

УДК 624.012.045

ОБРАЗОВАНИЕ НАКЛОННЫХ ТРЕЩИН ПЕРВЫХ ДВУХ ТИПОВ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Рассматривается определение полной картины трещинообразования веера наклонных трещин, прилегающего к грузу, что позволяет существенно уточнить действительное напряженно-деформированное состояние железобетонных составных конструкций в процессе нагружения. Предложена расчетная модель для определения усилий в продольной и поперечной арматуре в наклонных трещинах первого и второго типов для различных уровней трещинообразования и расчетная схема для определения деформаций растянутого бетона между этими трещинами.

The article deals with the definition of a complete picture of cracking fans inclined cracks adjacent to the load, which can significantly clarify the actual stress-strain state of reinforced concrete composite constructions in the process of loading. Proposed a computational model to determine forces in the longitudinal and transverse reinforcement in the inclined cracks of the first and second types for different levels of cracking, and computational the scheme for determining the deformation of concrete in tension between the cracks.

Ключевые слова: уровни трещинообразования, наклонные трещины, расчетная модель, расчетная схема, напряженно-деформированное состояние, железобетонные составные конструкции.

Характер трещинообразования в зонах совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил зависит от величин и соотношения M и Q , а также от геометрии сечения, прочностных и деформативных характеристик бетона, величины и ряда других факторов. В этих зонах, как известно [1], появляются трещины первого и второго типов.

При проведении исследований выявлен третий тип наклонных трещин, развивающихся в приопорной части вдоль сжатого столба образующейся арки, которые могут соединяться (при определенных геометрических параметрах и армировании) с трещинами, появляющимися на верхней грани железобетонной конструкции над аркой. Как подтверждают эксперименты, их слияние происходит практически мгновенно. Угол их наклона может существенно изменяться, образуя веер 2 [2]. Этот тип трещин развивается не от опоры к силе, а пробивается через сжатый столб образующейся арки, который может выходить на верхнюю грань железобетонной конструкции и приводить к ее разрушению.

Что касается существующих методов расчета образования наклонных трещин, то следует отметить, что нормативный метод ограничивается рассмотрением трещин лишь второго типа. Он основан на сравнении величин главных растягивающих напряжений на нейтральной оси элемента, полученных по формулам теории упругости, с пределом прочности бетона при растяжении. При этом не только не используется существенный резерв, заложенный в способности растянутого бетона к неупругому дефор-



Н.В. Усенко

инженер производственно-технического отдела
ООО Строительная компания
«Интергал-Буд», соискатель кафедры
компьютерных технологий
строительства Национального
авиационного университета, г. Киев

мированию, но и не учитывается реальная возможность развития неупругих деформаций в бетоне.

Существующие на сегодняшний день приемы расчета образования наклонных трещин по существу основываются, за редким исключением, также на предположениях об упругой работе бетона и сводятся, главным образом, к уточнению нормативного метода за счет учета ряда дополнительных факторов или введения поправочных эмпирических коэффициентов.

Для определения действительного напряженно-деформированного состояния железобетонных составных конструкций необходимо иметь полную картину трещинообразования в процессе нагружения. При этом важно располагать не только различными уровнями трещинообразования нормальных трещин, но и иметь полную картину вееров наклонных трещин. Определение расстояний и уровней появления наклонных трещин третьего типа рассмотрено в работе [2]. Что же касается последующих уровней трещинообразования наклонных трещин первого и второго типов, то вопрос остался открытым. Рассмотрим решение этой задачи.

Вначале необходимо нанести весь веер наклонных трещин первого и второго типов (рис. 1).

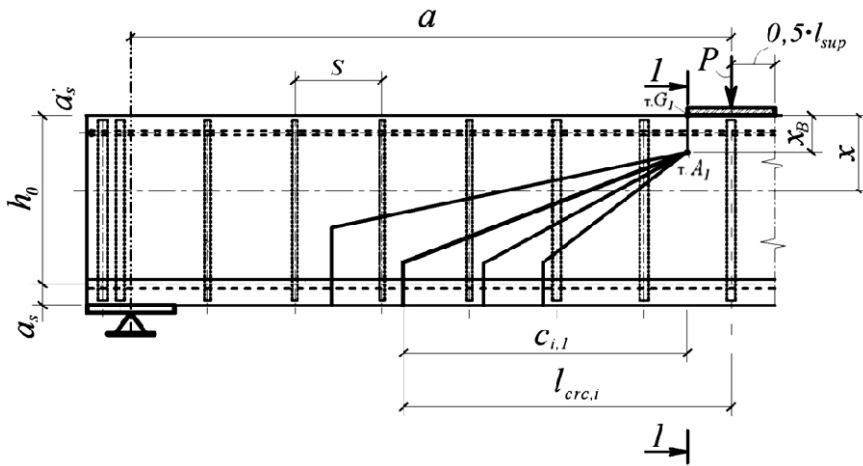


Рис. 1. Расчетная схема для определения параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций в зоне трещин, образующих веер 1, прилегающий к сосредоточенной силе (стадия, соответствующая определению ширины раскрытия трещин)

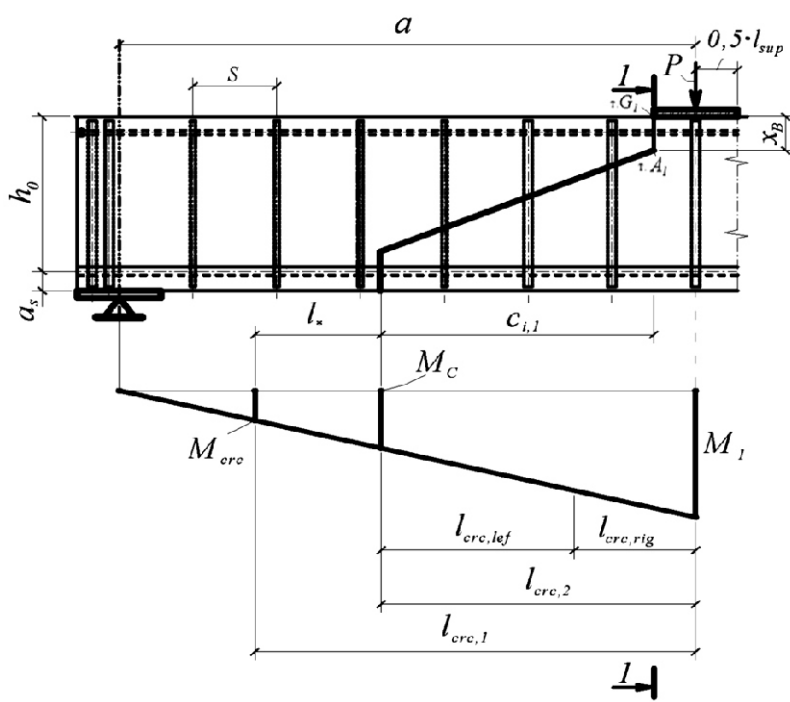


Рис. 2. К определению следующего уровня появления трещин

После определения опасной косо́й трещины по критерию образования или наибольшей ширины их раскрытия [2, 3] находим расстояние между трещинами первого уровня, $l_{crc,1}$, расположенными вдоль продольной арматуры (рис. 2). Оно определяется из следующего соотношения:

$$\frac{a}{a} \frac{M_I}{l_{crc,1} M_{crc}} \quad (1)$$

Отсюда следует, что

$$l_{crc,1} = \frac{a(M_I - M_{crc})}{M_I} \quad (2)$$

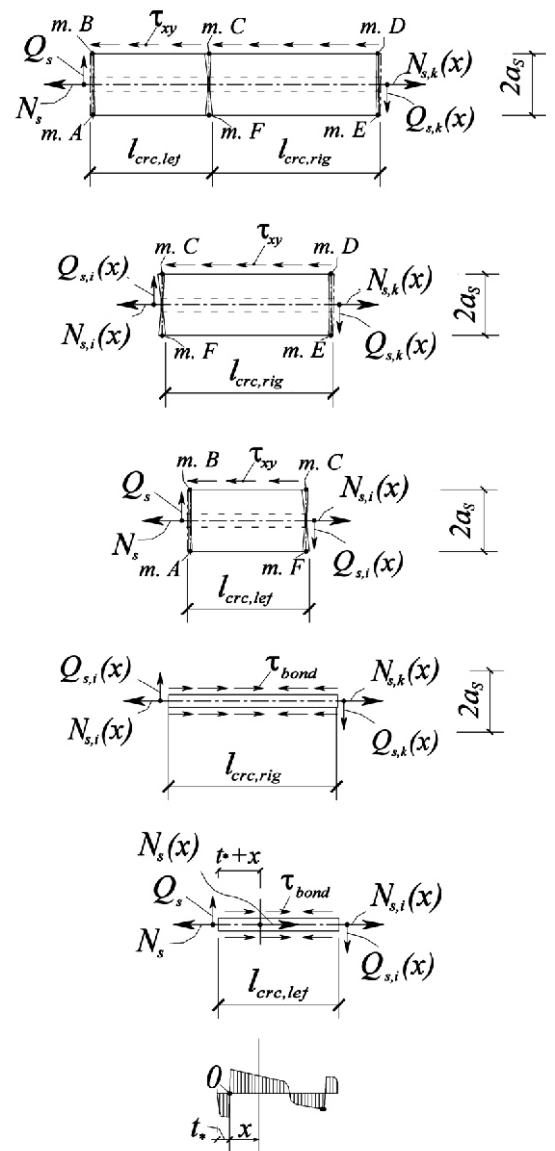


Рис. 3. К составлению условий равновесия для определения деформаций растянутого бетона между трещинами и равновесия продольного арматурного стержня для соответствующего уровня образования трещин

Для определения расстояния между трещинами второго уровня используется соотношение между изгибающим моментом в сечении I–I и в сечении с опасной наклонной трещиной, отыскиваемой по критерию максимальной ширины их раскрытия

$$\frac{a}{l_{crc,2}} = \frac{M_I}{M_C} \quad (3)$$

Отсюда следует, что

$$l_{crc,2} = \frac{a(M_I - M_C)}{M_I} \quad (4)$$

При этом, располагая напряжениями в продольной арматуре в сечении с опасной наклонной трещиной, представляется возможным также определить функциональное расстояние между трещинами l_{crc} [4].

$$l_{crc} = \frac{2(\ln B_4 - Bt)}{B} \quad (5)$$

где

$$B_4 = 1 + \frac{bt,c}{(K-1)B_3} + \frac{bt,u}{B_3(K-1)}; \quad (6)$$

$$B_3 = s + \frac{T}{E_s A_s} + \frac{bt,s}{\nu_b E_b} B_2;$$

$$B_2 = \frac{Q}{tB}; \quad (7)$$

B – параметр сцепления арматуры с бетоном, принимаемый равным

$$B = \frac{S_s G}{K A_s E_s}; \quad (8)$$

$$\frac{1}{K} = 1 + 2 \dots \quad (9)$$

В выражении (9) принято:

$$t = \frac{A_s E_b}{2}, \quad (10)$$

где $\frac{E_s}{E_b}; \frac{A_s}{bh_0}$.

Необходимо отметить, что для области действительных чисел на параметр B_4 накладываются следующие ограничения:

$$0 < B_4 < e^{Bt_b}. \quad (11)$$

Сравнивая функциональное и уровневое значение l_{crc} , выполняется анализ возможной реализации появления последующих уровней трещинообразования.

Анализ соотношения (5) показывает, что увеличение деформаций в арматуре при возрастающей нагрузке приводит к уменьшению расстояния между трещинами. При этом новый уровень трещинообразования соответствует уровню нагрузки, при котором соблюдается следующее неравенство:

$$l_{crc,i} < l_{crc,i-1}, \quad (12)$$

где справа от опасной наклонной трещины определяется из следующих соотношений (см. рис. 1):

$$\frac{l_{crc,lef}}{l_{crc,rig}} = \frac{M_1}{M_C} \quad (13)$$

$$\text{При этом } l_{crc,lef} = l_{crc,rig} = l_{crc,2}. \quad (14)$$

Двигаясь влево от опасной косоугольной трещины, сравниваем l_{crc} функциональное и l (см. рис. 2), и в случае необходимости используем аналогичные соотношения

$$\frac{l_{crc,lef}}{l_{crc,rig}} = \frac{M_C}{M_{crc}}; \quad (15)$$

$$l_{crc,lef} = l_{crc,rig} = l. \quad (16)$$

При этом за пределы участка, где $M < M_{crc}$, не выходим.

В случае наличия обрывов продольной арматуры на участке наклонных трещин, соотношения (13) и (15) несколько видоизменяются, а именно: кроме отношения моментов учитываются также отношения площадей продольной арматуры (до и после обрыва). В итоге, эти формулы примут вид:

$$\frac{l_{crc,lef}}{l_{crc,rig}} = \frac{M_1}{M_C} \frac{A_{s,rig}}{A_{s,lef}}; \quad (17)$$

$$\frac{l_{crc,lef}}{l_{crc,rig}} = \frac{M_C}{M_{crc}} \frac{A_{s,rig}}{A_{s,lef}}. \quad (18)$$

При появлении последующих уровней трещинообразования уравнения (17), (18) принимают вид:

$$\frac{l_{crc,lef,i}}{l_{crc,rig,i}} = \frac{M_{rig,i}}{M_{lef,i}} \frac{A_{s,rig,i}}{A_{s,lef,i}}; \quad (19)$$

$$\frac{l_{crc,lef,i}}{l_{crc,rig,i}} = \frac{M_{rig,i}}{M_{lef,i}} \frac{A_{s,rig,i}}{A_{s,lef,i}}. \quad (20)$$

Таким образом, трещинообразование продолжается до момента разрушения. При этом выделяется не один (как это принято в ряде из-

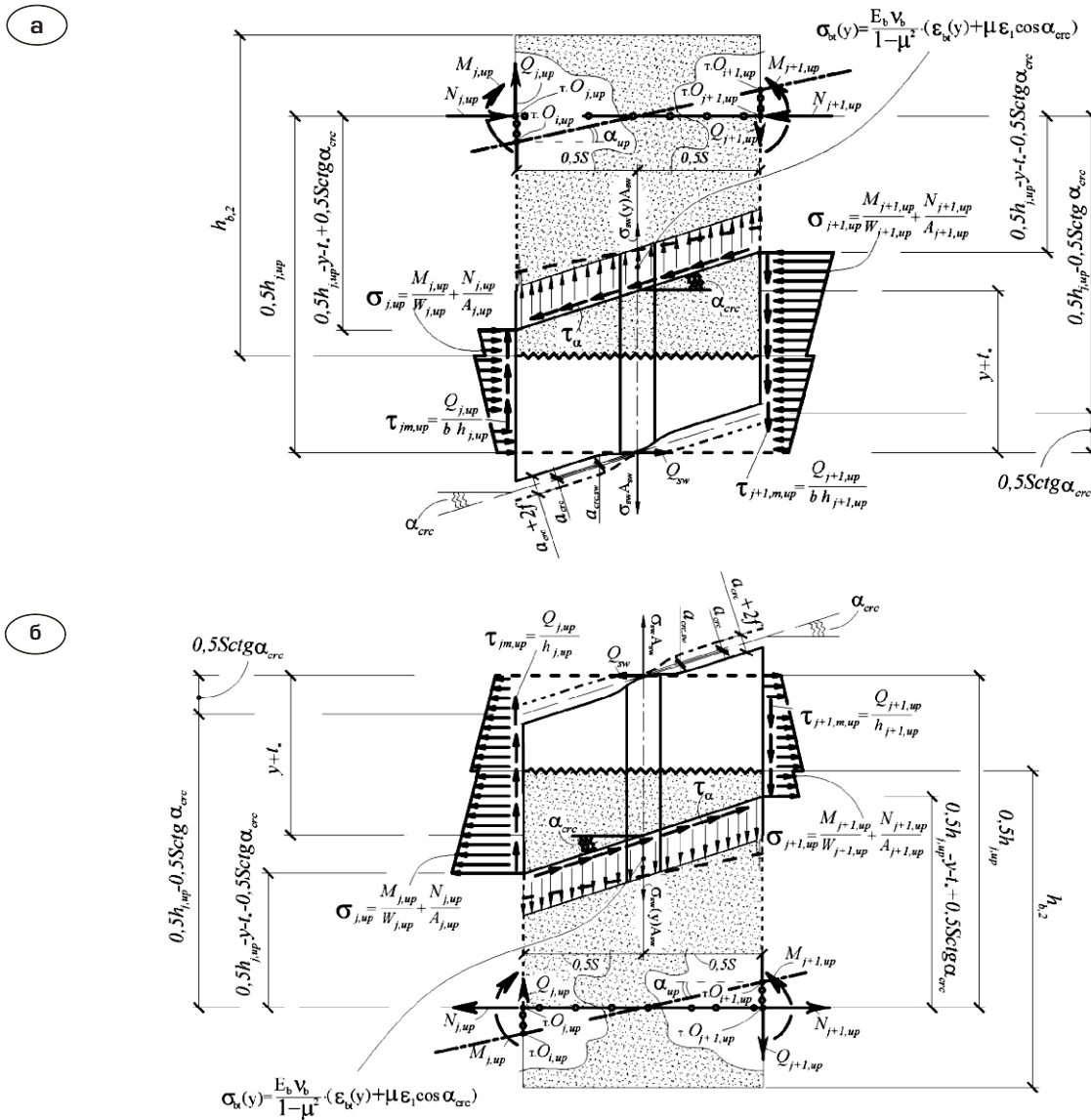


Рис. 4. Расчетная схема к определению деформаций растянутого бетона $b_t(y)$ между наклонными трещинами первого, второго и третьего типов в железобетонной составной конструкции:
а – случай 1; б – случай 2

вестных методик), а несколько уровней трещинообразования:

- $l_{crc} < l_{crc,1}$ трещин нет;
- $l_{crc,1} < l_{crc} < l_{crc,2}$ первый уровень;
- $l_{crc,2} < l_{crc} < l_{crc,3}$ второй уровень; . (21)
-
- $l_{crc} < 6t$ последний уровень.

Расстояние между трещинами является важнейшим параметром, необходимым для определения ширины раскрытия трещин в железобетонных конструкциях. Из физических соображений в формуле для определения ширины раскрытия трещин логично использовать уров-

невое (дискретное) значение l_{crc} в соответствии с неравенствами (12) и (21).

При наличии расстояний между трещинами вдоль продольной арматуры в пролете «среза» на различных уровнях их трещинообразования и усилиями в продольной арматуре в местах ее пересечения трещинами несложно определить напряжения в продольной арматуре s_x , а также деформации в бетоне $b_t(x)$ и относительные взаимные смещения арматуры и бетона $g(x)$ в произвольном сечении x [4]. Для составления соответствующих условий равновесия вырезаемый железобетонный элемент в окрестности трещины (рис. 3) в первом приближении может рассматриваться как центрально растянутый.

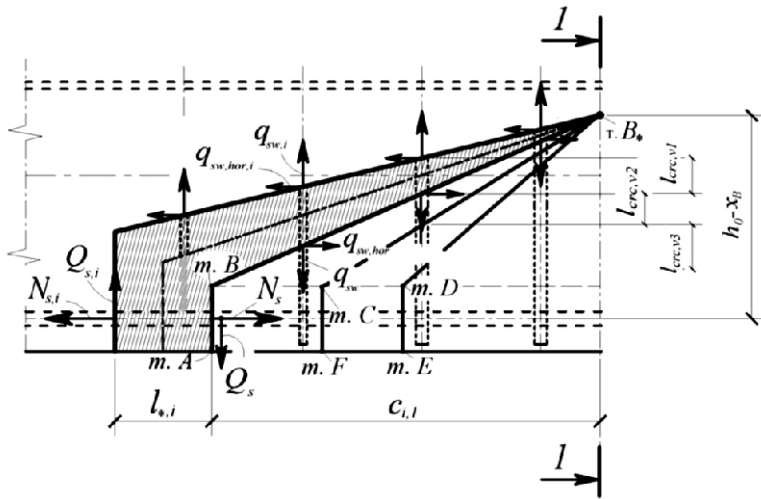


Рис. 5. Расчетная модель для определения усилий в продольной и поперечной арматуре в трещинах, образующих веер 1, прилегающий к сосредоточенной силе

Располагая уровнями трещинообразования вдоль продольной арматуры в пролете «среза», можно построить вероятный веер трещин первого и второго типов, прилегающий к сосредоточенной силе. Степень реализации трещин веера 1 (пересекут ли эти трещины поперечную арматуру, либо ее будет пересекать только опасная наклонная трещина) определяется напряженно-деформированным состоянием вдоль хомутов на основании расчетной схемы, приведенной на рис. 4, которая соответствует расчетной модели (рис. 5), из которой следует, что, располагая усилиями в продольной и поперечной арматуре в опасной наклонной трещине, несложно получить такие усилия и в соседней наклонной трещине веера 1. Для заштрихованной на рис. 5 арки составляются уравнения равновесия моментов относительно точки B ($M_B = 0$) и уравнения равновесия проекций всех сил на ось OY ($OY = 0$):

$$N_{s,i}(h_0 - x_B) - N_s(h_0 - x_B) - Q_{s,i}(l_{,i} - c_{i,l}) - Q_s c_{i,l} - q_{sw,i} \cdot 0,5(l_{,i} - c_{i,l})^2 - q_{sw,hor} \cdot 0,5c_{i,l}^2 = 0; \quad (22)$$

$$q_{sw,i,hor} \cdot 0,5(l_{,i} - c_{i,l})^2 - q_{sw,hor} \cdot 0,5c_{i,l}^2 = 0; \quad (23)$$

В этих уравнениях неизвестными являются $N_{s,i}$ и $q_{sw,i}$. При этом $Q_{s,i}$ равняется $0,2N_{s,i}$, а $q_{sw,i,hor} = 0,2q_{sw,i}$.

Следует отметить, что в первом приближении при составлении соответствующих условий равновесия вырезаемый железобетонный

элемент в окрестности трещины может рассматриваться как центрально растянутый стержень.

В рассматриваемой расчетной модели в точке B безусловно созданы идеализированные условия (предположив, что площадь бетона в этой точке стремится к нулю). Однако, если даже положить, что эта площадь имеет место и в точке B появится шарнирно-неподвижная опора с соответствующими реакциями N_B и Q_B , то на моментном уравнении (22) это никак не отразится, а в уравнение проекций (23) войдет лишь Q_B . При этом учитывая, что поперечная сила в сечении I-I распределяется большей своей частью над и под наклонной трещиной, то ее часть, прилегающая к окрестности точки B , будет весьма незначительной, что вполне оправдывает принятую расчетную модель на рис. 5.

Последовательно перемещаясь от одной трещины к другой, используемая расчетная модель позволяет определить усилия в продольной и поперечной арматуре в любой трещине из веера 1 из уравнений, аналогичных (21) и (22).

В итоге представляется возможным получение полного напряженно-деформированного состояния и картины трещинообразования с учетом их истории (количество уровней трещинообразования) в пролете «среза» железобетонных составных конструкций.

- [1] Гольшев А.Б. Сопротивление железобетона: монография / А.Б. Гольшев, В.И. Колчунов. – К.: Основа, 2009. – 432 с.
- [2] К определению деформаций растянутого бетона для расчета трещиностойкости железобетонных конструкций по наклонным сечениям / [Х.З. Баширов, А.А. Дородных, Вл.И. Колчунов, И.А. Яковенко, Н.В. Усенко] // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 6(245). – С. 2–7.
- [3] Усенко Н.В. Образование наклонных трещин третьего типа в железобетонных составных конструкциях / Н.В. Усенко, И.А. Яковенко, В. И. Колчунов // Будівництво України. – 2013. – № 2. – С. 24–28.
- [4] Колчунов В.И. Разработка двухконсольного элемента механики разрушения для расчета ширины раскрытия трещин железобетонных конструкций / В.И. Колчунов, И.А. Яковенко // Вестник гражданских инженеров. – Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2009. – № 4(21). – С. 160–163.

Надійшла 28.11.2013 р.