

менно к диагоналям плиты. Предлагаемая методика расчета прогиба плит, опертых по контуру, при продавливании позволяет получать более точные результаты

при  $c/h_0=0,5...3,5$  при  $K=(7,63...0,9)(c/h_0)$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соломатов В. И., Выровой В. Н., Залесов А. С., Дорофеев В. С. Технологическая поврежденность компо-

зиционных строительных материалов и конструкций // Транспортное строительство. — 1990. — № 7. — С. 39—40.

2. Рекомендации по расчету плит перекрытий крупнопанельных зданий с учетом пространственной работы. — М.: ЦНИИЭП жилища, 1983. — 95 с.

УДК 624.012.35:620.191.33

Э. Г. ЕЛАГИН, канд. техн. наук (МИСИ)

## Расчет по раскрытию трещин при совместном действии изгибающего и крутящего моментов и продольной силы

В СНиП 2.03.01—84 отсутствуют рекомендации по определению ширины раскрытия трещин, возникающих от совместного действия изгиба с кручением. Автором рассмотрен сложный случай комбинированного силового воздействия, когда наряду с изгибающим  $M$  и крутящим  $T$  моментами к железобетонному элементу сплошного и пустотелого прямоугольного сечения приложена центрально растягивающая или сжимающая продольная сила  $N$ .

При действии кратковременных нагрузок по аналогии с оценкой ширины раскрытия трещин пластин [1] вместо  $\sigma_s/E_s$ ,  $\eta$ ,  $\mu$ ,  $d$  в формуле (144) норм примем  $\epsilon_{n,j}$ ;  $\eta_{red,j}$ ;  $\mu_{red}$ ;  $d_{red,j}$  [ $\epsilon_{n,j}$  — средняя деформация элемента в направлении, перпендикулярном к линии трещин; индекс  $red$  означает приведение характеристик поперечной и продольной арматуры к обобщенным значениям;  $j=1, 2, 3$  — точки оценки ширины раскрытия трещин, наклонных к продольной оси элемента (см. рисунок)].

Для нахождения  $\epsilon_{n,j}$  используют положения геометрической теории деформации в точке механики деформируемых сплошных сред. Сумма относительных деформаций по трем ортогональным направлениям инвариант к ортогональному преобразованию координатной системы, т. е.

$$\epsilon_{sw,j} + \epsilon_{sy,j} = \epsilon_{t,j} + \epsilon_{n,j},$$

где  $\epsilon_{sw,j}$ ,  $\epsilon_{sy,j}$  — средняя деформация хомутов и продольной арматуры;  $\epsilon_{t,j}$  — деформация бетона по лос между трещинами. В отличие от источника [1] здесь учитывают влияние  $\epsilon_{t,j}$  на  $a_{crc}$ , поскольку для рассматриваемого случая деформирования, как показали эксперименты [2, 3], оно оказа-

лось существенным. Также в отличие от источника [1] учтем сосредоточенное расположение продольных арматурных стержней. Значения  $\epsilon_{sy,j}$  и  $\epsilon_{sw,j}$  можно выразить через внешние усилия  $M$ ,  $T$  и  $N$  на основании положений [4],  $\epsilon_{t,j}$  принять по [1].

В результате получили зависимости для нахождения ширины раскрытия трещин

$$a_{crc} = \epsilon_{n,j} \delta \eta_{red,j} 20 \times \times (3,5 - 100 \mu_{red,j}) \sqrt[3]{d_{red,j}},$$

где

$$\begin{aligned} \epsilon_{n,1,3} &= M(n_5 z - n_8) + T(n_6 + n_5 n_3 z) + N[n_5 z(z - 0,5 h_1) - n_7]; \\ \epsilon_{n,2} &= M[n_5(z - 0,5 h_1) - n_1, 0,5 h_1] + \\ &+ T[n_5 n_3(z - 0,5 h_1) + (n_1 n_4 - n_2) \times \\ &\times 0,5 h_1 + n_9] + N[n_5(z - 0,5 h_1)^2 + n_1 \times \\ &\times 0,5 h_1^2 - n_{10}]; \\ n_1 &= \frac{\cos^2 \alpha_3 + \sin^2 \alpha_3}{A_b^2 z^2}; \\ n_2 &= \left( \frac{1}{E_{bn}} - \frac{1}{E_{bt}} \right) \frac{\sin \alpha_3 \cos \alpha_3}{W_{pb,t} z}; \\ n_3 &= \frac{\text{tg } \alpha_1}{2b_1 h_1} \left\{ \frac{h_1}{6} \left( b_1 + \frac{h_1}{6} \right) + \right. \\ &+ \left. \left( \frac{5}{6} h_1 - x_1 \right) \times \left[ b_1 + \frac{h_1}{3} + \right. \right. \\ &\left. \left. + \left( \frac{5}{6} h_1 - x_1 \right) \frac{\text{tg } \alpha_2}{\text{tg } \alpha_1} \right] \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_4 &= \frac{\text{tg } \alpha_1}{2b_1 h_1} \left[ \frac{b_1 x}{2} + \frac{h_1}{3} \left( \frac{h_1}{12} + \frac{x}{2} \right) + \right. \\ &+ \left. \frac{\text{tg } \alpha_2}{\text{tg } \alpha_1} \left( \frac{5}{6} h_1 - x_1 \right) \left( \frac{h}{2} + \frac{2h_1}{3} \right) \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_5 &= \frac{\psi_s}{E_s(A_s, red z^2 + k_s z)}; \\ n_6 &= \frac{\left( \frac{h_1}{3} + b_1 \right) \psi_{sw} 10,4}{A} + \end{aligned}$$

$$+ \frac{1,6 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1}{v_{crc,1} E_b W_{pl,t}};$$

$$A = b_1 h_1 E_{sw} [f_{sw} \left( \frac{h_1}{3} + b_1 \right) \text{tg } \alpha_1 + k_{sw}];$$

$$n_7 = \frac{\sin^2 \alpha_3}{E_b A_{red}}; \quad n_8 = \frac{0,5 h_1 \sin^2 \alpha_1}{I_{red} E_b};$$

$$\begin{aligned} n_9 &= \frac{\psi_{sw} 20,75}{b_1 h_1 E_{sw} f_{sw} \text{tg } \alpha_2} + \frac{3 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{v_{crc,2} E_b W_{pl,t}}; \\ n_{10} &= \frac{\sin^2 \alpha_2}{E_b A_{red}}; \end{aligned}$$

$\delta=1, 2$ ;  $\alpha_j$  — угол наклона трещин к плоскости поперечного сечения элемента;  $E'_{bn}$ ,  $E'_{bt}$  — модули деформаций бетона сжатой зоны перпендикулярно и вдоль оси ортотропии;  $W_{pb,t}$  — пластический момент сопротивления при кручении;  $k_s$ ,  $k_{sw}$  — составляющие, учитывающие действие касательных усилий в стержнях продольной и поперечной арматуры в трещине;  $A'_b$  — приведенная площадь сжатой зоны бетона в плоскости поперечного сечения элемента;  $x_1 = x - \frac{h-h_1}{2}$ ;  $\psi_s$ ,

$\psi_{sw,j}$  — коэффициенты, учитывающие работу растянутого бетона на участках с трещинами для растянутой от изгиба продольной арматуры и хомутов;  $v_{crc,j}$  — отношение модуля деформаций сжатого бетона на участках между наклонными к продольной оси трещинами к начальному модулю упругости бетона;

$$A_{s, red} = \frac{h_s}{h_1}; \quad f_{sw} = \frac{A_{sw}(b_{sw} + h_{sw})}{S(b_1 + h_1)};$$

$$f_{s, max} = \frac{1,5 A_{s, red}}{h_1 + b_1};$$

индексы  $sw$  и  $s$  относятся к поперечной и продольной арматуре;

$$f_{s, red} = f_{sw} \sin^2 \alpha_j + f_{s, max} \cos^2 \alpha_j \beta_j;$$

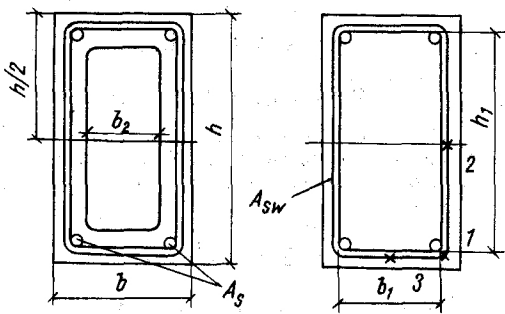
$$\mu_{red,i} = \frac{2f_{s, red}}{b - b_2} \leq 0,02;$$

$$\eta_{red,j} = \frac{\eta_{sw} f_{sw} \sin^2 \alpha_j}{f_{s, red,j}} + \frac{\eta_{fs, max} \cos^2 \alpha_j \beta_j}{f_{s, red,j}};$$

$$d_{red,j} = \frac{d_{sw} f_{sw} \sin^2 \alpha_j}{f_{s, red,j}} + \frac{d_{fs, max} \cos^2 \alpha_j \beta_j}{f_{s, red}};$$

$\beta_j$  — коэффициент, учитывающий сосредоточенное расположение стержней продольной арматуры;  $\beta_3=0,25$ ;  $\beta_2=1$ ;  $\alpha_j$  — угол наклона трещины к плоскости поперечного сечения элемента:

$$\text{tg } 2\alpha_j = \frac{6\tau}{\sigma_{by,j} - \sigma_{bx,j}};$$



Геометрические параметры поперечных сечений и точки вычисления ширины раскрытия трещин

$$\begin{aligned} & \times \frac{(3,5 - 100\mu_s)}{s(h_1 - x_1)} \times (\operatorname{tg} \alpha_1 [b_1 z (h_1 - x_1) + \\ & + \frac{h_1}{3} (z - \frac{h_1}{12}) (\frac{11}{12} h_1 - x_1)] + \\ & + \operatorname{tg} \alpha_2 (\frac{5}{6} h_1 - 2x_1)) \frac{5}{6} h_1 (z - \frac{7}{12} h_1 + \\ & + x_1) \}; \end{aligned}$$

$$k_{sw} = \frac{0,2d_s^2 \eta_{sw} \sqrt{10d_{sw}} (3,5 - 100\mu_s)}{4 \sqrt{\left(\frac{E_{sw}}{E_b}\right)^3 d_s}}$$

$d_{sw}$ ,  $d_s$  — диаметры хомутов и стержней продольной арматуры, см.

Высоту сжатой зоны  $x$  и расстояние между равнодействующими усилий в сжатой зоне над трещиной и в растянутой продольной арматуре  $z$  определяют согласно указаниям п. 4.28 СНиПа с увеличением изгибающего момента  $M$  на приращение момента  $\Delta M$ .  $\Delta M = Tn_3$  представляет момент от усилий в ветвях хомутов у вертикальных граней элемента и касательных усилий в продольной арматуре; момент образования трещин  $T_{cr,j}$  вычисляют по рекомендациям [5].

Было проведено сравнение данных опыта [2, 3] по раскрытию трещин с вычисленными значениями  $a_{cr,c}$ . 35 опытных балок с размерами поперечного сечения  $20 \times 36$  см, с напрягаемой и ненапрягаемой арматурой испытали

$\tau$ ,  $\sigma_{by,j}$  — касательные и нормальные напряжения в бетоне в момент образования трещин;  $\sigma_{bx,j}$  — напряжения в бетоне от усадки;  $\psi_{sw,j} = 1,15 - \psi_{ls} \Phi_{mi} \leq 1$  поскольку в данном случае поперечная арматура ненапрягаемая,  $\psi_s$  для продольной арматуры определяют согласно указаниям п. 4.29 СНиПа; принимают по табл. 36 норм, а

$$\Phi_{mi} = \frac{T_{cr,c,j}}{T - T_{cr,c,j} + T_{cr,c,j}}$$

$T$  — крутящий момент рассматриваемого уровня нагружения;  $T_{cr,c,j}$  — крутящий момент образования трещин;  $T_{cr,c,j}$  — то же без учета усилия  $N$ ;

$$v_{cr,c} = \left(\frac{T_{cr,c,j}}{T}\right)^2 v_1 + \frac{T_{cr,c,j}}{T} \alpha \mu;$$

$$\mu = \frac{f_{sw} \cos^2 \alpha_1}{b - b_2} + \frac{f_{si} \sin^2 \alpha_1}{b - b_2};$$

$$f_{s,1} = \frac{A_{s,red,1}}{b_1}; \quad f_{s,2} = \frac{A_{s,red,2}}{h_1};$$

$$v_1 = \frac{1}{3 - \frac{b}{b_1}};$$

$$k_s = \frac{0,05d_{sw}^2 \eta_s \sqrt{10d_s}}{4 \sqrt{\left(\frac{E_s}{E_b}\right)^3 d_{sw}}} \times$$

при  $T/M = 0,3; 0,6; \infty$ . Призматическая прочность бетона колебалась в пределах 16...39 МПа. Балки имели сплошное и пустотелое сечения, продольное армирование 4  $\varnothing 14$  и 18 А-III и Ат-VI. Поперечное армирование из стержней  $\varnothing 10$  и 12 А-I с шагом 4 и 8 см. Как правило, вычисленные значения  $a_{cr,c}$ , отличаются от опытных величин не более, чем на 10...15 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпенко Н. И. Теория деформирования железобетона с трещинами. — М.: Стройиздат, 1976. — 240 с.
2. Экспериментальные исследования деформативности железобетонных стержней прямоугольного сечения при совместном действии изгибающего и крутящего моментов / В. Н. Байков, Э. Г. Елагин, В. А. Вернигор, А. И. Туров. — М., 1985. С. 22—37. — Деп. во ВНИИИС Госстроя СССР, № 5891.
3. Елагин Э. Г., Туров А. И. Опытные перемещения железобетонных балок сплошного и пустотелого поперечного сечения, подверженных изгибу с кручением. — М., 1988. — С. 1—16. — Деп. во ВНИИИС Госстроя СССР, № 8086.
4. Елагин Э. Г., Антонова Л. Д. Единая расчетная модель по определению деформаций железобетонных стержней при совместном действии изгибающего и крутящего моментов // Железобетонные конструкции сельских зданий. — М.: ЦНИИЭПсельстрой, 1985. — С. 36—41.
5. Елагин Э. Г., Туров А. И. Сопротивление образованию трещин железобетонных балок сплошного и пустотелого прямоугольного сечения, подверженных одновременному действию изгиба с кручением. — М., 1988. — С. 17—24. — Деп. во ВНИИИС Госстроя СССР, № 8087.

### Вниманию специалистов!

НИИ строительства Эстонии предлагает новый прибор с микропроцессорной системой для контроля прочности, однородности, класса бетона по прочности на сжатие ВСМ (по ГОСТ 22690).

С запросами обращаться: 200001, г. Таллинн, бульвар Эстония, 7, тел. 45-41-58, факс 42-23-25, О. Ю. Саммал.