



DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-2-251-257

EDN: DMOFUJ

УДК 691.539.216

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Механические свойства мелкозернистых карбонатных бетонов с комплексной добавкой, включающей тонкодисперсный известняковый наполнитель и суперпластификатор

В.В. Белов , П.В. Куляев , Т.Р. Баркая 

Тверской государственный технический университет, Тверь, Российская Федерация

✉ vladim-bel@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 17 февраля 2023 г.

Доработана: 12 апреля 2023 г.

Принята к публикации: 21 апреля 2023 г.

Для цитирования

Белов В.В., Куляев П.В., Баркая Т.Р. Механические свойства мелкозернистых карбонатных бетонов с комплексной добавкой, включающей тонкодисперсный известняковый наполнитель и суперпластификатор // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 2. С. 251–257. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-2-251-257>

Аннотация. Деформационные и прочностные свойства мелкозернистых карбонатных бетонов, несмотря на то что они хорошо зарекомендовали себя в различных типах строительства, не изучены в той же степени, как характеристики традиционных тяжелых бетонов. Цель исследования – разработка способов повышения физико-механических свойств мелкозернистых карбонатных бетонов с использованием минеральной комплексной добавки, состоящей из тонкодисперсного известнякового наполнителя и суперпластификатора в составе бетона. Проанализированы взаимосвязи предельных значений прочностных характеристик (кубиковая прочность) и трещинообразующих напряжений и деформаций для обычного и карбонатного мелкозернистого составов бетона. Через механизм демпфирования процесса трещинообразования в бетоне, за счет совместной работы суперпластификатора и карбонатного микродисперсного наполнителя получен состав карбонатного мелкозернистого бетона, способный сопротивляться статическим и динамическим нагрузкам, с плотной структурой и повышенными надежностью и долговечностью.

Ключевые слова: трещинообразующие напряжения, деформации, карбонатный микронаполнитель, суперпластификатор, комплексная добавка, микро-трещинообразование, демпфирование, мезопоры, микропоры

Белов Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор, советник Российской академии архитектуры и строительных наук, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, Тверь, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-0761-6460; vladim-bel@yandex.ru

Куляев Павел Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры конструкций и сооружений, Тверской государственный технический университет, Тверь, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-8762-215X; p.kuliaev@yandex.ru

Баркая Темура Рауфович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, Тверской государственный технический университет, Тверь, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-0012-1430; btrs@list.ru

© Белов В.В., Куляев П.В., Баркая Т.Р., 2023



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

Mechanical properties of fine-grained carbonate concretes with a complex additive, including fine limestone filler and superplasticizer

Vladimir V. Belov , Pavel V. Kuliaev , Temur R. Barkaya 

Tver State Technical University, Tver, Russian Federation

✉ vladim-bel@yandex.ru

Article history

Received: February 17, 2023

Revised: April 12, 2023

Accepted: April 21, 2023

For citation

Belov V.V., Kuliaev P.V., Barkaya T.R. Mechanical properties of fine-grained carbonate concretes with a complex additive, including fine limestone filler and superplasticizer. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023;19(2):251–257. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-2-251-257>

Abstract. The stress-strain properties of fine-grained carbonate concretes, despite the fact that they have proven themselves well in various types of construction, have not been studied to the same extent as the deformation and strength properties of traditional heavy concrete. The object of the study is to find ways to improve the physical and mechanical properties of fine-grained carbonate concretes by using a mineral complex additive consisting of a finely dispersed limestone filler and a superplasticizer in the composition of concrete. The relationship between the ultimate values of strength characteristics (cubic strength) and crack-initiating stresses and deformations for conventional and carbonate fine-grained concrete compositions were analyzed. Through the damping mechanism of the cracking process in concrete, due to the joint work of a superplasticizer and a carbonate microdisperse filler a composition of carbonate fine-grained concrete was obtained, capable of resisting static and dynamic loads, with a dense structure and increased reliability and durability.

Keywords: cracking stresses, deformations, carbonate micro-filler, superplasticizer, complex additive, microcracking, damping, mesopores, micropores

1. Введение

Актуальность разработки карбонатных мелкозернистых бетонов (МЗКБ) с повышенной трещиностойкостью и прочностью диктуется растущей потребностью в строительных материалах, которые обладают достаточной степенью долговечности и надежности. Анализ показал [1–8], что разработке подобных материалов уделяется недостаточно внимания. Несмотря на наличие публикаций по исследованию физико-механических характеристик карбонатных бетонов, используемых в строительных конструкциях [1–11], малоизученными остаются такие свойства мелкозернистого карбонатного бетона, как трещиностойкость и деформативность, в условиях интенсивных знакопеременных и динамических нагрузок, особенно при использовании его в конструкциях, подверженных повышенному трещинообразованию и износу. Кроме того, несмотря на востребованность в строительстве, в целом недостаточно изучены деформативные характеристики (трещинообразующие деформации и напряжения) композитов с минеральными заполнителями и добавками, включая наноразмерные [12–17]. В настоящем исследовании оцениваются изменения значений трещинообразующих деформаций и напряжений при введении в состав бетона комплексной добавки на основе тонкодисперсного известнякового наполнителя и суперпластификатора для составов обычного и карбонатного мелкозернистого бетона. Трещинообразующие напряжения и деформации МЗКБ оценивались для различных пропорций компонентов бетона. **Цель исследования** состоит в повышении индексов надежности и долговечности конструкций, подвергающихся интенсивному воздей-

Vladimir V. Belov, Doctor of Technical Sciences, Professor, adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Head of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0761-6460; vladim-bel@yandex.ru

Pavel V. Kuliaev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, Tver, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8762-215X; p.kuliaev@yandex.ru

Temur R. Barkaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, Tver, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0012-1430; btrs@list.ru

ствию и трещинообразованию, через модификацию деформативных свойств. Главной задачей при этом стало существенное (в сравнении с обычным составом бетона) повышение уровней трещинообразующих деформаций и напряжений при оптимально подобранных пропорциях компонентов бетона.

2. Методы исследования

Разработан трещиностойкий состав карбонатного бетона с комплексной добавкой из СП-1 и ультрадисперсного известнякового порошка на базе эталонного состава МЗКБ. Проведено сравнение механических характеристик разработанных композиций с добавлением данной добавки в различных комбинациях. Показано, что модифицированный комплексной добавкой бетон обладает более высокими деформативно-резистентными свойствами, поскольку обеспечивает более высокий уровень напряжений и деформаций, соответствующих началу микротрещинообразования. При этом проверяется гипотеза пластического демпфирования процесса микротрещинообразования, способствующего снижению трещинообразующих деформаций мелкозернистого карбонатного бетона.

Методика исследований, проведенных в Тверском техническом университете, состояла в том, что деформации в конкретных условиях испытаний, уровнях напряжений были определены экспериментально при различных соотношениях компонентов. При этом приготовлены образцы для испытаний с комбинациями соотношений вода/цемент 0,35; 0,45 и соотношений известняк/цемент в составе вяжущего 0; 0,3; 0,5. Всего приготовлено шесть смесей, в качестве частичной замены цемента введен ультрадисперсный карбонатный порошок. В воду добавляли суперпластификатор СП-1, равный 1,4 % от массовой доли вяжущего. Испытания на прочность при сжатии стандартных кубов проводились в соответствии с нормами стандартов. Значения трещинообразующих деформации и соответствующих им значений напряжений определялись опытно на образцах с размерами 10×10×10. Молотый в шаровой мельнице карбонатный бой после просева применялся как ультрадисперсный известняковый наполнитель – часть твердой фазы вяжущего. Все образцы бетона (по два для каждого из шести составов) хранились согласно условиям стандартов. В табл. 1 и 2 представлены эталонные составы обычной и известняковой мелкозернистой смесей. В табл. 3 приведены варьируемые пропорции компонентов карбонатных смесей.

Испытательным устройством был гидравлический пресс.

Таблица 1

Эталонный состав обычного мелкозернистого бетона

Компоненты	Состав, кг/м ³
Цемент	678
Заполнитель	1483
Вода	286
Добавка СП-1	1,8

Table 1

Reference composition of ordinary fine-grained concrete

Components	Composition, kg/m ³
Cement	678
Aggregate	1483
Water	286
Additive SP-1	1.8

Таблица 2

Эталонный состав МЗКБ (без известнякового компонента в составе вяжущего)

Компоненты	Количество на 1 м ³ состава, кг
Цемент	696
Заполнитель	1490
Вода	298
Добавка СП-1	2,6

Table 2

**Reference composition of fine-grained carbonate concretes
(without limestone component in the binder composition)**

Components	Quantity for 1 m ³ of composition, kg
Cement	696
Aggregate	1490
Water	298
Additive SP-1	2.6

Таблица 3

**Пропорции компонентов для шести составов по отношению к базовому составу МЗКБ
(с изменением пропорций известняка – цемент в вяжущем)**

Номер состава	Водоцементное отношение	Отношение известняка к цементу
1	0,46	0
2	0,44	50
3	0,34	0
4	0,36	0
5	0,38	17,8
6	0,42	50

Table 3

**The proportions of the components for the six compositions in relation to the base fine-grained carbonate concretes composition
(with a change in the proportions of limestone – cement in the binder)**

Composition number	Water – cement ratio	Limestone to cement ratio
1	0.46	0
2	0.44	50
3	0.34	0
4	0.36	0
5	0.38	17.8
6	0.42	50

3. Результаты

Результаты испытаний для базового состава обычного бетона и шести композиций карбонатного мелкозернистого бетона приведены в табл. 4. Они вполне согласуются с представленными целями и задачами, тем самым свидетельствуя о некотором увеличении порога трещинообразования карбонатного мелкозернистого бетона по сравнению с базовым составом обычного бетона.

Таблица 4

Сравнение значений трещинообразующих напряжений и прочности на сжатие обычного бетона и МЗКБ

Вид бетона и номер состава	Трещинообразующее напряжение $\sigma_{кр}$, МПа	Прочность на сжатие R, МПа
Обычный бетон	31,2	48,1
Составы МЗКБ	1	34,4
	2	23,3
	3	24,2
	4	34,1
	5	40,1
	6	30,3

Comparison of the values of cracking stresses and compressive strength of ordinary concrete and fine-grained carbonate concretes

Type of concrete and composition number	Crack-forming stress σ_{cr} , MPa	Compressive strength R, MPa
Ordinary concrete	31.2	48.1
Fine-grained carbonate concretes compositions	1	44.1
	2	27.8
	3	35.6
	4	41.2
	5	46.8
	6	37.3

Рисунок подтверждает гипотезу повышения порога трещинообразования МЗКБ при увеличении значений соответствующих параметров, трещинообразующих деформаций и напряжений. Это согласуется с механизмом пластического демпфирования процесса микротрещинообразования МЗКБ и верифицирует гипотезу образования разноуровневых микропластических центров внутри твердеющей матрицы карбонатного композита. Повышению границы трещинообразования в значительной степени способствуют соотношение компонентов матричной части композита и заполняющей, тонкости помола карбонатного наполнителя и процентное содержание суперпластифицирующей добавки.



Прочность при сжатии (кривая 1) и напряжения при образовании трещин (кривая 2) в зависимости от содержания известнякового наполнителя в карбонатном мелкозернистом бетоне
Compressive strength (curve 1) and cracking stresses (curve 2) depending on the content of limestone filler in carbonate fine-grained concrete

Таким образом, результаты подтверждают механизм демпфирования трещинообразования в карбонатном монолите по повышенным по сравнению с эталонным составом значениям трещинообразующих напряжений и деформаций. Известняковый наполнитель действует сингулярно с суперпластификатором и играет роль микропластических центров – микрошарниров, гасящих упругую энергию трещинообразования на микроуровне. В сравнении с другими работами получены результаты, свидетельствующие о более значительном угасании данной упругой энергии трещинообразования для карбонатного мелкозернистого композита.

4. Заключение

Определено соотношение основных компонентов бетона, включая комплексную добавку, содержащую микродисперсную часть – карбонатный порошок и суперпластификатор, при котором достигнуто заметное повышение деформативных характеристик карбонатного бетона. При этом реализован метод, описанный в начале исследования, – сравнение максимального порога трещинообразования для базового

состава обычного бетона и мелкозернистого карбонатного композита на основе комплексной добавки, включающей микродисперсный карбонатный наполнитель и суперпластификатор.

Несмотря на то, что уровень деформаций и, соответственно, степень деформативности МЗКБ несколько больше, чем для бетона обычного состава, порог трещинообразования МЗКБ оказался существенно выше (значения трещинообразующих деформаций и напряжений), благодаря:

– наличию пластического минерального компонента в матрице – комплексной добавки, включающей микродисперсную часть – карбонатный порошок и суперпластификатор;

– совместному влиянию карбонатного тонкодисперсного микронаполнителя и суперпластификатора на картину распределения микротрещин внутри матрицы МЗКБ (эффект сингулярного воздействия). Комбинированно они сдерживают рост упругих макро-, мезо- и микротрещин, лишая их энергии для дальнейшего роста, степень которого определяет порог трещинообразования для обоих составов и зависит в основном от соотношения компонентов внутри композита и их дисперсности;

– лучшей упаковке частиц внутри карбонатного композита;

– более плотной структуре матрицы бетона. Бетон обычного состава (эталонный) является менее связанным внутренними микроразонами пластичности, уступая тем самым карбонатному мелкозернистому бетону.

Результаты исследования позволяют оценить данный состав как более долговечный и трещиностойкий в сравнении с базовым составом.

Список литературы / References

1. Yu R., Spiesz P., Brouwers H.J.H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Research*. 2014;56:29–39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.002>

2. Belov V.V., Subbotin S.L., Kulyaev P.V. Strength and deformation properties of concretes with carbonate microfillers. *Stroitelnye Materialy*. 2015;(3):25–29. (In Russ.) Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23108568_67985513.pdf (accessed: 11.02.2023)

Белов В.В., Субботин С.Л., Куляев П.В. Прочностные и деформативные свойства бетонов с карбонатными микронаполнителями // Строительные материалы. 2015. № 3. С. 25–29. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23108568_67985513.pdf (дата обращения: 11.02.2023).

3. Chaid R., Jauberthie R., Boukhaled A. Effet de l'ajoutcalcairesur la durabilite des betons. *Lebanese Science Journal*. 2010;11(1):92–103. Available from: <https://lsj.cnrs.edu.lb/wp-content/uploads/2015/12/chaid.pdf> (accessed: 21.01.2023).

4. Desnerck P., De Schutter G., Taerwe L. Stress-strain behavior of self-compacting concretes containing limestone fillers. *Structural Concrete*. 2012;13(2):95–101. <https://doi.org/10.1002/suco.201100056>

5. Berdov G.I., Ilina L.V., Zyryanova V.N., Nikonenko N.I., Melnikov A.V. Improving the properties of composite building materials by introducing mineral microfillers. *Stroyprofi: Building Technologies and Concrete*. 2012;(2):26–30. (In Russ.) Available from: <http://stroy-profi.info/files/pdf/2/stroyprofi-2-26.pdf> (accessed: 07.04.2023).

Бердов Г.И., Ильина Л.В., Зырянова В.Н., Никоненко Н.И., Мельников А.В. Повышение свойств композиционных строительных материалов введением минеральных микронаполнителей // Стройпрофи: Строительные технологии и бетоны. 2012. № 2. С. 26–30. URL: <http://stroy-profi.info/files/pdf/2/stroyprofi-2-26.pdf> (дата обращения: 07.04.2023).

6. Singh M., Siddik R. Properties of concrete containing a large amount of coal ash as a fine aggregate. *Journal of Cleaner Production*. 2015;91:269–278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.026>

7. Kou S.S., Poon S.S. Properties of concrete prepared using fine crushed stone, kiln bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. *Construction and Building Materials* 2009;23(8):2877–2886. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.009>

8. Linda Amel C., Kadri E.H., Sebaibi Y., Sualkhi H. Influence of dune sand and pumice on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2018;133:209–218. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.043>

9. Zaetang Y., Wongs A., Sata V., Chindaprasirt P. Use of coal ash as geopolymer binder and coarse aggregate in pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2015;96:289–295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.076>

10. Belov V., Kuliaev P., Barkaya T. Dynamic characteristics of reinforced concrete beams made of carbonate concrete. *Materials Research Proceedings*. 2022;21:209–213.

11. Belov V., Kuliaev P., Artyemyev A. Pressed concrete based on depleted raw material mixture. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2503:060005. <https://doi.org/10.1063/5.0099416>

12. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. Topological models of the structure and structural elements of composite construction materials. *Cement and Its Applications*. 2011;(11–12):62–68. (In Russ.)

Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. Топологические модели структуры и структурных элементов строительных композиционных материалов // Цемент и его применение. 2011. № 11–12. С. 62–68.

13. Gorynin I.V., Kuznetsov P.A. Structural and functional nanostructured materials. *Nanotekhnologii, Ekologiya, Proizvodstvo*. 2011;(8):116–121. (In Russ.)

Горынин И.В., Кузнецов П.А. Конструкционные и функциональные наноструктурированные материалы // Нанотехнологии, экология, производство. 2011. № 1 (8). С. 116–121.

14. Tretyakov Yu.D. Evolution of nanomaterials, nanoparticles, nanostructures and the problem of health. *Nanotekhnologii, Ekologiya, Proizvodstvo*. 2011;(1):98–106. (In Russ.)

Третьяков Ю.Д. Эволюция наноматериалов, наночастиц, наноструктур и проблема здоровья // Нанотехнологии, экология, производство. 2011. № 1 (8). С. 98–106.

15. Goldman A., Bentur A. Effects of pozzolanic and non-reactive fillers on the transition zone of high strength concrete. *Proceedings of International Symposium on Interfaces in Cementitious Composites, Toulouse, 1992*. London; 1993. p. 53–62.

16. Moser B., Pfeifer C. Microstructure and durability of ultra-high performance concrete. *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. 2008;10:417–424.

17. Sobolev K., Flores Vivian I., Hermosillo R., Torres-Martínez L. Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites. *ACI Materials Journal*. 2008;254:93–120.