

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СВОБОДНОЙ ВОДЫ В ПОРОВОЙ СТРУКТУРЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Кравченко В. В.

*К. т. н., докторант УО «Брестский государственный технический университет»
Брест, Беларусь, vvkravchenko@g.bstu.by*

Введение

Все виды бетонов обладают собственными деформациями. Развитие собственных деформаций в условиях внутреннего или внешнего ограничения обуславливает возникновение и развитие микротрещин в структуре бетона, снижая его долговечность. Основными воздействиями, обуславливающими возникновение и развитие усадки, являются: 1) капиллярное давление, действующее в поровой среде цементного камня; 2) изменение поверхностной энергии частиц твердой фазы цементного камня и 3) расклинивающее давление между частицами твердой фазы цементного камня. Таким образом, для прогнозирования возникновения и развития усадки необходимо иметь возможность оценивать основные механизмы ее возникновения.

Эффективное поровое давление

Основные механизмы возникновения усадки в цементном камне с математической точки зрения можно выразить через эффективное поровое давление:

$$p_{eff} = S \cdot p_c + p_{st} + p_d \cdot \phi_d, \quad (1)$$

где S – степень насыщения пор влагой; p_c – капиллярное давление, Па; p_{st} – давление, обусловленное изменением поверхностной энергии частиц твердой фазы, Па; p_d – расклинивающее давление между частицами твердой фазы, Па; ϕ_d – объемная доля пор, где проявляется расклинивающее давление.

Капиллярное давление определяют на основании законов Лапласа и Кельвина, давление, обусловленное изменением поверхностной энергии, по данным [1], расклинивающее давление – по данным [2].

Основным показателем, оказывающим существенное влияние на компоненты эффективного порового давления является относительная влажность в поровой среде цементного камня. В свою очередь относительная влажность является величиной, производной от количества влаги в поровой среде цементного камня. При этом количество влаги, находящейся в порах цементного камня в процессе гидратации, распределяется неравномерно в объеме цементного камня, изменяясь от некоторой условной точки в центре ядра цементного камня к условной точке на его поверхности, что обусловлено процессами миграции влаги в его поровой среде.

Распределение влаги в поровой среде цементного камня

Для описания процесса миграции влаги в поровой среде цементного камня используют модифицированное уравнение Ричардса:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial \theta_{hyd}}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

где θ – относительное содержание влаги, м³/м³; $D(\theta)$ – коэффициент фильтрации влаги в поровой среде цементного камня, м²/с; $\frac{\partial \theta_{hyd}}{\partial t}$ – потребление влаги на реакции гидратации, (м³/м³)/с.

Следует отметить, что в большинстве существующих моделей используется несколько иная форма уравнения (2), выраженная через степень насыщения пор влагой S , которую получают, используя соотношение $\theta = \phi \cdot S$ (ϕ – относительный объем пористости цементного камня, м³/м³).

Применительно к поровой среде цементного камня, механизм фильтрации влаги включает два термодинамических процесса: 1) фильтрацию влаги, обусловленную законом Дарси ($D_l(\theta)$) и 2) диффузию водяного пара, обусловленную первым законом Фика ($D_v(\theta)$) [3]:

$$D(\theta) = D_l(\theta) + D_v(\theta) = \frac{k_{eff}}{\eta_l} \cdot \frac{\partial p_c}{\partial \theta} + \frac{D_{eff}}{p_v} \cdot \left(\frac{p_v}{\rho_l} \right)^2 \cdot \frac{\partial p_c}{\partial \theta}, \quad (3)$$

где k_{eff} – коэффициент проницаемости поровой среды, м²; D_{eff} – коэффициент диффузии водяного пара, м²/с; p_v – давление водяного пара, Па; η_l – динамическая вязкость жидкости, Па·с; ρ_v , ρ_l – плотность водяного пара и жидкости соответственно, кг/м³.

Для вычисления коэффициента фильтрации влаги $D(\theta)$ необходимо установить зависимость $p_c(\theta)$. В существующих подходах для этих целей используют феноменологическое уравнение ван Генухтена:

$$p_c(S) = a \cdot (S^{-b} - 1)^{1-\frac{1}{b}}, \quad (4)$$

где a , b – параметры уравнения.

Существенный недостаток такого подхода – для определения параметров необходимо экспериментальное построение изотерм сорбции и десорбции водяного пара для исследуемой структуры цементного камня. Этот подход является

трудоемким и требующим специального оборудования. Более предпочтительным в данном случае является подход, основанный на условии термодинамического равновесия в поровой среде цементного камня.

Термодинамическое равновесия в поровой среде цементного камня

Вероятностная модель распределения пор по размерам может быть представлена упрощенным унимодальным вероятностным распределением Рэля-Ритца [4]:

$$V(r) = 1 - e^{-B \cdot r}, \quad (5)$$

где V – относительный объем пор до радиуса r ; r – радиус пор, м; B – структурный параметр, соответствующий максимуму функции плотности вероятности распределения пор, $1/\text{м}$.

Зная функцию распределения пор по размерам, можно выразить условие термодинамического равновесия между жидкостью и водяным паром в поровой среде, при котором все поры радиусов, меньших r_c , будут полностью заполнены влагой, тогда как остальные будут обезвоженными. Принимая допущение, что миграция влаги в цементном камне происходит в основном только через капиллярные поры, условие термодинамического равновесия пористой среды записывают следующим образом [4]:

$$S(r_c) = \int_0^{r_c} \frac{dV}{dr} dr = 1 - e^{-B_c r_c}, \quad (6)$$

где r_c – радиус капиллярных пор с менисками, м; B_c – структурный параметр распределения капиллярных пор, $1/\text{м}$.

Используя выражение (6) совместно с положениями, обозначенными в [4] можно получить зависимость для определения r_c :

$$r_c = -\frac{\ln(1 - S_c(1 - \ln(S_0)))}{B_c}, \quad (7)$$

где S_c – степень насыщения пор, соответствующей количеству воды в полностью заполненных влагой порах.

В предложенном подходе ключевым параметром является параметр B_c , который можно с определенной погрешностью определить из существующих расчетных моделей микроструктуры цементного камня.

Заключение

Предложен подход к распределению свободной влаги в поровой среде цементного камня, по которому вместо феноменологических уравнений ван Генухтена следует использовать условие термодинамического равновесия в поровой среде на основе распределения пор цементного камня по размерам, зависящего от единственного структурного параметра, приближительная оценка которого может быть получена из вычислительных моделей развития микроструктуры цементного камня, что позволяет не прибегать к трудоемким экспериментальным исследованиям для подбора необходимых параметров.

Список использованных источников

1. The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials / O. Coussy, P. Dangla, T. Lassabatère, V. Baroghel-Bouny // *Materials and Structures*. – 2004. – Vol. 37, iss. 1. – P. 15–20.
2. Maruyama, I. Origin of Drying Shrinkage of Hardened Cement Paste: Hydration Pressure / I. Maruyama // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2010. – Vol. 8, iss. 2. – P. 187–200.
3. Mainguy, M. Role of Air Pressure in Drying of Weakly Permeable Materials / M. Mainguy, O. Coussy, V. Baroghel-Bouny // *Journal of Engineering Mechanics*. – 2001. – Vol. 127, iss. 6. – P. 582–592.
4. Maekawa, K. *Multi-scale Modelling of Structural Concrete* / K. Maekawa, T. Ishida, T. Kishi. – New York : Taylor & Francis Group, 2009. – 655 p.