

Тур В.В., д-р техн. наук, проф.; Драган А.В.
(БрГТУ, г. Брест)

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН В ЦЕНТРАЛЬНО РАСТЯНУТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Начиная со второй половины XX века и до наших дней железобетон является одним из наиболее массово применяемых строительных материалов. Подобная популярность требует постоянного совершенствования теории и методов расчета железобетонных конструкций. Несмотря на значительный объем научных исследований железобетона, накопленных к настоящему времени, существует ряд проблем, которые на некоторое время выпали из поля зрения отечественных исследователей. Одной из них является проблема трещинообразования в железобетонных конструкциях. Как известно, образование и чрезмерное раскрытие трещины существенно снижает эксплуатационную пригодность и долговечность конструкции, а в отдельных случаях может привести и к преждевременному выходу её из строя. В этой связи в настоящее время особую актуальность приобретают исследования направленные на изучение трещинообразования и разработку методик, позволяющих достоверно прогнозировать ширину раскрытия трещин на протяжении всего периода эксплуатации конструкции.

Предлагаемый подход к расчету трещинообразования железобетонных элементов основывается на следующих представлениях о механизме совместного сопротивления арматурой и растянутым бетоном действию внешних растягивающих усилий. В сечении с трещиной всё растягивающее усилие, действующее на железобетонный элемент, воспринимается исключительно арматурой ($\epsilon_s = \epsilon_{s\max}$, $\epsilon_{ct} = 0$). По мере приближения к центру элемента часть усилия, по средствам возникающих в контактном слое сил сцепления, передается от арматурного стержня на бетон, который постепенно включается в работу на растяжение и тем сам разгружает арматурный стержень («tension stiffening effect»). В некотором сечении деформации арматуры и бетона выравниваются ($\epsilon_s = \epsilon_{ct}$) и каждый из компонентов сечения (арматурный стержень и растянутый бетон) воспринимают часть внешнего растягивающего усилия, пропорциональную его жесткости. Таким образом, по длине железобетонного элемента можно выделить несколько характерных зон. К первой группе следует отнести зоны, расположенные непосредственно у сечения с трещиной – это так называемые зоны перераспределения усилий между арматурой и бетоном (зона 1). Ко

второй группе относятся центральные зоны (зона 2), в пределах которых наблюдается совместное деформирование арматуры и бетона (рис. 1).

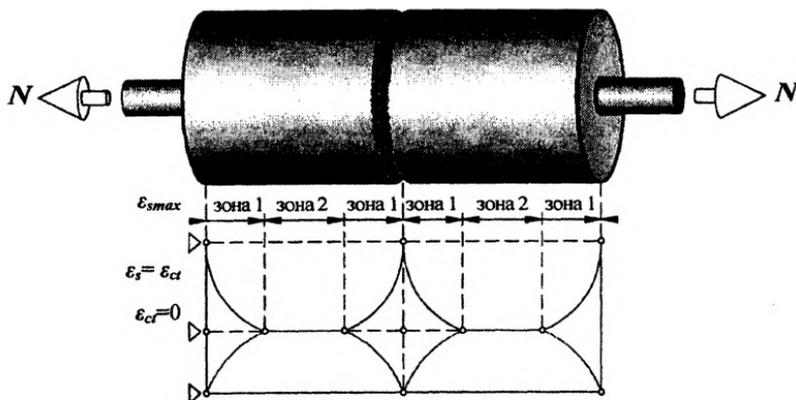


Рис. 1. Распределение относительных деформаций по длине железобетонного элемента с трещиной

На основании изложенных выше представлений о характере изменения напряженно-деформированного состояния по длине элемента можно предположить, что появление первой(ых) трещины(-н) должно произойти в пределах зоны синхронного деформирования арматуры и бетона на этапе нагружения, при котором величина относительных деформаций в указанной зоне достигнет значения равного предельной растяжимости бетона (ϵ_{ct}). Во всех сечениях указанной зоны имеет место одинаковое напряженно-деформированное состояние и деформации бетона принимают свои предельные значения. Следовательно, образование трещины в любом из сечений данной зоны равновероятно. В результате случайного характера распределения зерен заполнителя, первая трещина появится в наиболее «ослабленном» из рассматриваемых нами сечений. Сечение, в котором произошло образование первой трещины, является своего рода точкой отсчета, от которой происходит распространение трещин по длине железобетонного элемента. Первая стадия трещинообразования считается завершенной, если по длине элемента трещинами были выделены блоки, длины которых удовлетворяют следующему условию:

$$l_{n1} \leq L_i < 2l_{n1}, \quad (1)$$

где l_{n1} – длина зоны перераспределения усилий между арматурой и бетоном, соответствующая усилию для первой стадии трещинообразования (N_{cr1}).

По завершению первой стадии трещинообразования по длине всех выделенных трещинами блоков зоны перераспределения усилий между арматурой и бетоном «перехлестнуться». Подобное напряженно-деформированное состояние позволяет однозначно выделить сечения, в которых относительные деформации растянутого бетона примут наибольшее значение (по середине каждого из блоков). При увеличении внешней нагрузки наступление очередной стадии трещинообразования произойдет в тот момент, когда относительные деформации бетона в центральном сечении хотя бы одного из имеющихся блоков достигнут предельного значения ϵ_{cr1} . С ростом величины растягивающего усилия деление каждого из рассматриваемых блоков будет продолжаться до тех пор, пока не будет выделен такой блок, для которого величина усилия, требуемая для образования очередной трещины, будет превышать предельную величину усилия, которую способен воспринять железобетонный элемент. После того, как по длине рассматриваемого железобетонного элемента выделятся блоки, образование новых трещин в которых невозможно, он переходит в новую стадию – стадию «стабилизированного (установившегося) трещинообразования». Данная стадия характеризуется тем, что распределение трещин по длине элемента не изменяется (количество трещин остается постоянным), а дальнейший прирост внешнего растягивающего усилия вызывает увеличение ширины раскрытия образовавшихся трещин.

С момента завершения первой стадии трещинообразования по всей длине железобетонного элемента наблюдается разница в относительных деформациях арматуры (ϵ_s) и растянутого бетона (ϵ_{ct}). Различие в удлинениях двух материалов, работающих «совместно», на участке между двумя соседними трещинами, очевидно, равняется ширине раскрытия трещин на уровне арматуры. В общем виде выражение для вычисления ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси железобетонного элемента, может быть представлено как:

$$\int_{L_m} (\epsilon_s(x) - \epsilon_{ct}(x)) dx, \quad (2)$$

где $\epsilon_s(x)$ и $\epsilon_{ct}(x)$ – функции, описывающие распределения соответственно относительных деформаций арматуры и бетона.

L_m – средняя длина блока (среднее расстояние между трещинами).

Анализ теоретических и экспериментальных данных об изменении расстояния между трещинами на различных стадиях процесса трещинообразования (от первой стадии, где $L_m \in [l_{11}; 2l_{11}]$, до стадии установившегося трещинообразования, где $L_m \in [0,5l_{11}; l_{11}]$) показал, что при определении ширины раскрытия трещин в качестве среднего значения расстояния меж-

ду трещинами может быть принята длина зоны перераспределения (l_t), соответствующая усилию N_{cr1} .

На основании установленных закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния арматуры и растянутого бетона по длине железобетонного элемента был разработан расчетный итерационный алгоритм, позволяющий определить для заданного уровня нагружения протяженность длины зоны перераспределения (l_t), а также распределения относительных деформаций компонентов сечения (арматуры $\epsilon_s(x)$ и бетона $\epsilon_{cr}(x)$) по длине указанной зоны. Достоверность результатов расчета по предлагаемому алгоритму была подтверждена соответствующими экспериментальными данными. Все процедуры предлагаемого алгоритма подробно описаны в работе [1].

Анализ результатов расчета по прилагаемому алгоритму железобетонных элементов с различными геометрическими и прочностными параметрами показал, что для описания распределений относительных деформаций $\epsilon_s(x)$ и $\epsilon_{cr}(x)$ по длине зоны перераспределения могут использоваться функции вида:

$$\epsilon_s(x) = \frac{N}{A_s \cdot E_s} \cdot \left[a \cdot \left(\frac{x}{l_t} \right)^{\frac{1+\alpha}{1-\alpha}} + b \right]; \quad (3)$$

$$\epsilon_{cr}(x) = \frac{N}{A_s \cdot E_s} \cdot \left[1 - \left[a \cdot \left(\frac{x}{l_t} \right)^{\frac{1+\alpha}{1-\alpha}} + b \right] \right] \cdot \rho_{eff} \cdot \alpha_E$$

$$\epsilon_{cr}(x) = \frac{N}{A_s \cdot E_s} \cdot \left[1 - \left[a \cdot \left(\frac{x}{l_t} \right)^{\frac{1+\alpha}{1-\alpha}} + b \right] \right] \cdot \rho_{eff} \cdot \alpha_E, \quad (4)$$

где $N/A_s E_s$ – относительные деформации арматуры в сечении с трещиной; N – величина внешнего растягивающего усилия, Н; l_t – длина зоны перераспределения усилий между арматурой и бетоном, мм, соответствующая усилию N ; $\alpha = 0,4$ – безразмерный коэффициент; a, b – безразмерные коэффициенты, характеризующие соотношение жесткостей арматуры и бетона, вычисляемые согласно следующим выражениям:

$$a = \frac{1}{1 + \rho_{eff} \cdot \alpha_E}; \quad b = \frac{1}{1 + \frac{1}{\rho_{eff} \cdot \alpha_E}}. \quad (5)$$

Для определения длины зоны перераспределения усилий предлагается использовать следующее выражение:

$$l_1 = k_p \frac{N_{ult}}{\pi \cdot \varnothing_s \cdot (1 + \rho_{eff} \cdot \alpha_E)} \cdot \sqrt{\frac{N}{N_{ult}}}, \quad (6)$$

где k_p – эмпирико-аналитический коэффициент, характеризующий условия сцепления арматуры с бетоном, $\text{мм}^2/\text{Н}$; $N_{ult} = f_{yk} \cdot A_s$ – предельная величина внешнего растягивающего усилия, Н ; N – величина внешнего растягивающего усилия, Н ; ρ_{eff} – эффективный процент армирования; $\alpha_E = E_s/E_{cm}$ – соотношение модулей упругости;

Подставив выражения (3), (4) и (6) в (1), и выполнив ряд преобразований, выражение для определения средней ширины раскрытия трещин примет следующий вид:

$$w_m = \frac{N}{A_s \cdot E_s} \cdot l_1 \cdot (1 - \alpha) \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{L_m}{2 \cdot l_1} \right)^{\frac{2}{1 - \alpha}} \right]. \quad (7)$$

С учетом предположения, согласно которому средняя длина блока (среднее расстояние между трещинами) равняется длине зоны перераспределения для первой стадии трещинообразования $l_{11} = f(N_{cr1})$, выражение (7) может быть преобразовано к виду:

$$w_m = k_p \frac{N}{A_s \cdot E_s} \cdot \frac{f_{ctm}}{(1 + \rho_{eff} \cdot \alpha_E)} \cdot 0,375 \cdot \frac{\varnothing_s}{\rho_{eff}} \cdot k_1 \cdot \psi, \quad (8)$$

где $k_1 = 0,6$; ψ – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения относительных деформаций арматуры и растянутого бетона по длине зоны перераспределения, величину которого следует определять по формуле:

$$\psi = \sqrt{\beta \cdot \rho_{eff}} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{N_{cr}}{N}} \cdot \left(1 - \frac{1}{6} \sqrt{\frac{N_{cr}}{N}} \right) \right). \quad (9)$$

здесь $w_m = \beta = f_{yk} / f_{ctm}$ – отношение нормативного сопротивления арматуры к средней прочности бетона при осевом растяжении.

Сопоставление результатов, вычисленных на основании формулы (8), с соответствующими данными, полученными в ходе непосредственного испытания железобетонных элементов на осевое растяжение, а также с расчетными значениями, найденными по альтернативным методикам, показало их хорошее совпадение. Данный факт может служить основанием

для использования предлагаемого подхода для практических расчетов в качестве альтернативы к уже имеющимся расчетным методикам.

Литература

1. Драган, А.В. Аналитическая модель трещинообразования растянутых железобетонных элементов / А.В. Драган // Вестн. БГТУ. – 2008. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 29 – 35.

УДК 624.012.46:69.057.43

Рак Н.А., канд. техн. наук, доц.
(БНТУ, г. Минск)

О НОРМИРОВАНИИ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ПРИ МЕСТНОМ СЖАТИИ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ КОСВЕННЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Согласно действующим в Республике Беларусь нормам [1] (с учетом изменений № 1-3) расчет прочности элементов из тяжелого бетона, усиленного косвенным армированием, при местном сжатии должен выполняться из условия

$$N_{Sd} \leq f_{cud,eff} \cdot A_{c0}, \quad (1)$$

где N_{Sd} – равнодействующая расчетных усилий, действующих на площадь смятия A_{c0} ; $f_{cud,eff}$ – приведенное расчетное сопротивление бетона смятию, определяемое по формуле:

$$f_{cud,eff} = f_{cud} + \varphi_0 \cdot \rho_{xy} \cdot f_{yd,xy} \cdot \varphi_s, \text{ но не более } 2 \cdot f_{cud}. \quad (2)$$

Здесь f_{cud} – расчетное сопротивление бетона смятию; φ_0 – коэффициент эффективности косвенного армирования, определяемый по формуле:

$$\varphi_0 = \frac{1}{0,23 + \psi}, \quad (3)$$

здесь $\psi = \frac{\rho_{xy} \cdot f_{yd,xy}}{\alpha \cdot f_{cd} + 10}$; ($f_{yd,xy}$ и f_{cd} – в Н/мм²); $f_{yd,xy}$ – расчетное сопротивление арматуры сеток; ρ_{xy} – коэффициент армирования, равный

$$\rho_{xy} = \frac{n_x \cdot A_{sx} \cdot l_x + n_y \cdot A_{sy} \cdot l_y}{l_x \cdot l_y \cdot s_n},$$