

универсального назначения: № 2018106360: заявл. 20.02.2018: опубл. 07.06.2019 / К. А. Андреева, А. А. Гавриленко, Л. В. Закревская, Е. В. Шишкина.

3. Патент на полезную модель № 61744 U1 Российская Федерация, МПК E04B 5/40. монолитное перекрытие : № 2006130422/22 : заявл. 23.08.2006 : опубл. 10.03.2007 / А. С. Афонин.

4. Патент на полезную модель № 52030 U1 Российская Федерация, МПК E04B 1/348. строительный элемент : № 2005121046/22 : заявл. 05.07.2005 : опубл. 10.03.2006 / А. П. Соляник, М. Б. Бокман.

5. Мясников, Д. О. Этапы блочно-модульного проектирования объектов / Д. О. Мясников // Строительство. Архитектура. Дизайн : Материалы Пятой Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Курск, 25 апреля 2024 года. – Курск: ЗАО Университетская книга, 2024. – С. 140-143.

УДК 691.328.43

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАТИВНОСТЬ НАПРЯГАЮЩЕГО ФИБРОБЕТОНА

Павлова Инесса Павловна¹, к.т.н., доцент, декан архитектурно-строительного факультета, **Лизогуб Александр Александрович**¹, младший научный сотрудник ОЛ «НИЦИС», **Лизогуб Ирина Владимировна**², старший преподаватель кафедры архитектуры и строительства

¹ Брестский государственный технический университет (г. Брест, ул. Московская, д. 267, 224017, Республика Беларусь), pavlinna@tut.by,
p_332_14lizogub@mail.ru

² Гродненский государственный университет имени Янки Купалы (г. Гродно, ул. Ожешко, д. 22, 230023, Республика Беларусь), lutaia-95@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы, связанные с пластической деформативностью эффективных видов бетона. Увеличение пластической деформативности и, как следствие, энергии деформирования конструктивной системы является одной из стратегий обеспечения живучести конструктивных систем при проектировании в особых расчетных ситуациях. В статье представлены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния образцов-цилиндров из напрягающего бетона с различным типом дисперсного армирования при центральном сжатии. Представлены составы экспериментальных образцов и методика исследований. В качестве оценки диссипативных свойств материала предложена такая характеристика, как удельная энергия разрушения образцов. Полученные результаты свидетельствуют о повышении пластической

деформативности дисперсно-армированного напрягающего бетона и его способности к рассеиванию (диссипации) энергии, что может быть использовано в рамках стратегии многоуровневого проектирования диссипативных конструктивных систем в особых расчетных ситуациях.

Ключевые слова: пластическая деформативность, напрягающий фибробетон, диссипативная система, живучесть, энергия разрушения.

PLASTIC DEFORMATIVITY OF SELF-STRESSING FIBER-REINFORCED CONCRETE

Pavlova Inessa Pavlovna¹, Ph.D., Associate Professor, Dean of the Faculty of Architecture and Civil Engineering, **Lizahub Aliaksandr Aliaksandravich**¹, junior research fellow of BL «RCIC», **Lizahub Irina Vladimirovna**², senior lecturer, Department of Architecture and Construction

¹ Brest State Technical University, (Brest, 267, Moskovskaya St., 224017, Republic of Belarus), pavlinna@tut.by, [p 332 14lizogub@mail.ru](mailto:14lizogub@mail.ru)

² Yanka Kupala State University of Grodno (Moscow, 22 Ozheshko St., 230023, Grodno, Republic of Belarus), lutaia-95@mail.ru

Abstract. The article discusses the issues of plastic deformability of effective types of concrete. Increasing plastic deformability and deformation energy is one of the strategies to ensure the survivability of structural systems when designing in an accidental design situation. The article presents the results of experimental studies of the stress-strain state of cylinder specimens made of self-stressing concrete with various types of dispersed reinforcement and without reinforcement under central compression. The compositions of experimental samples and research methods are presented. As an assessment of the dissipative properties of a material, such a characteristic as the specific energy of destruction of samples has been proposed. The results indicate an increase in the plastic deformability of self-stressing fiber-reinforced concrete and its ability to dissipate energy, which can be used within the framework of a multi-level design strategy for dissipative structural systems in an accidental design situation.

Keywords: plastic deformativity, self-stressing fiber-reinforced concrete, dissipative system, robustness, energy of destruction.

Введение

Важным свойством строительного сооружения является живучесть в особых расчетных ситуациях, которая в большей степени зависит от способности к пластической деформативности конструктивной системы.

В ряде работ [1] - [8] исследовались механизмы повышения деформационных характеристик и способности эффективных видов бетона к

диссипации энергии. К таким бетонам можно отнести высокопрочные бетоны, бетоны с дисперсным армированием и напрягающие бетоны. В статьях [1] - [8] отмечается, что внедрение в бетон дисперсного армирования позволяет значительно улучшить диссипативные свойства конструктивной системы. Вследствие этого в качестве объекта исследований был выбран дисперсно-армированный напрягающий бетон.

Цель работы – оценка пластической деформативности напрягающего фибробетона.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: провести экспериментальные исследования образцов-цилиндров из напрягающего фибробетона при осевом сжатии с последующим построением диаграмм деформирования и выполнить качественную и количественную оценку полученных результатов. Основная гипотеза заключается в том, что применение фиброволокна повышает пластическую деформативность и, как следствие, способность к рассеиванию (диссипации) энергии.

Методы

Для экспериментальных исследований были приняты составы, указанные в таблице 1. Опытные образцы изготавливались из напрягающего бетона с самоупрежением $S_p = 1,8$ МПа, представленного портландцементом и расширяющейся добавкой сульфаталюминатного типа. В качестве пластификатора использовали пластифицирующую добавку I группы «Frem». Дисперсное армирование представлено стальной анкерной фиброй диаметром 0,40 мм и длиной 30 мм, а также полипропиленовой фиброй диаметром 0,05 мм и длиной 12 мм.

Таблица 1. Составы экспериментальных исследований

Шифр состава	Расход материалов на 1 м ³ бетонной смеси					
	Заполнители, кг		Вязущее, кг	Вода, л Пластификатор, кг	Фибра, кг	
	Песок	Щебень			Стальная	Полипропиленовая
НБО	850	890	480	$\frac{184,6}{3,6}$	–	–
НБМ					40	–
НБП					40	3

Диаграмма деформирования бетона « σ - ε » определялась при испытании образцов-цилиндров размерами 150 × 300 мм на осевое сжатие в жестком режиме загрузки (с контролем перемещений) при заданной скорости нагружения 0.5 мм/мин.

В работе в качестве оценки диссипативных свойств материала принята такая характеристика, как энергия разрушения. В общем случае энергия разрушения образца при осевом сжатии, согласно [9], [10], может быть

представлена в виде произведения объема образца V_c и определенного интеграла функции кривой деформирования бетона $\sigma = f(\varepsilon)$:

$$U = V_c \int_0^{\varepsilon_c} \sigma_c d\varepsilon_c \quad (1)$$

Для возможности сопоставления полученных диаграмм при изучении характера разрушения образцов может быть выполнена их нормализация путем деления напряжений и относительных деформаций образцов на соответствующие пиковые значения (σ_c' – величина напряжений в пиковой точке диаграммы деформирования, соответствующая кратковременной прочности бетона при осевом сжатии; ε_{c1} – величина относительной продольной деформации, соответствующей напряжениям σ_c'). Отсюда в статье для упрощения сравнения и сопоставления результатов предложена безразмерная характеристика удельной энергии разрушения образца U_n :

$$U_n = \int_0^{\varepsilon_c/\varepsilon_{c1}} \frac{\sigma_c}{\sigma_c'} d \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (2)$$

Используя уравнение (2) могут быть определены величины удельной энергии разрушения образцов U_{n1} и U_{n2} , соответствующие площадям под восходящей и нисходящей ветвью нормализованной диаграммы:

$$U_n = U_{n1} + U_{n2} \quad (3)$$

$$U_{n1} = \int_0^1 \frac{\sigma_c}{\sigma_c'} d \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (4)$$

$$U_{n2} = \int_1^{\varepsilon_{c3}/\varepsilon_{c1}} \frac{\sigma_c}{\sigma_c'} d \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (5)$$

где $\varepsilon_{c3} / \varepsilon_{c1}$ – величина нормализованной относительной продольной деформации, принятой в качестве предельной деформации бетона при сжатии.

Также из условия равенства энергий разрушения восходящей и нисходящей ветвей диаграмм $U_1 = U_2$ для исследуемых образцов могут быть определены точки устойчивого деформирования и соответствующие им относительные деформации ε_{c2} .

Результаты и обсуждение

В результате испытаний образцов-цилиндров на осевое сжатие для исследуемых составов (НБО, НБМ, НБП) были получены соответствующие нормализованные диаграммы деформирования « σ - ε » (см. рисунок 1).

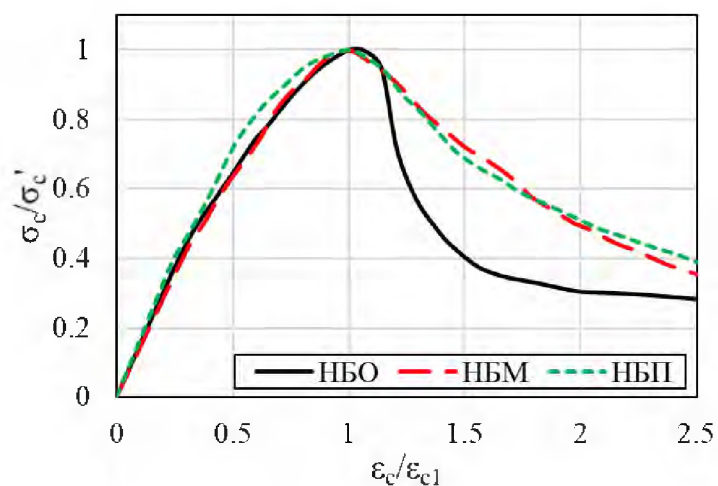


Рис. 1. Нормализованные диаграммы « σ/σ'_c - $\varepsilon/\varepsilon_{c1}$ » бетона при осевом сжатии
 В соответствии с теоретическими положениями, представленными выше, были получены и сведены в табл. 2 основные характеристики диаграмм « σ - ε » и результаты их анализа.

Таблица 2. Основные результаты

Шифр состава	Напряжения σ'_c , МПа	Относительные деформации		Нормализованные отн. деф.		Удельная энергия разрушения		
		ε_{c1} , мм/мм	ε_{c2} , мм/мм	$\varepsilon_{c2}/\varepsilon_{c1}$	$\varepsilon_{c3}/\varepsilon_{c1}$	U_{n1}	U_{n2}	U_n
НБО	29.8	0.00186	0.0043	2.31	2.5	0.60	0.68	1.28
НБМ	32.3	0.00184	0.0032	1.74	2.5	0.60	0.95	1.55
НБП	32.3	0.00210	0.0039	1.86	2.5	0.64	0.96	1.60

Как видно из диаграмм деформирования (рисунок 1), характер разрушения образцов с дисперсным армированием НБМ, НБП отличается от характера разрушения обычного образца НБО, что наиболее выражено в величине удельной энергии разрушения нисходящей ветви U_{n2} . Для образцов НБМ, НБП удельная энергия разрушения U_{n2} на 40% превышает соответствующую энергию образца НБО. Полная удельная энергия деформирования U_n образцов НБМ, НБП выше на 21% и 25% по сравнению с неармированным образцом НБО.

Выявлено незначительное увеличение на 7% удельной энергии разрушения восходящей ветви U_{n1} для образца НБП по сравнению с образцами НБО и НБМ.

Выводы

Выполнены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния образцов-цилиндров из напрягающего бетона с различным типом дисперсного армирования и без армирования при центральном сжатии. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Дисперсное армирование стальной фиброй напрягающего бетона (образец НБМ) позволило повысить энергию разрушения U_{n2} , соответствующую нисходящей ветви, на 40%, а общую энергию разрушения U_n на 21% по сравнению с неармированным образцом.

2. Использование полиармирования в виде стальной и полипропиленовой фибры (образец НБП) привело к увеличению на 7% энергии разрушения восходящей ветви U_{n1} , на 40% энергии разрушения нисходящей ветви U_{n2} и на 25% общей энергии разрушения U_n по сравнению с неармированным образцом.

Полученные результаты свидетельствуют о повышении пластической деформативности и способности к рассеиванию (диссипации) энергии дисперсно-армированного напрягающего бетона, что может быть использовано в рамках стратегии многоуровневого проектирования диссипативных конструктивных систем в особых расчетных ситуациях.

Благодарности. Исследование осуществлено в рамках задания Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) на выполнение научно-исследовательской работы (договор № T23РНФМ-060).

Список использованной литературы

1. Savin S., Sharipov M. Specific Energy Absorbed by Fiber-Reinforced Concrete Under Static and Dynamic Loading // International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. Cham: Springer Nature Switzerland. 2023. С. 143-151. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47810-9_14.

2. Xie H., Yang L., Zhang Q., Huang C., Chen M., Zhao K. Research on energy dissipation and damage evolution of dynamic splitting failure of basalt fiber reinforced concrete // Construction and Building Materials. 2022. № 330. С. 127-292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127292>.

3. Poon C. S., Shui Z. H., Lam L. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures // Cement and concrete Research. 2004. Т. 34. №. 12. С. 2215-2222.

4. Павлова И. П., Белкина И. В., Лизогуб А. А. Верификация модифицированной деформационной модели напрягающего фибробетона на фоне экспериментальных исследований // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. 2023. Т. 13. № 2. С. 74–87.

5. Landis E. N., Kravchuk R., Loshkov D. Experimental investigations of internal energy dissipation during fracture of fiber-reinforced ultra-high-performance concrete // Frontiers of Structural and Civil Engineering. – 2019. – Т. 13. – С. 190-200.

6. Wu H., Shen A., Ren G., Ma Q., Wang Z., Cheng Q., Li Y. Dynamic mechanical properties of fiber-reinforced concrete: A review // Construction and Building Materials. 2023. Т. 366. С. 130145.

7. Wu K., Qian S., Zheng H., Zhou Y., Zhu R. Energy dissipation and damage on the interface of steel and steel fiber-reinforced concrete composite column // The Structural Design of Tall and Special Buildings. – 2022. – Т. 31. – №. 18. – С. e1984.
8. Behbahani H. P., Nematollahi B., Farasatpour M. Steel fiber reinforced concrete: a review. Proceedings of the International Conference on Structural Engineering Construction and Management (ICSECM2011). 2011. С. 1-12.
9. Liu T., Wang S., Gao J., Tian X. The energy analysis of concrete failure in structural engineering // Systems Engineering Procedia. 2011. №1. С.106-111.
10. Радайкин О. В. Сравнительный анализ различных диаграмм деформирования бетона по критерию энергозатрат на деформирование и разрушение // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. 2019. №. 10. С. 29-39.

УДК 624.042.12

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БАЛОК С РАСКОСНОЙ ПЕРФОРАЦИЕЙ

Попова Марина Владиславовна, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, **Тужилова Мария Валерьевна**, магистрант кафедры строительных конструкций, **Репин Владимир Анатольевич**, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г. Владимир, ул. Горького, д. 87, 600000, Российская Федерация), tuzhilova.mar@yandex.ru

Аннотация. Балки с раскосной перфорацией стенки имеют преимущества перед балками с другими видами перфорации стенки. Они обладают большой высотой сечения, более жесткие. Установлено, что для поясов и стенки, в упругой стадии работы материала, можно считать справедливой гипотезу плоских сечений. Деформации в поясах, представляющих малый и большой тавр, следуют линейному закону, а в стенке деформации сдвига можно считать так же линейными и равными в граничных точках деформациям малых тавров. Что касается вертикальных напряжений, то из-за их небольшого значения в расчетах не учитываем. Напряжения по длине отверстия распределено неравномерно. Наибольшие значения получаются в начале и конце выреза. В зоне изменения высоты сечения балки нормальные и касательные напряжения одновременно имеют относительно большие значения в месте контакта лепестка с выступом, поэтому требуется проверка прочности стенки балки по приведенным напряжениям.

Ключевые слова: раскосная перфорация, напряжения, параметры сечений.