

ЦЕМЕНТНЫЙ БЕТОН ПОВЫШЕННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Батяновский Э.И., Бабицкий В.В., Дрозд А.А., Дедюля В.М.

БГПА, г. Минск

Важнейшей качественной характеристикой бетонных и железобетонных элементов благоустройства и мощения (тротуарных, облицовочных и др. плит, бортовых камней) является их эксплуатационная долговечность, основу которой составляет плотность (непроницаемость) бетона. Одним из возможных путей получения цементного бетона повышенной плотности и непроницаемости представляется способ формирования, включающий приготовление, укладку и уплотнение вибрированием с пригрузом (в некоторых случаях – вибропрессованием) сухой смеси вяжущего и заполнителей (наполнителей), насыщение уплотненной смеси водой (растворами химических добавок) под избыточным давлением (вакуумом или при их сочетании), повторное виброуплотнение с пригрузом. Полученный описанным способом бетон с применением портландцемента М400÷М500 (содержание 360÷400 кг на 1 м³ бетона), рядовых песка и щебня (крупностью 5÷20 мм, прочностью на дробимость 80 МПа) обладает следующими физико-механическими характеристиками: средняя плотность при естественной влажности ≈2500 кг/м³, прочность при сжатии 70÷80 МПа, растяжении при изгибе – 7÷8 МПа, модуль упругости динамический – более 50000 МПа, водопоглощение по массе – 1.5÷2 %, водонепроницаемость – 2.0 МПа и более, морозостойкость до 1000 циклов, истираемость – 0.4÷0.5 г/см².

Технология формования изделий с использованием сухой бетонной смеси несомненно сложнее традиционной, но уровень эксплуатационных характеристик бетона значительно превышает показатели известных технологий, включая и вибропрессование. Сравнительные исследования на морозо- и солестойкость (с среде хлоридов и сульфатов) показали, что бетон сухого формования в 3–4 раза долговечнее полученного традиционными способами из водозатворенной (жесткой и малоподвижной) смеси.

При разработке технологии изготовления изделий формованием сухой бетонной смеси исследовали различные варианты ее уплотнения, водонасыщения, дополнительной обработки и твердения бетона. Наибольший научный интерес представляет теоретическое обоснование закономерностей водонасыщения сухой смеси, являющейся классическим примером капиллярно-пористого тела. Было известно предложение Г.М.Хуторцова [1] для определения времени насыщения $t_{\text{нас}}$ слоя уплотненной смеси высотой h из выражения:

$$t_{\text{нас}} = \alpha h^{1.6} \quad (1)$$

где: α – эмпирический коэффициент, соответствовавший варианту пропитки смеси за счет сил сорбции (капиллярного подсоса).

Зависимость (1) уточнена Н.М. Угликом в работе [2] и приведена к виду:

$$t_{\text{нас}} = a h^b \quad (1)$$

где: a и b – эмпирические коэффициенты, отражающие особенности увлажнения сухой смеси конденсатом водяного пара.

Реализация влагонасыщения полидисперсной сухой смеси водой или растворами химических добавок (их наличие существенно изменяет вязкость и плотность жидкости) под избыточным давлением требовала теоретического обоснования с использованием фундаментальных представлений о фильтрации жидкостей через пористые среды [3–5]. Фильтрационной средой, через которую жидкость проникает и распространяется по объему сухой смеси с заполнителями из плотных горных пород, является цемент. Пусть $P_{\text{нас}}$ – давление, при котором осуществляется фильтрация жидкости, в Па (Н/м^2); μ_g – динамическая вязкость жидкости, Н.с/м^2 ; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, выражаемая силой тяжести в Н/м^3 ; m_3 – эффективная пористость (д.ед.) и d_3 – эффективный диаметр частиц (в м) фильтрационной среды.

Тогда время влагонасыщения слоя сухой смеси высотой h при средней скорости движения жидкости в порах W определится из выражения.

$$t_{\text{нас}} = h / W \quad (3)$$

Из теории фильтрационной гидравлики известна зависимость

$$W = v_{\phi} / m_3 \quad (4)$$

а скорость фильтрации жидкости v_{ϕ} , согласно формуле Дарси выражается уравнением:

$$v_{\phi} = - \frac{K_{\phi}}{\rho_{\text{ж}}} \frac{dP}{dh} \quad (5)$$

где: K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, зависящий от свойств фильтрующей жидкости и характеристик пористой среды.

Поскольку противоположная от места подвода жидкости и смеси грань является поверхностью депрессии (избыточное давление равно нулю), давление по высоте h будет изменяться в пределах от $P_{\text{нас}}$ до 0.

Проинтегрировав выражение (5) в указанных пределах, получим:

$$v_{\phi} = - \frac{K_{\phi}}{\rho_{\text{ж}}} \cdot \frac{P_{\text{нас}}}{h} \quad (6)$$

Коэффициент фильтрации по Козени [3] определяется из зависимости:

$$K_{\phi} = \beta \frac{d_3^2}{\mu_g} \cdot \frac{m_3^2}{(1 - m_3)^2} \quad (7)$$

где: β – размерный эмпирический коэффициент (Н/м^3), равный 8.2.

Путем последовательной подстановки K_{ϕ} из зависимости (7) и v_{ϕ} (6) в выражения (4) и (3) получим формулу для расчета времени влагонасыщения сухой бетонной смеси:

$$t_{\text{нас}} = \frac{1}{\beta} \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot h^2 \cdot \mu_{\text{г}}}{d_3^2 \cdot P_{\text{нас}}} \left(\frac{1 - m_3}{m_3} \right)^2 \quad (8)$$

Анализ формулы (8) показывает, что продолжительность влагонасыщения сухой бетонной смеси зависит от совокупности свойств фильтрующей жидкости и пористой среды. В частности, увеличиваясь с ростом вязкости и плотности фильтрата, а также с увеличением степени дисперсности и плотности укладки частиц твердой фазы, и снижаясь при увеличении давления жидкости.

Основываясь на данных ситового анализа используемых в строительстве цементов [6] рассчитали по методу Козени [3] усредненный размер зерен (флокул) вяжущего d_3 , оказывающийся равным 23÷25 мкм.

Тогда зависимость (8) преобразуется в удобную для расчетов формулу:

$$t_{\text{нас}} = K \frac{h^2}{P_{\text{нас}}} \left(\frac{1 - m_3}{m_3} \right)^2 \quad (9)$$

где: $K = \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot \mu_{\text{г}}}{\beta \cdot d_3^2}$. Значения K для воды и растворов ряда химических добавок в бетон

определены в диапазоне температур от 5 до 80°C и приводятся в методике расчета в виде табличных данных.

Решив выражение (9) относительно h возможно рассчитать глубину проникновения жидкости в сухую смесь за время $t_{\text{нас}}$:

$$h = \frac{m_3}{1 - m_3} \sqrt{\frac{t_{\text{нас}} \cdot P_{\text{нас}}}{K}} \quad (10)$$

При фильтрации воды по поровым каналам уплотненного цемента на поверхности частиц адсорбируется часть жидкой фазы, образуя сольватные слои, со свойствами, присущими псевдотвердым телам. Вследствие этого уменьшаются сечения каналов, по которым происходит фильтрация жидкости, и снижается пористость среды [3, 4]. Получающаяся при этом пористость названа эффективной m_3 и имеет связь с начальной (истинной) пористостью фильтрационной среды m_n по зависимости:

$$m_3 = m_n \left[1 - 3 \left(\frac{1 - m_3}{m_n} \right) z \right] \quad (11)$$

где: z – отношение толщины адсорбированного слоя жидкости δ_c к эффективному диаметру частиц d_3 .

Следует отметить, что фиксированное расчетное значение d_3 фильтрационной среды вносит некоторую погрешность при определении $t_{\text{нас}}$ для цементов с различны-

ми (количественно и по видам) минеральными добавками. Учитывая связь между d_s и удельной поверхностью цемента $S_{уд}$ (определяли по "ПСХ") зависимости (8) и (11) получены в следующих выражениях:

$$t_{нас} = K_1 \frac{\mu_{г}}{\rho_{нас}} \left(\frac{S_{уд} \cdot h}{m_3} \right)^2 \quad (12)$$

$$m_3 = m_n \left[1 - 2.3 \cdot S_{уд} \cdot \delta_c \left(\frac{1 - m_n}{m_n} \right)^2 \right] \quad (13)$$

Толщину сольватной оболочки δ_c жидкости на поверхности зерен цемента возможно определить по зависимости:

$$\delta_c = (0.395 - K_{нг}) 10^{-6} \quad (14)$$

предложенной Блещиком Н.П. в работе [7]. Значение истинной пористости уплотненного цемента m_n устанавливают на основании расчетных данных состава сухой бетонной смеси из выражения:

$$m_n = 1 - \frac{Ц_{\phi}}{\left[1 - \left(\frac{П_{\phi}}{\rho_n^3} + \frac{Щ_{\phi}}{\rho_{ш}^3} \right) \right] \rho_{ц}} \quad (15)$$

где: $Ц_{\phi}$, $П_{\phi}$, $Щ_{\phi}$ – фактические расходы цемента, песка и крупных заполнителей в кг на 1 м^3 сухой смеси в уплотненном состоянии;

ρ_n^3 , $\rho_{ш}^3$, $\rho_{ц}$ – плотность зерен песка и крупного заполнителя и плотность цемента в $\text{кг}/\text{м}^3$ соответственно.

Практическая проверка полученных зависимостей при изменении как параметров жидкости, так и фильтрационной среды (сухие смеси с различными расходами составляющих, видами и тонкостью помола вяжущего, высотой слоя смеси и степенью уплотнения, температурой и др.) показала хорошую сходимость расчетных величин времени насыщения и его экспериментальных значений. При исключении влияния случайных факторов отклонения не превышали $6 \div 8 \%$, а в $30 \div 50 \%$ случаев имело место практическое совпадение значений расчетных и опытных $t_{нас}$, что свидетельствует о возможности использования полученных зависимостей для практических расчетов.

Литература

1. Хуторцов Г.М. Песчаный бетон, изготовленный методом сухого бетонирования. – в сб.: Технология переработки физико-химические и структурно-механические свойства дисперсных материалов. Мн.: 1973, с. 252–262.

2. Углик Н.М. Исследование технологии формования тротуарных плит из сухих бетонных смесей. Автореферат канд. диссертации. Мн.: 1981, 19 с.
3. Лейбензон Л.С. Движение природный жидкостей и газов в пористой среде. М.–Л.: Гостехиздат, 1947, с. 11–73.
4. Полубаринова–Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977, с. 17–88.
5. Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы. М.: Мир, 1964, с. 68–104.
6. Кравченко И.В. Быстротвердеющие и высокопрочные цементы – в кн.: Шестой международный конгресс по химии цемента. Т 3. Цементы и их свойства. М., Стройиздат, 1976, с. 6–20.
7. Блещик Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и пресс-вакуум-бетона – Мн.: Наука и техника, 1977, 230 с.