

НАПРЯЖЕНИЯ В БЕТОНЕ НА СТАДИИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

Дорофеев В.С., Кобринец В.М. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

В работе [1] отмечается, что потенциальная способность к образованию зародышевой трещины закладывается в дисперсную систему на самых начальных этапах ее образования. В порядке дискуссии предлагается обсудить результаты по оценке растягивающих напряжений при твердении бетона.

«При твердении грубогетерогенных материалов возникает неравномерное поле деформаций, которое ведет к концентрации напряжений на границе включений и появлению зародышевых трещин» [1]. Чтобы изучить механизм и причины зарождения технологических трещин нужно сложную структуру бетона заменить простой расчетной моделью. Такой адекватной моделью может служить бесконечная плоскость с одним включением [1].

Насколько крупный заполнитель разной формы – керамзит, речной гравий или щебень с рваными краями адаптирован к такой модели, необходимо проверять экспериментально.

Рассмотрим слой единичной толщины, состоящий из матрицы и крупного заполнителя. Толщина заполнителя соответствует толщине слоя.

Проведем мысленный эксперимент.

Извлечем зерна крупного заполнителя из матрицы. Отверстия, где они находились, вследствие усадки уменьшатся. Затем вернем заполнитель на прежнее место.

Возникнут напряжения, как в матрице, так и в заполнителе (рис. 1).

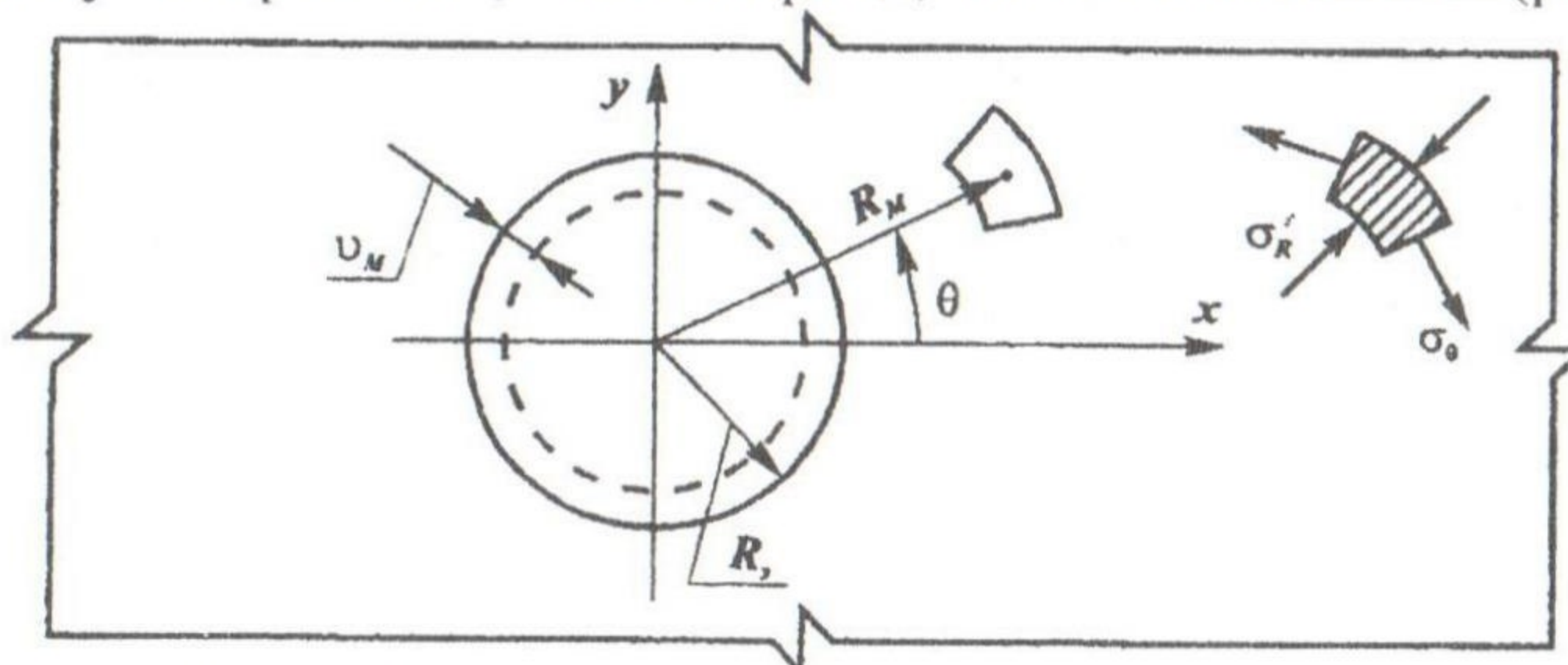


Рис. 1. Напряжения в матрице после усадки.

В матрице возникнут растягивающие напряжения σ_{Θ} и сжимающие σ_r . Для их определения воспользуемся решением аналогичной задачи для бесконечной пластинки с круговым отверстием, в которое вложена упругая круговая шайба, полученное Н.И. Мусхешвили [2]. Диаметр шайбы несколько отличается от диаметра отверстия. Матрица и крупный заполнитель оказывают друг на друга давление величиной q

$$q = \frac{4G_3 \cdot G_M \cdot \Delta v}{R_3 [2G_3 + G_M (c - 1)]}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент Пуассона; G – модуль сдвига; $c = (3 - 4\mu_3)$ – для плоской деформации (ПД), $c = (3 - 4\mu_3)(1 + 4\mu_3)$ – для плоского напряженного состояния (ПНС). Буква «3» относится к заполнителю, буква «М» - к матрице.

Напряжения в матрице:

для ПД

$$\sigma_{\Theta} = \frac{2G_3 \cdot G_M \cdot R_3 \cdot \Delta v}{G_3 \cdot R_M^2 + G_M \cdot R_3^2 (1 - 2\mu_3)}, \quad (2)$$

для ПНС

$$\sigma_{\Theta} = \frac{2G_3 \cdot G_M \cdot R_3 \cdot \Delta v}{G_3 \cdot R_M^2 + G_M \cdot R_3^2 (1 - 2\mu_3)(1 + \mu_3)}, \quad (3)$$

По мере удаления от заполнителя с увеличением R_M , напряжения σ_{Θ} уменьшаются и при $R_M \rightarrow \infty$ $\sigma_{\Theta} = 0$.

Максимального значения напряжения достигнут на поверхности контакта заполнителя с матрицей, когда $R_M = R_3 = R$

для ПД

$$\sigma_{\Theta} = \frac{2G_3 \cdot G_M \cdot \Delta v}{R [G_3 + G_M (1 - 2\mu_3)]}, \quad (4)$$

для ПНС

$$\sigma_{\Theta} = \frac{2G_3 \cdot G_M \cdot \Delta v}{R [G_3 + G_M (1 - \mu_3)(1 + \mu_3)]}, \quad (5)$$

При абсолютно жестком заполнителе на ранних стадиях твердения бетона такое допущение можно принять, напряжения для ПД и ПНС составляют

$$\sigma_{\Theta} = \frac{E_M \cdot R_3 v_M}{(1 + \mu_M) \cdot R_M^2}, \quad (6)$$

Величина v_M зависит от усадки

$$v_M = R_M \cdot \varepsilon_{sh}(t), \quad (7)$$

и в данном случае $R_M = R_3$.

Следовательно, на границе с крупным заполнителем

$$\sigma_{\Theta} = \frac{E_M \cdot \varepsilon_{sh}(t)}{(1 + \mu_M)}, \quad (8)$$

Из вышесказанного следует, что именно здесь напряжения могут достичь такого уровня, при котором возможно зарождение трещины. Но на поверхности заполнителя с матрицей возникают силы сцепления, а они сдерживают трещинообразование. Поскольку в бетоне зерна крупного заполнителя расположены достаточно близко, будет происходить наложение их напряженных полей, и это может привести к зарождению трещины в матрице между зернами крупного заполнителя.

Для количественной оценки напряженного состояния определим величину усадки бетона при 7 сутках влажного хранения для элемента сечением 40x40 см [3]

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh}^N(\infty, 7) \cdot \zeta_{1.sh} \cdot \zeta_{2.sh} \cdot \zeta_{3.sh} \cdot \quad (9)$$

При модуле открытой поверхности $M=10$ и влажности $W=70\%$
 $\varepsilon_{sh} = 1,9836 \cdot 10^{-4}$.

Напряжения на поверхности контакта

$$\sigma_{\Theta} = \frac{2[R_3 \cdot \varepsilon_{sh}(t) - v_3(t)] \cdot E_M(t)}{[2 + G_M(c-1)/G_3] \cdot R_3(1 + \mu_M)}. \quad (10)$$

Перемещения v для крупного заполнителя при усадочных напряжениях составляют

$$v_3 = \frac{\sigma_{\Theta}}{R_3} \cdot R_3. \quad (11)$$

Задача решается итерационно.

Для бетона В20, когда возможна плоская деформация

$$\sigma_{\Theta} = \frac{4,5763 \cdot 10^4 (1,9836 \cdot 10^{-4} \cdot R_3 - v_3)}{2,26664 \cdot R_3}, \quad (12)$$

для плоского напряженного состояния

$$\sigma_{\Theta} = \frac{4,5763 \cdot 10^4 (1,9836 \cdot 10^{-4} \cdot R_3 - v_3)}{2,35861 \cdot R_3}. \quad (13)$$

Вычисления начинаются полагая $\sigma_{\Theta} = 1$ МПа. Это значение подставляется в (10), а затем определяется σ_{Θ} по (11) или (12), и процесс повторяем до сходимости. Для бетона В20 при $R_3 = 1$ см это напряжение составляет $\sigma_{\Theta} = 2,9089$ МПа. Нормативное сопротивление растяжению составляет 1,4 МПа. Создается впечатление, что от усадки обязательно появятся трещины. Но это не совсем так. Дело даже не в

том, что усадка в начальный период меньше, чем та, при которой определяется σ_{Θ} .

При формировании напряжений от усадки сразу появится ползучесть бетона, а это приводит к релаксации напряжений

$$\sigma_{\Theta}(t) = E_M(t) \left[\varepsilon_{sh}(t) + \int_{\tau_1}^t \varepsilon_{sh}(\tau) R_M(t, \tau) d\tau \right]. \quad (14)$$

Точность вычислений зависит от вида резольвенты. Для молодого бетона процессы старения происходят весьма интенсивно. Такую задачу надо решать по наследственной теории старения. С определенным приближением представление о влиянии ползучести дает теория упругой наследственности.

$$\sigma_{\Theta}(t) = \sigma_{\Theta}(\infty) \left[1 - \frac{\zeta_{OM}}{1 + \zeta_{OM}} \left(1 - e^{-\gamma(1+\zeta)(t-\tau)} \right) \right]. \quad (15)$$

Предельная мера ползучести определяется при тех же условиях, что и усадка

$$C(\infty, 28) = C_{(\infty, 28)}^N \cdot \zeta_{2C} \cdot \zeta_{3C}. \quad (16)$$

$$C(\infty, 28) = 105 \cdot 0,76 \cdot 0,87 \cdot 10^6 = 69,426 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}.$$

Напряжения с учетом ползучести составляют $\sigma_{\Theta} = 1,0065$ МПа.

Если же учесть изменение усадки во времени [3]

$$\varepsilon_{sh}(t, t_W) = \varepsilon_{sh}(\infty, t_W) \left[1 - e^{-\alpha_{sh}(t-t_W)} \right], \quad (17)$$

для рассматриваемого бетона

$$\varepsilon_{sh}(t, 7) = 1,9836 \cdot 10^{-4} \cdot \left[1 - e^{-0,016(t-7)} \right],$$

в возрасте 28 суток $\varepsilon_{sh}(28, 7) = 0,5661 \cdot 10^{-4}$.

При определении меры ползучести [3]

$$C(t, \tau) = C(\infty, 28) \cdot \left(C + de^{-\gamma t_0} \right) \left[1 - \beta \cdot e^{-\gamma(t-t_0)} \right], \quad (18)$$

до 28 суток используется приведенный возраст t_0

$$t_0 = 14 \cdot (2 - \zeta_t) / (1 + \zeta_t), \quad (19)$$

$$\zeta_t = \left[1 - \frac{0,779 R_h^n(t_0)}{B} \right] \cdot (2 + 0,045B). \quad (20)$$

Если получается $t_0 < 7$ сут., принимается $t = 7$ сут. Коэффициентом β учитывается быстроснатекающая ползучесть.

$$C(t, \tau) = 69,426 \cdot 10^{-6} \left(0,5 + 0,942^{-0,016t_0} \right) \left[1 - 0,8^{-0,008(t-t_0)} \right]. \quad (21)$$

В возрасте 28 сут. $C(28,7) = 32,076 \cdot 10^{-6}$ МПа⁻¹. Параметры нелинейности упругих деформаций [3]

$$K_E = 1 + V_E \cdot \eta_{(t)}^m = 1 + 2\eta^{4,7},$$

деформаций ползучести

$$K_C = 1 + V_C \cdot \eta_{(t)}^c = 1 + 2,35\eta^4.$$

Для значения $\eta = 0,78$ напряжения $\sigma_{\Theta} = 0,6212$ МПа. Если учесть, что ползучесть при растяжении больше чем при сжатии и неравномерности усадки, то результат может быть увеличен вдвое $\sigma_{\Theta} = 1,2424$ МПа. Как видно, для идеально гладкого заполнителя при учете только линейных деформаций усадочные трещины не появляются. Но идеально гладкого заполнителя не существует. Поэтому возникнет концентрация напряжений. Этому вопросу посвящена статья И.Н.Слезингера и С.Я.Барской [4]. Шайба имеет отклонения от идеально круглой формы и характеризуется уравнением

$$R = R_0 \left[1 + \sum_{k=1}^n (h_k \cos \Theta + H_k \sin \Theta) \right], \quad (22)$$

где h_k, H_k - соответственно малые параметры.

Уравнением (22) задается чередование на поверхности шайбы гладких выступов и впадин. При этом, как отмечается в [4], концентрация напряжений может достигнуть 1,5-3 раза. Следует полагать, что для крупного заполнителя, например, для щебня концентрация напряжений, где имеются острые края, будет не меньше. В этом случае появление усадочных трещин вполне возможно.

Для гладкого заполнителя поверхность меньше и силы сцепления с матрицей меньше, но и концентрация напряжений меньше. Для заполнителя с рваной поверхностью силы сцепления больше и концентрация напряжений выше. Какой же должна быть оптимальная форма заполнителя?

При формировании технологической поврежденности следовало бы выяснить роль скорости деформаций усадки и ползучести на начальном этапе твердения бетона.

Вывод. Технологическая поврежденность зависит от деформаций усадки, ползучести, механических свойств и формы заполнителя.

Литература

1. В.С. Дорофеев, В.Н. Выровой. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций – Одесса: Город мастеров, 1998. – 168 с.
2. Н.И. Мусхелишвили. Некоторые задачи теории упругости. Издательство Академии наук СССР, Москва, 1935, Ленинград, - 453 с.
3. М.М. Застава, А.А. Агаев, Ю.А. Работин. Регулирование расчетной надежности железобетонных конструкций. – Одесса, 1996. – 194 с.
4. И.Н. Слезингер, С.Я. Барская. Влияние случайных отклонений формы и механических параметров на коэффициенты концентрации напряжений в пластине с впаянной круглой шайбой: Сб.: Статистика сооружений, Киев КИСИ, 1978. – с. 124 – 127.