

С.В. ФЕДОСОВ, В.Е. РУМЯНЦЕВА, доктора техн. наук, И.В. КРАСИЛЬНИКОВ, инженер, Ивановский государственный политехнический университет; Н.С. КАСЬЯНЕНКО, канд. техн. наук, ООО «Научно-исследовательский институт охраны труда» (Иваново)

Теоретические и экспериментальные исследования процессов коррозии первого вида цементных бетонов при наличии внутреннего источника массы

По общепринятой международной классификации, предложенной профессором В.М. Москвиным, к коррозии бетонов первого вида относят процессы, возникающие в бетоне при воздействии на него вод с малой жесткостью, когда составные части цементного камня растворяются, вымываются и уносятся перемещающейся водной средой [1].

При этом с точки зрения теории тепломассопереноса [2], перенос гидроксида кальция происходит в три этапа:

- массопроводность (диффузия) гидроксида кальция из внутренних слоев бетона к границе раздела фаз «бетон – жидкая среда»;
- массоперенос через границу раздела фаз;
- массоотдача от границы раздела фаз в объем жидкой среды.

В результате процессов растворения и выноса растворенных веществ нарушается химическое равновесие между поровой жидкостью и составляющими цементного камня (высокоосновными соединениями), которые подвергаются ступенчатому разложению, что приводит к потере прочности и, как следствие, к разрушению цементного камня.

Следует заметить, что разложение высокоосновных соединений приводит к выделению в поровое пространство цементного камня дополнительного количества «свободного гидроксида кальция», которое с физико-математической точки зрения может рассматриваться как возникновение внутреннего источника массы.

Математически задача массопереноса «свободного гидроксида кальция» с внутренним источником массы, в безразмерном виде представлена следующей системой уравнений с начальными и граничными условиями:

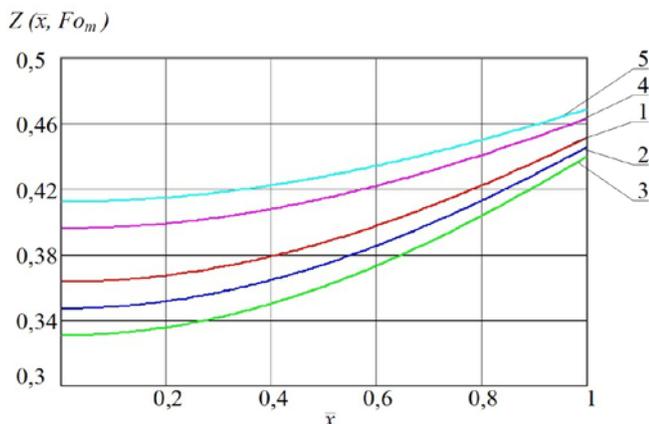


Рис. 1. Профиль безразмерных концентраций гидроксида кальция по толщине стенки резервуара при $Fo_m=1$, $Bi_m=1$, $K_m=1$ с разными значениями Po_m : 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – -1; 5 – -2

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2} - Po_m^*, \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad Fo_m > 0, \quad (1)$$

$$Z(\bar{x}, Fo_m)|_{Fo_m=0} = \frac{C_0 - C(x, \tau)}{C_0} \Big|_{\tau=0} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{1}{Bi_m} \cdot \frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = [Z_p(Fo_m) - Z(\bar{x}, Fo_m)] \Big|_{\bar{x}=1}, \quad (4)$$

$$-\frac{\partial Z_{жс}(Fo_m)}{\partial Fo_m} = K_m \cdot \frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=1}, \quad (5)$$

$$K_m = \frac{m \cdot S \cdot \delta}{V_{жс}} \cdot \frac{\rho_{бем}}{\rho_{жс}} = \frac{m \cdot G_{бем}}{G_{жс}}. \quad (6)$$

В данной системе уравнений обозначено: $Fo_m = k\tau / \delta^2$ – массообменный критерий Фурье; $Bi_m = \beta \cdot \delta / k$ – массообменный критерий Био; $Po_m^* = q_v \cdot \delta^2 / k \cdot C_0 \cdot \rho_{бем}$ – модифицированный критерий Померанцева; $\bar{x} = x / \delta$ – безразмерная координата; $Z(\bar{x}, Fo_m)$ – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона; $Z_p(Fo_m)$ – безразмерная равновесная концентрация

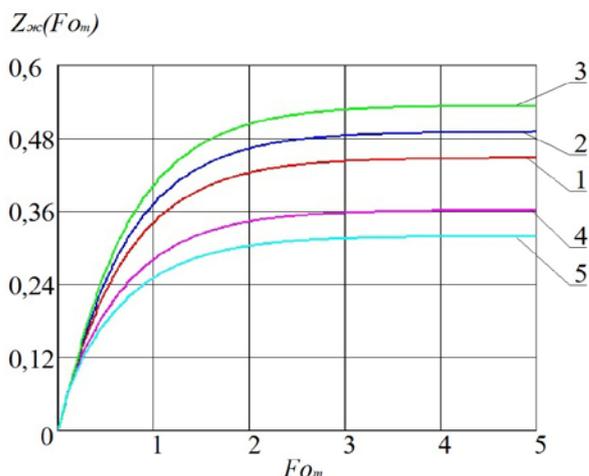


Рис. 2. Профиль безразмерных концентраций гидроксида кальция в жидкой фазе при $Bi_m=1$, $K_m=1$ с разными значениями Po_m : 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – -1; 5 – -2

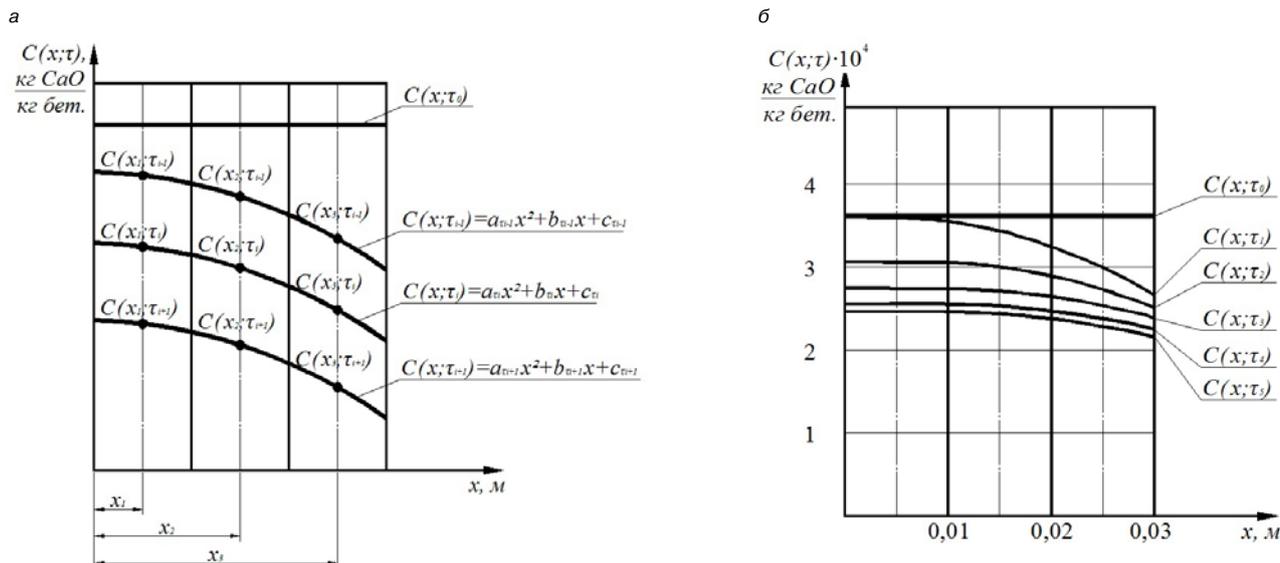


Рис. 3. а – схема для определения параметров уравнения параболы по экспериментальным данным, б – профили концентраций гидроксида кальция в разные временные интервалы, построенные по уравнению параболы

ция на поверхности твердого тела; $Z_{жс}(F_{O_m})$ – безразмерная концентрация переносимого компонента в жидкой фазе; $C(x, \tau)$ – концентрация «свободного СаО» в бетоне в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , кг СаО/кг бетона; $C_p(\tau)$ – равновесная концентрация на поверхности твердого тела, кг СаО/кг бетона; k – коэффициент массопроводности в твердой фазе, м²/с; β – коэффициент массоотдачи в жидкой среде, м/с; δ – толщина стенки конструкции, м; x – координата, м; τ – время, с; q_v – источник массы вещества в результате химической реакции или физических превращений, кг/(м³·с); $\rho_{бет}, \rho_{жс}$ – плотности бетона и жидкости, соответственно, кг/м³; m – константа Генри, кг жидко-

сти/кг бетона; K_m – коэффициент, учитывающий характеристики фаз; $G_{бет}$ – масса бетонного резервуара, кг; $G_{жс}$ – масса жидкости в резервуаре, кг.

Решение задачи выполнялось методом преобразования Лапласа, т.е. исходная система уравнений отображалась в область комплексных чисел, в которых было получено решение системы, а затем произведен перевод решения в область оригиналов [3].

Решив систему уравнений (1)–(6), получаем выражения, позволяющие рассчитывать динамику и кинетику процесса коррозии первого вида цементных бетонов при наличии внутреннего источника массы в твердой фазе:

$$Z(\bar{x}, F_{O_m}) = \frac{Z_p(0)}{K_m + 1} - 2Bi_m \cdot Z_p(0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n \cdot \cos(\mu_n \bar{x})}{\psi'(Bi_m, K_m, \mu_n)} \cdot \exp(-\mu_n^2 F_{O_m}) + 2Po_m^* \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_n \bar{x}) \cdot [(\mu_n^2 - Bi_m \cdot K_m) \cdot \sin \mu_n - \mu_n \cdot Bi_m \cdot (\cos \mu_n - 1)]}{\mu_n^2 \cdot \psi'(Bi_m, K_m, \mu_n)} \cdot \exp(-\mu_n^2 F_{O_m}), \quad (7)$$

$$Z_{жс}(F_{O_m}) = Z_{жс}(0) + 2Bi_m \cdot K_m \cdot Z_p(0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n}{\psi'(Bi_m, K_m, \mu_n)} \cdot [\exp(-\mu_n^2 F_{O_m}) - 1] - 2Po_m^* \cdot K_m \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n \cdot [(\mu_n^2 - Bi_m \cdot K_m) \cdot \sin \mu_n - \mu_n \cdot Bi_m \cdot (\cos \mu_n - 1)]}{\mu_n^3 \cdot \psi'(Bi_m, K_m, \mu_n)} \cdot [\exp(-\mu_n^2 F_{O_m}) - 1]. \quad (8)$$

Некоторые результаты расчетов по полученным выражениям приведены на рисунках 1 и 2, которые показывают распределение безразмерных концентраций переносимого компонента при фиксированном значении массообменного числа Фурье и изменяющемся значении модифицированного критерия Померанцева. Отметим, что позиции 1, 2, 3 на этих рисунках соответствуют положительному значению модифицированного числа Померанцева (т.е. целевой компонент выделяется в объеме твердой фазы).

В то же время позиции 4, 5 характеризуют процесс, при котором происходит поглощение целевого компонента в объеме твердой фазы; этот случай не типичен для процессов коррозии первого вида, но наглядно иллюстрирует возможность разработанной математической модели.

Однако разработка математических моделей невозможна без четкого представления о механизме процес-

сов, экспериментальных данных, характеризующих влияние различных факторов на кинетику и динамику процессов и проверки достоверности методологии прогноза в натуральных условиях.

Изучение процесса массопереноса в процессах жидкостной коррозии цементных бетонов проводилось на образцах размером 3×3×3 см, которые состоят из плотно подогнанных друг к другу пластин размером 1×3×3 см. Боковые грани пластин, а также торцевая грань нижней пластины покрываются слоем битумно-полимерной мастики холодного отверждения. Изготовленные образцы в возрасте не менее 28 сут погружаются в жидкую среду объемом 1000 см³, откуда с периодичностью 14 сут отбираются пробы для титрования объемом 100 см³ [4].

Изучение состава образцов цементного камня после воздействия реакционной среды проводится методами дифференциально-термического анализа, инфракрас-

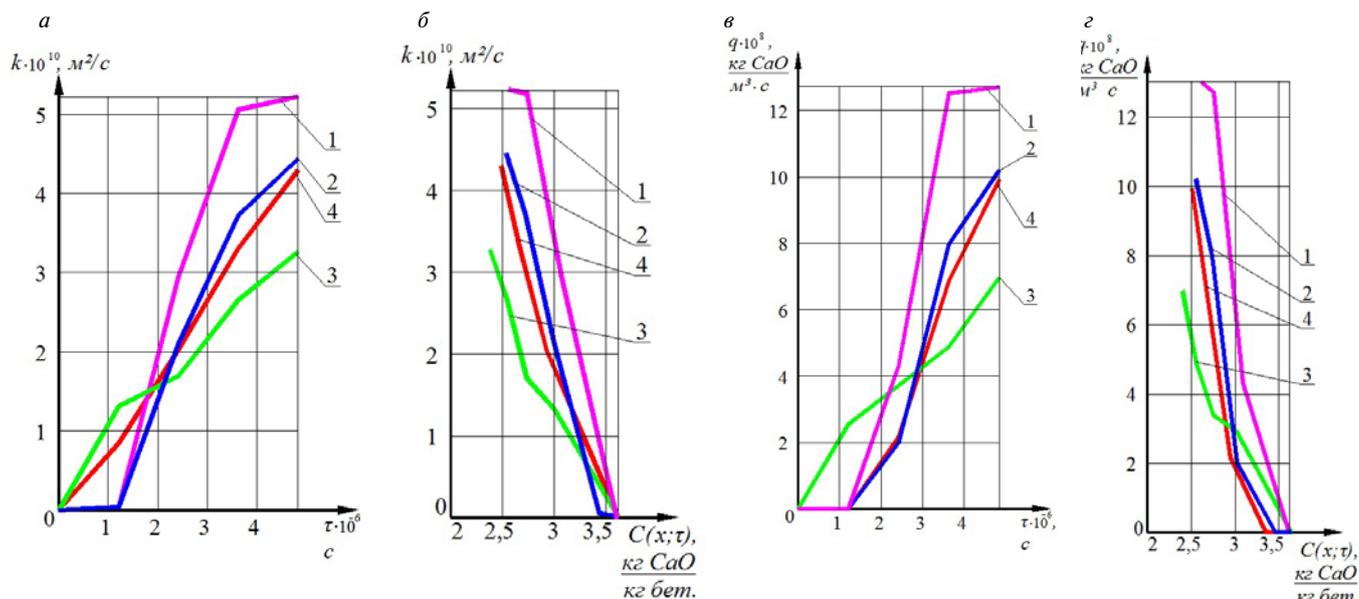


Рис. 4. а – график изменения коэффициента массопроводности, k от времени, τ ; б – график изменения коэффициента массопроводности, k от концентрации гидроксида кальция, C ; в – график изменения мощности источника массы, q_v от времени, τ ; г – график изменения мощности источника массы, q_v от концентрации гидроксида кальция, C (1 – в пластине № 1; 2 – в пластине № 2; 3 – в пластине № 3; 4 – по среднему значению концентрации)

ной Фурье-спектрометрии, комплексонометрии. По результатам проведения эксперимента получаем усредненные значения концентраций гидроксида кальция в каждой пластине в разные моменты времени. Однако знание только усредненных значений не всегда достаточно для проверки адекватности разработанной математической модели и для определения наиболее важных характеристик процесса массопереноса, таких как коэффициенты массопроводности и массоотдачи, мощность внутреннего источника массы.

В данной ситуации очень важно иметь хотя бы приближенный профиль концентраций переносимого компонента по толщине образца. Для построения такого профиля необходимо принять функцию распределения концентраций, которая удовлетворяла бы имеющимся экспериментальным данным (рис. 3).

В данном случае одним из вариантов решения будет принятие распределения концентраций переносимого компонента по координате в параболическом виде.

Запишем следующую зависимость концентрации $C(x, \tau_i)$ от координаты:

$$C(x, \tau_i) = a_{\tau_i} x^2 + b_{\tau_i} x + c_{\tau_i}. \quad (9)$$

Следовательно, теперь для построения профиля концентраций переносимого компонента в момент времени τ_i в зависимости от координаты x необходимо определить коэффициенты уравнения параболы a_{τ_i} , b_{τ_i} и c_{τ_i} .

Значение коэффициентов найдем из зависимости концентрации $C(x, \tau_i)$ от координаты, то есть по выражению (9), зная в момент времени τ_i значения концентраций переносимого компонента в точках x_1, x_2, x_3 как усредненные значения концентраций гидроксида кальция в каждой пластине. Математически это выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} C(x_1, \tau_i) = a_{\tau_i} x_1^2 + b_{\tau_i} x_1 + c_{\tau_i} \\ C(x_2, \tau_i) = a_{\tau_i} x_2^2 + b_{\tau_i} x_2 + c_{\tau_i} \\ C(x_3, \tau_i) = a_{\tau_i} x_3^2 + b_{\tau_i} x_3 + c_{\tau_i} \end{cases} \quad (10)$$

Система уравнений (10) при численно известных значениях $C(x_1, \tau_i)$, $C(x_2, \tau_i)$, $C(x_3, \tau_i)$ и x_1, x_2, x_3 представляет собой комплекс из трех линейных уравнений с тремя неизвестными (a_{τ_i} , b_{τ_i} , c_{τ_i}).

В ходе ряда не сложных математических преобразований получены следующие значения для определения коэффициентов функции параболы:

$$a_{\tau_i} = \frac{C(x_1, \tau_i) \cdot (x_3 - x_2) + C(x_2, \tau_i) \cdot (x_1 - x_3) + C(x_3, \tau_i) \cdot (x_2 - x_1)}{(x_3 - x_2)(x_1 - x_3)(x_1 - x_2)}, \quad (11)$$

$$b_{\tau_i} = \frac{C(x_1, \tau_i) - C(x_2, \tau_i) - a_{\tau_i} (x_1^2 - x_2^2)}{(x_1 - x_2)}, \quad (12)$$

$$c_{\tau_i} = C(x_1, \tau_i) - a_{\tau_i} x_1^2 - b_{\tau_i} x_1. \quad (13)$$

Рассчитанные по формулам (3–5) значения коэффициентов уравнения параболы позволяют использовать уравнение (9) для построения профиля концентраций переносимого компонента по толщине образца, полностью удовлетворяющего экспериментальным данным. Построенный по уравнению (9) профиль концентраций всегда можно сопоставить с теоретическим, являющимся результатом решения математической модели, для подтверждения ее адекватности.

По полученным экспериментальным данным возможно определение таких основных характеристик массопереноса, как коэффициент массопереноса и мощность внутреннего источника массы, опираясь на основное уравнение массопроводности:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(x, \tau) \cdot \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \right] + \frac{q_v(x, \tau)}{\rho_{бет}}. \quad (14)$$

Учитывая, что слагаемое в левой части уравнения массопроводности представляет собой производную первого порядка концентрации переносимого компонента по времени, заменяем:

$$\frac{\partial C(x_j, \tau_i)}{\partial \tau} = \frac{C(x_j, \tau_i) - C(x_j, \tau_{i-1})}{\Delta \tau}. \quad (15)$$

Для замены первого слагаемого правой части исходного уравнения, приближенно принимая в момент времени τ_i распределение концентрации по координате в виде параболы, воспользуемся уравнением (1) и найдем производную второго порядка от функции:

$$\frac{\partial C(x_j, \tau_i)}{\partial x} = 2a_{\tau_i} x_j + b_{\tau_i}, \quad \frac{\partial^2 C(x_j, \tau_i)}{\partial x^2} = 2a_{\tau_i}. \quad (16)$$

Перепишем уравнение (6) с учетом выражений (7) и (8) для моментов времени τ_i и τ_{i+1} :

$$\frac{C(x_j, \tau_i) - C(x_j, \tau_{i-1})}{\Delta \tau} = 2k(x_j, \tau_{i,i+1}) \cdot a_{\tau_i} + \frac{q_v(x_j, \tau_{i,i+1})}{\rho_{\text{бет}}}, \quad (17)$$

$$\frac{C(x_j, \tau_{i+1}) - C(x_j, \tau_i)}{\Delta \tau} = 2k(x_j, \tau_{i,i+1}) \cdot a_{\tau_{i+1}} + \frac{q_v(x_j, \tau_{i,i+1})}{\rho_{\text{бет}}}, \quad (18)$$

где: $k(x_j, \tau_{i,i+1})$, $q_v(x_j, \tau_{i,i+1})$ – коэффициент массопереноса, м²/с, и мощность внутреннего источника массы, кг СаО/(м³ с) соответственно, в промежуток времени от τ_i до τ_{i+1} .

Решив систему уравнений (9), (10) относительно $k(x_j, \tau_{i,i+1})$ и $q_v(x_j, \tau_{i,i+1})$ получаем следующие выражения:

$$k(x_j, \tau_{i,i+1}) = \frac{2C(x_j, \tau_i) - C(x_j, \tau_{i-1}) - C(x_j, \tau_{i+1})}{2\Delta \tau (a_{\tau_i} - a_{\tau_{i+1}})}, \quad (19)$$

$$q_v(x_j, \tau_{i,i+1}) = \rho_{\text{бет}} \cdot \frac{a_{\tau_i} [C(x_j, \tau_{i+1}) - C(x_j, \tau_i)] + a_{\tau_{i+1}} [C(x_j, \tau_{i-1}) - C(x_j, \tau_i)]}{\Delta \tau (a_{\tau_i} - a_{\tau_{i+1}})}. \quad (20)$$

Некоторые результаты расчетов по формулам (19) и (20) представлены на рис. 4, анализ графиков которого, показывает увеличение значений коэффициента массопереноса k и мощности объемного источника массы, q_v , что полностью согласуется с физическими представлениями о процессах, протекающих при коррозионном массопереносе.

Внедрение данной методики в процесс проектирования строительных конструкций позволит экономически обоснованно назначать средства защиты от коррозии и устанавливать оптимальные сроки их применения, рационально, с требуемой периодичностью проводить ремонтно-восстановительные работы и в конечном итоге определять время разрушения конструкции.

Ключевые слова: массоперенос, коррозия, внутренний источник массы, профиль концентраций.

Список литературы

1. Москвин В.М. Коррозия бетона. М.: Госстройиздат, 1952. 342 с.
2. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК ПресСто, 2010. 364 с.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970. 720 с.
4. Федосова Н.Л., Румянцева В.Е., Смелцов В.Л., Хрунов В.А. Костерин А.Я. Экспериментальные исследования процессов массопереноса при жидкостной коррозии цементных бетонов // Приволжский научный журнал. 2010. № 1. С. 39–45.



«Строительство:
анализ рынка и прогноз
до 2015 года»

13 сентября 2013 г.

Radisson Blu Brloruskaya Hotel,
Москва, Россия

Вступительная конференция
Восточно-Европейская Ассоциация Прогнозирования Строительства
Члены Ассоциации:



(Болгария, Россия, Румыния, Сербия, Словения, Турция, Украина)

Восточно-Европейская Ассоциация Прогнозирования Строительства (EECFA), основанная в 2012 г., является объединением 7 национальных исследовательских организаций, основанном для проведения исследований и прогнозирования развития строительного комплекса.

Проводимые членами EECFA исследования региональных рынков охватывают 18 сегментов строительства в соответствии с классификацией Eurostat. Исследования проводятся по уникальной методике с использованием единых подходов к обработке данных и построению прогнозной модели, что позволяет получить сопоставимые данные для разных стран.

Подробная информация о конференции, условия участия и регистрация на сайте
<http://eecfa.com>

Все вопросы по электронной почте gs-expert@eecfa.com
тел. +7 (499) 250-4874; +7 (916) 507-8377

УДК 624.012

Н.И. КАРПЕНКО, д-р техн. наук, академик РААСН, Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (Москва); В. А. ЕРЫШЕВ, д-р техн. наук, Е. В. ЛАТЫШЕВА, канд. техн. наук, Тольяттинский государственный университет (Самарская обл.)

К построению диаграмм деформирования бетона повторными нагрузками сжатия при постоянных уровнях напряжений

Большинство строительных конструкций в процессе эксплуатации подвергаются повторным воздействиям, при которых временная нагрузка периодически снимается и прикладывается вновь через определенный промежуток времени. При многократно повторных нагружениях исследуется влияние различных факторов на выносливость бетона при базовом числе 2 млн циклов, что примерно соответствует среднему количеству нагружений некоторых промышленных и транспортных железобетонных конструкций за время их эксплуатации. Периодичность многократно повторных (малоцикловых) нагружений гораздо меньше (до 50–100 циклов), однако они оказывают существенное влияние на изменение деформативных и прочностных свойств бетона, а их повторяемость приводит к накоплению деформаций в циклах.

Рассматривается восходящий участок криволинейной диаграммы бетона на сжатие (σh), который реализуется при испытании стандартных образцов-призм при осевом нагружении с постоянными скоростями роста напряжений (рис. 1) до разрушения ($\tilde{\sigma}_b, \tilde{\epsilon}_b$ – соответственно предельные напряжения и предельные относительные деформации в вершине диаграммы). В рамках модели кратковременного нагружения при центральной сжатии диаграмма деформирования бетона представляется в виде:

$$\tilde{\epsilon}_b = \tilde{\sigma}_b / (E_b \tilde{\nu}_b), \quad (1)$$

где $\tilde{\epsilon}_b, \tilde{\sigma}_b, E_b$ – соответственно относительные деформации, напряжения, начальный модуль упругости бетона; $\tilde{\nu}_b$ – коэффициент изменения секущего модуля ($E_b \tilde{\nu}_b$ – секущий модуль), методика вычисления которого представлена в [1]. Здесь и далее вводятся следующие обозначения: параметры с волной (\sim) соответствуют их значениям в вершине диаграммы на каждом цикле $\tilde{\epsilon}_b, \tilde{\sigma}_b, \tilde{\nu}_b$; параметры со стрелками: (\leftarrow) – при разгрузке, (\rightarrow) – при повторных нагружениях.

Выделим две группы кратковременных циклов одноосного сжатия, состоящие из ветви нагрузки до постоянного в каждом цикле уровня напряжений: уровня цикла ($\tilde{\sigma}_{b1} \leq 0,85\tilde{\sigma}_b$ и $\tilde{\sigma}_{b2} > 0,85\tilde{\sigma}_b$ – соответственно) и ветви полной разгрузки. В работе [2] установлено, что если $\sigma_b = \tilde{\sigma}_{b1} \leq 0,85\tilde{\sigma}_b$, призмы при многократно повторном нагружении не разрушались, а когда этот уровень превышался $\sigma_b = \tilde{\sigma}_{b2} > 0,85\tilde{\sigma}_b$, призмы разрушались при конечном числе циклов 7–32. Отметим следующие свойства циклических диаграмм при многократно повторных нагружениях, которые наблюдаются в экспериментальных исследованиях [3–5]: остаточные необратимые деформации при разгрузке и их увеличение при повторных нагружениях (ϵ_{b1}^0 – при напряжениях $\tilde{\sigma}_{b1}$ и ϵ_{b2}^0 – при напряжениях $\tilde{\sigma}_{b2}$); затухающий рост остаточных деформаций при полной разгрузке и деформаций в вершине циклов, например при $\tilde{\sigma}_{b1}$, – на низких и средних уровнях напряжений (при некотором количестве циклов $i = 1, 2, 3, \dots, N_c$ наступает стабилизация роста деформаций, ветви нагрузки и разгрузки образуют

замкнутую область с общими точками «н» и «с» в вершинах диаграмм); накопление остаточных деформаций и деформаций в вершинах циклов и разрушение бетона при ограниченном количестве циклов $i = 1, 2, 3, \dots, N_f$ – на высоких уровнях нагружения, например при $\tilde{\sigma}_{b2}$; ветви разгрузки имеют одностороннюю кривизну в сторону оси деформаций, напротив, кривизна ветвей нагрузки с ростом числа циклов нагружения изменяется от выпуклости к оси напряжений на первых циклах до выпуклости к оси деформаций.

В [1, 3–5] предлагалось описывать кривую ветви разгрузки и учитывать нелинейность путем подбора специальных функций, что приводило к усложнению расчетных зависимостей. Вместе с тем рассматривался и так называемый «лучевой метод», в котором ветви разгрузки и повторного нагружения представлялись отрезками прямых линий (секущими), соединяющими конечные точки в вершинах диаграмм и при полном снятии нагрузки в каждом цикле. Для каждого отрезка записываются связи между конечными приращениями напряжений $\Delta\sigma_b$ и деформаций $\Delta\epsilon_b$, отсчитываемых от начала отрезка. Установлено, что при уменьшении деформаций по линейному закону их значения отличаются от фактических в большей степени при разгрузке с высоких уровней напряжений, однако максимальное отклонение от опытных данных в середине пути разгрузки не превышает 6–7%, а с учетом трансформации по вогнутости эта разница на ветвях повторного нагружения еще меньше.

В развитии лучевого метода выделим первый цикл циклического нагружения (рис. 2, а), который включает нагрузку по криволинейному участку $00_{\Delta 1}$ исходной диаграммы « $\epsilon_b - \sigma_b$ » и полную разгрузку по линейному закону. На отрезке разгрузки $0_{\Delta 1} - 0_{\Delta 1}^0$ (ϵ_{b1}^0 – остаточные де-

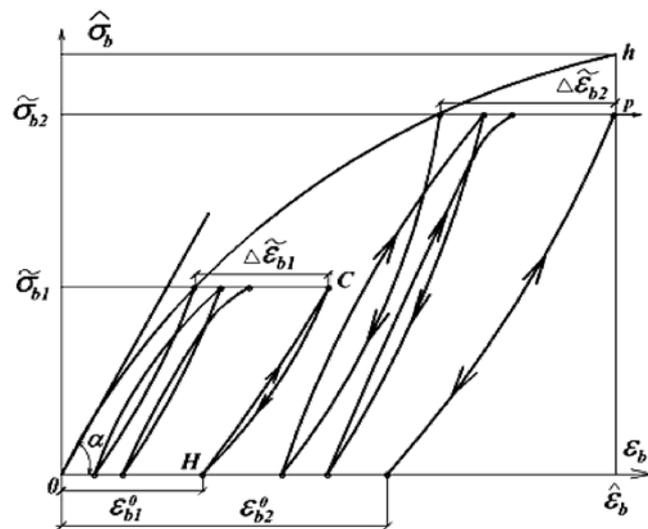


Рис. 1. Диаграммы деформирования бетона при циклических нагружениях с постоянными уровнями напряжения