

УДК 624.012.3/4

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ БЕТОНА^{*)}

А.М. Брагов, Г.М. Грушевский, Н.Ю. Комаров

Нижний Новгород

Представлены результаты исследований влияния шероховатости поверхности заполнителя на динамические свойства бетона. Динамические испытания были выполнены с использованием метода Кольского и его модификаций: простое сжатие, сжатие в обойме, раскалывание при сжатии. Отмечено, что увеличение шероховатости приводит к росту прочности при простом сжатии и раскалывании.

Введение

В последние годы в связи с участвовавшими техногенными катастрофами, террористическими актами, которые сопровождаются нагрузками ударного или взрывного характера, интерес к изучению динамических свойств бетона значительно вырос во всем мире [1–5]. Кроме того, в процессе эксплуатации гражданские здания и технические сооружения могут подвергаться действию сейсмических нагрузок высокой интенсивности и малой длительности. Подобные воздействия порождают ряд особенностей в поведении бетонов, связанных с существенным влиянием скорости деформации на процессы деформирования и разрушения. Прочность конструкций, испытывающих такие нагрузки, зависит от того, насколько правильно при их проектировании были учтены особенности поведения бетона при динамическом нагружении.

Как известно, бетонная смесь является многокомпонентной средой и поэтому ее физико-механические свойства зависят от целого ряда факторов. Одними из основных факторов, определяющих физико-механические свойства бетона, являются такие технологические факторы, как чистота поверхности заполнителя, шероховатость поверхности заполнителя; водо-цементное отношение (В/Ц); размер частиц заполнителя (его удельная поверхность), однородность растворной части и цементного клея и др. [6].

Исследованию влияния формы и состояния поверхности заполнителя на его сцепление с цементным камнем и прочность бетона при статическом сжатии посвящена работа С. Перри и Ж. Гиллотта [7]. В качестве заполнителя ими были использованы шарики из стекла и кварцита разного диаметра с различной шероховатостью. Экспериментальные данные показали, что уменьшение поверхностной шерохо-

^{*)} Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 08-08-97060-р-п-а, 07-08-13637-офи_ц) и Министерства образования и науки РФ (грант Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-3367.2008.8).

ватости стеклянных шариков и кварцита с 4–5 мкм до 0 снижает прочность бетона соответственно на 8,4–11,9%, предельные продольные деформации – на 27,2–27,3%, напряжение начального трещинообразования – на 11,2–11,4% и критическое напряжение – на 14,4–18,4%. Как считают авторы работы [7], такое изменение механических свойств определяется тем, что повышение степени шероховатости зерен заполнителя сдерживает процесс образования и развития трещин на границе контакта заполнителя и раствора при действии нагрузки и, таким образом, способствует улучшению прочностных и деформативных свойств бетона. По данным из [8], полированная поверхность гранита, известняка, песчаника обладает сцеплением с цементным камнем на отрыв в месячном возрасте на уровне 0,6–0,9 МПа с последующим повышением этой характеристики к 3 месяцам до 0,8–1,0 МПа. Шероховатость поверхности повышает характеристику сцепления на отрыв и сдвиг в 1,5–2 раза. Эти данные относятся к цементному камню с В/Ц = 0,32 при его прочности на сжатие в 28-суточном возрасте, равной 80 МПа, на осевое растяжение – равной 4,4 МПа. В [9] приводятся данные испытаний бетона невысокой прочности с В/Ц = 0,5. Эти эксперименты проводились на образцах основных породообразующих минералов гранитных и известняковых заполнителей – кварца, полевого шпата и кварцита – при их шероховатой поверхности. В месячном возрасте характеристика сцепления на отрыв составила от 30 до 60% прочности цементного камня на растяжение при последующем небольшом приросте к двум годам хранения в нормальных условиях. Однако вопрос влияния шероховатости поверхности заполнителя на динамические свойства бетона практически не изучен. В связи с этим в работе проведено экспериментальное исследование влияния шероховатости на динамические диаграммы бетона.

Образцы

Для проведения статических и динамических испытаний были взяты образцы в форме таблеток диаметром 20 мм и толщиной 10 мм. Для них был выбран состав бетонной смеси повышенной прочности. Расчетный класс бетона соответствовал классу В40. Мелкозернистый бетон был изготовлен в соответствии с требованиями ГОСТ 26633-91 [10]. Подбор состава экспериментальной смеси произведен в соответствии с ГОСТ 27006-86 [11] и представлен в таблице.

Таблица

	Цемент М500	Вода	Песок
Соотношение	1	0,55	1,2
Расход на 1м ³ , кг	758	417	909
Расход на 1л, кг	0,758	0,417	0,909

Были выбраны две партии образцов: с заполнителем – песком из гранитного щебня (с размером частиц $D = 1,25–2,5$ мм) – партия №1 (более шероховатая поверхность) и с заполнителем – песком из гравия ($D = 1,25–2,5$ мм) – партия №2 (более окатанная поверхность).

Результаты испытаний

Статические испытания контрольных образцов кубов с длиной ребра 7,07 см проводилось по ГОСТ 10180-90 [12] на прессе ПСУ-125.

Прочность при сжатии образцов-кубиков для первой и второй партии оказалась равной 40 МПа и 33,8 МПа соответственно. В случае использования песка из гранит-

ного щебня прочность образцов была на 6,2 МПа или на 15,5% выше прочности образцов с заполнителем в виде песка из гравия.

Динамические испытания изготовленных образцов проводились на установке РСГ-20, реализующей метод Кольского и его модификации с использованием разрезных стержней Гопкинсона [13–18]. Все партии изготовленных образцов подверглись испытаниям: на динамическое сжатие; динамическое сжатие в обойме; "бразильский" тест – испытание на раскалывание.

Достоверность получаемых результатов обеспечивалась тщательной подготовкой и проведением экспериментов, регулярной калибровкой измерительных каналов и проведением серий из 4-5 экспериментов в номинально одинаковых условиях с усреднением результатов. Достоверность полученных результатов также проверялась путем сравнения с данными других авторов для аналогичных материалов.

Процесс разрушения можно отслеживать и с помощью импульсов, регистрируемых в ходе испытания. Прошедший импульс, характеризующий действующие напряжения в образце, для образца без макроповреждений имеет нарастающую амплитуду и начинает спадать после снижения амплитуды падающего импульса. Накопление микроповреждений до критического уровня приводит к появлению макротрещин, то есть к макроразрушению образца. Образовавшиеся очаги разрушения являются источниками волн разгрузки, которые снижают амплитуду действующих напряжений в образце. Амплитуда прошедшего импульса при этом уменьшается независимо от величины амплитуды и длительности падающего импульса.

Результаты исследования прочности бетонных образцов на раскалывание представлены на рис. 1. Из рисунка следует, что применение мелкого заполнителя с более шероховатой поверхностью (щебня) в партии №1 по сравнению с мелким заполнителем в партии №2 (гравием, имеющим более окатанную поверхность) создает прибавку в прочности на раскалывание, равную 2,4 МПа или 14,5% (значения максимальных прочностей 19,0 и 16,6 МПа, соответственно). Наибольший эффект был достигнут при применении более шероховатого заполнителя, обладающего большей контактной зоной и, следовательно, более качественным сцеплением между песком из гранитного щебня и цементным камнем. Этот эффект позволяет бетону наилучшим образом противостоять растягивающим напряжениям, возникающим при испытании на раскалывание.

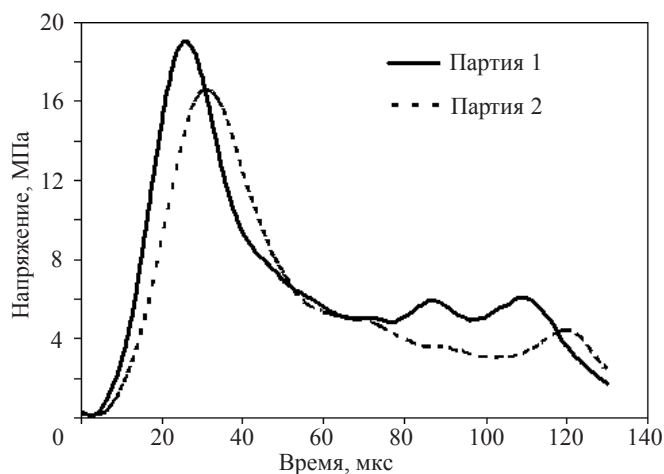


Рис. 1

Результаты исследования прочности бетонных образцов на динамическое сжатие без обоймы даны на рис. 2 и 3. Из рис. 2 видно, что отличие в максимальных значениях напряжений бетона партий №1 и №2 составляет 9,0 МПа (предельное напряжение партии №1 $\sigma_1 = 39,7$ МПа, партии №2 $\sigma_2 = 30,7$ МПа). Следовательно, прибавка прочности бетона за счет большей шероховатости поверхности заполнителя составляет 31,6%.

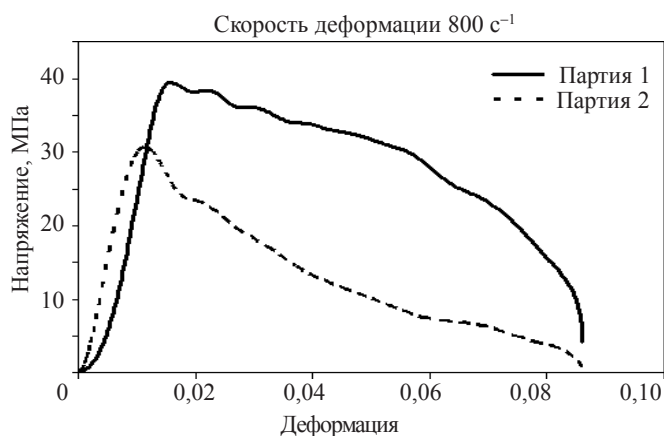


Рис. 2

При более высокой скорости деформации, составившей 1400 с⁻¹ (рис. 3), разница предельных значений напряжений при сжатии немного увеличивается и составляет 10,9 МПа ($\sigma_1 = 90,8$ МПа; $\sigma_2 = 79,9$ МПа). В процентном соотношении она составляет 13,6%.

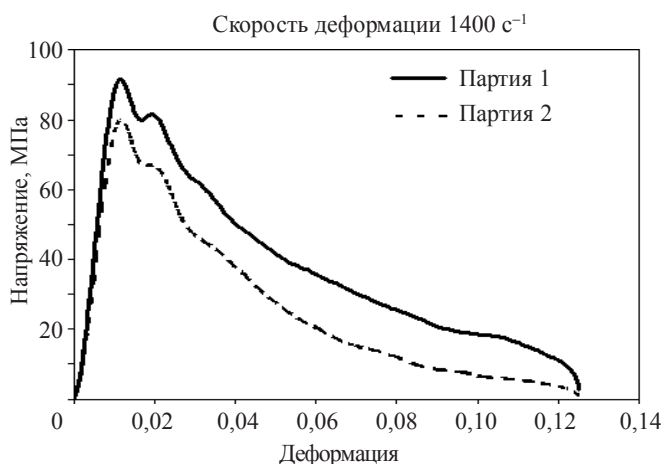


Рис. 3

Диаграммы показывают, что увеличение шероховатости поверхности заполнителя приводит к росту прочности при простом сжатии и раскалывании. В целом, наблюдается тенденция снижения эффекта влияния модифицирования поверхности при росте скорости деформации, что можно объяснить более равномерным распределением напряжений от дефектных мест в контактной зоне по всему объему испы-

туемого образца. При этом разрушение происходит более интенсивно с быстрой потерей прочности, то есть ветвь разгрузки имеет больший наклон, в то время как при более низкой скорости деформации (800 с^{-1}) величина разрушающего напряжения уменьшается и ветвь разгрузки имеет более пологий вид.

Наряду с диаграммами деформирования, полученными при испытаниях на раскалывание и линейное сжатие, большой интерес представляют данные, полученные при сжатии образцов в жесткой ограничивающей радиальную раздачу обойме. Результаты исследования прочности бетонных образцов на динамическое сжатие в обойме при скорости деформации $\sim 1400 \text{ с}^{-1}$ представлены на рис. 4.

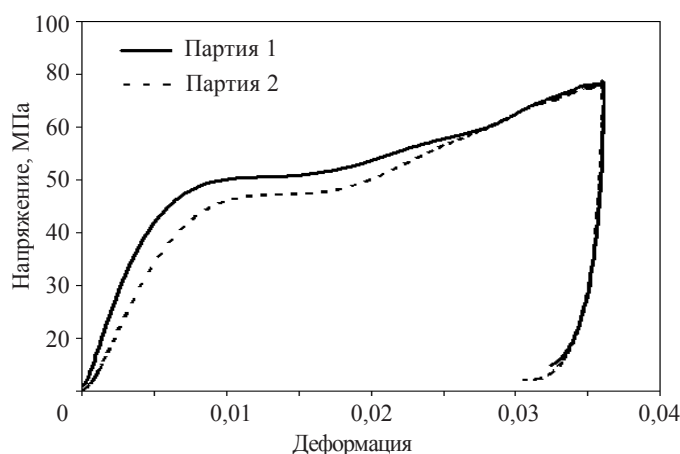


Рис. 4

Очевидно, что диаграммы деформирования образцов обеих партий близки и расхождение соответствующих значений на них не превышает 8,5%. Но они достигнуты при разнице в значениях напряжений в 6,9 МПа ($\sigma_1 = 81,3 \text{ МПа}$, $\sigma_2 = 74,4 \text{ МПа}$), что свидетельствует о влиянии шероховатости заполнителя на прочностные свойства бетонов, испытанных в обойме.

Выводы

Применение заполнителя (щебня), обладающего более шероховатой поверхностью по сравнению с другим заполнителем (гравием), позволяет повысить динамический предел прочности до 30% на сжатие и до 15% на растяжение. Этот эффект является следствием образования более качественного контакта заполнителя с цементным камнем за счет лучших механических характеристик поверхности зерен щебня.

Таким образом, установленная зависимость между прочностными характеристиками бетона и шероховатостью заполнителя может быть использована при изготовлении железобетонных конструкций, наилучшим образом сопротивляющихся ударным динамическим нагрузкам высокой интенсивности.

Ключевые слова: бетон, динамика, заполнитель, шероховатость, эксперимент, метод Кольского.

Литература

1. Zhao, H. A study on testing techniques for concrete-like materials under compressive impact loading / H. Zhao // Cement and Concrete Composites. – 1998. – №20. – P. 293–299.

2. *Gomez, J.T.* Static and dynamic behavior of concrete and granite in tension with damage / J.T. Gomez, A. Shukla, A. Sharma // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2001. – №36. – P. 37–49.
3. *Grote, D.L.* Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. Experimental characterization / D.L. Grote, S.W. Park, M. Zhou // *International Journal of Impact Engineering*. – 2001. – №25. – P. 869–886.
4. *Park, S.W.* Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: II. Numerical simulation / S.W. Park, Q. Xia, M. Zhou // *International Journal of Impact Engineering*. – 2001. – №25. – P. 887–910.
5. *Leppanen, J.* Experiments and numerical analyses of blast and fragment impacts on concrete / J. Leppanen // *International Journal of Impact Engineering*. – 2005. – №31. – P. 843–860.
6. *Баженов, Ю.М.* Бетон при динамическом нагружении / Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1970. – 274 с.
7. *Perry, C.* The influence of mortar-aggregate bond strength on the behavior of concrete in uniaxial compression / C. Perry, J.E. Gillott // *Cem. and Concr. Res.* – 1977. – №5. – P. 553–564.
8. *Bertacchi, P.* Adherence entre aggregate et ciment et son influence sur les caracteristiques des betons / P. Bertacchi // *Rev. des Mater. de Const.* – 1970. – №659–660. – P. 243–249.
9. *Ярлушкина, С.Х.* Физико-химические процессы, их роль в формировании прочности цементного камня с заполнителями / С.Х. Ярлушкина // *Структурообразование бетонов и физико-химические методы его исследования: Сб. тр. НИИЖБа*. – М., 1980. – С. 60–69.
10. ГОСТ 26633-91* Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: CD "Строительство".
11. ГОСТ 27006-86 Бетоны. Правила подбора составов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: CD "Строительство".
12. ГОСТ 10180-90 (2003) Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: CD "Строительство".
13. *Bhushan, B.* Measurement of dynamic material behavior under nearly uniaxial strain conditions / B. Bhushan, W.E. Jahsmann // *Int. J. Solid Structures*. – 1978. – Vol. 14, № 9. – P. 739–753.
14. *Davies, R.M.* A critical study of the Hopkinson pressure bar / R.M. Davies // *Philos. Trans. R. Soc. (London)* – 1948. – A. Vol. 240. – P. 375–457.
15. *Davies, R.M.* A simple modification of the Hopkinson pressure bar / R.M. Davies // *Proc. 7th Int. Cong. on Applied Mechanics*. – 1948. – Vol.1. – P. 404.
16. *Neville, A.M.* Properties of concrete / A.M. Neville // *J. Wiley & Sons*. New York, 1973. – P. 313–320.
17. *Field, J.E.* Experimental methods at high strain rate / J.E. Field, S.M. Walley, N.K. Bourne, J.M. Huntley // *J. de Physique IV. Colloque C3. Dymat 1994*. – P. 3–22.
18. *Bacon, C.* Development of the Kolsky-Hopkinson techniques and applications for non-conventional testing / C. Bacon, J-L. Lataillade // *New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact: Trends in Mechanics of Materials* / Eds. W.K. Nowacki, J.R. Klepaczko. – Warsaw, 2001. – P. 1–58.

[30.09.2008]

INFLUENCE OF AGGREGATE'S SURFACE ROUGHNESS ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CONCRETE

A.M. Bragov, G.M. Grushevsky, N.Yu. Komarov

The results of investigating the influence of the aggregate's surface roughness on dynamic characteristics of concrete are presented. The dynamic tests have been performed using Kolsky method and its modifications: uniaxial compression, compression in a rigid jacket, splitting under compression. It is stated, an increase in roughness results in strength growth under uniaxial compression and splitting.

Key words: concrete, dynamics, aggregate, roughness of surface, experiment, Kolsky method.