

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ СОСТАВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА НА ЕГО ПОРОВУЮ СТРУКТУРУ

Довгань П.М., Кровяков С.А., Керш В.Я., Еремина Н.А., Четиль С.Р.

Исследовано влияние факторов состава мелкозернистого бетона на интегральные показатели его поровой структуры. Показано, что введение цеолита и замена части кварцевого песка керамзитовым, повышает средний размер капилляров и, одновременно, их однородность. Увеличение дозировки пластификатора сказывается иначе - снижается и средний размер капилляров, и их однородность.

Одной из важнейших характеристик бетона, влияющей на ряд свойств и, прежде всего на долговечность, являются параметры его порового пространства, т.е. объем, не заполненный твердой фазой. Транспортные пути образуются системой пор и трещин, характеризующейся значительным разнообразием размеров, форм и характера взаимных связей. Все это в значительной степени определяет интенсивность взаимодействия среды и цементного камня, как на наружной, так и на внутренней поверхности поровой структуры бетона.

Поровая структура бетона характеризуется следующими основными свойствами: общей пористостью, т.е. части общего объема, которую занимают поры, причем можно различать 'пористость открытую' или замкнутую по степени соединения с внешней поверхностью; размером капилляров и их однородностью по размерам.

Исследовалось влияние факторов состава мелкозернистого бетона на интегральные показатели его поровой структуры. Эксперимент

проводился по 18-ти точечному четырехфакторному D-оптимальному плану. Варьировались следующие факторы состава мелкозернистого бетона: песчано-цементное отношение $\Pi/\text{Ц} = X_1 = 2.64 \pm 0.53$ по объему; доля керамзитовых зерен в песке $\text{ЕС} = X_2 = 15 \pm 15\%$ по объему; дозировка добавки-пластификатора УПСБ-М $P = X_3 = 0.7 \pm 0.2\%$ от массы цемента; количество тонкомолотого цеолита Сокирнянского месторождения $Z = X_4 = 8 \pm 8\%$ от массы цемента. Во все смеси вводилось такое количество воды, чтобы их удобоукладываемость была одинаковой (5.5 - 7 см по пенетрации стандартного конуса). Переход к нормализованным переменным выполнен по типовой формуле [1].

Определялась открытая пористость материала (по величине максимального водопоглощения) в возрасте 90 и 730 суток (3 и 24 месяца, соответственно $W_{\text{max.90}}$ и $W_{\text{max.730}}$), насыщение структуры бетона при этом производилось как за счет длительного хранения образцов в воде, так и за счет вакуумирования. В возрасте же 730 суток также оценивалась характеристики поровой структуры бетона по кинетике водопоглощения: λ - средний размер капилляров и α - однородность размеров капилляров [2]. Натурный эксперимент показал, что величина открытой пористости бетона изменялась со временем и в возрасте 730 суток она ниже, чем в возрасте 90 суток (для некоторых составов - до 30%). Таким образом, прослеживается известный факт сокращения объема пор в бетоне за счет увеличения количества продуктов гидратации.

Однако величина сокращения пористости во времени существенно зависит от состава бетона. Это влияние может быть отображено экспериментально статистической моделью (ЭС-моделью), описывающей отношение пористости бетона в возрасте 730 суток к пористости бетона того же состава в возрасте 90 суток ($s_3 = 0.07$):

$$W_{\text{max.730}}/W_{\text{max.90}} = 0.952 + 0.029x_1x_2 - 0.129x_2^2 - 0.058x_2x_3 + 0.037x_4 \quad (1)$$

Поле данного критерия имеет максимум $Y_{\text{max}} = 1$ в точке с координатами $x_1 = -1$, $x_2 = -0.34$, $x_3 = x_4 = 1$, и минимум $Y_{\text{min}} = 0.7$ в точке $x_1 = 1$, $x_2 = x_3 = x_4 = -1$. Таким образом, можно сделать вывод, что пористость бетонов с низким $\Pi/\text{Ц}$ отношением, низкой (около 10%) долей керамзитового песка и максимальными дозировками пластификатора и цеолита практически не изменилась. Наиболее существенно сократилась пористость материалов с высоким $\Pi/\text{Ц}$, без керамзита и цеолита и минимальной дозировкой пластификатора. Необходимо также отметить, что $\Pi/\text{Ц}$ отношения влияет на сокращение пористости не значительно. Влияние же остальных факторов состава на величину

$W_{\text{max.730}}/W_{\text{max.90}}$ отображено на диаграмме в виде куба (рис.1.а), построенной по модели (1), П/Ц при этом зафиксировано на среднем уровне ($x_1=0$). Как видно из диаграммы, при максимальной и минимальной дозировке керамзитового песка сокращение пористости наиболее значительно, а по мере увеличения дозировки цеолита снижение пористости менее ощутимо. То есть поры, образованные зернами цеолита, плохо заполняются растущими продуктами гидратации цемента.

Анализ влияния факторов состава мелкозернистого бетона на средний размер капилляров λ показал, что увеличение доли песка в материале (П/Ц отношения), естественно, увеличивает данный показатель. Аналогично сказывается введение в состав бетона цеолита. Но наиболее существенное влияние на величину λ оказывает пластификатор. При увеличении дозировки добавки пластификатора средний размер капилляров снижается, при этом наиболее ощутимо это происходит в диапазоне от 0.5 до 0.7% от массы цемента.

Однако на однородность размеров капилляров α варьируемые факторы состава мелкозернистого бетона влияют иначе, чем на средний размер капилляров. Это влияние может быть адекватно описано ЭС-моделью со всеми значимыми оценками коэффициентов ($s_3=0.032$):

$$\alpha = 0.336 + 0.024x_2 - 0.042x_3 + 0.059x_3^2 + 0.026x_4 - 0.018x_1x_4 - 0.030x_2x_3 - 0.021x_3x_4 \quad (2)$$

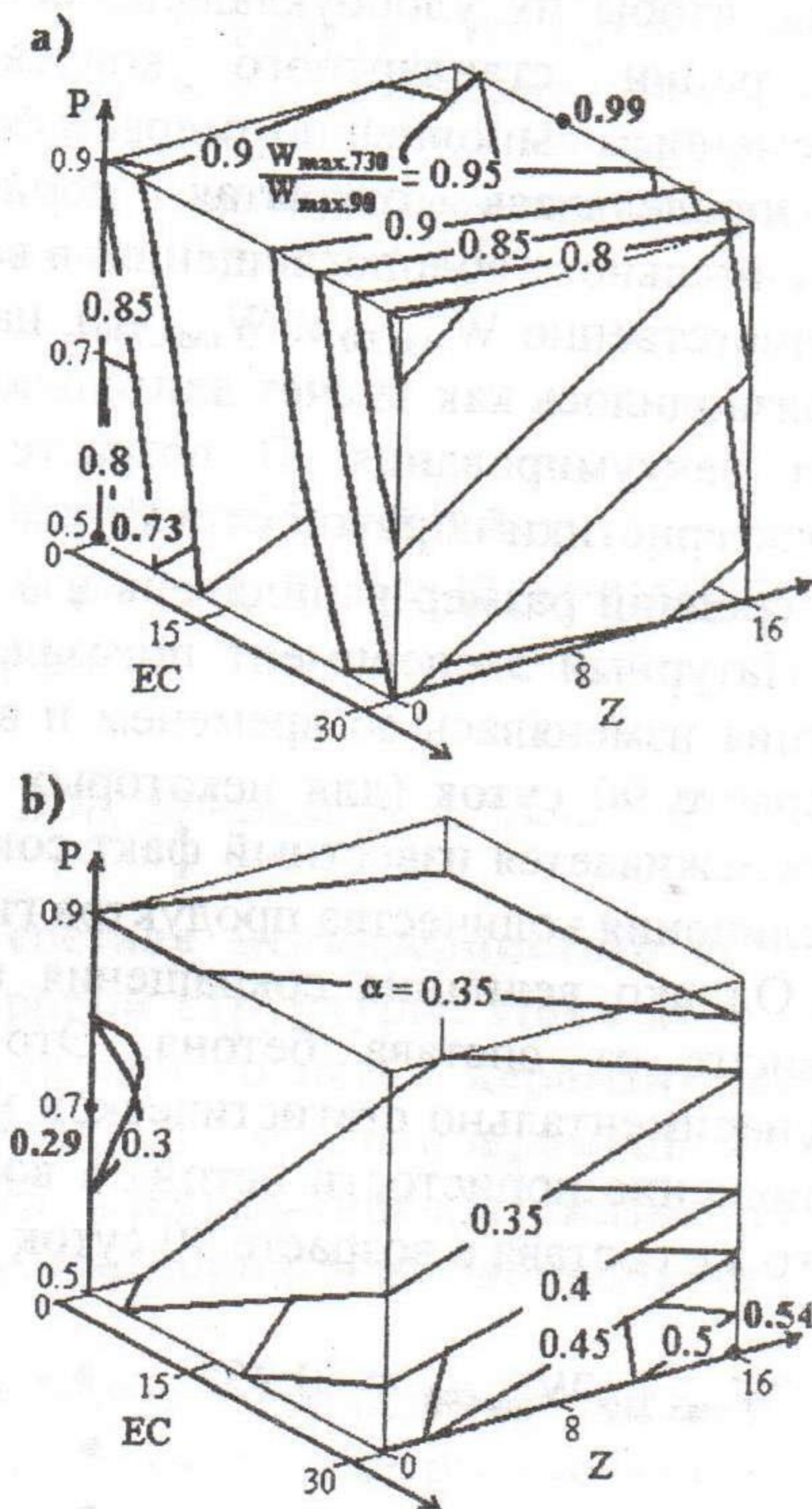


Рис.1

Как видно из модели, П/Ц отношение на величину α влияет не существенно. Влияние остальных факторов состава отображено на диаграмме (рис.1.б), построенной по модели (2).

Как видно из диаграммы, увеличение дозировки пластификатора преимущественно снижает однородность размеров капилляров, а увеличение количества цеолита и доли керамзитового песка напротив - повышает показатель α . Максимально значения $\alpha_{\max}=0.554$ он достигает в точке с координатами $x_1=x_3=-1$, $x_2=x_4=1$, то есть с низкими П/Ц и дозировкой добавки, и с максимальной дозировкой цеолита и керамзита.

Помимо того исследовалась взаимосвязь между показателями поровой структуры композита и его механическими свойствами. Проведенный корреляционный анализ показал, что показатели W_{\max} и λ линейно взаимосвязаны с трещиностойкостью бетона (уровнем критического коэффициента интенсивности напряжений) K_{Ic} в сухом (после 24 сушки при $t = 105 \pm 2$ °С) и равновесном (воздушном) состоянии. Взаимосвязи между λ и K_{Ic} сухого (индекс "d") можно предположить с риском не более 5%, $r\{\lambda, K_{Ic.d}\} = -0.48$, между λ и K_{Ic} при равновесной влажности (индекс "n") с риском не более 2%, $r\{\lambda, K_{Ic.n}\} = -0.51$. Взаимосвязь с величиной открытой пористости бетона и уровнем критического коэффициента интенсивности напряжений сухом и равновесном состоянии еще выше: $r\{W_{\max}, K_{Ic.d}\} = -0.54$ (риск менее 2%), $r\{W_{\max}, K_{Ic.n}\} = -0.62$ (риск менее 1%). При насыщении же бетона водой линейная взаимосвязь между интегральными показателями пористости и трещиностойкостью исчезает, что объясняется способностью капиллярной воды работать при кратковременных нагрузках подобно твердому телу, а также ее "склеивающей" способностью (эффект капиллярного обжатия), которая способствует торможению роста трещин [3].

Таким образом, в целом можно сделать вывод, что введение в состав мелкозернистого бетона цеолита, равно как и замена части кварцевого песка керамзитовым, несколько повышает средний размер капилляров, но при этом одновременно повышается и их однородность. Увеличение же дозировки пластификатора на поровой структуре сказывается иначе - средний капилляров снижается, но одновременно снижается и их однородность по размерам. Интегральные показатели пористости взаимосвязаны с трещиностойкостью мелкозернистого бетона в сухом состоянии и при равновесной влажности. При насыщении же бетона водой данная линейная взаимосвязь исчезает.

Литература.

1. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. - К., Выща школа, 1989. - 328 с.
2. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. - М., Стройиздат, 1979. - 344 с. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. - Тбилиси: Мецниереба, 1979. - 230 с.