

ПОРИСТОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ БЕТОНА

Гузев Е.А.

НИИЖБ, г. Москва

Леонович С.Н.

БГПА, г. Минск

Цементный камень бетонов исследуемых составов различается в основном количеством активных физико-химических связей в цементирующей матрице и количеством пустот, дефектов структуры. Так в обычном, уплотненном вибрацией бетоне, при расходах портландцемента активностью 40 МПа от 272 до 472 кг/м³ и сравнительно близком количестве воды 227 - 237 л количество условных активных физико-химических связей в объеме цементного камня находилось в узком пределе (табл. 1)

$$A_{ф.х.} = R_{ц} Q_{ц} / Q_{цк} = 13.7 - 17.45 \text{ МПа}$$

Значительную роль в уровне прочности бетона занимают адгезионные связи матрицы с заполнителями и вид и количество пустот, капилляров в матрице и гелевых пор, заполненных водой, паром, воздухом.

Поры геля в цементном камне подсчитаны по зависимости

$$P_r = 0.19\alpha \rho_y / 1 + \rho_{ц} \text{ В/Ц}$$

где α – степень гидратации цемента;

$\rho_{ц}$ – объемное содержание пор в цементном камне подсчитано по выражению:

$$P_{цкк} = \rho_y (\text{В/Ц} - 0.42\alpha) / 1 + \rho_{ц} \text{ В/Ц}$$

Общее количество пор в цементном камне подсчитано по формуле

$$P_{общ} = \rho_{ц} (\text{В/Ц} - 0.23 \alpha) / 1 + \rho_y \text{ В/Ц}$$

Общая пористость бетона определена по зависимости

$$P_{\delta \text{ общ}} = (\text{В} - 0.23\alpha \text{ Ц}) + (1 - \delta)1000 / 1000$$

$$\delta = (\varphi_{щ} + \varphi_{п} + \varphi_{ц} + \varphi_{в}) / 1 \approx 0.98$$

$$\alpha = 0.4 - 0.65 - 0.8$$

Рассматривая влияние поровой структуры цементного камня, гелевых пор и капилляров на уровень условных активных сил A и прочность бетона на сжатие возможно предположить заметно различный характер (рис. 1). Так при меньшем количестве цемента в матрице ниже уровень условных активных связей, большее количество капиллярных пустот и выше общая пористость. Больше пор и в макрообъеме-бетоне. В составе 1.3 – $P_{\delta} = 21,3\%$, против 9% в составе 1.1. Количество гелевых пор также четко связано с количеством цемента и прочностью бетона, просматривается тенденция уменьшения количества гелевых при повышенном уровне условных активных связей (рис. 2,3).

Роль условий твердения (составы 1.2 – У.Т. и 2.2 – Е.Т.) проявилось в несколько большем количестве гелевых пор в бетоне ускоренного твердения (табл. I).

Повышение активности цемента в составе 2.3 с 40 до 50 Мпа и расходе 286 кг/м³ при В/Ц = 0,76 в сравнении с составом 2.2 проявилось в некотором увеличении количества условных активных связей и увеличением гелевых пор вдвое при близком количестве капиллярных пор и равной общей пористости бетона.

Применение в состав 2.1 низкомарочного шлакопортландцемента М300 в количестве 385 кг/м³ при В/Ц = 0,56 (воды 266л) в сравнении с составом 1.2 - 333 кг/м³ М400 при В/Ц = 0,67 и 5.1 – 334 кг/м³ М400 при В/Ц = 0,53 показало, что его структурные характеристики по уровню условной активности связей существенно выше. Несколько меньше количество капилляров и больше гелевых пор.

Введение в 360 кг/м³ цемента М400 пластификатора С-3 – состав 5.2 при В/Ц = 0,35 в сравнении с составами 1.2 – 330 кг/м³ В/Ц = 0,67 и 5.1 – 334 кг/м³ при В/Ц = 0,53 изменило структуру цементного камня и бетона. Заметно увеличился уровень условных активных связей. Уменьшилось количество капилляров и возросло количество пор в геле, уменьшилась и общая пористость и особенно пористость бетона (табл. I).

Технологические параметры бетона (количество цемента и его активность, водоцементное отношение, химические пластификаторы) в определенной закономерности влияют на формирование уровня активных связей в цементном камне и бетоне и соответствующей структуры пустот с ее реактивными внутренними силами, что проявляется в величинах энергетических и силовых параметров. В соответствии с методикой исследований при испытаниях образцов-призм, изготовленных из бетона составов 1.1 ... КЦ-4) получены ПРДД. Результаты обработки экспериментальных данных по характеристикам прочностных и деформативных свойств, удельной упругой и упругопластичной работы, удельной энергии разрушения, значениям интеграла и коэффициентам интенсивности напряжений сведены в таблицы V.2 – V.6. Количество цемента и воды в составах 1.1 – 1.2 и 5.1 и 1.3 при близких значениях фцк и фп и фщ обеспечивает формирование таких структур цементного камня и бетона, в которых свойства четко соответствуют закону R и $E = f(V/C)$ (табл. V.2) рис. V.4, при некотором разбросе свойств. В таких же соотношениях находятся и силовые и энергетические характеристики свойств бетонов. Так энергозатраты на начальном этапе нагружения реализуются на создание напряжений в активных связях и вершинах наиболее мелких трещиноподобных технологических дефектов: в порах, капиллярах, трещинах на их активацию.

Уровень работы W_m в структурах нагружаемых образцов из бетонов исследуемых составов табл. 2 находится в зависимости от условного количества активных связей A_c (табл. 1), возникших при твердении цемента и обратно пропорционален количеству пустот, трещиноподобных капилляров и пор с трещинами – создающих реактивные силы в структуре.

Энергозатраты на инициирование разрушения структуры деформируемого бетона G_i находится в прямой связи с количеством и видом дефектов в цементном камне. Их уровень 5,21 ; 7,7 ; 9,87 МПа и количество капиллярных пустот 59,6; 52-41,7; 33-41 % в цементном камне и пустот в бетоне 21,3 %; 11,7-18,7 % и 9 % различной формы и разной степени заполнения их водой и паром подтверждают вероятность различной интенсивности силовых процессов делокализации трещинообразования, формирование локальных зон повышенной концентрации реактивных сил в вершинах трещин в блоках малых объемов и создание микромагистралей, ориентированных в момент страгивания в направлении общей магистральной трещины.

Важным фактором в процессе старта и движения микромагистралей при формировании зоны предразрушения являются поры геля. Так выявляется закономерность роли пор геля как фактора торможения процесса делокализации микро и субмикротрещин. Чем выше содержание гелевых пор в объеме цементного камня, тем больше требуется затрат энергии на инициирование страгивание магистральной трещины: $V_{пг} = 10.6 \% - G_i = 5.21 \text{ Н/м}$; $V_{пг} = 12.5 \% - G_i = 7.7 \text{ Н/м}$; $V_{пг} = 13.5 \% - G_i = 9.87 \text{ Н/м}$ (рис. 4).

Вероятно предположить, что гелевые поры можно рассматривать, как структурные образования – тормозящие продвижения трещин, объемы поглощающие энергию, требующие затрат на их преодоление.

Естественно вышеизложенные физические и физико-химические процессы, происходящие в напряженной многомасштабной структуре бетона с различным количеством активных и реактивных сил отображаются и в уровнях энергетических константах бетонов упругопластической вязкости J – интеграла и силовых K_i и K_c . Так известно, что особенностью инвариантной энергетической характеристикой материала J -интеграла является его независимость от формы и размеров сечения образца. При этом в сечении при деформации могут развиваться и пластические зоны, а во всех ситуациях J -интеграл остается неизменным. Величина J -интеграла отражает некоторую среднюю характеристику поля напряжений и деформаций в окрестности вершины трещины. Свойство инвариантности, а также сингулярность напряжений и деформаций позволили принять J -интеграл в качестве критериальной величины для формулировки критерия разрушения. В принятой модели предусматривается в многочисленных микротрещинах в структуре цементного камня активный докритический их рост в локальных объемах в направлении формирования магистралей и ее страгивания. Магистральная трещина нормального отрыва начинает распространяться, когда инвариантный J -интеграл достигает предельного значения J_{lc} .

В наших опытах определены значения J_{IC} и их величины также четко увязываются со структурными характеристиками составов: чем больше уровень условных активных сил A и чем меньше капиллярных пустот и пор в бетоне, тем выше значение J_{IC} 5,78 Н/м – состав 1.1; 5,02 – 5,47 – составы 5.1 и 1.2 2,48 Н/м для бетона состава 1.3. В такой же закономерности изменялись и величины силового критерия трещиностойкости K_I и K_c 0,54–0,59 : 0,38–0,6 : 0,29 МН^{3/2} (табл. 2). Определенным образом в уровне энергетических силовых параметров трещиностойкости проявляется технологический фактор-условия твердения (составы 1.2–ТВО и 2.2–ЕТ). При всех прочих равных условиях в образцах, твердевших в естественных условиях, сформировались структуры с одинаковыми структурами в цементном камне и бетоне: общая и капиллярная пористость цементного камня 0,525–0,58 и 0,36–0,4, пористость бетона 18,7–19,3 и 19,3–20,7%. Но капиллярных пор в бетоне ускоренного твердения значительно, почти вдвое больше (13% против 7,6%.)

Вероятно этот фактор и стал основной причиной несколько более высокого уровня γ_{IC} 5,47 > 4,92 Н/м и $K_{IC} = 0,6 > 0,56$ (рис. 5, табл. 4). В составах 2.3 и 1.3 получены свойства сопротивления бетона развитию трещин заметно зависят от уровня активных сил возникающих в физико-химических и адгезионных связях, определяемых активностью цемента 40МПа и 50МПа. Так при увеличении активности цемента с 40МПа до 50 значения A возросли с 13,7 МПа до 19,2 МПа, и при величинах V/D 0,76 и 0,85 характеристики пористости цементного камня общей и капиллярной оказались практически одинаковыми, но в составе 1.3 количество демпфирующих развитие трещин гелевых пор оказалось заметно меньше, по видимому, это положение отразилось на уровне реактивных сил, следствием чего явилось существенное понижение значений γ_{IC} – 6,87 н/м для состава 2.3 до 2,81 н/м для состава 1.3, а так же и значений K_{IC} от 0,42 до 0,29 МН/м^{3/2} (табл. 5). Иное (с параметрами γ_{IC} и K_{IC} положение наблюдается в бетоне состава 2.1, изготовленном на шлакопортландцементе с активностью 30 МПа.

Характеристики свойств бетонов

| № пп | Шифр состава | Ц, кг | R _н , МПа | В/Ц | R _б , МПа | A _c | Концентрация цемента в бетоне Ф _{цк} | Пористость цементного камня | | | K _{IC} | П _с ^{об} ч |
|------|--------------|--------------|----------------------|------|----------------------|----------------|---|-----------------------------|--------------|------------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| | | | | | | | | Поры геля, % | Капилляры, % | П _с ^{об} цк, % | | |
| 1 | 1.1 | 472 | 40 | 0,49 | 35,0-35,8 | 26,85 | 0,29 | 13,5 | 27,5 | 33,0-41,0 | 0,54-0,59 | 9 |
| 2 | 1.2 | 333 | 40 | 0,67 | 35,0-37,8 | 23,7 | 0,23 | 12,5 | 36,0-40,0 | 47,0-52,5 | 0,6 | 19,3 |
| 3 | 1.3 | 272 | 40 | 0,85 | 15,0-16,4 | 21,0 | 0,22 | 10,6 | 49,0 | 54-59,6 | 0,29 | 21,3 |
| 4 | 2.1 | 287 | 30 | 0,56 | 40,0 | 19,2 | 0,25 | 11,4 | 32,9-36,0 | 41,0-44,3 | 0,64 | 13,7 |
| 5 | 2.2 | 33 | 40 | 0,67 | 25,0-28,6 | 23,7 | 0,23 | 7,69-9,0 | 36,0-40,0 | 47,0-49,0 | 0,56 | 19,3-19,7 |
| 6 | 2.3 | 286 | 50 | 0,76 | 20,0 | 28,3 | 0,22 | 14,0 | 45,4-40,0 | 51,0-59,4 | 0,42 | 19,4 |
| 7 | 5.1 | 334 | 40 | 0,53 | 32,7 | 26,0 | 0,22 | 14,5 | 34,0 | 39,0-41,7 | 0,38 | 14,69 |
| 8 | 5.2 | 360 С-3 | 40 | 0,35 | 52,4 | 30 | 0,2 | 18,5 | 7,7 | 25,0-30,5 | 0,59-0,8 | 9,2 |
| 9 | ВБ-1 | 500+55ш | 60 | 0,3 | 67,5 | 46 | 0,26 | 20,0 | 4,87 | 24,8 | 0,62 | 9,5 |
| 10 | ВБ-2 | 450+45ш | 50 | 0,28 | 75,0 | 39,0 | 0,24 | 21,0 | 1,67-1,8 | 18,0-22,7 | 0,64 | 7,86 |
| 11 | КЦ-1 | 520 | 50 | 0,37 | 47,7 | 36,3 | 0,29 | 17,8 | 15,1 | 32,9 | 0,83-1,14 | 11,7 |
| 12 | КЦ-3 | 544 | 50 | 0,28 | 56,2 | 38,9 | 0,20-0,23 | 20,5 | 2,4 | 22,9 | 0,86 | 7,9 |
| 13 | КЦ-4 | 648 С-3, ПАЩ | 50 | 0,27 | 41,1 | 39,2 | 0,248 | 20,9 | 1,4 | 22,3 | 1,0-1,16 | 8,4 |

Влияние расхода цемента на силовые и энергетические параметры разрушения тяжелого бетона

| Расход цемента, кг/м ³ | Прочностные и деформативные характеристики, МПа | | | | Силовые и энергетические параметры разрушения | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|----------------|-----------------|-----------------------------------|---|--|--|--|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---|---|
| | R | R _b | R _{bt} | E _b × 10 ⁻⁴ | W _m × 10 ⁻² , Н.М | W _i × 10 ⁻² , Н.М | W ₁ × 10 ⁻² , Н.М | W ₁ × 10 ⁻² , Н.М | W ₂ × 10 ⁻² , Н.М | G _i , Н/М | G _F , Н/М | J _i , Н/М | K _i , МН/М ^{3/2} | K _c , МН/М ^{3/2} |
| 280 (состав 1.3) 334 | 16,4 | 15,8 | 0,81 | 2,180 | 0,76 | 3,17 | 16,80 | 2,06 | 5,21 | 31,6 | 2,81 | 0,34 | 0,29 | |
| (состав 5.1) 330 | 32,7 | 26,5 | 0,74 | 2,963 | 0,86 | 2,99 | 18,84 | 4,85 | 7,7 | 34,7 | 5,02 | 0,48 | 0,38 | |
| (состав 1.2) 470 | 37,8 | 35,4 | 1,46 | 3,913 | 1,08 | 8,77 | 20,07 | 5,70 | 11,08 | 42,2 | 5,47 | 0,66 | 0,00 | |
| (состав 1.1) | 35,8 | 27,8 | 1,23 | 3,657 | 0,98 | 5,91 | 22,35 | 4,96 | 9,67 | 44,7 | 5,78 | 0,59 | 0,54 | |

Влияние условий твердения свежесформованного бетона на его прочность, деформативность и трещиностойкость

| Серия образцов | Условия твердения бетона | Прочностные и деформативные характеристики, МПа | | | | Силовые и энергетические параметры разрушения | | | | | | | | | |
|----------------|--------------------------|---|----------------|-----------------|-----------------------------------|---|--|--|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---|---|--|
| | | R | R _b | R _{bt} | E _b × 10 ⁻⁴ | W _m × 10 ⁻² , Н.М | W _e × 10 ⁻² , Н.М | W ₁ × 10 ⁻² , Н.М | W ₁ × 10 ⁻² , Н.М | G _i , Н/М | G _F , Н/М | J _i , Н/М | K _i , МН/М ^{3/2} | K _c , МН/М ^{3/2} | |
| 2.2.0 | УЕТ | 28,6 | 22,5 | 1,23 | 3,203 | 0,61 | 6,11 | 17,82 | 10,89 | 36,77 | 4,92 | 0,59 | 0,56 | | |
| 1.2.0 | ТВО | 37,8 | 35,4 | 1,46 | 3,913 | 1,06 | 5,70 | 20,07 | 11,08 | 42,2 | 5,47 | 0,68 | 0,60 | | |

Примечание: УЕТ, ТВО - соответственно условия естественного твердения бетона (t = 20°C, W > 80 %) и режим тепловлажностной обработки бетона.

Влияние активности и вида цемента на прочность, деформативность и трещиностойкость тяжелого бетона

| Серия образцов | Марка цемента | Расход цемента, кг/м ³ | Прочностные и деформативные характеристики, МПа | | | Силовые и энергетические параметры трещиностойкости | | | | | | | | | |
|----------------|------------------|-----------------------------------|---|----------------|-----------------|---|---|---|---|---|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | R | R _b | R _{bt} | E _b × 10 ⁻⁴ | W _m × 10 ⁻² , Н.м | W _e × 10 ⁻² , Н.м | W _i × 10 ⁻² , Н.м | W ₁ × 10 ⁻² , Н.м | G _i , Н/м | G _F , Н/м | J _i , Н/м | K _i , МН/м ^{3/2} | K _e , МН/м ^{3/2} |
| 2.3.0 | 500 | 285 | 20,4 | 16,2 | 1,01 | 2,861 | 2,79 | 3,79 | 6,58 | 21,60 | 10,72 | 41,35 | 6,87 | 0,45 | 0,42 |
| 1.3.0 | 400 | 280 | 16,4 | 15,4 | 0,81 | 2,180 | 0,76 | 2,41 | 3,17 | 16,8 | 5,21 | 31,55 | 2,81 | 0,34 | 0,29 |
| 2.1.0 | 300 [*] | 385 | 44,9 | 30,1 | 1,29 | 3,359 | 3,65 | 5,54 | 9,19 | 32,63 | 14,51 | 60,33 | 9,60 | 0,68 | 0,54 |

Примечание: 300^{*} - шлакопортландцемент марки 300 с добавкой гранулированного шлака 53,0 %.

Таблица 6

Влияние поверхностно-активной добавки на прочностные, деформативные показатели, силовые и энергетические параметры трещиностойкости тяжелого бетона

| Вид бетона, состав | Прочностные и деформативные характеристики, МПа | | | Силовые и энергетические параметры трещиностойкости | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---|----------------|-----------------|---|---|---|---|---|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--|
| | R | R _b | R _{bt} | E _b × 10 ⁻⁴ | W _m × 10 ⁻² , Н.м | W _e × 10 ⁻² , Н.м | W _i × 10 ⁻² , Н.м | W ₁ × 10 ⁻² , Н.м | G _i , Н/м | G _F , Н/м | J _i , Н/м | K _i , МН/м ^{3/2} | K _e , МН/м ^{3/2} | | |
| Бетон без добавки, состав 5.1.0 | 32,7 | 26,5 | 0,74 | 2,963 | 0,86 | 2,99 | 4,85 | 18,84 | 7,70 | 34,7 | 5,02 | 0,48 | 0,38 | | |
| Бетон с добавкой, состав 5.2.0 | 52,4 | 44,7 | 1,26 | 3,642 | 5,14 | 6,20 | 11,34 | 32,40 | 17,72 | 60,4 | 12,0 | 0,80 | 0,59 | | |