

DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-6-433-437
УДК 624.01

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Численные исследования прочности бетонных цилиндров на сжатие

О.В. Мкртычев, М.И. Андреев*

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26
*misha-andreev_93@mail.ru

История статьи:

Поступила в редакцию: 12 октября 2019 г.
Доработана: 22 ноября 2019 г.
Принята к публикации: 04 декабря 2019 г.

Аннотация

Актуальность. При проведении расчетов конструкций в нелинейной постановке большое значение имеет выбор адекватных моделей материалов и диаграмм деформирования. Поскольку отсутствуют указания, как использовать диаграммы деформирования бетона и арматуры при их совместной работе, приведенные в СП 63.13330.2018, для моделирования железобетонных конструкций конечными элементами одного типа необходимо вводить допущения. **Целью** работы является проведение численных экспериментов по испытанию бетонных цилиндров на одноосное сжатие и верификация полученных результатов с нормативными данными. **Методы.** Численные эксперименты выполнялись в программном комплексе LS-DYNA. Данный программный комплекс позволяет моделировать совместную работу бетона и арматуры с помощью объемных (для бетона) и стержневых (для арматуры) конечных элементов. В качестве модели принят цилиндр диаметром 150 мм, высотой 300 мм. Образцы смоделированы объемными конечными элементами. Для моделирования бетона используется нелинейный материал CSCM (Continuous Surface Cap Model). Испытания проводились с образцами следующих классов бетона по цилиндрической прочности на сжатие: C12, C16, C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50, C55. Это соответствует следующим классам по кубиковой прочности на сжатие: B15, B20, B25, B30, B37, B45, B50, B55, B60, B67. **Результаты.** Проведенные исследования показали, что характер разрушения образцов при численном эксперименте соответствует характеру разрушения при испытаниях. Исследуемая модель бетона CSCM может использоваться при расчетах бетонных и железобетонных конструкций для основных классов бетона при учете дополнительных поправочных коэффициентов к цилиндрической прочности.

Ключевые слова: верификация; модель бетона; численный эксперимент; нелинейный материал; бетонный цилиндр; одноосное сжатие; объемные конечные элементы; цилиндрическая прочность

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 7.1524.2017/ПЧ.

Для цитирования

Мкртычев О.В., Андреев М.И. Численные исследования прочности бетонных цилиндров на сжатие // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 6. С. 433–437. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-6-433-437>

Введение

Расчет конструкций в нелинейной постановке подразумевает повышенное внимание к выбору адекватных моделей материалов и диаграмм дефор-

мирования. В СП 63.13330.2018 [1] приведены диаграммы деформирования бетона и арматуры. Однако отсутствуют указания, как использовать эти диаграммы при совместной работе бетона и арматуры. Таким образом, для моделирования железобетонных конструкций конечными элементами одного типа необходимо вводить допущения. Современные программные комплексы, такие как LS-DYNA, ANSYS и другие, позволяют моделировать совместную работу бетона и арматуры с помощью объемных (для бетона) и стержневых (для арма-

Мкртычев Олег Вартанович, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов; eLIBRARY SPIN-код: 9676-4986.
Андреев Михаил Иванович, аспирант кафедры сопротивления материалов; eLIBRARY SPIN-код: 1820-3744.

© Мкртычев О.В., Андреев М.И., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

туры) конечных элементов. В такой постановке для стержневых конечных элементов можно использовать диаграммы, представленные в [1]. Работа бетона в случае трехосного напряженного состояния не может быть в полной мере описана диаграммой деформирования бетона, полученной при одноосном сжатии. Необходимо использовать более сложные модели бетона.

1. Методика расчета

Реализованная в программном комплексе LS-DYNA нелинейная модель бетона Continuous Surface Cap Model (CSCM) [3; 4] позволяет преодолеть существующие недостатки диаграмм работы бетона. Она дает возможность учитывать совместную работу бетона и арматуры.

Из названия Continuous Surface Cap Model следует, что математическая модель будет представлена замкнутой поверхностью с наличием так называемого колпака (рис. 1).

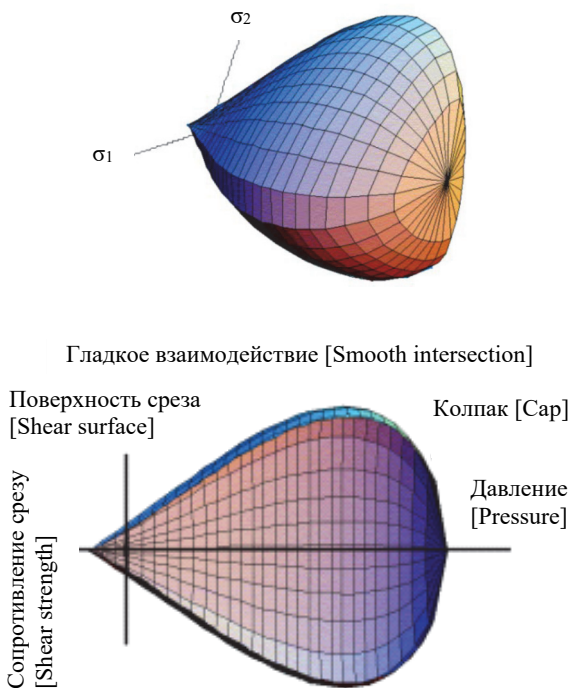


Рис. 1. Математическая модель бетона CSCM
[Figure 1. Mathematical model of concrete CSCM]

Модель CSCM использует большой набор многочисленных стандартизированных свойств материала с основными входными параметрами – прочность на сжатие, размер характерной фракции крупного заполнителя. Набор свойств материала для данной модели соответствует положениям норм СЕВ-FIP (СЕВ, 1993) [5; 6; 7]. Параметры соответствуют прочности на сжатие от около 20 до 58 МПа, в дан-

ном диапазоне между 28 и 48 МПа материал работает более корректно.

2. Постановка задачи

Цель данного исследования заключается в проведении численных экспериментов по испытанию бетонных цилиндров на одноосное сжатие и последующем сравнении полученных результатов с экспериментальными и нормативными данными. Ранее в [8] были проведены численные исследования образцов бетонных кубов и призм. Сравнение результатов показывает хорошую сходимость.

Численные эксперименты реализовываются в программном комплексе LS-DYNA [9; 10]. В качестве образца в соответствии с [2] принят цилиндр диаметром 150 мм, высотой 300 мм. Образец смоделирован объемными конечными элементами. Нижняя и верхняя плиты испытательной машины также выполнены из объемных конечных элементов (рис. 2). Нижняя плита закреплена от всех возможных перемещений, верхняя – может перемещаться только в вертикальном направлении.

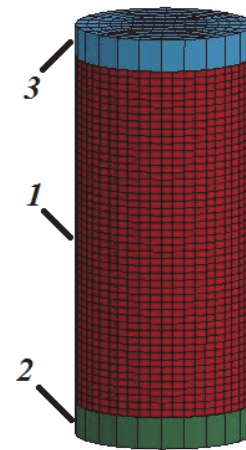


Рис. 2. Модель испытаний:
1 – образец испытаний; 2 – нижняя опорная плита испытательной машины; 3 – верхняя плита испытательной машины (пресс)
[Figure 2. Testing model:
1 – test sample; 2 – lower support plate of a testing machine; 3 – upper support plate of a testing machine (press)]

Материал плит – сталь. Для моделирования бетона используется нелинейный материал CSCM [4–7].

В ходе эксперимента к верхней плите прикладывалась постепенно увеличивающаяся нагрузка, и образец доводится до разрушения.

Испытания проводились с образцами следующих классов бетона по цилиндрической прочности на сжатие – С12, С16, С20, С25, С30, С35, С40, С45, С50, С55, что соответствует следующим классам по кубиковой прочности на сжатие – В15, В20, В25, В30, В37, В45, В50, В55, В60, В67 [5–7].

В процессе испытаний учитывалось трение между плитами испытательной машины и образца.

3. Результаты расчета

Проведенные исследования показали, что характер разрушения образцов при численном эксперименте соответствует характеру разрушения при реальных испытаниях. Разрушение цилиндра с учетом трения приведено на рис. 3.

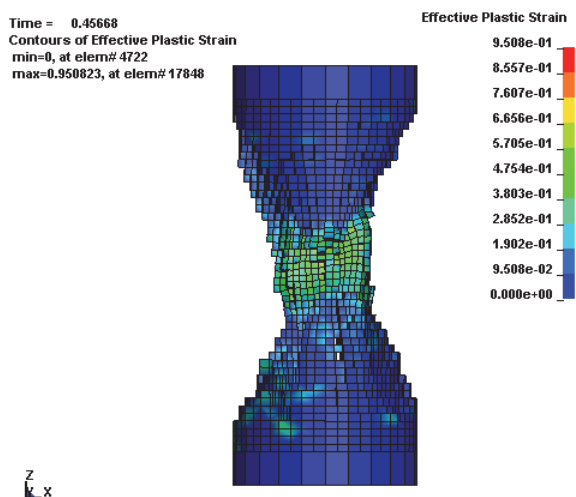


Рис. 3. Картина разрушения бетонного цилиндра с интенсивностью пластических деформаций.

Численный эксперимент

[Figure 3. Pattern of the concrete cylinder destruction with intensity of plastic deformations. Numerical experiment]

На рис. 4 приведены удовлетворительные разрушения образцов-цилиндров в соответствии с ГОСТ 10180-2012 [2].

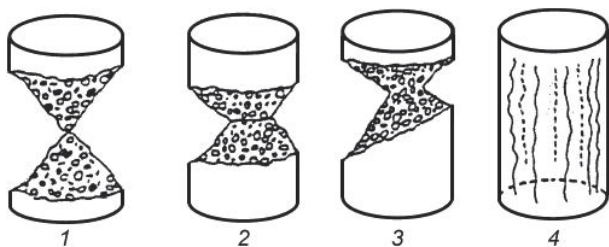


Рис. 4. Картина разрушения бетонного цилиндра. Экспериментальные данные

[Figure 4. Pattern of the concrete cylinder destruction. Experimental data]

Как показывает анализ результатов, картина разрушения при численном эксперименте соответствует имеющимся экспериментальным данным.

В ходе проведения численных экспериментов фиксировались значения разрушающей нагрузки для цилиндров. Эти значения соответствуют средней цилиндрической прочности. Полученные данные

сравнивались с нормативными значениями [5–7]. Результаты для разных классов бетона приведены в таблице.

Таблица

Основные результаты расчета
[Table. Main results of calculation]

Класс бетона [Concrete class]	f_{cm} (средняя цилиндрическая), МПа [f_{cm} (mean cylindrical), MPa]		Δ
	Нормативное значение [Normative value]	Численный эксперимент [Numerical experiment]	
B15 (C12)	20	20,3	1,5%
B20 (C16)	24	26,99	12,5%
B25 (C20)	28	33,2	18,6%
B30 (C25)	33	39,7	20,3%
B37 (C30)	38	45,6	20%
B45 (C35)	43	50,7	17,9%
B50 (C40)	48	55,5	15,6%
B55 (C45)	53	60,3	13,8%
B60 (C50)	58	64,95	12,0%
B67 (C55)	63	69,5	10,3%

Нормативные значения средней цилиндрической прочности и их соотношение к классу бетона по средней кубической прочности взяты из [5–7].

На рис. 5 полученные результаты представлены в виде графиков.

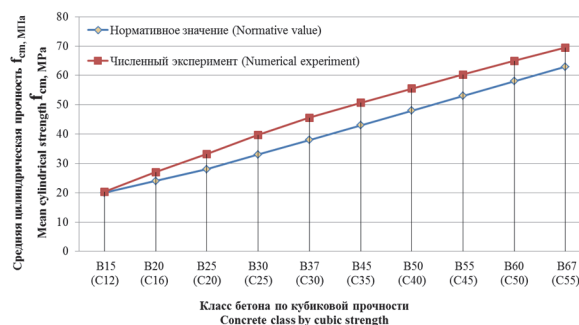


Рис. 5. Средняя цилиндрическая прочность в зависимости от класса бетона при численном эксперименте и нормативных значениях
[Figure 5. The mean cylindrical strength, depending on the class of concrete in the numerical experiment and the normative values]

Заключение

Проведенные исследования показывают, что полученный в численных исследованиях характер разрушения бетонных цилиндров соответствует экспериментальным данным.

Верификационный анализ демонстрирует, что в результатах, приведенных в таблице, расхождение между заданной прочностью бетона для исследуемых классов и фактической прочностью бетона, полученной в ходе испытания, составляют от 1,5 до 20,3 %.

Исследуемая модель бетона CSCM наиболее адекватно характеризует работу бетона. Расхождения до 20,3 % между заданной прочностью и фактической прочностью разрушения можно считать приемлемыми, что также подтверждается результатами, полученными в [11; 12]. Однако результаты, полученные в [8], показывают хорошую сходимость численных экспериментов с нормативными данными для призменной прочности. Следует отметить, что при проектировании несущих элементов зданий и сооружений используется призменная прочность бетона. Таким образом, предлагаемая модель бетона CSCM может использоваться при расчетах бетонных и железобетонных конструкций для основных классов бетона с учетом перехода от кубиковой к призменной прочности и дополнительных поправочных коэффициентов к цилиндрической прочности.

Список литературы

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-101-2003. М., 2018. 143 с.
2. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М., 2012. 36 с.
3. US Department of Transportation. Federal Highway Administration. Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159. FHWA-HRT-05-063, 190. 2007.
4. Murray Y.D. Users Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159, FHWA-HRT-05-062. 2007.
5. EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–1. General rules and rules for buildings. 2004.
6. Telford T. Designers' guides to the Eurocodes. Designers' guides to Eurocode 2: Design of concrete structures designers' guide to EN1992-1-1 and EN1992-1-2 Eurocode 2: Design of concrete structures general rules and rules for buildings and structural fire design. 2005.
7. Telford T. Comite Euro-International du Beton CEB-FIP Model Code 1990. Design code. 1993.
8. Mkrtychev O.V., Sidorov D.S., Bulushev S.V. Comparative analysis of results from experimental and numerical studies on concrete strength // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 117. 00123.
9. Mkrtychev O.V., Andreev M.I. Verification of the reinforced concrete beam model based on the results of a full-scale experimental study // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. 01029.
10. Andreev M.I., Bulushev S.V., Dudareva M.S. Verification of the eccentrically compressed reinforced concrete column calculation model based on the results of a full-scale experimental study // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. 04013.
11. Hua Jiang, Jidong Zhao. Calibration of the continuous surface cap model for concrete // Finite Elements in Analysis and Design. 2015. Vol. 97. Pp. 1–19.
12. Salamon J., Harris D.W. Evaluation of Nonlinear Material Models in Concrete Dam Finite Element Analysis // Report DSO-2014-08. Colorado, 2014. P. 89.

RESEARCH PAPER

Numerical studies of strength of concrete cylinders for compression

Oleg V. Mkrtychev, Mikhail I. Andreev*

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation
*misha-andreev_93@mail.ru

Article history:

Received: October 12, 2019
Revised: November 22, 2019
Accepted: December 04, 2019

Acknowledgements

This study was performed with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Grant No. 7.1524.2017/Project Part.

Abstract

Relevance. The choice of adequate models of materials and deformation diagrams is of great importance when performing structural calculations in a nonlinear setting. Since there are no instructions on how to use the deformation diagrams of concrete and reinforcement when working together, given in SP 63.13330.2018, it is necessary to introduce assumptions for modeling reinforced concrete structures with finite elements of the same type. **The aims of the work** are to conduct numerical experiments on testing concrete cylinders for uniaxial compression and to verify the results with normative data. **Methods.** Numerical experiments were performed in the LS-DYNA software package. This program complex allows to simulate the joint work of concrete and reinforcement with the help of volume (for concrete) and rod (for reinforcement) finite elements. A cylinder with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm was taken as model. Samples were modeled by volumetric finite elements. The CSCM – Continuous Surface Cap Model is a nonlinear material used to model concrete. Tests were carried out with samples of the

Oleg V. Mkrtychev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Strength of Materials Department; eLIBRARY SPIN-code: 9676-4986.
Mikhail I. Andreev, post-graduate student of the Strength of Materials Department; eLIBRARY SPIN-code: 1820-3744.

For citation

Mkrtychev O.V., Andreev M.I. (2019). Numerical studies of strength of concrete cylinders for compression. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(6), 433–437. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-6-433-437>. (In Russ.)

following classes of concrete for cylindrical compressive strength: C12, C16, C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50, C55. This corresponds to the following classes of cubic compressive strength: B15, B20, B25, B30, B37, B45, B50, B55, B60, B67.

Results. The conducted researches have shown that the character of destruction of samples at numerical experiment corresponds to the character of destruction at tests. The investigated concrete model CSCM can be used in the calculation of concrete and reinforced concrete structures for the main classes of concrete, when taking into account the transition from cubic to prismatic strength and additional correction factors to cylindrical strength.

Keywords: verification; concrete model; numerical experiment; nonlinear material; concrete cylinder; uniaxial compression; volumetric finite elements; cylindrical strength

References

1. SP 63.13330.2018. (2018). *Betonnnye i zhelezo-betonnnye konstrukcii. Osnovnyye polozeniya [Concrete and Reinforced Concrete Structures. General provisions]*. SNIP 52-101-2003. Moscow. (In Russ.)
2. GOST 10180-2012. (2012). *Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nyh obrazcam [State Standard 10180-2012. Concrete. Methods for determining the strength of control samples]*. Moscow. (In Russ.)
3. US Department of Transportation. Federal Highway Administration. (2007). *Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159. FHWA-HRT-05-063, 190*.
4. Murray Y.D. (2007). *Users Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159, FHWA-HRT-05-062*.
5. EN 1992-1-1 Eurocode 2 (2004). *Design of concrete structures. Part 1–1: General rules and rules for buildings*.
6. Telford T. (2005). *Designers' guides to the Eurocodes. Designers' guides to Eurocode 2: Design of concrete structures designers' guide to EN1992-1-1 and EN1992-1-2 Eurocode 2: Design of concrete structures general rules and rules for buildings and structural fire design*.

7. Telford T. (1993). *Comite Euro-International du Beton CEB-FIP Model Code 1990. Design code*.

8. Mkrtychev O.V., Sidorov D.S., Bulushev S.V. (2017). Comparative analysis of results from experimental and numerical studies on concrete strength. *MATEC Web of Conferences*, 117, 00123.

9. Mkrtychev O.V., Andreev M.I. (2018). Verification of the reinforced concrete beam model based on the results of a full-scale experimental study. *MATEC Web of Conferences*, 196, 01029.

10. Andreev M.I., Bulushev S.V., Dudareva M.S. (2018). Verification of the eccentrically compressed reinforced concrete column calculation model based on the results of a full-scale experimental study. *MATEC Web of Conference*, 251, 04013.

11. Hua Jiang, Jidong Zhao. (2015). Calibration of the continuous surface cap model for concrete. *Finite Elements in Analysis and Design*, 97, 1–19.

12. Salamon J., Harris D.W. (2014). *Evaluation of Nonlinear Material Models in Concrete Dam Finite Element Analysis* (p. 89). Report DSO-2014-08. Colorado.