

*Мамонтов Ю.А. д-р техн. наук, профессор.  
Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауезова*

## ОБРАЗОВАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Образование конических, или так называемых главных, трещин является одной из причин развития других, более опасных разрушений. Это радиальные или продольные трещины. Появившись в торце, например, при отпуске натяжения арматуры, они развиваются вдоль нее, снижая несущую способность конструкций. Опасность их массового появления усугубляется расширением применения высокопрочной арматуры, переходом к тонкостенным сечениям и эксплуатацией конструкций в тяжелых климатических условиях.

Распор, или поперечные напряжения  $P_{\text{сц}}$  являются составной частью наравне с касательными напряжениями  $\tau_{\text{сц}}$  контактных усилий  $q(y)$  в зоне анкеровки. Обеспечить соосность передачи усилий  $q$  с осью арматуры не представляется возможным. Это и является причиной расклинивающего действия арматуры на бетон. В связи с тем что распор находится в определенной зависимости с касательными напряжениями сцепления  $\tau_{\text{сц}}$  ( $P_{\text{сц}} = \tau_{\text{сц}} \cdot \text{ctg}\varphi_k$ ) и, естественно, с контактными усилиями  $q(y)$ , законы их распределения по длине зоны анкеровки аналогичны. Следовательно, максимальным значениям  $q(y)$  и  $\tau_{\text{сц}}$  соответствуют максимальные значения  $P_{\text{сц}}$ .

Трудность в определении распора  $P_{\text{сц}}$  заключается в

неопределенности и изменчивости с нагрузкой угла  $\varphi_k$ . При определенном давлении выступов арматуры на бетонные консоли они разрушаются, уплотняются, образуя клинья. Этот клин спрессованного бетона как бы присоединен к выступу арматуры. Он-то и передает давление на окружающий бетон без трения, нормально к своей поверхности. Угол между траекторией сжимающих напряжений и осью арматуры, т.е. угол при вершине клина, принято обозначать через  $\varphi_k$ . При увеличении нагрузки угол  $\varphi_k$  постепенно уменьшается и при достижении некоторой величины  $\varphi_{kT}$  в зоне максимальной концентрации напряжений появляется поперечная трещина. Ее направление совпадает с направлением главных сжимающих напряжений. Согласно работе [1] в стадии упругой работы сцепления  $\text{ctg}\varphi_k = 0,3$ . Затем его значение увеличивается и достигает максимума. Резкое возрастание распора приводит к раскалыванию бетона, что сопровождается, естественно, падением поперечного давления. Величина контактных напряжений падает до своего постоянного значения, при этом  $\text{ctg}\varphi_k$  также уменьшается до стационарной величины, равной 0,5...0,7. При определенных смещениях арматуры относительно бетона  $g$  возникают максимальные по значению напряжения сцепления  $\tau_{\text{сц}}$  и здесь же на-

блюдается пик величины  $\sigma_{\phi_k}$ , косвенно характеризующий всплеск распорных напряжений  $P_{cu}$ .

Таким образом, повышение трещиностойкости концевых участков железобетонных элементов происходит через уменьшение максимальных значений местных растягивающих напряжений и распора, за счет равномерного распределения контактных напряжений и увеличения угла  $\phi_k$  путем повышения податливости и прочности на растяжение контактного слоя.

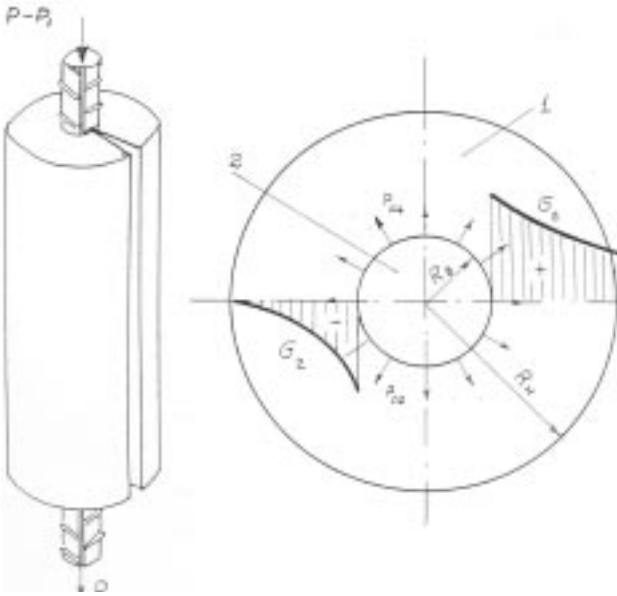


Рисунок 1. Расчетная схема для определения давления арматуры на бетон: 1 – бетонный образец, 2 – арматура

На рисунке 1 дана модель по расчету напряжения и деформаций, приводящих к раскалыванию бетона вдоль арматуры.

В основу расчета положена известная задача Ляме по определению напряжения в толстостенной трубе, нагруженной внутренним давлением.

Основные допущения:

- работа контактного слоя и окружающего бетона при взаимодействии с арматурой происходит в упругой стадии;
- справедлива гипотеза плоских сечений;
- известен закон распределения контактных напряжений и соотношения между касательными и нормальными напряжениями, т.е. между напряжениями сцепления  $\tau_{cu}$  и распором  $P_{cu}$ .

Так как наличие касательных напряжений сказывается только на величине осевых перемещений, действие их в дальнейшем не учитывается.

Бетонный цилиндр нагружен внутренним давлением  $p$ , создаваемым распором арматуры. Тогда радиальное напряжение находится из выражения

$$\sigma_r = \frac{pR_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \left(1 - \frac{R_H^2}{r^2}\right), \tag{1}$$

а окружное напряжение из выражения

$$\sigma_t = \frac{pR_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \left(1 + \frac{R_H^2}{r^2}\right), \tag{2}$$

где  $R_B$  – приведенный радиус арматурного стержня;  $R_H$  – внешний радиус бетонного цилиндра;  $r$  – текущий радиус, изменяющийся от  $R_B$  до  $R_H$ .

На рисунке 1 показаны эпюры изменения радиального и окружного напряжений в бетоне. Максимальные растягивающие напряжения действуют у внутренней поверхности бетонного цилиндра, т.е. в контактном слое:

$$\sigma_{t(r=R_B)} = p \frac{R_H^2 + R_B^2}{R_H^2 - R_B^2}. \tag{3}$$

Радиальное напряжение при этом равно  $-p$ . Эквивалентные напряжения по теории небольших касательных напряжений находим из выражения

$$\sigma_{kb} = p \frac{R_H^2 + R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} - (-p) = p \frac{2R_H^2}{R_H^2 - R_B^2}. \tag{4}$$

В результате деформирования под действием распора внутренний и внешний диаметры бетонного цилиндра увеличиваются на величину  $f$ .

$$f = \frac{1}{E(R_H^2 - R_B^2)} \left[ (1-\mu)p \cdot R_B^2 \cdot r + (1+\mu)p \frac{R_B^2 \cdot R_H^2}{r} \right], \tag{5}$$

где  $E$  и  $\mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона контактного слоя или бетона, соответственно.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что зарождаются продольные (радиальные) трещины на границе бетона с арматурой, т.е. в контактном слое, где действуют максимальные растягивающие напряжения. Поэтому увеличение прочности контактного слоя на растяжение и его предельной растяжимости способно увеличить трещиностойкость заделки.

Влияние толщины защитного слоя бетона в железобетонных конструкциях на вероятность образования продольных трещин можно проследить на изменениях  $\sigma_r$  и  $\sigma_t$  по мере уменьшения толщины цилиндра. Пусть

$$R_H = R_B + a, \tag{6}$$

где  $a$  – толщина защитного слоя (толщина цилиндра).

Тогда

$$\sigma_{t(r=R_B)} = D \frac{(R_B + a)^2 + R_B^2}{a(2R_B + a)}; \quad \sigma_{t(r=R_H)} = D \frac{2R_B^2}{a(2R_B + a)}. \tag{7}$$

Приведенные выражения дают основание предполагать, что с увеличением толщины защитного слоя значения наибольших напряжений уменьшаются. В случае бесконечности наружного радиуса выражение (7) примет вид

$$\sigma_r(t) = \mp D \frac{R_B^2}{r^2}. \tag{8}$$

Из этого следуют очень важные выводы:

– во-первых, напряжения убывают пропорционально квадрату расстояния от центра стержня, т.е. довольно быстро. Так, если принять  $r = 4R_b$ , то в области на этом расстоянии напряжения составят лишь 1/16 от максимальных;

– во-вторых, с увеличением диаметра арматуры при одном и том же поперечном давлении ее на бетон как радиальные, так и окружные растягивающие напряжения возрастают. Иными словами, с увеличением диаметра арматуры трещиностойкость снижается.

Таким образом, уменьшить уровень распора в зоне активного взаимодействия арматуры с бетоном и тем

самым снизить риск образования продольных трещин можно за счет:

- уменьшения концентрации контактных напряжений путем повышением податливости контактного слоя;
- увеличения толщины защитного слоя бетона;
- увеличения расстояния между арматурными стержнями;
- уменьшения диаметра арматуры.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Холмянский, М. М. Контакт арматуры с бетоном / М. М. Холмянский. – М.: Стройиздат, 1981. – 184 с.