭ моделирования двутавровых СВПБ-балок балок, испытанных в рамках экспериментальной части настоящей работы [37]. Для проверки универсальности расчетной модели план эксперимента включал балки из сверхвысокопрочного бетона ($V_f = 0$) и сталефибробетона ($V_f = 1{,}5$ %), с поперечной арматурой ($\mu_{sw} = 0{,}78$ и 1 %) и без таковой ($\mu_{sw} = 0$), с шириной полки $b_f = 50$, 100 и 200 мм, испытания с пролетами среза $a/h_0 = 2$ и 3.

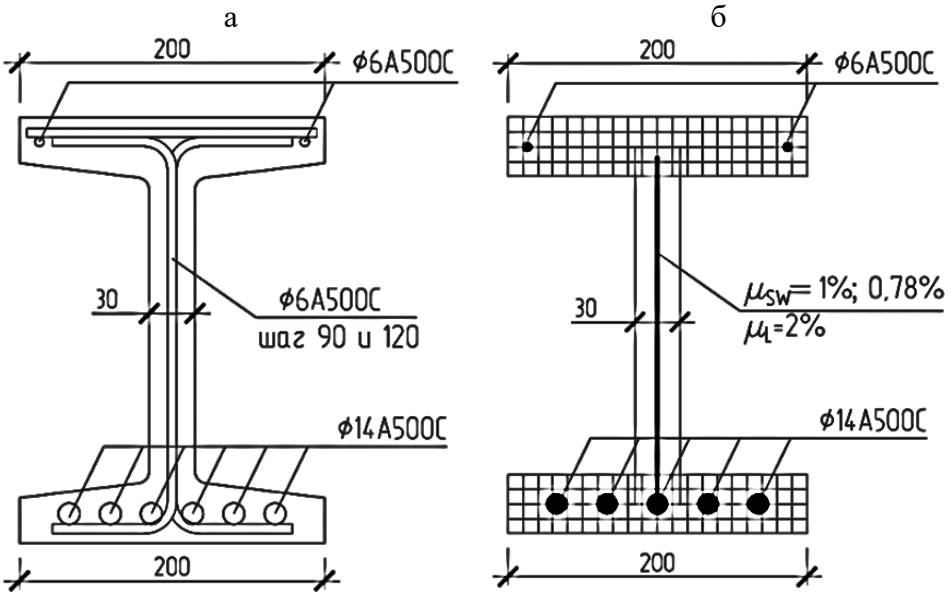

Рисунок 2. *Фактические и расчетные сечения испытанных балок [37]*

Примеры полученных опытных и расчетных графиков роста прогибов балок приведены на рисунке 3. Представленные данные свидетельствуют о хорошем соответствии теоретических и опытных результатов. Средняя разница между разрушающими поперечными силами Q_{OS} и Q_{exp} составляет 7 %, максимальная разница — 15,3 %. Модель достаточно точно описывает поведение балок на всех этапах нагружений.

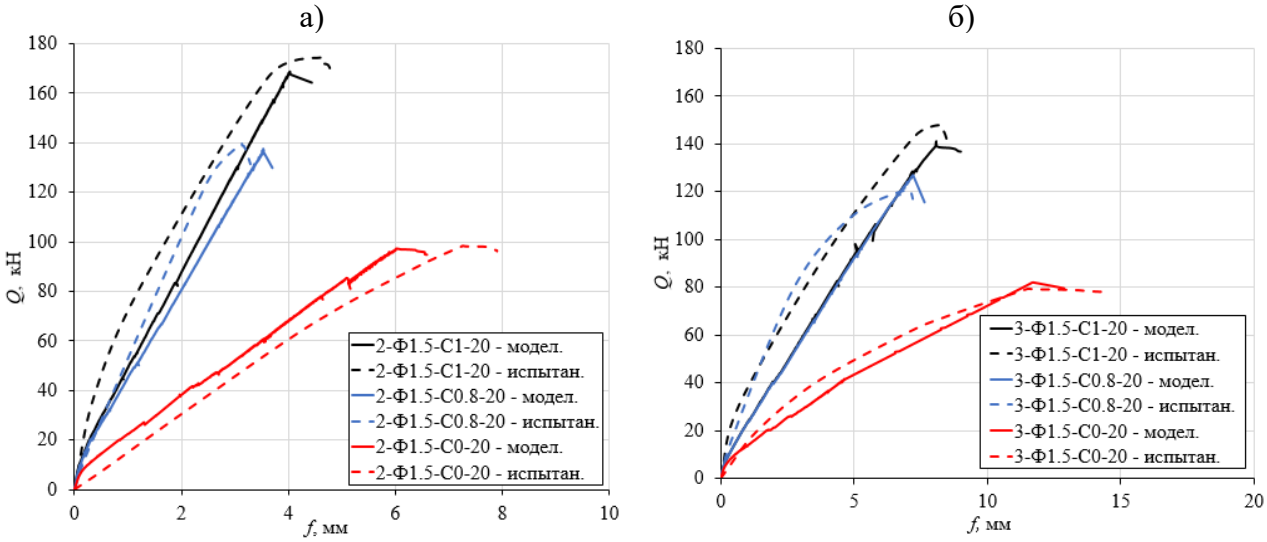

Рисунок 3. *Опытные и расчетные диаграммы деформирования балок с V_f = 1,5 %: а — a/h_0 = 2; б — a/h_0 = 3 (составлено авторами)*

В части вычисления разрушающих поперечных сил Q модель также показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными. Это наглядно видно на диаграмме рассеяния теоретических Q_{OS} и опытных Q_{exp} значений: полученные точки лежат вблизи линии наилучшего соответствия без существенных выбросов (рис. 4).

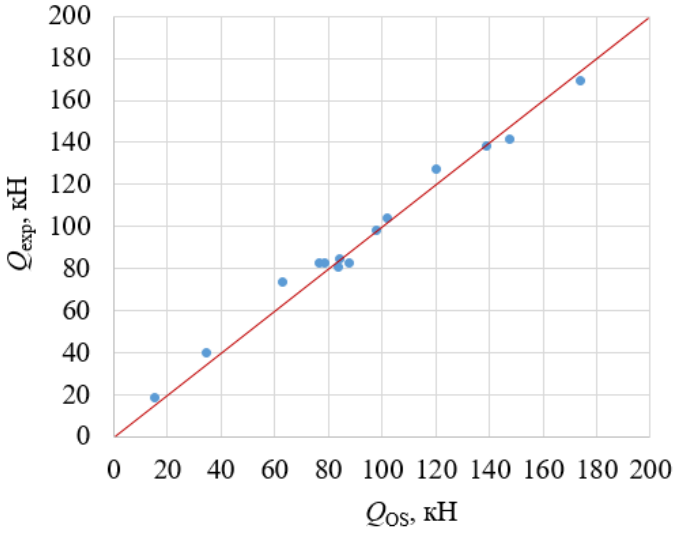

Рисунок 4. *Диаграмма рассеяния для расчётных и опытных значений разрушающих поперечных сил (составлено авторами)*

Обсуждение

Разработана методика конечно-элементных расчетов СВПБ-балок на поперечные силы в приложении OpenSees. Введены новые классы материалов с диаграммами деформирования сверхвысокопрочного бетона и фибробетона, а также заключенной в них арматуры. Оптимальные значения вариативных параметров конечно-элементной модели, обеспечивающие наилучшую сходимость экспериментальных и теоретических диаграмм работы конструкций, определены по результатам калибровки. Проверка применимости разработанной модели, проведенная путем сопоставления теоретических результатов с экспериментальными данными автора и других исследователей, показала, что предложенная конечно-элементная модель с

новыми классами материалов может эффективно использоваться для расчета двутавровых СВПБ-балок по прочности и прогибам в зонах действия поперечных сил.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bache, H. Densified Cements Ultra-Fine Particle-Based Materials. Proceedings of the 2nd International Conference on Super Plasticizers in Concrete, Ottawa, Canada, 1981. 33 p.
2. Fehling, E. Ultra-High Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Examples. / Ekkehard Fehling, Michael Schmidt, Joost Walraven, Torsten Leutbecher, Susanne Fröhlich // Wilhelm Ernst & Sohn. –2014. — 188 pp.
3. Fröhlich, S. Influences on Repeatability and Reproducibility of Testing Methods for Fresh UHPC / S. Fröhlich, and M. Schmidt // 3rd Intl. Symp. on Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Structural Materials& Engineering Series. — 2012. — No. 19. — pp. 225–232.
4. Fehling, E. Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Betone (UHPC) [Развитие, долговечность и проектирование сверхвысокопрочных бетонов (СВПБ)] / E. Fehling, M. Schmidt, T. Teichmann, K. Bunje, R. Bornemann, and B. Middendorf // DFG research report FE 497 / 1-1, Structural Materials & Engineering Series, Kassel University Press GmbH, Kassel. — 2005. –No. 1. — 130 pp. — (На нем. яз.).
5. Bornemann, R. UHPC with steel- and noncorroding high strength polymer fibres under static and cyclic loading / R. Bornemann, S. Faber // In Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Kassel, Germany. — 2004. — pp. 673–681.
6. Glotzbach, C. Charakterisierung der interpartikulären Wechselwirkungen von Feinstoffleimen [Характеристика межчастичных взаимодействий в тонкодисперсных вяжущих составах] / C. Glotzbach, D. Stephan, K. Amrhein // 17th Int. Baustofftagung [17-я конференция по строительным материалам (ibausil)] — Proc. vol. 1 (ed. J. Stark). Weimar. — 2009 — pp. 319–324. — (На нем. яз.).
7. Graybeal, B. Material property characterization of ultrahigh performance concrete / B. Graybeal // In FHWA-HRT-06-103, U.S. Department of Transportation. — 2006. — 176 pp.
8. Каприелов, С.С. О подборе составов высококачественных бетонов с органоминеральными модификаторами / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Г.С. Кардумян, И.А. Чилин // Строительные материалы. — 2017. — № 12. — С. 58–63.
9. Калашников, В.И. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей / Калашников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С., Володин В.М., Белякова Е.А. // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8(34). С. 47–53.
10. Пухаренко, Ю.В. Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона / Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков // Вестник гражданских инженеров. — 2017. — № 1(60). — С. 172–176.

11. Морозов, В.И. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях / В.И. Морозов, Ю.В. Пухаренко // Вестник МГСУ. — 2014. — № 3. — С. 189–196.

12. Пантелеев, Д.А. Деформативные и прочностные характеристики полиармированного фибробетона / Д. А. Пантелеев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2015. — № 3(33). — С. 133–139.

13. Wille, K. Properties of strain hardening ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading / K. Wille, S. El-Tawil, A.E. Naaman // Cement and Concrete Composites. — 2014, — Vol. 48. — pp. 53–66.

14. Shin, J. Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Precast Segmental Bridges: Flexural Behaviour and Joint Design / Hamburg-Harburg University of Technology. — Seoul, Korea, July 6th. 2016. — 202 pp.

15. Sobolev, K. How nanotechnology can change the concrete world: Part 1 / K. Sobolev, M.F. Gutiérrez // Am. Ceram. Soc. Bull. — 2005. — Vol. 84, No. 10. — pp. 14–17.

16. Akcaoglu, T. Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression / T. Akcaoglu, M. Tokyay, T. Celik // Cement and Concrete Composites. — Vol. 26, No 6. — 2004. — pp. 633–638.

17. Baby, F. Shear Behavior of Ultrahigh Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams: I — Experimental Investigation / F. Baby, P. Marchand, F. Toutlemonde // Journal of Structural Engineering. — 2014. — Vol. 140, No 5 — 10 pp.

18. Yang, I-H. Shear Behaviour of Ultra-High-PerformanceFibre-Reinforced Concrete Beams Without Stirrups / I-H. Yang, C. Joh, B-S. Kim // Magazine of Concrete Research. — 2012. — Vol. 64, No. 11). — pp. 979–993.

19. Pansuk, W. Shear capacity of high performance fiber reinforced concrete I-beams / W. Pansuk, T. Nguyen, Y. Sato, J.d. Uijl, J. Walraven // Construction and Building Materials. — 2017. — Vol. 157. — pp. 182–193.

20. Thiemicke, J. Experimental and numerical investigations on I-shaped UHPC-beams with combined reinforcement under shear load. / J. Thiemicke, E. Fehling // In book: Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation. 1st Edition. — 2016. — pp. 1363–1367.

21. Ţibea, C. Ultimate shear response of ultra-high-performance steel fibre-reinforced concrete elements / C. Ţibea, Dan V. Bompa // Archives of Civil and Mechanical Engineering. –2020. — Vol. 20, No. 49. — 16 pp.

22. Yavas¸ A. Impact of Reinforcement Ratio on Shear Behavior of I-Shaped UHPC Beams with and without Fiber Shear Reinforcement / A. Yavas, Goker C.O. // Materials. — 2020. — Vol. 13, No. 7–17 pp.

23. Zagon, R. Shear behaviour of SFR-UHPC I-shaped beams / R. Z agon, S. Matthys, Z. Kiss // Construction and Building Materials. — 2016. — Vol. 124. — pp. 258–268.

24. Meszoly, T. Shear Behavior of Fiber-Reinforced Ultra-High Performance Concrete Beams / T. Meszoly, N. Randl // Engineering Structures. — 2018 — Vol. 168. — pp. 119–127.

25. Hasgul, U. Steel Fiber Use as Shear Reinforcement on I Shaped UHP-FRC Beams / U. Hasgul, A. Yavas¸ T. Birol, K. Turker // Applied Sciences. — 2019. — Vol. 9, No. 24. — 17 pp.

26. Telleen, K. Experimental investigation into the shear resistance of a reinforced UHPFRC web element / K. Telleen, T. Noshiravani, R. Galrito, E. Brühwiler // 8th fib PhD Symposium in Kgs. Lyngby, Denmark. — June 20–23, 2010. — 6 pp.

27. Schröfl, C. Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC) / C. Schröfl, M. Gruber, J. Plank // Cement and Concrete Research. 2012. — Vol. 42 — pp. 1401–1408.

28. Zagon, R. Shear Behaviour of UHPC Concrete Beams / R. Zagon, K. Zoltan // Procedia Technology. — 2016– vol. 22. — pp. 122–126.

29. Ahmed, A. Prediction of shear behavior of glass FRP bars-reinforced ultra-high-performance concrete I-shaped beams using machine learning / A. Ahmed, M. Uddin, M. Akbar, R. Salih, M. Khan, H. Bisheh, T. Rabczuk // International Journal of Mechanics and Materials in Design. — 2023. — Vol. 24, No. 4. — 22 pp.

30. Aghdasi, P. Developing ultra-high-performance fiber-reinforced concrete for large-scale structural applications / P. Aghdasi, A.E. Heid, Sh. Chao // ACI Materials Journal. — 2016. — Vol. 113, No. 5. — pp. 559–570.

31. Solhmirzaei, R. Machine learning framework for predicting failure mode and shear capacity of ultra-high performance concrete beams / R. Solhmirzaei, H. Salehi, V. Kodur, M.Z. Naser // Engineering Structures. — 2020. — Vol. 224. — 11 pp.

32. Rossi, P. Probabilistic Numerical Model of Cracking in Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) Beams Subjected to Shear Loading / P. Rossi, D. Desnoyers. J.-L. Tailhan // Cement and Concrete Composites. 2018. Vol. 90. pp. 119–125.

33. Jiang, J. OpenSees Software Architecture for the Analysis of Structures in Fire / J. Jiang, L. Jiang, P. Kotsovinos, J. Zhang, A. Usmani, F. Mckenna, G.Q. Li // Journal of Computing in Civil Engineering. — 2013. — Vol. 29. 13 pp.

34. Mortazavi S.J. Implementation of new elements and material models in OpenSees software to account for post-earthquacke fire damage / S.J. Mortazavi, I. Mansouri, P. Awoyera, M.Z. Naser // Structures. 2020. — Vol. 27. — pp. 1777–1785.

35. Wang, J. Constitutive Relationships of Prestressed Concrete Membrane Elements: Ph.D. Dissertation / Jun Wang. — Houston, Texas. — 2006. — 306 pp.

36. Magureanu, C. Bending and shear behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete / C. Magureanu, I. Sosa, C. Negrutiu, B. Heghes // High Performance Structures and Materials V. 2010. Vol 112. pp. 79–89.

37. Салиб, М.И.Ф. Прочность наклонных сечений двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона / М.И.Ф. Салиб, М.М. Тамов // Инженерный вестник Дона. — 2024. — № 1(109). — С. 369–381.

Tamov Murat Mukhamedovich
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
E-mail: murat.tamov@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8235-2314
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=800695

Numerical modeling of ultra-high-strength concrete beams using object-oriented programming

Abstract. The article examines the development of nonlinear numerical models of I-beams made of ultra-high-performance concrete using object-oriented programming tools in the OpenSees environment. The author analyzes the existing experimental database and existing methods for modeling the stress-strain state of such beams under shear force. The physical and mechanical properties of UHPC and the principles of mixture design are described. The article provides an overview of the OpenSees software platform and the developed finite element analysis methodology, which includes the creation of new material classes based on stress-strain diagrams for ultra-high-performance concrete, fiber-reinforced concrete, and embedded reinforcement. The Softened Membrane Model (SMM) is used to simulate the behavior of reinforced concrete beam webs under load. Model calibration was performed using experimental data, which allowed for refining the calculation scheme parameters and achieving a high degree of agreement between theoretical and experimental results. A comparison of calculated and experimental values of ultimate shear forces demonstrated the high accuracy of the proposed finite element model. The study also examines the strength and deformability characteristics of I-beams reinforced with both fiber and transverse reinforcement. A comparison of theoretical and experimental deflection curves demonstrated the model's ability to accurately assess the stress-strain state of beams at all loading stages. The developed models can be used in the design and analysis of flexural structures made of UHPC, as well as in improving numerical modeling methods for their behavior under loading.

Keywords: ultra-high-performance concrete; I-shaped beams; shear behaviour; object-oriented programming