

ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ БЕТОНА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ

У статті наведено результати експериментально-теоретичних досліджень умов руйнування бетону в конструкціях, підданих впливу агресивних середовищ. Наведені можливі механізми мікротріщиноутворення залежно від структури бетону.

В статье представлены результаты экспериментально-теоретических исследований условий разрушения бетона в конструкциях, подвергнутых воздействию агрессивных сред. Приведены возможные механизмы микротрещинообразования в зависимости от структуры бетона.

The article presents the results of experimental and theoretical studies of the conditions of concrete destruction in the structures, exposed to the influence of aggressive media. The possible mechanisms of micro-crack formation, depending on the structure of the concrete, have been described.

Одним из условий обеспечения долговечности бетонных и железобетонных сооружений является высокая трещиностойкость материала. Как известно [1], в подавляющем большинстве случаев процесс разрушения бетона происходит в результате прорастания одной из трещин или семейства разветвленных трещин через его сечение. Такие трещины часто называют магистральными. При эксплуатации бетонного сооружения магистральные трещины в течение длительного времени не наблюдаются, а затем, появившись и с большой скоростью двигаясь сквозь бетонный массив, быстро его разрушают.

При накоплении усталостных деформаций в бетоне протекают следующие физические процессы: вначале наблюдается образование зародышевых микротрещин, их нестабильный рост, а затем распространение или блокировка трещин в объеме, содержащем структурные элементы (границы заполнителей, поры и полости различного происхождения), являющиеся препятствиями для микротрещин [2].

Для развития представлений о кинетике разрушения бетона сооружения необходимо исследовать процесс образования магистральной трещины. В самом деле, рост магистральной трещины определяется состоянием и процессами в очень малой области – у вершины этой трещины. В бетоне, представляющем собой неоднородный материал, трещины могут развиваться в различных зонах: в цементной матрице, в заполнителе и в контактной зоне [3]. Трещины имеют тенденцию легко проникать из более жесткого в менее жесткий материал. Обратное явление затруднено, то есть возможна остановка трещин на границе раздела компонентов.

Достаточным условием для разрушения образца материала является образование одной или нескольких магистральных, то есть сквозных трещин. При таком условии наличие в бетонном элементе даже значительного числа несквозных трещин еще не говорит о его разрушении; с другой стороны, образование, например, сквозной продольной трещины в сжатом бетонном элементе считается эквивалентным его разрушению, даже если образовавшиеся части еще могли бы выдержать сжимающую нагрузку [4].

Зарождение макротрещины, обусловленное хрупким разрушением в ее вершине, в общем случае не является «гарантом» глобального разрушения элемента конструкции. При хрупком разрушении нестабильное развитие трещины начинается сразу после ее старта, но трещина может остановиться, не разрушив конструкции [5].

Таким образом, надежность конструкции в общем случае определяется не только условиями старта трещины, но и кинетикой ее роста.

Старт трещины при хрупком разрушении реализуется по механизму встречного процесса, который включает зарождение и развитие микротрещины в зоне предразрушения и ее объединение с макротрещиной. Дальнейшее развитие макротрещины возможно по двум альтернативным механизмам [6].

Первый механизм базируется на представлении, что рост макротрещины происходит за счет непрерывного зарождения у ее вершины микротрещин, которые, развиваясь, объединяются с макротрещиной. Иными словами, рост макротрещины есть не что иное, как непрерывный акт зарождения хрупкого разрушения. Очевидно, что при хрупком развитии трещины по первому механизму необходима достаточно большая энергия,

так как непрерывно (по мере роста трещины) должны обеспечиваться необходимые и достаточные условия зарождения макроразрушения, что связано с обязательным наличием меньшего или большего пластического деформирования у вершины движущейся макротрещины.

Второй возможный механизм развития трещины базируется на следующих представлениях. После объединения микротрещины с макротрещиной идет быстрое непрерывное динамическое развитие макротрещины при отсутствии заметного пластического деформирования у ее вершины (недостаточно времени на реализацию релаксационных процессов в вершине). При этом энергия, необходимая для старта трещины, выше, чем энергия, требующаяся на ее развитие. Следовательно, динамическое развитие трещины при хрупком разрушении наиболее вероятно происходит по второму механизму.

С целью исследования изменений, происходящих в структуре бетона в процессе разрушения под действием одноосной сжимающей нагрузки, были проведены эксперименты. При этом установлено, что изменение структуры бетонных образцов проходит четыре стадии. На первой стадии в бетоне возникают внутренние напряжения без образования трещин, то есть бетон ведет себя как упругое тело. Эта стадия продолжается до нагрузки, составляющей около 30 % от разрушающей нагрузки. На второй стадии, при нагружении до 50 % от разрушающей нагрузки, образуются трещины в контактном слое между цементной матрицей бетона и зернами крупного заполнителя. На третьей стадии (до 75 % от разрушающей нагрузки) возникшие трещины расширяются и происходит образование трещин непосредственно в цементной матрице. На последней, четвертой стадии, при напряжениях, превышающих 75 % разрушающей нагрузки, отдельные трещины смыкаются, образуя систему трещин, и начинается разрушение бетона.

Для исследования влияния механических характеристик и состояния поверхности заполнителя на прочность бетона испытывали три типа образцов: балочки, состоящие наполовину из заполнителя и раствора, и призмы с включениями заполнителя. Поверхность заполнителя в различных сериях опытов шлифовали, делали шероховатой, покрывали полиэтиленовой пленкой или приклеивали к раствору эпоксидным клеем. Модельный заполнитель был также изготовлен из раствора. Исследования показали, что прочность сцепления заполнителя с раствором при изгибе не зависит от прочности заполнителя, а прочность сцепления при сдвиге

со сжатием (по наклонному сечению) является функцией прочности заполнителя и состояния его поверхности. Независимо от прочности и состояния его поверхности первые трещины в бетоне при осевом сжатии появлялись по поверхности сцепления заполнителя с раствором. При прочности заполнителя ниже прочности раствора в дальнейшем одновременно развивались трещины в заполнителе и в растворной части и, наконец, разрушение от сжатия заполнителя приводило к разрушению бетона. Поэтому прочность бетона зависела от прочности заполнителя.

При прочности заполнителя выше прочности растворной части бетона на последующих стадиях нагружения растворные трещины сливаются с трещинами сцепления, образуя непрерывную систему трещин, параллельных действию нагрузки. На последнем этапе локальное разрушение растворной части вблизи заполнителя приводит к разрушению бетона в целом, поэтому прочность при сжатии такого бетона в основном зависит от прочности раствора. При прочности заполнителя, меньшей прочности раствора, соотношение прочностей раствора и бетона растет при увеличении соотношения прочностей заполнителя и раствора, а при прочности заполнителя, большей прочности раствора, соотношение прочностей бетона и раствора несколько уменьшаются при росте соотношения прочностей заполнителя и раствора. Поэтому использование высокопрочных заполнителей не является обязательным для получения высокопрочного бетона. Шероховатость поверхности заполнителя влияет на прочность сцепления, но слабо сказывается на прочности бетона при сжатии.

По данным [7], бетон при сжатии может разрушаться по одному из трех механизмов: вследствие раскалывания заполнителей, от нарушения сцепления цементной матрицы или раствора с крупным заполнителем или от разрушения самой цементной матрицы. Все три механизма разрушения могут иметь место в бетоне одновременно. Количество плоскостей разрушения при деформации бетона в предельном состоянии уменьшается при увеличении крупности заполнителя, что приводит к снижению прочности бетона. С другой стороны, при увеличении крупности заполнителя возрастает концентрация напряжений, что также снижает прочность бетона.

Для определения путей упрочнения структуры бетона исследован процесс микротрещинообразования образцов на стадии, предшествующей нестабильному развитию трещин. При сравнении влияния мелкого и крупного заполнителей на кинетику развития трещин установ-

лено, что зерна крупного заполнителя вызывают концентрацию напряжений. Это связано с наличием трещин в контактном слое между крупным заполнителем и растворной частью.

При исследовании характера микроразрушений в структуре бетона наибольшее количество трещин наблюдалось в контактной зоне заполнитель – цементная матрица, причем трещины по границе сцепления были открытыми и непрерывными. Во всех составах наблюдалось прохождение трещин сцепления в цементной матрице через поры. Трещины сцепления в большинстве проходили по нижней грани зерен крупного заполнителя. Небольшие неровности зерен не влияли на непрерывность трещин сцепления. Тонкие трещины в цементной матрице обычно распространялись между соседними зернами крупного заполнителя, из которых достаточно было одному иметь трещину сцепления. Трещины сцепления появлялись в результате водоотделения и дифференциальных объемных деформаций.

При исследовании микроструктуры бетона, эксплуатировавшегося в агрессивных условиях, установлено, что микротрещины имели межкристаллический характер. При возрастании влажности среды микротрещины приобретали транскристаллический характер и проходили через кристаллы кальцита, а также через капиллярные и структурные поры или вдоль более крупных микротрещин в бетоне на границах заполнителя и цементной матрицы.

В процессе обследования состояния строительных конструкций, эксплуатирующихся в условиях повышенных температур и при воздействии паров кислот, установлено, что способность раствора противостоять распространению трещин в значительной степени зависит от дисперсности и зернового состава заполнителя. Более высокие значения параметров прочности и трещиностойкости получены у раствора на основе заполнителя, содержащего сравнительно крупные зерна с соответствующей меньшей дисперсностью. Начальные трещины в бетоне имели раскрытие около 30 мкм и сужались к устью до 1 мкм. Траектория роста трещин в бетоне носила извилистый характер в сравнении с цементной матрицей, где микротрещины имели вид ломаной линии. Трещины в бетоне во многих случаях ветвились по трем и более направлениям. Устье трещины часто располагалось около крупных зерен песка или зерна крупного заполнителя. Вблизи конца трещины наблюдалось множество микротре-

щин. В зоне устья главной трещины зафиксированы диффузионные микротрещины, которые можно рассматривать как зону предразрушения. Размер этой зоны составляет 1–4 мм для цементной матрицы и растворной части.

При исследовании микроструктуры цементной матрицы разрушающегося бетона установлено, что трещины располагаются преимущественно вокруг реликтовых зерен цемента, вдоль кристаллов портландита, которые имеют склонность к раскалыванию, а также проходят через поры. Трещины часто имеют разветвления, зигзагообразные включения длиной около 10 мкм, а также пересечения. Наблюдаются неразрушенные участки цементного камня, являющиеся мостиками прочности. Разрушение бетона происходит при преодолении микротрещиной энергетического барьера и направлено перпендикулярно направлению растягивающих усилий.

Таким образом, при исследовании состояния микроструктуры бетона конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия агрессивных сред, подтверждена необходимость восстановления несущей способности конструкций путем нанесения защитного слоя специального бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ansari F. Analysis of Micro-Cracked Zone in Concrete // *Fract. Toughness and Fract. Energy Concr. Proc. Int. Conf.* – Amsterdam. – 1985. – P. 229–240.
2. Bochenek A., Prokopski G. Badania Wplywu Stosunku Wodno-Cementowego na Mikromechanizm Pecania Betonu Zwyklego // *Arch. Inz. Lad.* – 1988. – № 2. – P. 261–270.
3. Chatterji S. Probable Mechanisms of Crack Formation at Early Ages of Concretes: A Literature survey // *Cem. and Concr. Res.* – 1982. – Vol. 3. – P. 371–376.
4. Cotterell Brian, Mai Yiu-Wing. Crack Growth Resistance Curve and Size Effect in the Fracture of Cement Paste // *J. Mater. Sci.* – 1987. – Vol. 8. – P. 2734–2738.
5. Fanella David, Krajcinovic Dusan. Size Effect in Concrete // *J. Eng. Mech.* – 1988. – Vol. 4. – P. 704–715.
6. Price Walter H. Control of Cracking of Concrete during Construction // *Concr. Int. Des. and Constr.* – 1982. – Vol. 1. – P. 40–43.
7. Struble L. J., Stutzman P. E., Fuller E. R. Microstructural Aspects of The Fracture of Hardened Cement Paste // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 1989. – Vol. 12. – P. 2295–2299.

Поступила в редколлегию 26.01.04.