

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}	P _с ^{об} п
								Поры геля, %	Капилляры, %	P _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, ПАЦ	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 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)	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
334 (состав 5.1)	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
330 (состав 1.2)	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
470 (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 ₂ × 10 ⁻² , Н.М	G _i , Н/М	G _F , Н/М	J _i , Н/М	K _i , МН/М ^{3/2}
2.2.0	УЕТ	28,6	22,5	1,23	3,203	0,61	6,72	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	6,77	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	Прочностные и деформативные характеристики, МПа			Силовые и энергетические параметры трещиностойкости										
		Расход цемента, кг/м ³	R	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 _{1x} × 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 _{1x} × 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	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	32,40	17,72	60,4	12,0	0,80	0,59		