

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ МАКРОСТРУКТУРЫ БЕТОНОВ

Дорофеев А. В., Выровой В. Н., Макарова С. С. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

Предложены и проанализированы механизмы организации макроструктуры бетонов. Показано влияние геометрических параметров макроструктуры на распределение технологических напряжений и характер трещинообразования в матричном материале. Получены экспериментальные результаты влияния состояния поверхности заполнителей на деформативные характеристики бетонов на плотных и пористых заполнителях.

Формирование полиструктурных систем, к которым относят бетоны всех видов [1, 2], можно представить как сложный процесс организации структур множества подсистем с индивидуальной для каждой механизмами структурообразования. В общем случае можно выделить следующие характерные механизмы организаций структур подсистем: – термофлуктуационный механизм образования и роста зародышей продуктов гидротации цемента [3]; – механизм образования дискретных структурных блоков исходных частиц вяжущего под действием сил межчастичных взаимодействий; – механизм, учитывающий взаимодействие матричного материала с заполнителями; – механизм формирования остаточных деформаций твердеющего материала, оформленного в конструктивные формы [2, 4]. Несмотря на качественно отличные механизмы организации отдельных подструктур (уровней структурных неоднородностей, подсистем), они приводят к одинаковому явлению – формированию структурных блоков с образованием принципиально новых для системы структурных параметров – внутренних поверхностей раздела. Образовавшиеся межблочные поверхности раздела на каждом структурном уровне способны трансформироваться в зародышевые трещины, определяя тем самым интегральную поврежденность бетона технологическими трещинами [4, 5]. Для гетерогенных материалов преимущественное развитие под действием экс-

плутационных нагрузок имеют трещины, соизмеримые с наибольшей по масштабу структурной неоднородностью [6]. Для бетонов такой неоднородностью (подструктурой, подсистемой) является неоднородность типа «матричный материал – заполнитель». Поэтому была определена задача по предложению и анализу механизмов формирования структуры бетонов на уровне структурной неоднородности «матричный материал – заполнитель» (макроструктуры бетонов).

При анализе механизмов формирования макроструктуры бетонов была принята плоская модель структурной ячейки бетонов, включающая в себя матричный материал, в котором распределены определенным образом заполнители в форме дисков [6, 7]. В силу того, что формирование структуры следует рассматривать как процесс, развивающийся во времени по мере твердения вяжущего, то при анализе приняты следующие допущения:

- матричный материал (растворная часть для бетонов и цементно-водные композиции для растворов) представляет собой непрерывную среду, в которой объемные деформации, связанные с физико-химическими гидратационными явлениями, протекают без градиентов;

- объемные деформации проявляются на границах раздела матричного материала;

- величина объемных деформаций прямопропорциональна объему твердеющего матричного материала;

- твердеющий матричный материал поэтапно меняет реологические характеристики от пластичного в вязко-упругое и упругое состояние (характерно для бетонов на органических и неорганических вяжущих, расплавов и высыхающих дисперсных материалов). Из рассмотрения исключаются изменение механических характеристик заполнителя, в предположении, что на ранних стадиях твердения матричного материала деформативные характеристики включений не оказывают влияние на процессы, протекающие в окружающей среде.

В качестве заполнителя приняты металлические кольца высотой $H=0,01\text{ м}$ и радиусом $R=0,02\text{ м}$. Расстояние между заполнителями выразилось в долях их радиуса и составляло $h=(0,2; 0,4; 0,6)R$. Рассматривались модели с кубической (модель состояла из четырех заполнителях при всех принятых h) и гексагональной (модель включала три заполнителя при разных h) укладками заполнителя. Принятые ограничения по характеристикам матрицы позволили принять при анализе механизмов трещинообразования в качестве матричного материала цементно-водные композиции с различными значениями В/Ц, глиняные суспензии с различными водоглиняными отношениями и технический пара-

фин. При анализе механизмов формирования остаточного деформативного состояния в качестве матричного материала приняты фоточувствительные материалы желатин, эпоксидная смола типа ЭД-16 и полиэфирная смола. Кроме того, как при образовании трещин, так и при анализе деформационных процессов без нарушения сплошности матрицы, был реализован графо-аналитический метод анализа распределения объемных деформаций твердеющего матричного материала.

Анализ характера трещинообразования матричного материала и формирования в нем остаточных деформаций проводили с учетом его адгезии к поверхности заполнителей. Были реализованы описанные в [5] три характерные случая формирования адгезионно-когезионных сил связи на границах раздела матрицы с заполнителями: 1 – адгезия матричного материала R_a больше его когезионной прочности R_k , $R_a > R_k$; 2 – $R_a < R_k$; 3 – $R_a = R_k$, что предполагает избирательный характер адгезии. В физических моделях изменение адгезионных характеристик к поверхностям заполнителя регулировали путем применения чистых и смазанных вазелином полностью или по определенным участкам поверхностей (матричный материал – цементный камень, глина, желатин). При использовании в качестве матрицы технического парафина, эпоксидной и полиэфирной смол для случаев $R_a < R_k$, и $R_a = R_k$ поверхность заполнителей полностью или частично изолировалась скотчем.

Отличительной особенностью бетонов является их ярко выраженная гетерогенность и наличие внутренних поверхностей раздела как неотъемлемого структурного параметра бетонов, без учета которого анализировать механизмы формирования микроструктуры, бесперспективно. Графо-аналитический метод позволил проанализировать распределение усадочных деформаций как на поверхностях раздела, так и в самом матричном материале. Анализ показал, что распределение деформаций зависит как от геометрических параметров моделей структурных ячеек бетонов (способов укладки заполнителей и расстояния между ними), так и от адгезионно-когезионных сил связи на границе раздела с заполнителями. При этом возникают градиенты деформаций по относительной величине и направлению. Возникающие максимальные градиенты деформаций не локализованы в определенных участках поверхностей раздела или объемов матричного материала. Область и участки с максимальными градиентами могут менять координаты по мере формоизменения поверхности раздела для случаев $R_a < R_k$ и $R_a = R_k$. Формоизменение поверхности раздела без нарушения целостности матрицы определяется соотношением структурной проч-

ности твердеющего материала и развитием в нем спонтанных объемных деформаций, что в свою очередь, зависит от состава матричного материала и условий его твердения. Поэтому организация макроструктуры бетона (структурной неоднородности «матрица-заполнитель») должна проводиться с учетом влияния на нее процессов организации структур на других уровнях структурных неоднородностей.

Качественная картина распределения объемных деформаций, полученная графо-аналитическим методом для всего многообразия моделей структурных ячеек с учетом адгезионно-когезионных сил связи на поверхностях раздела, подтверждена на моделях, в которых в качестве матричного материала использованы фотоупругие материалы.

Характер трещинообразования при одинаковых геометрических параметрах принятых моделей и величине адгезии, включая избирательную, не зависит, как показал проведенный анализ, от природы матричного материала. При практически одинаковом «рисунке» трещин в зависимости от вида матричного материала изменяется ширина раскрытия трещин. Максимальная ширина раскрытия трещин (до 0,001 м) наблюдалась при применении в качестве матричного материала глиняных суспензий. Для случая $R_a < R_k$ характерны трещины на границе раздела с заполнителями для всех способов укладки независимо от расстояния между заполнителями при явном формоизменении поверхностей раздела. В зонах максимального формоизменения, которое зависит в основном от расстояния между заполнителями, зарождаются трещины на поверхностях раздела с последующим ростом в периферийные зоны матрицы.

При реализации полной адгезии к поверхности заполнителя, случай $R_a > R_k$, трещины возникают в матрице в участках равноудаленных от заполнителей с последующим прорастанием в межзеренное пространство матрицы. Заполнители как бы заключены в матрицу, разделенную трещинами.

В случае избирательной адгезии, $R_a = R_k$, трещины возникают на границе раздела в зонах отсутствия адгезии, в участках перехода от совершенной адгезии к участкам с минимальной адгезией с последующим ростом вглубь матричного материала.

Анализ траектории зарождающихся и развивающихся трещин показал, что при сохранении общего направления, определяемого градиентами усадки материала, расположенного на противоположных берегах трещин, траектория микроизвилистая.

Проявление трещин на уровнях структурных неоднородностей вяжущего по методикам, предложенным в [4] показал, что характер мик-

траекторий макротрещин зависит от дискретного строения матричного материала. Это подтверждает влияние структурных неоднородностей друг на друга с формированием полиструктурных систем типа бетонов.

Проведенный анализ позволяет заключить, что формирование макроструктуры бетонов зависит от начальных геометрических параметров (количества и способов ориентирования заполнителей) и от уровня адгезивно-когезионных сил связи на поверхностях раздела между матричным материалом и заполнителями. Геометрические параметры макроструктуры определяют градиенты собственных объемных изменений матричного материала, что ведет к зарождению и развитию трещин в матрице. Изменение качественной картины распределения трещин в макроструктуре в значительной степени зависит от соотношения адгезионных и когезионных сил в матричном материале. Объемные изменения твердеющего материала матрицы неизбежно ведут к образованию внутренних поверхностей раздела. В случаях, если адгезия значительно превышает когезионную прочность, трещины зарождаются и развиваются в матрице, которая блокирует заполнители в своем объеме, что не позволяет системе реализовать потенциальные возможности заполнителей при действии на систему внешних нагрузок. При ослабленной адгезии преобладают трещины сцепления, от которых часть трещин прорастает в матрицу, что также не позволяет включить заполнители полностью в работу восприятия и перераспределения деформаций при внешних нагрузках. Наличие технологических трещин как на границах раздела, так и в самой матрице, должно оказывать влияние на деформативные характеристики бетонов. Для подтверждения этого была проведена серия экспериментов по изучению влияния состояния поверхности крупных заполнителей на поведение бетонов под нагрузкой. Известно [6], что аппретирование поверхности заполнителей кремнийорганическими соединениями изменяет ее молекулярное состояние и сводит адгезию к гидрофобной поверхности к минимуму. В опытах использовались промытые плотные и пористые заполнители фракций 5-20 мм. В качестве плотных заполнителей применялся гранитный щебень. Пористый заполнитель – керамзитовый гравий Одесского завода. Расход цемента для тяжелого бетона составлял $\rho = 351 \text{ кг/м}^3$ при $W/\rho = 0,57$. Для керамзитобетона – $\rho = 364 \text{ кг/м}^3$ при $W/\rho = 0,57$. Расход песка для тяжелого бетона составил $P = 788 \text{ кг/м}^3$, для легкого – $P = 540 \text{ кг/м}^3$.

Часть щебня, керамзитового гравия и песка обрабатывались водными эмульсиями ГКЖ-94 и высушивались при $T = 373\text{K}$ до постоянной

массы. Водопоглощение обработанного щебня не превышало 1% по массе, а керамзитового гравия – $W=4\%$ (против $W=26\%$ необработанного керамзитового гравия).

Формовалось по две серии образцов для тяжелого и легкого бетона. Каждая серия включала в себя по шесть призм размером $10 \times 10 \times 40$ см. При одинаковых составах бетона серии отличались только лишь состоянием поверхности плотных и пористых заполнителей. После твердения в течение 28 суток в нормальных условиях определялись деформативные характеристики бетонов.

Анализ экспериментальных результатов показал, что при модификации поверхности плотных и пористых заполнителей механические характеристики повышаются в среднем на 20%, деформативные характеристики снижаются в 1,2 – 1,5 раза. При этом разброс результатов при определении деформаций под нагрузкой снижается в два раза.

Проведенные анализ механизмов организации макроструктуры и исследования по влиянию состояния поверхности заполнителей на механические и деформативные характеристики бетонов позволяют заключить:

1. Формирование остаточного поля технологических деформаций, возникающего в результате объемных изменений твердеющего матричного материала, в значительной мере зависит от геометрических параметров макроструктуры (способов укладки и расстояния между заполнителями) и от соотношения адгезионной и когезионной прочности матричного материала.

2. Характер трещинообразования матрицы зависит от уровня ее взаимодействия с поверхностью заполнителей и от количества заполнителей. Изменять распределение технологических трещин в матричном материале можно путем изменения соотношения развития объемных деформаций и кинетики набора структурной прочности твердеющей матрицы.

3. Изменение характера трещинообразования макроструктуры за счет изменения уровня адгезии растворной части к поверхности плотных и пористых заполнителей позволяет регулировать деформативными характеристиками тяжелых и легких бетонов.

Литература

1. Соломатов В. И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов / Изв. вузов. Стр-во и архитектура. – 1985. – №8. – С. 58 – 64.

2. Выровой В. Н., Соломатов В. И. Макроструктура бетона как композиционного материала / Сб. Повышение долговечности бетонов транспортных сооружений, выпуск 784, – М.: МНИТ, 1986, – С.55 – 59.

3. Дельман Б. Кинетика гетерогенных реакций. – М.: Мир, 1972. – 554 с.

4. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / Соломатов В. И., Выровой В. Н., Дорофеев В. С., Сиренко А. В. – К.: Будівельник, 1991. – 144 с.

5. Современные методы оптимизации композиционных материалов / В. А. Вознесенский, В. Н. Выровой, В. Я. Керш и др. – К.: Будівельник, 1983. – 144 с.

6. Дорофеев В. С., Выровой В. Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций – Одесса: Город мастеров, 1998. – 165 с.

7. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Г. И. Горчаков, Л. П. Ореглихер, В. И. Савин и др. – М.: Стройиздат, 1976. – 144 с.