

Отчет о проделанной работе с использованием оборудования ИВЦ НГУ

1. Аннотация

Проведено трехмерное моделирование четырехточечного изгиба железобетонной балки в пакете ANSYS. При моделировании учитывалось разрушение бетона, а также его физическая нелинейность и разносопротивляемость растяжению - сжатию. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, трехмерными расчетами других авторов и результатами, полученными в рамках модели пониженной размерности. На основании полученных результатов сделан вывод о том, что модель пониженной размерности адекватно описывает поведение конструкции до начала текучести арматуры. Установлена сильная зависимость результатов трехмерных расчетов от шага нагрузки при наличии пластических деформаций в арматуре.

2. Тема работы

Численное моделирование деформирования композитных конструкций.

3. Состав коллектива

1. Брындин Лука Сергеевич, младший научный сотрудник центра НТИ по новым функциональным материалам НГУ, младший научный сотрудник института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.
2. Голушко Сергей Кузьмич, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник центра НТИ по новым функциональным материалам НГУ, профессор кафедры математического моделирования НГУ.
3. Шапеев Василий Павлович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, профессор кафедры математического моделирования НГУ.
4. Беляев Василий Алексеевич, к.ф.-м.н., специалист 1 категории по работе с партнерами коммерциализации НИОКР ЦТТК НГУ.
5. Болтаев Артем Игоревич, ведущий специалист отдела моделирования ООО ИК ЦТО.
6. Горынин Арсений Глебович, младший научный сотрудник центра НТИ по новым функциональным материалам НГУ.

4. Научное содержание работы

4.1 Постановка задачи

Средствами конечно-элементного пакета ANSYS провести трехмерное моделирование изгиба железобетонной балки с учетом особенностей деформиро-

вания составляющих ее материалов. Провести сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, трехмерным моделированием других авторов и результатами моделирования в рамках модели пониженной размерности.

4.2 Современное состояние проблемы

К настоящему времени существует несколько подходов к моделированию деформирования и расчету железобетонных конструкций. Наиболее применимой в инженерной практике является методика анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) по строительным нормам и правилам [1–3]. Для учета особенностей деформирования материала вводятся различные коэффициенты, зачастую полученные эмпирически. Итоговый расчет должен проходить по коэффициентам запаса. При этом сами используемые методики содержат соотношения с “запасом прочности”. В случае же, когда конструкция не удовлетворяет требованиям прочности по консервативным методикам, начинается поиск альтернативных вариантов, позволяющих провести более точный расчет. Этот подход может быть связан с уточнением используемых моделей пониженной размерности с целью учета тех или иных особенностей материала. Чаще всего он используется для типовых элементов, таких как балки, пластины и оболочки [4–6]. Третьим подходом, наиболее точным с точки зрения описания напряженно-деформированного состояния конструкции, является трехмерное моделирование, которое чаще всего осуществляется с помощью конечно-элементных пакетов прикладных программ [7–9].

4.3 Описание работы

В работе [10] проведены испытания железобетонной балки на четырехточечный изгиб. Ее численное моделирование проведено в работе [7] с помощью ANSYS и в [12] с использованием разработанной коллективом авторов модели пониженной размерности. В данной работе проведено моделирование этого эксперимента в ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 20.2 .

Для моделирования поведения бетона использовался элемент SOLID65. Закон деформирования бетона задавался кусочно-линейной функцией с запретом разрушения элементов в области сжатия. Продольная и поперечная арматура моделировалась балочными элементами BEAM188 с упруго-пластическим поведением материала. В качестве критерия разрушения бралась модель Вильяма-Варнке [11]. Сцепление между бетоном и арматурой полагалось абсолютно жестким. В целях сокращения времени расчета моделировалась одна четвертая часть балки с учетом симметрии НДС.

Расчет проводился с постепенным увеличением нагрузки, при этом для более точного моделирования шаг уменьшался при появлении первой трещины и после начала текучести арматуры.

4.4 Полученные результаты

На рис. 1 приведены диаграммы нагрузка–прогиб ($P-w$), полученные в эксперименте [10], при моделировании на ANSYS в [7], при моделировании на ANSYS в рамках данной работы и при расчетах в рамках пониженной модели [12]. Отличия результатов при моделировании на ANSYS вызваны тем, что в работе [7] были специально подобраны шаги нагрузки таким образом, чтобы итоговый результат лучше совпадал с экспериментальной кривой и наблюдалась сходимость решения. Расчет на ANSYS в данной работе в настоящий момент удалось провести до значений нагрузки, соответствующих начальному этапу текучести арматуры, что связано с расходимостью итерационного процесса для решения нелинейных уравнений.

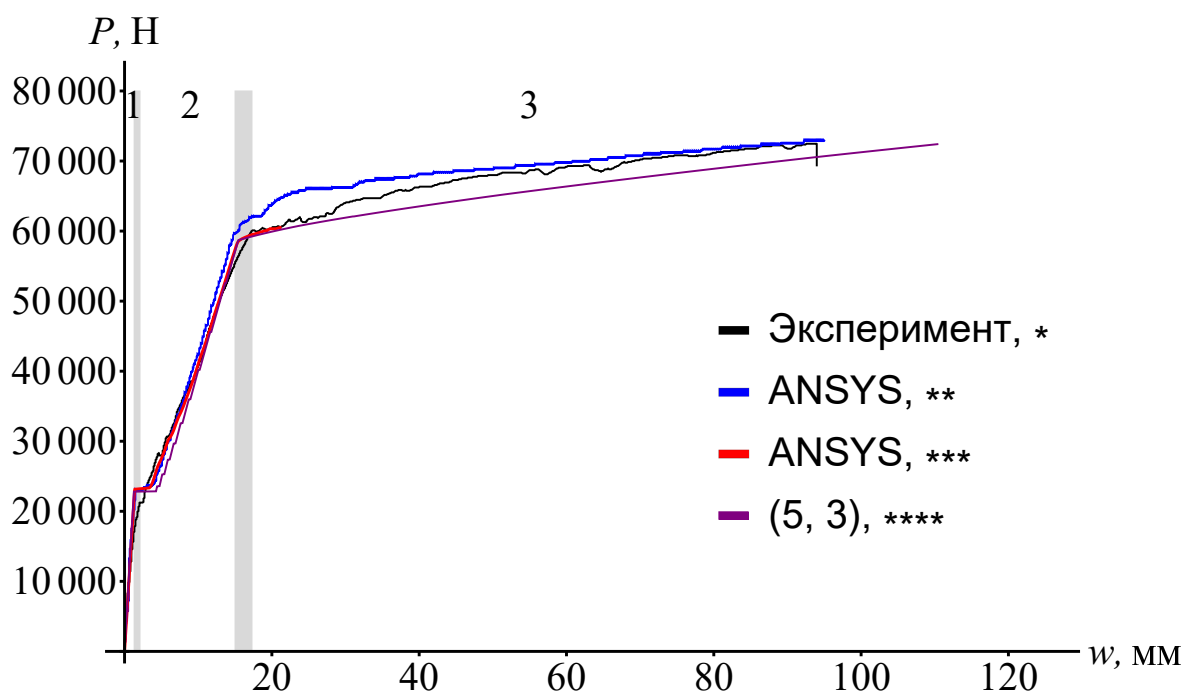


Рис. 1. Диаграммы нагрузка–прогиб, полученные: * — в эксперименте [10], ** — в ANSYS [7], *** — в ANSYS в данной работе, **** — в рамках модели пониженной размерности [12]

Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что модель пониженной размерности адекватно описывает поведение конструкции до начала текучести, при этом момент появления первой трещины и начала текучести арматуры хорошо согласуется с трехмерными расчетами. Кроме того, существенная разница трехмерных расчетов на этапе текучести арматуры говорит о том, что следует осторожно относиться к результатам трехмерных расчетов, которые могут быть чувствительны к изменению, например, шага нагрузки. Работа в исследовании поведения конструкции на этом этапе еще не закончена и требует проведения дополнительных численных экспериментов.

5. Эффект от использования кластера

Кластер ИВЦ НГУ позволил избежать покупки дорогостоящей лицензии для использования ANSYS, а также провести трудоемкие расчеты за относительно короткое время.

Литература

- [1] СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 / М.: ФАУ ФЦС, 2012.
- [2] Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary / ACI Committee 318. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008.
- [3] Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: The European Union Per Regulation, 2005.
- [4] **Monti G., Spacone E.** Reinforced concrete fiber beam element with bond-slip // J. Struct. Eng. 2000. V. 126. № 6. P. 654–661.
- [5] **Floros D., Ingason O. A.** Modelling and simulation of reinforced concrete beams: M.S. Dissertation. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2013.
- [6] **Адищев В. В., Мальцев В. В.** Применение нелинейных диаграмм деформирования бетона для расчета напряженно-деформированного состояния в железобетонной балке численно-аналитическим методом // Изв. вузов. Стр-во. 2017. № 1. С. 5–17.
- [7] **Wolanski A. J.** Flexural Behavior of reinforced and prestressed concrete beams using finite element analysis: M.S. Dissertation. Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, USA, 2004.
- [8] **Лукин А. В., Модестов В. С.** Конечно-элементное моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, 2014. №3. С. 35–46.
- [9] **Самошкин А. С., Тихомиров В. М.** Математическая модель деформирования железобетона с учетом контактного взаимодействия его струк-

турных компонент // Вычислит. технологии. 2017. Т. 22, Спец. выпуск 1. С. 75–86.

- [10] **Foley C. M.** Strengthening Existing Reinforced Concrete Beams for Flexure Using Bolted External Structural Steel Channels / C. M. Foley, E. R. Buckhouse. Marquette University, College of Engineering, Dept. of Civil and Environmental Engineering, 1998.
- [11] **William K.J., Warnke E.P.** Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete // Proceedings of the International Association of Bridge and Structural Engineers Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses, Bergamo (Italy), May 17–19 1974, P. 1–30.
- [12] **Belyaev V. A., Boltaev A. I., Bryndin L. S., Golushko S. K., Gorynin A. G., Shapeev V. P.** Modelling and simulation of deformation and failure of reinforced concrete beams under four-point bending // Journal of Siberian Federal University - Mathematics and Physics. 2021. V. 14. № 6. P. 679–689. doi:10.17516/1997-1397-2021-14-6-679-689