

composition of limestone). It has been revealed that limestone semi-inert and finely dispersed filler increases the impact strength and dynamic strength, which makes fine-grained limestone concrete a material that well accepts shock loads. According to the results of the study, it was also concluded that the impact strength and energy absorption properties of cracking and destruction of carbonate concretes are sensitive to the rate of deformation and depend on the percentage of the mineral carbonate component in the concrete matrix. It is shown that the dynamic strength of carbonate concretes under compression increases with an increase in the rate of deformation, and the amount of absorbed energy increases with the average rate of change in the kinetic energy of loading.

Keywords: dynamic loads, strain rate, dynamic strength, impact toughness.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BELOV Vladimir Vladimirovich – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

KULYAEV Pavel Viktorovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

BARAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V., Kulyaev P.V., Barkaya T.R. Dependence of the impact strength of carbonate concrete on the strain rate // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 19–25.

УДК 691.32

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАРБОНАТНОГО БЕТОНА В УСЛОВИЯХ СЛАБОИНТЕНСИВНОГО УДАРНОГО СЖАТИЯ

П.В. Куляев, Ю.В. Сизов

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Куляев П.В., Сизов Ю.В., 2024

Аннотация. Изучены динамические и статические свойства карбонатного бетона на основе комплексной добавки из тонкодисперсного известнякового порошка и суперпластификатора с использованием слабоинтенсивного ударного сжатия образцов кубов в осевом направлении. Отмечено, что разработка составов ударопрочного бетона служит основой для освоения и применения местных минерально-сырьевых ресурсов. Указано, что соблюдение принципа использования местных материалов при изготовлении

бетона на основе известнякового тонкодисперсного порошка, который отвечает требованиям экономичного проектирования объектов, подвергающихся ударным воздействиям, может значительно сократить сроки и стоимость строительства и повысить долговечность. Сделан вывод, что при содержании известнякового порошка до 25 % динамические характеристики плавно переходят свои пиковые значения. Показано, что с увеличением содержания известнякового порошка в пределах данного объема коэффициент динамического упрочнения бетона сначала повышался, затем снижался и достиг своего максимального значения при содержании известнякового порошка в количестве 22 %.

Ключевые слова: скорость деформации, динамический модуль упругости, коэффициент, динамическое упрочнение.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-25-32

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении длительного времени исследователи изучали механические свойства карбонатных бетонов, такие как коррозионная стойкость, долговечность, механические свойства и другие, и был достигнут определенный прогресс [1]. Проведенные работы показали, что из-за относительно низкой прочности, хрупкости, пористости с микроконцентраторами напряжений на границе *заполнитель – наполнитель – матрица* и высокой проницаемости композита, имеющего микродефекты и микротрещины в структуре, бетоны основного состава более чувствительны к динамическому воздействию [2]. Обычный мелкозернистый бетон обладал относительно низкой прочностью на сжатие (порядка 30–40 МПа) [1], что не позволяет выполнить требования, предъявляемые к инженерному строительству динамических сооружений [3]. Поэтому текущие исследования посвящены способам улучшения эксплуатационных характеристик карбонатных бетонов, включая их динамические свойства. В ряде работ показано, что механические свойства бетона тесно связаны с его составом и структурой [4–7]. Некоторые ученые сосредоточились на способах повышения прочности бетона путем оптимизации соотношения компонентов смеси [8], в то время как другие пытаются улучшить характеристики композитов, добавляя в их структуру различные волокна. Например, Сюй и другие [9] включали стеклянные волокна в матрицу бетона и разработали метод анализа развития внутренних микротрещин в армированных стекловолокном полимерно-песчано-бетонных композитах, а также изучали влияние стеклянных волокон на повышение прочности и трещиностойкости бетона. В работе [9] изучали воздействие добавления углеродных волокон на механические свойства и микроструктуру карбонатного бетона, армированного углеродным волокном, с использованием механических экспериментов, рентгеновской дифрактометрии, цифровой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Добавление указанных волокон может повысить прочность бетона на сжатие, растяжение и раскалывание. Методы улучшения механических свойств карбонатных бетонов путем введения добавок представляют особый интерес. В работе [10] изучали влияние добавления золы-уноса, доменного шлака и метаксаолина на механические свойства, усадку при высыхании, карбонизацию и проницаемость для хлорид-ионов гидротехнического песчаного бетона (HSC) и сравнили результаты с обычным портландцементом (ОПЦ) и бетоном на натуральных заполнителях (NAC). В итоге заключили, что прочность на сжатие у HSC была несколько ниже, но он обладал лучшей проницаемостью для хлорид-ионов. В

работах [11–14] исследовались ударная выносливость и динамическая прочность бетонов при разных условиях нагружения, в том числе бетонов, изготовленных на основе стальной фибры в условиях одноосного импульсного сжатия. В настоящей работе в качестве микронаполнителя применяли известняковый тонкодисперсный порошок. Основой известнякового наполнителя является карбонат кальция CaCO_3 . Исследования показали, что известняковый порошок положительно влияет на механические и реологические свойства бетона. Оценить, в каких пропорциях в составе бетона и до каких пределов известняковый тонкодисперсный порошок совместно с суперпластификатором позволяет улучшить динамические свойства карбонатного композита, – цель настоящего исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Были проведены квазистатические, слабоинтенсивные динамические и статические испытания кубов – образцов карбонатного бетона с различным содержанием известнякового микронаполнителя. Для мониторинга процесса динамического разрушения и образования полей деформаций бетона была применена фото- и видеофиксация. Известняковый наполнитель изготавливали дроблением и последующим помолом карбонатного щебня. Заполнитель – продукт дробления карбонатного щебня – зерна известняка размером от 5 до 0,05 мм. Девять бетонных кубиков размерами $10 \times 10 \times 10$ см были испытаны на слабоинтенсивное динамическое и статическое сжатие. У трех кубиков был базовый состав смеси (без известнякового наполнителя). Шесть образцов содержали известняковый наполнитель. Составы бетона приведены в табл. 1.

Таблица 1

Опытные составы, кг/м³ смеси

Компонент смеси	Состав		
	Базовый	№ 1	№ 2
Цемент	415	472	336
Песок	150	–	–
Заполнитель (крошка из силикатного бетона)	1070	–	–
Известняковый заполнитель	–	1528	1528
Известняковый наполнитель	–	200	336
Суперпластификатор СП-1	3,94	5,04	2,6
Вода	180	295	333
Водоцементное соотношение	0,43	0,44	0,5

Бетон при динамическом воздействии ведет себя по-разному. Образец может разрушиться и при возрастании динамической нагрузки, и при ее спаде. Если воздействие импульсное, то при превышении значения статической разрушающей нагрузки испытываемый образец может и не разрушиться. В качестве критерия, определяющего поведение бетона при слабоинтенсивном динамическом сжатии, был принят приведенный коэффициент динамического упрочнения (ПКДУ). Мы рассчитывали ПКДУ косвенно, по интегрированной формуле, в которой напряжение, соответствующее моменту начала трещинообразования (трещинообразующее), берется в качестве маркера (верхней планки) процесса микроструктурного упрочнения бетона (динамической реструктуризации). При

этом третье квадратичное слагаемое в базовой формуле [13] заменяется десятичным логарифмом соотношения значений данного напряжения и предела прочности на сжатие [11–14]:

$$\text{ПКДУ} = 1,58 - 0,35 \lg \tau + \lg \left(\frac{\sigma_s}{R} \right),$$

где τ – продолжительность возрастания нагрузки, мс, от нуля до разрушения образца (при ударном сжатии – среднее время разрушения; рассчитывалась по стандартной методике с учетом размеров и массы сменного ударного наконечника и упругих характеристик материала опытных образцов [12–14]); σ_s – напряжение, соответствующее началу трещинообразования бетона, МПа; R – прочность бетона при сжатии, МПа.

Опытные образцы-кубы всех трех составов (рис. 1) испытывали на специальном устройстве рамного типа (рис. 2). Высота подъема груза составила 10–30 см, масса груза в копре варьировалась от 5 до 20 кг. Прочность определяли с помощью гидравлического пресса (рис. 3).



Рис. 1. Опытные образцы-кубы



Рис. 2. Ударная установка с образцом-кубом для испытания на ударное сжатие



Рис. 3. Гидравлический пресс для испытания на статическое сжатие

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обобщенные результаты испытаний серий опытных образцов-кубов на динамическое нагружение с указанием свойств бетона даны в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Напряжения диапазона упрочнения

Состав	Напряжение σ_s , соответствующее началу трещинообразования бетона, МПа	Продолжительность прироста нагрузки (среднее время разрушения) τ , мс	Прочность на осевое сжатие R , МПа
Базовый	33,1	5	52,1
№ 1	36,4	8	44,1
№ 2	31,3	10	37,2

Таблица 3

Значения показателя

Наименование показателя	Состав бетона		
	Базовый	№ 1	№ 2
Приведенный коэффициент динамического упрочнения	0,684	1,181	1,155

Из анализа результатов видно, что чем больше разрыв значений между напряжениями начала процесса микротрещинообразования в бетоне и пределом прочности на сжатие и выше скорость удара, тем больше значения ПКДУ.

Скол опытного образца после разрушения представлен на рис. 4.

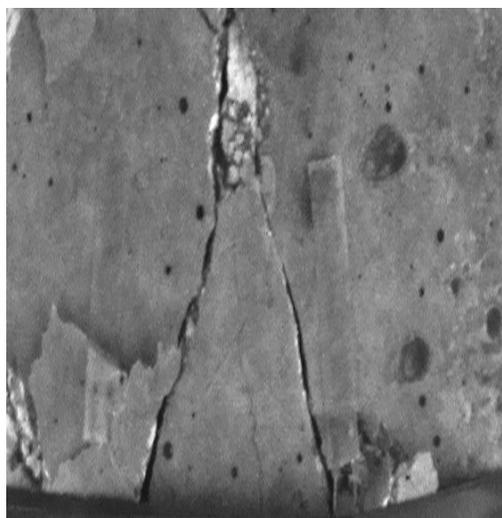


Рис. 4. Образец после разрушения с трещиной скола при ударном сжатии

Чем выше доля карбонатного наполнителя в бетоне, тем больше значение ПКДУ. Комплексная добавка из наполнителя и суперпластификатора способствует формированию пластических микроцентров в матрице бетона, тем самым повышая свойства демпфирования ударной нагрузки и значение коэффициента.

Приведенный коэффициент динамического упрочнения характеризует деформационную способность образцов воспринимать удар. Известняковый микронаполнитель увеличивает скорость поглощения энергии удара бетона образцов-кубов, тем самым улучшая процесс внутренней реструктуризации матрицы композита и способствуя ее упрочнению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты показывают, что степень динамического упрочнения при приведенной оценке зависит от скорости деформации и соотношения значений трещинообразующих напряжений и предела прочности на сжатие. Данный вывод в настоящем исследовании оправдан только для слабоинтенсивного осевого ударного сжатия. Динамические характеристики при разрушении, степень фрагментации, энергия поглощения возрастают, в то время как поглощающая способность уменьшается с увеличением скорости деформации. Метод изучения и выводы имеют решающее значение для определения динамических свойств других хрупких материалов. Испытания свидетельствуют о существовании верхнего предела содержания карбонатного микронаполнителя в составе бетона, соответствующего оптимальному проценту (22 %), при котором ПКДУ достигает своего максимума (ПКДУ = 1,181). Иными словами, прочность на ударное слабоинтенсивное сжатие на 18 % больше прочности на статическое сжатие. Оба вида бетона (базовый и карбонатный) являются материалами, чувствительными к скорости нагружения и уровню деформации. Общая степень упрочнения композита растет с увеличением скорости изменения энергии удара и возрастанием содержания демпфирующей добавки из микронаполнителя и суперпластификатора. Карбонатный бетон с добавкой из известнякового наполнителя и суперпластификатора в оптимальной дозе (22 %) обладает более высокими показателями динамической реструктуризации и упрочнения, что делает его эффективным при применении в конструкциях, работающих в условиях слабоинтенсивного ударного сжатия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frew D.J., Forrestal M.J., Chen W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split hopkinson pressure bar // *Experimental Mechanics*. 2002. Vol. 42, pp. 93–106.
2. Ma H., Yue C., Yu H., Mei Q., Chen L., Zhang J., Zhang Y., Jiang X. Experimental study and numerical simulation of impact compression mechanical properties of high strength coral aggregate seawater concrete // *International Journal of Impact Engineering*. 2020. Vol. 137, pp. 103466.
3. Da B., Yu H., Ma H., Tan Y., Mi R., Dou X. Experimental investigation of whole stress-strain curves of coral concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 122, pp. 81–89.
4. Liu J., Ou Z., Peng W., Guo T., Deng W., Chen Y. Literature review of coral concrete // *Arabian Journal for Science. Engineering*. 2018. Vol. 43, pp. 1529–1541.

5. Xi-Bing L., De-Sheng G., Hai-Hui L. On the reasonable loading stress waveforms determined by dynamic stress-strain curves of rocks by SHPB // *Journal of Explosion and Shock Waves*. 1993. № 13 (2), pp. 125–130.
6. Zou J., Li S. Theoretical solution for displacement and stress in strain-softening surrounding rock under hydraulic-mechanical coupling // *Science China Technological Sciences*. 2015. Vol. 58. № 8, pp. 1401–1413.
7. Jin-Feng Z., Yu S. Theoretical solutions of a circular tunnel with the influence of the out-of-plane stress based on the generalized hoek-brown failure criterion // *International Journal of Geomechanics*. 2016. Vol. 16. № 3, pp. 06015006.
8. Xin L., Xu Y., Bai E., Li W. Mechanical properties of ceramic porous cement-based material subjected to impact loads // *Materials & Design*. 2014. № 55, pp. 778–784.
9. Alam S.Y., Kotronis P., Loukili A. Crack propagation and size effect in concrete using a non-local damage model // *Engineering Fracture Mechanics*. 2013. № 109, pp. 246–261.
10. Alam S.Y., Loukili A. Transition from energy dissipative processes to displacement discontinuities during concrete failure. URL: https://www.researchgate.net/publication/303514585_Transition_from_energy_dissipative_processes_to_displacement_discontinuities_during_concrete_failure (дата обращения: 29.05.2024).
11. Gary G., Bailly P. Behaviour of quasi-brittle material at high strain rate. Experiment and modeling // *Eur. J. Mech.* 1998. Vol. 17 (3), pp. 403–420.
12. Парфенов А.В. Ударная выносливость бетонов на основе стальной и синтетической фибры. Дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2004. 178 с.
13. Никулин А.И. О динамической прочности бетона при неоднородном импульсном сжатии // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 1. С. 77–81.
14. Цветков К.А. Влияние динамического нагружения на прочностные и деформативные свойства бетона при одноосных и двухосных напряженных состояниях. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2004. 25 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУЛЯЕВ Павел Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

СИЗОВ Юрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: uvsizov1961@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Куляев П.В., Сизов Ю.В. Динамические свойства карбонатного бетона в условиях слабоинтенсивного ударного сжатия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 2 (22). С. 25–32.

**DYNAMIC PROPERTIES OF CARBONATE CONCRETE
UNDER LOW-INTENSITY IMPACT COMPRESSION**

P.V. Kulyaev, Yu.V. Sizov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The dynamic and static properties of carbonate concrete based on a complex additive of fine limestone powder and superplasticizer using low-intensity shock compression of cube samples in the axial direction have been studied. It is noted that the development of high-impact concrete compositions serves as the basis for the development and application of local mineral resources. It is indicated that compliance with the principle of using local materials in the manufacture of concrete based on limestone fine powder, which meets the requirements of economical design of objects exposed to impact, can significantly reduce the time and cost of construction and increase durability. It is concluded that with a limestone powder content of up to 25 %, the dynamic characteristics smoothly pass their peak values. It is shown that with an increase in the content of limestone powder within a given volume, the coefficient of dynamic hardening of concrete first increased, then decreased and reached its maximum value with a limestone powder content of 22 %.

Keywords: deformation rate, dynamic modulus of elasticity, reduced coefficient of dynamic hardening.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KULYAEV Pavel Victorovitch – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

SIZOV Yuri Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: uvsizov1961@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kulyaev P.V., Sizov Yu.V. Dynamic properties of carbonate concrete under low-intensity impact compression // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 25–32.