

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ БЕТОНА ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ЕГО ПРОЧНОСТЬ И УДАРНУЮ СТОЙКОСТЬ

М. В. ДРАПАЛЮК, В. Н. ПИЛИПЕНКО

### INFLUENCE OF STRUCTURALLY-MECHANICAL HETEROGENEITY CONCRETE TRANSPORT STRUCTURES ITS DURABILITY AND SHOCK RESISTANCE

DRAPALUK M., PYLYPENKO V.

*В статье приведено теоретическое обоснование влияния структурно-механической неоднородности бетона транспортных сооружений на его прочность. Определены пути оптимизации структуры бетона с целью повышения трещиностойкости, ударной стойкости и долговечности. Показано, что использование бетонов на смешанных крупных и мелких заполнителях, а также комбинированных бетонов, в качестве вяжущих в которых используются портландцемент с минеральными добавками, шлакопортландцемент, пуццолановый и другие виды смешанных цементов позволяет максимально снизить дефектность бетона.*

**Ключевые слова:** *структурно-механическая неоднородность бетона, оптимизация структуры, дефектность, цементная матрица, кристаллы.*

Постановка проблемы. В настоящее время считается общепризнанным определяющее влияние структуры бетона на его физико-механические свойства. Особенностью структуры бетона является ее высокая неоднородность, определяемая тремя факторами: пористостью цементной матрицы, значительным различием составляющих бетона по упругим и прочностным характеристикам, дефектностью структуры бетона на всех ее уровнях [1].

В зависимости от размеров в цементной матрице бетона выделяют три группы пор: поры геля, капиллярные поры и макропоры. Поры геля имеют диаметр  $(15...30) \cdot 10^{-7}$  м и составляют (по Пауэрсу) около 28% объема матрицы.

Капиллярная пористость характеризуется диаметром пор  $10^{-7}...10^{-5}$  м, количество которых в цементной матрице составляет 10...40%. Меньшее значение пористости соответствует цемент-

ной матрице бетона нормального твердения в возрасте 28 сут при В/Ц около 0,2, большее значение - при В/Ц около 0,8. В этом интервале В/Ц прочность при сжатии цементной матрицы бетона изменяется в пределах одного порядка: приблизительно от 100 до 15 МПа [2].

Макропоры в цементной матрице - это поры с размерами до  $10^{-3}$  м. Несмотря на незначительное содержание в цементной матрице и бетоне макропор (до нескольких процентов).

Таким образом, цементная матрица - носитель прочности бетона - содержит поры различных размеров, которые существенно снижают прочностные свойства бетона [2].

Значительное различие цементной матрицы и заполнителей бетона по прочностным и упругим характеристикам определяется тем обстоятельством, что плотные заполнители тяжелого бетона, в т.ч. кварцевый песок, не обладают идеальной совместимостью с традиционной цементной матрицей, имеющей модуль упругости  $(8...20) \cdot 10^3$  МПа, в силу своей высокой жесткости (модуль упругости до  $10^5$  МПа), приводящей к значительным усадочным напряжениям при твердении [3].

Дефектность структуры бетона складывается из дефектности цементной матрицы, определяемой размерностью кристаллов и контактов в кристаллогидратном сростке, микротрещинами термомеханической и усадочной природы, а также несовершенством контактного слоя между цементной матрицей и заполнителем.

Кристаллогидратный сросток представляет собой хаотически ориентированную, много раз статически неопределимую структуру, состоящую из неравнопрочных и разноразмерных кристаллов, сросшихся в местах контактов, в которой

уже на стадии гидратационного структурообразования возможны деструктивные процессы, обусловленные усадочными напряжениями. Это подтверждают случаи саморазрушения образцов на напрягающих цементах. Возникающие внутренние напряжения снижают предельную растяжимость цементной матрицы бетона и приводят к образованию трещин при меньших уровнях и меньшем количестве циклов попеременного нагружения бетона.

Слабость контактного слоя определяется седиментационными процессами в свежесуложенном бетоне и развитием в нем усадочных трещин при твердении. Сначала в результате внутреннего водоотделения вода скапливается под зернами заполнителя, в результате чего образуются пустоты, частично или полностью заполненные водой. В процессе твердения бетона дефектность контактного слоя усиливается за счет возникновения усадочных напряжений и, как следствие этого, образования и развития трещин усадочной природы, локализованных, в основном, на границах раздела фаз с различными жесткостями [4].

Цель исследований заключается в определении возможности описания механизма разрушения и оценки прочности кристаллизационного сростка применительно к структуре модифицированной цементной матрицы бетона.

Я.И. Френкель [5] при исследовании механизма разрушения кристаллических тел отмечал, что развитие и рост трещин могут эффективно тормозиться присутствующими в материале мелкими порами, а также включениями с меньшей прочностью или модулем упругости. Следовательно, кроме зон с пониженной прочностью, эффективным тормозом на пути растущей трещины могут стать зоны с повышенной вязкостью, имеющие модуль упругости значительно меньше модуля упругости основного материала. Кроме высоких вязко-пластических свойств, указанные зоны должны обладать также высокой адгезией к основному материалу.

Впервые теоретическое обоснование принципа «слабой поверхности» (впоследствии названного «демпфирующим элементом») применительно к бетону дано П.Г. Комоховым [6]. Механизм торможения процессов разрушения бетона определяется присутствием в нем «слабых» упруго-вязких и слоистых включений, снижающих локальные напряжения и гасящих энергию роста трещин. К подобным слоистым включениям относятся гидросиликаты и гидроксид кальция, а также добавки полимеров и вспученного верми-

кулита, названные «демпфирующими». Кроме того, вязкими катализаторами хрупкого разрушения бетона являются замкнутые воздушные поры, которые, с одной стороны, снижают эффективное сечение материала, с другой - способны перераспределить локальные напряжения в бетоне среди его компонентов с различной упругостью.

Отличительными признаками демпфирующих добавок являются их пониженные жесткостные характеристики, определяемые высокой пористостью материала. Введение в бетон таких добавок, снижающих концентрацию напряжений на границе раздела фаз с различными упругими характеристиками, существенно уменьшает размах колебаний и пределы изменений максимальной и минимальной деформации и напряжений в процессе разрушения бетона.

По П.Г. Комохову [6], механизм действия демпфирующих добавок состоит в том, что на пути растущей трещины возникает энергетический гаситель в виде микровключения. Такое включение не способно отдавать полученную энергию, затраченную на его деформирование. Тем самым уменьшается энергия роста трещины и релаксируют напряжения в ее вершине. Наличие в структуре бетона упруго-вязких включений - низко модульных добавок демпфирующего действия как релаксаторов внутренних напряжений и энергетических гасителей трещин - обеспечивает повышение прочности, трещиностойкости и морозостойкости бетона.

Последовательность разрушения кристаллогидратного сростка как отдельной микроячейки цементной матрицы при действии динамических нагрузок представляется следующей:

- в первом цикле нагружения происходит разрушение наиболее малопрочных элементов кристаллизационного сростка (наиболее крупных и малопрочных кристаллов, а нагрузка, которую несли разрушившиеся элементы, перераспределяется на наиболее прочные сохранившиеся;

- при последующих циклах нагружения происходит постепенный выход из строя более прочных элементов из числа сохранившихся в каждом предшествующем цикле. Причем, частичные разрушения микроячеек будут иметь место в каждом цикле нагружения, поскольку на более прочные сохранившиеся элементы будет действовать и большая величина нагрузки;

- полное разрушение микроячейки при некотором критическом числе циклов нагружения, т.е. выход из строя всех, в том числе наиболее

прочных ее элементов, способных нести нагрузку. Следует отметить, что при этом не происходит окончательного разрушения материала в целом, так как отдельные микроячейки также различаются по прочности.

Интегральное накопление повреждений как отдельных микроячеек цементной матрицы со стабилизацией разрушения и перераспределением усилий на оставшиеся ячейки имеет место лишь до определенного момента, после которого наступает полное разрушение материала.

Таким образом, повышение общей прочности кристаллогидратного сростка и длительности этапа его предразрушения в процессе многократного нагружения возможно двумя путями:

- обеспечением формирования на этапе твердения структуры с развитыми прочными контактами и повышенной дисперсностью кристаллов, что технологически осуществимо путем оптимизации режима твердения бетона и изделий на его основе;

- снижением самой величины внутреннего давления и соответственно - внутренних напряжений в структуре материала. Этому может способствовать введение в структуру цементной матрицы и бетона маложестких компонентов демпфирующего действия.

Характерно, что для бетонов с высоким насыщением маложесткими компонентами прочность контактной зоны довольно велика, а начальные дефекты контактной зоны практически отсутствуют. Поэтому по мнению [7] основную роль в процессе разрушения такого бетона играют начальные трещины в песчано-цементной матрице и в крупном заполнителе. Дальнейшее развитие начальных трещин будет проходить по-разному. Как известно, трещины имеют тенденцию легко проникать из более жесткого материала в менее жесткий, а обратное явление затруднено. Поэтому трещины, развивающиеся в менее жестком материале, будут остановлены на границе с матрицей и не сыграют решающей роли в разрушении бетона. Наоборот, трещины, развивающиеся в более жесткой матрице, будут сравнительно легко проникать в заполнитель, т.е. они будут играть основную роль в разрушении бетона. Отсюда, если жесткость (модуль упругости) включения будет больше или равна жесткости цементной матрицы, то начальные трещины будут развиваться по цементной матрице, поскольку включение в этом случае воспринимает часть внешней нагрузки. В случае, когда модуль упругости включения будет меньше, чем у цементной

матрицы, рост трещин будет происходить в направлении слабонапряженной области, т.е. в направлении маложесткого включения. И чем «слабее» включение, тем интенсивнее протекает этот процесс.

В попытках теоретического подхода к описанию механизма демпфирования хрупких пористых материалов (типа цементного камня и бетона) чрезвычайно трудно учесть влияние всей гаммы структурных факторов. Такими факторами являются: наличие или отсутствие в твердой непоризованной фазе пористого материала начальных остроконечных дефектов типа трещин (будем в последующем в этом смысле различать дефектный и бездефектный по твердой фазе пористые материалы), интегральная пористость, функция распределения пор по размерам, абсолютный размер пор по отношению к размеру трещин и объемное насыщение таких трещин, степень неупорядоченности распределения пор в объеме, а также анизотричность пор.

В связи с этим целесообразен ступенчатый, поэтапный подход к решению задачи о возможности торможения и гашения роста трещин в бетоне. Ее можно разложить на следующие частные задачи:

- о торможении трещин (демпфировании) и связанном с ним изменении прочности бездефектного пористого материала с малой пористостью - бетона (при отсутствии взаимного влияния пор);

- о демпфировании и изменении прочности бездефектного пористого материала с высоким уровнем пористости при регулярном и неупорядоченном расположении одномерных и разноммерных пор;

- о демпфировании и изменении прочности дефектного пористого материала с малой и большой пористостью при малом и большом (по отношению к дефектам) размере пор;

- о демпфировании и изменении прочности дефектного пористого материала с большой пористостью при наличии пор широкого по размерам спектра при неупорядоченном расположении пор.

Перечень задач составлен таким образом, что каждая последующая осложняется по отношению к предыдущей на один структурный фактор, влияние которого сравнительно несложно наложить на предыдущий результат.

Поэтапная схема позволяет обойти пространственный вероятностный подход к решению задачи и осуществить детерминистический под-

ход к описанию механизма демпфирования и разрушения, учитывающий локальные разрушения в отдельных микрообъемах материала, предшествующие окончательному разрушению образца.

Подытожить сказанное можно словами А.А. Гвоздева [8], который отметил, что «неоднородность бетона, порождая возникновение микротрещин, задерживает их перерождение в опасные макротрещины, а наличие концентраторов напряжений в самой структуре материала делает его малочувствительным как к внешним концентраторам, так и ко вновь возникшим внутренним».

Суммируя известные результаты исследований связи структуры и прочности бетона, можно определить следующие пути оптимизации его структуры с целью повышения трещиностойкости, ударной стойкости и долговечности.

1. Снижение жесткости заполнителей бетона за счет использования плотных заполнителей средней жесткости (типа известнякового щебня) и легких заполнителей (шлаковой пемзы, керамзита). Однако указанные бетоны могут иметь пониженную по сравнению с тяжелыми бетонами на плотных и прочных заполнителях прочность при сжатии.

2. Снижение концентрации плотных заполнителей за счет раздвижки зерен крупного заполнителя цементно-песчаным раствором и мелкого – цементным камнем.

3. Повышение прочности сцепления заполнителя с цементным камнем за счет повышения чистоты и шероховатости поверхности плотных заполнителей, а также применения пористых заполнителей.

4. Использование бетонов на смешанных крупных и мелких заполнителях, а также комбинированных бетонов, в качестве вяжущих в которых используются портландцемент с минеральными добавками, шлакопортландцемент, пуццолановый и другие виды смешанных цементов.

Наиболее оптимально последнее предложение, являющееся фактически комбинацией первых трех приемов. Его реализация позволяет одновременно устранить отмеченные недостатки и максимально снизить дефектность бетона.

#### Литература

1. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. / Ахвердов И.Н. - М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.

2. Гусев Б.В. Вибрационная технология бетона / Б.В. Гусев, В.Г. Зазимко. – К: Будівельник, 1991. – 163 с.

3. Соломатов В.И. Интенсивная технология бетонов / Соломатов В.И., Тахиров М.К., Тахер Шах Мд. – М.: Стройиздат, 1989. – 264 с.

4. Derucher К.М. Composite materials: Testing and Design. / Derucher К.М. – New Orleans - Philadelphia, 1989. - 697 p.

5. Френкель Я.И. Статическая физика. / Френкель Я.И. – М. – Л.: Изд. АН СССР, 1968. – 760 с.

6. Комохов П.Г. Технологические свойства бетонной смеси с пластификатором Л-1 / Комохов П.Г., Сычев М.М., Курашев М.И. Современная технология производства работ в строительстве. Материалы семинара. - Л. - 1983. - С. 33-37.

7. Пискунов Ю.А. Механизм разрушения бетона при ударе / Пискунов Ю.А. // Изв. вузов. Строительство и архитектура. - 1989. - № 5. – С. 68-71.

8. Гвоздев А.А. Прочность, структурные изменения и деформации бетона / А.А. Гвоздев // НИИЖБ Госстроя СССР. - М.: Стройиздат, 1987. - 299 с.

#### ***М. В. Драпалюк, В. М. Пилипенко Вплив структурно-механічної неоднорідності бетону на його міцність та ударну стійкість***

*В статті наведено теоретичне обґрунтування впливу структурно-механічної неоднорідності бетону на його міцність. Визначено шляхи оптимізації структури бетону з метою підвищення тріщиностійкості, ударної стійкості та довговічності. Показано, що використання бетонів на змішаних великих та дрібних заповнювачах, а також комбінованих бетонів у яких використовується портландцемент із мінеральними добавками, шлакопортландцемент, пуццолановий та інші види змішаних цементів дозволяє максимально знизити дефектність бетону.*

***Ключові слова:*** структурно-механічна неоднорідність бетону, оптимізація структури, дефектність, цементна матриця, кристали.

#### ***M. Drapaluk, V. Pylypenko influence of structurally-mechanical heterogeneity concrete transport structures its durability and shock resistance***

*The theoretical substantiation of influence of structurally-mechanical heterogeneity of concrete on*

*its durability is resulted. Ways of optimization of structure of concrete for the purpose of increase fracture, shock firmness and durability are defined. It is shown that use of concrete on the mixed large and small fillers, and also the combined concrete, as knitting in which are used cement with mineral*

*additives, and other kinds of the mixed cements allows to lower deficiency of concrete as much as possible.*

**Keywords:** *structurally-mechanical heterogeneity of concrete, structure optimization, deficiency, a cement matrix, crystals.*