

## КОЭФФИЦИЕНТЫ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ КОНТАКТА МАТРИЦЫ И ЗАПОЛНИТЕЛЯ

Докт. техн. наук, проф. ЛЕОНОВИЧ С. Н.

Белорусский национальный технический университет

Бетон как конгломерат обладает только одному ему присущими структурными особенностями, выявляемыми при сопоставлении со структурами цементного камня и цементно-песчаного раствора. В первую очередь, это новые объемы, заполненные жидкостью или газовой средой, по данным автора [1], возникающие на границе между цементным камнем и крупным заполнителем и расположенные обычно под его нижней гранью для вибрированного бетона или под гранью, обращенной к наружной поверхности изделия, для центрифугированного бетона (рис. 1–3). Возникновение этих полостей связано с отделением воды в результате седиментации в процессе формирования изделия. Вследствие этого в затвердевшем бетоне возникают «контактные поры», способные существенным образом повлиять на долговечность бетонов.

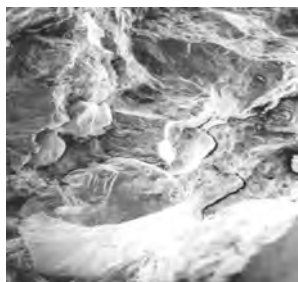


Рис. 1. Структура бетона (макрофото,  $\times 45$ )

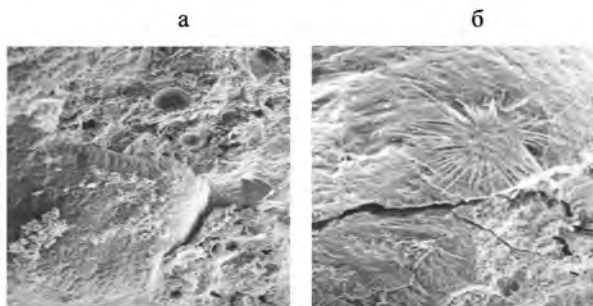


Рис. 2. Контактная зона с заполнителем в слоях бетона:  
а – макрофото,  $\times 700$ ; б – то же,  $\times 1500$



Рис. 3. Внутренний слой центрифугированного бетона (контактная зона) (макрофото,  $\times 700$ )

Кроме того, трещины, образовавшиеся в цементном камне бетона в процессе его твердения, будут существенно способствовать разрушению материала, подвергаемого циклическому замораживанию-оттаиванию (ЦЗО). При переходе воды в лед часть ее отжимается в трещины, расположенные на поверхности пор, или в радиальные трещины на контакте «негидратированное зерно клинкера – гидратированная масса». При этом в трещинах возникает гидростатическое давление, которое приводит к разрушению структуры материала. Это положение, подтвержденное рядом экспериментальных исследований, в том числе выполненных под руководством С. В. Шестоперова, не нашло, тем не менее, серьезного теоретического обоснования и не доведено до расчета [2].

Рассмотрим радиальные трещины (рис. 4) – трещины нормального отрыва, образовавшиеся из-за разности модулей упругости и коэффициентов линейного расширения зерна заполнителя и цементного камня, обозначенные III.

Коэффициент интенсивности напряжений определим по формуле

$$K_{I,t} = p\sqrt{\pi l} \frac{[1 - \alpha(r)]f\left(\frac{l}{R}\right)(M - R)^2}{(M - R)^2 - r^2} (1 + g), \quad (1)$$

где  $p$  – давление;

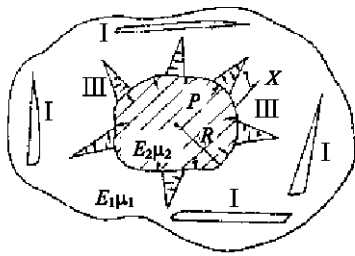


Рис. 4. Радиальные трещины возле заполнителя

$$\alpha(r) = 2(1 - \mu_1)r / \{r^2 + (1 - 2\mu_1)(M - R)^2 + [(M - R)^2 - r^2](1 - \mu_2) \times (M - R)E_1 / [(1 + \mu_1)(M - R - l)E_2]\};$$

$$g = \frac{(1,7 + 14\alpha_0)l}{M - 2R};$$

$R$  – средний радиус зерна заполнителя;  $M$  – расстояние между зернами;  $l$  – длина радиальной трещины;  $\mu_1, E_1$  – соответственно коэффициент Пуассона и модуль упругости Юнга матрицы;  $\mu_2, E_2$  – то же заполнителя;

$$r = l + R; \quad \alpha_0 = \frac{G_1}{G_2},$$

$G_1$  – модуль сдвига матрицы;  $G_2$  – то же заполнителя;

$$f\left(\frac{l}{R}\right) = 2,26 - \frac{l}{R}0,15.$$

Примем температурный перепад, характеристики матрицы и льда по [1]. Тогда коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве для радиальных трещин у зерна заполнителя при температуре  $-20^\circ\text{C}$

$$K_{I,t} = 2,48838 \cdot 10^{-11} \sqrt{\pi \cdot 0,04} \times$$

$$K_{I,t} = 2p(1 - \alpha)^{-1} \sqrt{\pi R \sin \theta} \{G_1(1 + X_2)[G_1(1 + X_2) + G_2(1 + X_1)] \times \times \varepsilon^{\beta(\theta + \pi)}\} / \{(G_1 + G_2 X_1)[G_2(1 + X_1) + 2G_1(1 + X_2)] - G_2(1 + X_1)(G_2 + G_1 X_2)(\cos \theta - 2\beta \sin \theta) \varepsilon^{-2\beta\theta}\}; \quad (3)$$

$$K_{II,t} = 2pR^\beta(1 + \alpha)^{-1} \sqrt{\pi R \sin \theta} \{G_1(1 + X_2)[G_1(1 + X_2)] + G_2(1 + X_1) \times \times (1 - 2\beta) \varepsilon^{\beta(\theta + \pi)} \varepsilon^{-\beta \ln 2 \sin \theta}\} / \{(G_1 + G_2 X_1)[G_2(1 + X_1) + 2G_1(1 + X_2)] - G_2(1 + X_1)(G_2 + G_1 X_2)(\cos \theta - 2\beta \sin \theta) \varepsilon^{-2\beta\theta}\}, \quad (4)$$

$$\times \frac{(1 - 6,2 \cdot 10^{-3}) \cdot 1,96 \cdot (0,06 - 0,02)^2}{(0,06 - 0,02)^2 - 0,06^2} \times (1 + 17,96) = 2,606 \cdot 10^{-10} \text{ МН/м}^{3/2}, \quad (2)$$

где

$$r = l + R = 0,04 + 0,02 = 0,06 \text{ м};$$

$$\alpha(r) = 6,2 \cdot 10^{-3};$$

$$f\left(\frac{l}{R}\right) = 2,26 - \frac{l}{R}0,15 = 1,96.$$

Известно, что в бетоне на границе заполнителя с цементно-песчаным раствором в процессе его испытания на морозостойкость могут создаваться радиальные или тангенциальные растягивающие или сжимающие напряжения.

Разрушение бетона при ЦЗО может происходить от радиальных и тангенциальных растягивающих напряжений. Наибольшая интенсивность морозной деструкции наблюдается [3] от радиальных растягивающих напряжений, которые могут быть инициаторами появления полостей на границе заполнителя с цементно-песчаным раствором, которые потом заполняются водой. При переходе воды в лед в образовавшихся полостях происходит интенсивное разрушение бетона.

Рассмотрим напряженное состояние в контактной трещине на границе крупного заполнителя и цементно-песчаного раствора при ЦЗО, обозначенной IV (рис. 5). Используем решение А. Перлмана и Дж. Си [4] при всестороннем растяжении пластины с круговым включением и трещиной на линии раздела сред. Для нашего случая коэффициенты интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге рассчитываются по формулам

где  $\beta = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \ln \alpha$ ;  $\alpha = \frac{G_1 + G_2 X_1}{G_2 + G_1 X_2}$ ;  $G = E/2(1 + \mu)$  –

модуль сдвига;  $E$  – модуль Юнга;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $X = 3 - 4\mu$  – для плоской деформации;  $X = (3 - \mu)/(1 + \mu)$  – для обобщенного плосконапряженного состояния.

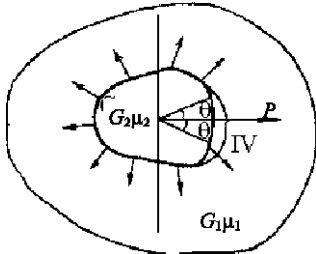


Рис. 5. Контактные трещины на границе «зерно заполнителя – матрица»

Задачи о дугообразных трещинах на контуре кругового включения, а также о трещинах на контуре жесткого эллиптического и квадратного включений рассмотрены в [5, 6], что дает возможность их использования при расчете напряженного состояния в бетоне при ЦЗО с различными видами заполнителей.

Коэффициент интенсивности напряжений от температурно-влажностного воздействия ( $-20^\circ\text{C}$ ) для околосерновых трещин составит

$$K_{I,t} = 2 \cdot 2,48838 \cdot 10^{-11} (1 + 0,52)^{-1} \times \sqrt{\pi \cdot 0,02 \sin \frac{5\pi}{6}} \{24000 \cdot (1 + 2,81) \times [24000 \cdot (1 + 2,81) + 12480 \cdot (1 + 2,08) \times \varepsilon^{3,5 \frac{5\pi}{6} + \pi}] / (24000 + 12480 \cdot 2,08) \times (5) \times [12480 \cdot (1 + 2,08) + 2 \cdot 24000 \cdot (1 + 2,81)] - 12480 \cdot (1 + 2,08)(12480 + 24000 \cdot 2,81) \times \left(\cos \frac{5\pi}{6} - 2 \cdot 2,48838 \cdot 10^{-11} \sin \frac{5\pi}{6}\right) \varepsilon^{-2,3,51 \frac{5\pi}{6}} = 9,368 \cdot 10^{-5} \text{ МН/М}^{3/2},$$

где

$$X_1 = \frac{3 - \mu_1}{1 + \mu_1} = \frac{3 - 0,3}{1 + 0,3} = 2,08;$$

$$X_2 = \frac{3 - \mu_2}{1 + \mu_2} = \frac{3 - 0,05}{1 + 0,05} = 2,81;$$

$$\beta = \frac{1}{2\pi} \ln \alpha = \frac{1}{2\pi} \ln 3,69 \cdot 10^9 = 3,51;$$

$$\alpha = (G_2 + G_1 X_2)(G_1 + G_2 X_1) = (24000 + 12480 \cdot 2,81) \times$$

$$\times (12480 + 24000 \cdot 2,08) = 3,69 \cdot 10^9.$$

В данной статье не ставилась задача расчета долговечности бетона и железобетона при ЦЗО. Вместе с тем представленный подход и иллюстрационные задачи убедительно демонстрируют значительные возможности механики разрушения в создании законченной теории морозной деструкции бетона и железобетона, базирующейся на особенностях структуры и текстуры.

## ВЫВОДЫ

Вычислительная механика разрушения позволяет оценить в терминах силовых и энергетических параметров кинетику морозной деструкции при любых сочетаниях структуры бетона и криогенных воздействий, что дает возможность расчета напряженно-деформированного состояния реальных железобетонных конструкций в реальных условиях эксплуатации (одностороннее замораживание, резкое охлаждение тонкостенной конструкции – термоморозостойкость, циклическое замораживание-оттаивание в условиях водонасыщения и т. д.).

Необходимы целенаправленные масштабные экспериментальные исследования о влиянии ЦЗО на силовые и энергетические характеристики бетонов различной структуры.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Леонович, С. Н.** Прочность конструкционных бетонов при циклическом замораживании-оттаивании с позиции механики разрушения / С. Н. Леонович. – Брест: БрГТУ, 2006. – 380 с.
2. **Леонович, С. Н.** Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения / С. Н. Леонович. – Минск: Тыздзень, 1999. – 266 с.
3. **Подвальный, А. М.** Физико-химическая механика – основа научных представлений о коррозии бетона и железобетона / А. М. Подвальный // Бетон и железобетон. – 2000. – № 5. – 23 с.
4. **Sih, G. C.** Hand book of stress intensity factors / G. C. Sih. – Bethlehem: Lehigh University Press, 1973. – Vol. 1. – 420 p.
5. **Панасюк, В. В.** Предельное равновесие хрупких тел с трещинами / В. В. Панасюк. – Киев: Наук. думка, 1968. – 246 с.
6. **Черепанов, Г. П.** Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

Поступила 19.10.2009