Строительные материалы и изделия

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-11>
УДК 692.54

Е.А. Садовская, С.Н. Леонович, Н.А. Будревич

САДОВСКАЯ ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА – аспирант (автор, ответственный за переписку),
elena_koleda@bk.ru

ЛЕОНОВИЧ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор, декан строительного факультета,
SPIN: 2514-7976, ResearcherID: D-8864-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4026-820X>,
ScopusID: 44661420200, leonovichsn@tut.by

БУДРЕВИЧ НЕЛЛИ АНАТОЛЬЕВНА – аспирант, nelli_budrevich@mail.ru

Кафедра «Строительные материалы и технология строительства»

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Закономерности для прочности фибробетона при испытании на сжатие кубов и цилиндров

Аннотация: Существует два наиболее популярных подхода в определении прочности на сжатие бетона: испытание кубов, испытание цилиндров. Использование разных образцов дает разные результаты, которые характеризуют один параметр материала – прочность на сжатие. Изложен общий подход к определению прочности на сжатие при испытании образцов в форме цилиндра и куба. Данная статья посвящена исследованию взаимосвязи между результатами испытаний кубов и цилиндров из фибробетона с одинаковым соотношением сторон. В результате аналитического обзора литературных источников по данной тематике обобщены факторы, влияющие на переходные коэффициенты при испытаниях образцов-цилиндров с соотношением высоты к диаметру менее 2. Приведены результаты испытаний на сжатие цилиндров и кубов из фибробетона, изготовленных и испытанных авторами данной статьи в лабораторном комплексе РУП «Белэнергострой» на площадке строительства Белорусской АЭС в 2018 г. Результаты исследования могут быть использованы при испытании фибробетонных образцов-цилиндров с соотношением $h/d=1$ (выбуренные керны, образцы после испытаний на водопоглощаемость и др.).

Ключевые слова: прочность на сжатие, цилиндр, куб, фибробетон, переходный коэффициент, аспектное отношение

Введение

Бетон относится к хрупким материалам. Для повышения вязкости разрушения в бетон путем подмешивания добавляют фибровые волокна. Получаемый материал – фибробетон имеет ряд преимуществ в сравнении с обычным бетоном: он повышает прочность бетона на изгиб; увеличивает вибрационную стойкость бетона; не препятствует образованию микротрещин, но хорошо удерживает трещины от расширения и от перерастания микротрещин в макротрещины и др. Физико-механические свойства фибробетона зависят от ряда параметров фибрового армирования, технологии производства и структуры бетонной матрицы.

Прочность на сжатие – один из основных показателей качества таких строительных материалов, как бетон и фибробетон. Рассчитывается данный параметр просто: напряжение при разрушении, отнесенное к площади поперечного сечения испытываемого образца. Размер и форма испытываемых образцов – два наиболее важных параметра, влияющие на показатель

прочности при сжатии. Существуют в основном три формы используемых образцов: куб, цилиндр и призма. Аспектное отношение существенно влияет на результаты испытаний на сжатие хрупких материалов, таких как бетон, фибробетон, пенобетон. Экспериментально обнаружено [12], что разрушающая нагрузка увеличивается по мере того, как аспектное отношение падает, а попытки подвести к стандартному соотношению усложняются при изменении уровня прочности материала.

Согласно рекомендациям Международной организации испытательных лабораторий, испытания на сжатие предпочтительно проводить на образцах-цилиндрах, которые дают более однородные результаты. Здесь прослеживаются меньшие зависимости: разрушения образца – от напряжения на его концах, а прочности – от свойств крупного заполнителя. Распределение деформирующего напряжения по горизонтальным плоскостям цилиндра более однородно, чем в образцах с квадратным поперечным сечением [3, 4].

Прочность при испытании кубов и цилиндров, сделанных из одного и того же бетона, различается. Стягивающее действие плит испытательной машины распространяется по всей высоте куба, но оставляет незатронутой часть испытываемого цилиндра [5].

В ряде исследований [6–14] установлено: влияние аспектного отношения на номинальную прочность квазихрупких материалов, разрушающихся после стабильного роста крупных трещин, вызвано главным образом выделением энергии. Исследования влияния изменения аспектного отношения за счет увеличения длины образца [10, 11] подтверждают большое влияние соотношения h/d на величину прочности при сжатии бетонного образца. Значение угла наклона, показанное на рис. 1, принимается приблизительно равным 45° , так как при другой величине угла ограничивающий эффект силы трения был бы незначительным. На схемах, приведенных на рис. 1, видно, как аспектное отношение образцов-цилиндров влияет на режим разрушения.

Рис. 1. Влияние размеров и формы образца на режим разрушения [6]

В настоящей статье мы предприняли попытку оценить изменение показателя прочности на сжатие фибробетона для образцов кубической $100 \times 100 \times 100$ мм и цилиндрической формы 150×150 мм. Аспектное отношение испытываемых образцов равно 1.

В нормативной литературе [1, 2] приводятся номинальные размеры диаметров образцов-цилиндров при испытании на сжатие: 70, 100, 150, 200, 250, 300 мм аналогично размерам кубов. При этом высота должна быть больше или равна диаметру. В [1] указано, что «допускается применение образцов других форм и размеров, если они предусмотрены в действующих нормативных или технических документах», т.е. испытания можно проводить на образцах разных размеров. Масштабные коэффициенты приводятся только для образцов с диаметром 100, 150, 200, 250, 300 мм и $h = 2d$ (см. таблицу).

Если $h/d > 2$ – образец можно укоротить отпиливанием его части длины до стандартного отношения $h/d = 2$. При коротком образце-цилиндре $h/d < 2$ необходимо расчетным путем привести прочность бетона к эквивалентному значению при $h/d = 2$. Поправочный коэффициент зависит от размеров образца и величины прочности бетона (рис. 2, а). Известно, что для малопрочных бетонов h/d имеет большее влияние, чем для высокопрочных [4].

Общепринятые коэффициенты перехода [1, 2, 8]

Масштабный коэффициент				Поправочный коэффициент				
hxd, мм	ГОСТ 10180	h = d, мм	K	h/d	ГОСТ 28570	h/d	ASTM 42-90	BS 1881
100x200	1,16	200	—	1,95–2,05	1,20	2,00	1,00	1,00
150x300	1,20	150	1,05	1,75–1,84	1,18	1,75	0,98	0,97
200x400	1,24	100	1,02	1,55–1,64	1,14	1,50	0,96	0,92
250x500	1,26	70	0,91	1,25–1,34	1,10	1,25	0,93	0,87
300x600	1,28	50	0,81	1,05–1,14	1,04	1,00	0,87	0,80
—	—	—	—	0,95–1,04	1,00	—	—	—

Рис. 2. а – влияние h/d на прочность цилиндра для различных уровней прочности бетона; б – влияние h/d на прочность цилиндра [4]

Графики рис. 2, а, б показывают, что размеры образца имеют большее влияние на прочность при соотношении $h/d < 2$. Для $h/d < 1,5$ измеренная прочность быстро возрастает вследствие «стеснения» плитами испытательной машины. Увеличение прочности при равных значениях высоты и диаметра образца составляет 15–20% от прочности образца с $h/d = 2$ [11].

Экспериментальные работы

В 2018 г. в лабораторном комплексе РУП «Белэнергострой», на площадке строительства Белорусской АЭС, авторами данной статьи были проведены экспериментальные работы. Для испытаний изготовили фибробетонные образцы-цилиндры 150x150 мм и образцы-кубы 100x100x100 мм. В качестве дисперсного армирования использовались 3 вида фибр (рис. 3, а–в):

- фибра из листовой стали волнового профиля ФЛВ-0,9-50 – стальная полоска, напоминающая объемную зигзагообразную кривую с рифлением (1% по объему смеси);
- фибра анкерная проволоочная ФАП-1,0-50 – стальная проволока с анкерными концами (1% по объему смеси);
- фибра полимерная волнового профиля ФПВ-0,95-40 – жесткое полимерное моноволокно с профилированной поверхностью, изготавливаемое из полипропилена (0,4% по объему смеси).

В качестве бетонной матрицы использовались четыре вида (А, Б, В, Г) смесей тяжелого бетона: А – цемент, 400 кг, щебень, 1020 кг, песок, 800 кг; Б – цемент, 445 кг, щебень, 1035 кг, песок, 820 кг; В – цемент, 425 кг, щебень, 875 кг, песок, 950 кг, сульфоалюминатная добавка, 40 кг; Г – цемент, 485 кг, щебень, 825 кг, песок, 800 кг, сульфоалюминатная добавка, 40 кг,

микрокремнезем, 45 кг. В каждый состав вводился модификатор на основе углеродных наноструктурированных материалов в количестве 0,4–1,0% от массы вяжущего. Полученные образцы испытывались на сжатие в гидравлическом прессе Testing 2.1005 в производственной лаборатории на строительстве БелАЭС. Прочность на сжатие рассчитывалась по формуле

$$R = \alpha \cdot \frac{F}{A},$$

где для кубов: $\alpha = 0,95$; $A = 100 \times 100$ мм; для цилиндров: $\alpha = 1$; $A = \pi \cdot 75^2$ мм.

Результаты испытаний представлены на рис. 4 и рис. 5.

Рис. 3. Фибровые волокна:

а – листовая сталь волнового профиля; б – анкерная проволочная; в – полимерная волнового профиля (Здесь и далее – рисунки Е.А. Садовской)

Рис. 4. Результаты испытаний на сжатие фибробетонных кубов и цилиндров

Рис. 5. Изменение отношения прочности на сжатие цилиндров к кубиковой прочности

Обсуждение результатов

Полученные данные свидетельствуют о незначительном влиянии (либо о его отсутствии) фибрового армирования на прочность при сжатии образцов-кубов. Образцы-кубы испытываются перпендикулярно, а образцы-цилиндры – параллельно слоям укладки. Этот факт может оказывать влияние при испытаниях бетонных образцов с дисперсным фибровым армированием. С этой точки зрения фибробетонные образцы-цилиндры моделируют наиболее приближенную к реальным условиям работу материала под сжимающей нагрузкой. Известно, что при однородной смеси без расслоений сжатие кубов параллельно и перпендикулярно слоям укладки не имеет отличий.

Заключение

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы.

- Отношение между прочностями цилиндра и куба зависит не только от прочности материала.
- На переходной коэффициент от прочности на сжатие куба к прочности на сжатие цилиндра влияют прочность фибробетона, отношение высоты образца-цилиндра к его диаметру, тип крупного заполнителя.
- Отношение высоты к диаметру равное 2 дает наилучшие результаты.
- Наиболее близкие друг к другу значения прочности на сжатие разных образцов получены в составе В, который относится к фибробетонам средней прочности.
- Фибровое армирование в использованной дозировке не оказывает влияние на прочность на сжатие кубов и в незначительной степени влияет на прочность на сжатие цилиндров при одинаковых отношениях высоты к диаметру.
- Фибровое армирование незначительно влияет на прочность при сжатии кубов.
- При испытании на сжатие фибробетонных образцов следует учитывать однородность фибробетонной смеси, особенно при комбинациях подвижных бетонных матриц с металлическим фибровым волокном, склонным к оседанию.

В дальнейшем планируется провести исследование ориентации фибровых волокон в образцах с разным аспектным отношением.

Практическая значимость. Стандартное испытание на сжатие образцов-цилиндров подразумевает использование образцов с высотой h , равной двум диаметрам d . Но бывают случаи, когда применяют образцы с другим соотношением сторон, например при использовании кернов, выбуренных из бетона конструкции, или образцов, изготовленных для других испытаний (например, физических), но пригодных для механических испытаний. Использование одних и тех же образцов в разных испытаниях позволяет устанавливать более достоверные зависимости, так как исключается погрешность, вызванная неоднородностью материала.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 10180. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
2. ГОСТ 28570. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций.
3. 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.
4. Невилль А.М. Свойства бетона. М.: Стройиздат, 1972. 344 с.
5. Ali Jihad Hamad. Size and shape effect of specimen on the compressive strength of HPLWFC reinforced with glass fibres. J. of King Saud University, Engineering Sciences. 2017;29(4):373–380.
6. Al-Sahawneh E.I. Size effect and strength correction factors for normal weight concrete specimens under uniaxial compression stress. Contemporary Engineering Sciences. 2013;6(1–4):57–68.

7. Bazant Z.P., Xiang Y. Compression failure of quasibrittle materials and size effect. American Society of Mechanical Engineers, Applied Mechanics Division, AMD. 1994;185:143–148.
8. BS-1881-120: Testing concrete method for determination of the compressive strength of concrete cores. British Standards Institute, 1983.
9. Jansen D.C., Shah S.P. Effect of Length on Compressive Strain Softening of Concrete. J. of Engineering Mechanics, ASCE. 1997;123(1):25–35.
10. Jin-keum Kim, Seong-Tae Y. Application of size effect to compressive strength of concrete members, India. 2002;27(part 4, August):467–484.
11. Kodukula J.R. Suitability of Glass Fibers in High Strength Recycled Aggregate Concrete-An Experimental Investigation. Asian J. Civil Engineering. 2009;10(6):681–690.
12. Mansur M.A., Islam M.M. Interpretation of Concrete Strength for Nonstandard Specimens. J. of Materials in Civil Engineering. 2002;14(part 2):151–155.
13. Markeset G., Hillerborg A. Softening of concrete in compression localization and size effects. Cement and Concrete Research. 1995;25:702–708.
14. Tianxi Tang, Surendra P. Shah, Chengsheng O. Fracture mechanics and size effect of concrete in tension. J. of Structural Engineering. 1992;118(11):3169–3185.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2021. N 2/47

Building Materials and Products

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-11>

Sadovskaya E., Leonovich S., Budrevich N.

ELENA SADOVSKAYA, Postgraduate Student (Corresponding Author), elena_koleda@bk.ru
 SERGEI LEONOVICH, Doctor of Engineering Sciences, Professor,
 Dean of the Civil Engineering Faculty, ResearcherID: D-8864-2018,
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4026-820X>, ScopusID: 44661420200, leonovichsn@tut.by
 NELLI BUDREVICH, Postgraduate Student, nelli_budrevich@mail.ru
 Department of Building Materials and Construction Technology
Belorussian National Technical University
 Minsk, Belarus

Predicted patterns of fiber-concrete strength during compressive tests of cubes and cylinders

Abstract: There are two most popular approaches to determination of the compressive strength of concrete: testing cubes and testing cylinders. Usage of different samples leads to different results, which are intended to characterize one and the same property of the material – its compressive strength. The article discusses a general approach to determination of the compressive strength of cylinders and cubes. The analysis of factors affecting transition coefficients when testing the cylinder samples with the ratio of height to diameter is less than 2. The results of testing cubes and cylinders for compression made of fiber-reinforced concrete are presented.

Keywords: compressive strength, cylinder, cube, fiber-concrete, transition coefficient, aspect ratio

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare absence of conflicts of interests.

REFERENCES

1. GOST 10180. Concrete. Methods for determining the strength of control samples.
2. GOST 28570. Concrete. Methods for determining strength by samples taken from structures.
3. Mkrtichev O.V., Andreev M.I. Numerical studies of the compressive strength of concrete cylinders. Structural Mechanics of Engineering Structures and Structures. 2019;15(6):433–437.
4. Neville A.M. Properties of concrete. M., Stroyizdat, 1972, 344 p.

5. Ali Jihad Hamad. Size and shape effect of specimen on the compressive strength of HPLWFC reinforced with glass fibres. *J. of King Saud University, Engineering Sciences*. 2017;29(4):373–380.
6. Al-Sahawneh E.I. Size effect and strength correction factors for normal weight concrete specimens under uniaxial compression stress. *Contemporary Engineering Sciences*. 2013;6(1–4):57–68.
7. Bazant Z.P., Xiang Y. Compression failure of quasibrittle materials and size effect. *American Society of Mechanical Engineers, Applied Mechanics Division, AMD*. 1994;185:143–148.
8. BS-1881-120: Testing concrete method for determination of the compressive strength of concrete cores. *British Standards Institute*, 1983.
9. Jansen D.C., Shah S.P. Effect of Length on Compressive Strain Softening of Concrete. *J. of Engineering Mechanics, ASCE*. 1997;123(1):25–35.
10. Jin-Keum Kim, Seong-Tae Y. Application of size effect to compressive strength of concrete members, India. 2002;27(part 4, August):467–484.
11. Kodukula J.R. Suitability of Glass Fibers in High Strength Recycled Aggregate Concrete-An Experimental Investigation. *Asian J Civil Engineering*. 2009;10(6):681–690.
12. Mansur M.A., Islam M.M. Interpretation of Concrete Strength for Nonstandard Specimens. *J. of Materials in Civil Engineering*. 2002;l(14, part 2):151–155.
13. Markeset G., Hillerborg A. Softening of concrete in compression localization and size effects. *Cement and Concrete Research*. 1995;25:702–708.
14. Tianxi Tang, Surendra P. Shah, Chengsheng O. Fracture mechanics and size effect of concrete in tension. *J. of Structural Engineering*. 1992;118(11):3169–3185.