

## СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ НА СЖАТИЕ

Блещик Н.П.

Строительный факультет, БГПА.

Рыскин М.Н.

Лаборатория технологии модифицированного бетона, БелНИИС.

Минск, Беларусь

В работе рассмотрены вопросы взаимосвязи структуры и прочности цементного камня. Предложена структурно-механическая модель цементного камня и приведены сравнительные оценки расчетных и опытных величин его прочности.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, цементный камень, структура, прочность.

Задача получения высокопрочного сводиться к созданию оптимальной структуры конгломерата, характеризующейся высокой собственной прочностью компонентов и высокой адгезионной прочностью их контактов. Свои особенности в характер деформирования и разрушения высокопрочных бетонов вносит то, что прочность цементного камня в них приближается к прочности заполнителя; при этом различие в дисперсности их составляющих элементов превышает три десятичных порядка. Отсюда целесообразность рассмотрения бетона как двухфазного материала (цементный камень – заполнитель), что обуславливает необходимость количественного прогнозирования прочностных и деформативных свойств камня в бетоне.

Авторы предприняли попытку выразить прочность камня исключительно через физические параметры его структуры: относительное объемное содержание геля ( $m_2$ ), гелевых пор ( $m_{2,п.}$ ), капиллярных пор ( $m_{к.п.}$ ), непрогидратированных клинкерных частиц ( $m_{кл.}$ ) и вовлеченного воздуха ( $m_{воз.}$ ).

Аналитические выражения, определяющие перечисленные структурные компоненты, получены в работе [1] в виде:

$$m_2 = \frac{(1+w) \cdot \alpha \cdot \rho_{см}}{\rho_2 \left( \rho_{с.м.} + \rho_4 + B \cdot C \right)} ; \quad (1)$$

$$m_{з.п.} = \frac{(1+w) \cdot \alpha \cdot \left( \rho_{э.м.} / \rho_2 - \rho_{э.м.} / \rho_{к.з.} \right)}{\rho_{э.м.} / \rho_4 + B / \Pi}; \quad (2)$$

$$m_{к.п.} = 1 - m_2 - \frac{(1-\alpha)(\rho_{э.м.} / \rho_4)}{\rho_{э.м.} / \rho_4 + B / \Pi}, \quad (3)$$

в которых  $\alpha$  - степень гидратации цемента, определяемая как произведение функций учитывающих минералогический состав клинкера, содержание безводного гипса, удельной поверхности цемента и водоцементного отношения цементного теста [2]:

$$\alpha = \varphi_{мс} \varphi_{зо3} \varphi_S \varphi_{В/Ц}; \quad (4)$$

$w$  - неиспаряемая вода на 1 г цемента при полной гидратации:

$$w = \frac{0.4K_{1г} C_3 A + 0.114K_{2г} C_4 AF + 0.231K_{3г} C_3 S + 0.155K_{4г} C_2 S}{(C_3 A + C_4 AF + C_3 S + C_2 S) \varphi_{мс}}, \quad (5)$$

где  $C_3 A, C_4 AF, C_3 S, C_2 S$  - процентное содержание трехкальциевого алумината, четырехкальциевого алюмоферрита, трехкальциевого силиката и двухкальциевого силиката;  $K_{1г}, K_{2г}, K_{3г}, K_{4г}$  - соответствующие временные функциональные коэффициенты обуславливаемые взаимодействием основных минералов с водой;

$\rho_{э.м.}, \rho_4, \rho_2, \rho_{к.з.}$  - плотности соответственно: воды в тесте, цемента, геля и твердого вещества в геле.

$$\rho_{к.з.} = 2433 \text{ кг/м}^3 \text{ [3].}$$

$$\rho_2 = \frac{0,734 \rho_4 (1+w)}{\left(1+w \frac{\rho_4}{\rho_э} - 0,00007 \rho_4\right)} \quad (6)$$

Как показано в статье [4] настоящего сборника, цементный камень может быть представлен как композиционный материал, в котором клинкерные частицы наполняют матрицу - "связку" образованную цементным гелем, капиллярными порами и вовлеченным воздухом ( $m_{св} = m_2 + m_{к.п.} + m_{зо3}$ ).

Поведение такого композита под сжимающей нагрузкой предложено описывать следующей структурно-механической моделью (рис. 1), в которой выделено два параллельно сочлененных блока (I и II).

Блок I включает непрогидратированные зерна цемента ( $m_{кл}$ ) и часть "связки" ( $m_{св}^I$ ), расположенную под зернами клинкера, которая при нагружении находится в сложном напряженном состоянии, обусловленном эффектом "обоймы".

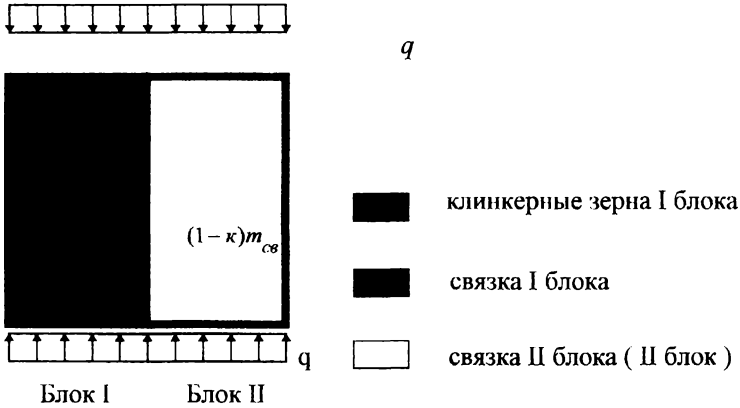


Рис. 1 Структурно-механическая модель цементного камня.

Блок II представляет собой свободнодеформируемую "связку" между включениями клинкера ( $m_{св}^II$ ). Работа под нагрузкой данного блока определяется исключительно механическими свойствами "связки", испытывающей одноосное напряженное состояние (сжатие), ориентированное в направлении действия внешней силы.

Относительные объемные содержания в цементном камне клинкерных частиц ( $m_{кл}$ ), "связки" I блока ( $m_{св}^I$ ) и "связки" II блока ( $m_{св}^II$ ), соответственно, вычисляются по формулам:

$$m_{кл} = 1 - (m_{св}^I + m_{св}^II) = 1 - m_{св} ; \quad (7)$$

$$m_{св}^I = k m_{св} ; \quad (8)$$

$$m_{св}^II = (1-k) m_{св} , \quad (9)$$

в которых  $k$  – параметр учитывающий долю "связки" входящей в блок I от объема всей связки. Параметр  $k$  выражен в виде линейной функции от  $m_{св}$  (рис.2) :

$$k = 1,25(1 - m_{св}) \quad (10)$$

Граничные условия данной функции: 1)  $k = 0$  при  $m_{св} = 1$  – отсутствие цементных зерен, модель вырождается в блок II; 2)  $k = 1$  при  $m_{св} = 0,25$  – отсутствует свободнодеформируемая "связка", модель вырождается в блок I (константа 0,25 представляет собой пустотность цементных зерен при максимально плотной их упаковке).

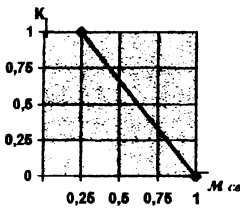


Рис. 2. Зависимость параметра  $k$  от объема "связки"  $m_{св}$ .

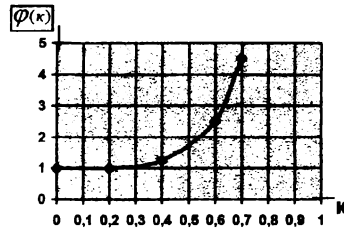


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $\varphi(k)$  от параметра  $k$ .

Относительные объемы блока I и блока II в ц.к.:

$$m_I = m_{кп} + m_{св}^I = 1 - (1 - k)m_{св} \quad ; \quad (11)$$

$$m_{II} = m_{св}^{II} = (1 - k)m_{св} \quad . \quad (12)$$

При нагружении, вплоть до момента разрушения, блоки I и II вынужденно деформируются совместно, определяя равенство их относительных продольных деформаций в предельной стадии ( $\varepsilon_{ц.к.} = \varepsilon_I = \varepsilon_{II}$ ). При этом прочность композита вычисляется из выражения:

$$f_{ц.к.} = \sigma_I m_I + \sigma_{II} m_{II} \quad . \quad (13)$$

Напряжения в блоках I и II в предельной стадии ( $\sigma_I, \sigma_{II}$ ) находятся, рассматривая концентрацию и упругие свойства отдельных компонентов каждого блока. Прочность цементного камня, исходя из зависимости (13), таким образом, определяется формулой:

$$f_{ч.к.} = \left[ \frac{f_{св}}{\frac{E_{св}^{II} m_{кл}}{E_{кл} m_I} + \frac{E_{св}^{II} m_{св}^I}{E_{св}^I m_I}} \right] m_I + f_{св} m_{II} , \quad (14)$$

где  $f_{св}$  – прочность "связки";

$E_{св}^I, E_{св}^{II}, E_{кл}$  – модули упругости соответственно "связки" I и II блока и клинкерных частиц.

Прочность "связки" определяется параметром  $\Phi$  полученном в работе [4]:

$$\Phi = \frac{m_z - m_{z,л}}{m_z + m_{кл} + m_a} . \quad (15)$$

На основании большего числа экспериментальных данных по прочности камня различных исследователей и собственных опытов, прочность "связки" цементного камня была найдена в виде:

$$f_{св} = K\Phi^n = 185\Phi^{2,9}, \text{ [МПа]}. \quad (16)$$

Физическим смыслом константы  $K=185$  МПа в формуле (16) является прочность твердого вещества "связки" в камне, т.е. прочность цементного геля при нулевой пористости.

Увеличение модуля упругости "связки" блока I ( $E_{св}^I$ ) по сравнению с модулем упругости "связки" блока II ( $E_{св}^{II}$ ) за счет ограничения деформаций связки клинкерными включениями может характеризоваться эмпирическим коэффициентом  $\varphi(k) \geq 1$ , полученном в виде функции от параметра  $k$  (рис.3):

$$\varphi(k) = E_{св}^{II} / E_{св}^I = 1 + 30k^6 . \quad (17)$$

На основании зависимостей предложенных О.Я. Бергом и др. [5], модуль упругости "связки" определяется из выражения:

$$E_{св} = E_{св}^{II} = \frac{50000 f_{св}}{80 + f_{св}}, \text{ [МПа]}. \quad (18)$$

Величина модуля упругости клинкерных частиц в цементном камне была принята равной  $E_{кл} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ .

В итоге, формула прочности цементного камня (14) с учетом (7)–(12), (14), (17) и (18) после преобразований примет вид:

$$f_{ч.к.} = 185\Phi^{2,9} \left[ \frac{(1 - (1 - k)m_{ce})^2}{\Phi^{2,9} \left( \frac{1 - m_{ce}}{123 + 3\Phi^{2,9}} + \frac{km_{ce}}{1 + 30k^6} \right)} + (1 - k)m_{ce} \right]. \quad (19)$$

Применимость полученных математических зависимостей проверялась на результатах многочисленных экспериментальных исследований отечественных и зарубежных авторов и собственных опытах. Часть этих данных приведена в таблице. Всего были обработаны результаты по прочности цементного камня на основе более чем 50 бездобавочных цементов различных химико-минералогических составов и дисперсности. Исходные водоцементные отношения изменялись от 0,22 до 0,5. Время твердения цементного камня составляло от 1 до 28 суток; твердение проходило в воздушно-влажностных условиях или воде при температурах 18–24°C.

Анализ экспериментальных данных и расчетных величин прочности цементного камня показал приемлемую их сходимость в широких диапазонах варьирования исходных данных. Таким образом разработанная структурно-механическая модель цементного камня достаточно адекватно отражает реальную физическую структуру цементного камня и процессы, происходящие при его деформировании и разрушении под кратковременной нагрузкой.

Расчетные ( $f_p$ ) и опытные ( $f_{on}$ ) значения прочности цементного камня

Характеристика цемента										В Ц	$\tau$ су т.	$f_p$ МПа	$f_{on}$ МПа	$f_p - f_{on}$ %
№	Вид цемента	Минералогический состав, %				SO <sub>3</sub> %	S <sub>уд.</sub> м <sup>2</sup> /кг	K <sub>нр.</sub>						
		C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	"Плевен" (Болгария)	7,08	10,3	58,2	21,1	0,36	320	0,25	0,3	1	17,5	16,0	+9,1	
		7,08	10,3	58,2	21,1	0,36	320	0,25	0,3	3	37,9	40,0	-5,4	
		7,08	10,3	58,2	21,1	0,36	320	0,25	0,3	7	59,4	62,0	-4,1	
		7,08	10,3	58,2	21,1	0,36	320	0,25	0,3	28	69,9	68,0	+2,7	
2	"В Пих" (Болгария)	12,5	9,4	38,5	35,0	0,52	350	0,26	0,3	1	21,2	27,0	-21,6	
		12,5	9,4	38,5	35,0	0,52	350	0,26	0,3	3	42,1	41,0	+2,6	
		12,5	9,4	38,5	35,0	0,52	350	0,26	0,3	7	61,3	55,0	+11,4	
		12,5	9,4	38,5	35,0	0,52	350	0,26	0,3	28	70,3	68,0	+3,3	
3	БТЦ (Болгария)	8,8	10,2	53,7	22,8	2,27	380	0,27	0,3	1	30,2	29,0	+4,2	
		8,8	10,2	53,7	22,8	2,27	380	0,27	0,3	3	53,7	46,0	+16,7	
		8,8	10,2	53,7	22,8	2,27	380	0,27	0,3	7	73,9	59,0	+25,2	
		8,8	10,2	53,7	22,8	2,27	380	0,27	0,3	28	78,2	79,0	-1,1	
										0,3				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
4	Себряков-ский	3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,25	1	27,2	26,0	+4,6
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,25	3	49,7	55,0	-9,7
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,25	7	70,0	72,0	-2,8
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,25	28	83,8	77,0	+8,9
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,3	1	14,9	13,0	+14,9
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,3	3	32,8	32,0	+2,5
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,3	7	52,1	51,0	+2,1
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,3	28	65,0	65,0	0
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,4	1	6,1	6,5,0	-0,5
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,4	3	17,1	17,0	+0,7
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,4	7	30,9	36,0	-14,1
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,4	28	40,4	45,0	-10,3
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,5	1	3,1	3,5,0	-11,3
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,5	3	10,0	11,0	-9,3
		3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,5	7	19,4	21,0	-7,8
3,3	13,9	53,6	26,0	1,65	300	0,25	0,5	28	26,1	34,0	-23,2		

#### Литература.

1. Отчет о НИР "Разработка основных положений структурно-механического метода экспрессной оценки морозостойкости бетона" // Белорусская государственная политехническая академия. Минск, 1996.
2. Блещик Н.П., Протько Н.С., Рыский М.Н. Математические модели кинетики гидратации цемента. // Междунар. Конф. Инженерные проблемы современного бетона и железобетона. Минск, БелНИИС, 1997. - Т. 2. - С. 25 - 36.
3. Пауэрс Т.К. Физические свойства цементного теста и камня // Четвертый международный Конгресс по химии цемента. - М.: Стройиздат, 1964. - С. 402-438.
4. Блещик Н.П., Рыский М.Н. К вопросу о моделировании структуры и прочности цементного камня. Настоящий сборник.
5. Берг О.Я. и др. Высокопрочный бетон. М., Стройиздат, 1971.