УДК 69.07

Корчагин О.П., кандидат технических наук, доцент, Набережночелнинский институт ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»;
Зонина С.В., старший преподаватель, Набережночелнинский институт ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

О СПЕЦИФИКЕ РАСЧЁТОВ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО НАКЛОННЫМ СЕЧЕНИЯМ.

Аннотация: в статье предлагается метод расчёта по наклонному сечению изгибаемых железобетонных элементов, обещающий экономию поперечной арматуры вследствие учёта работы продольной арматуры с пониженным значением расчётного сопротивления и при уточнённом значении поперечной силы в сечении.

Ключевые слова: прочность, наклонные сечения, поперечная сила, действие момента, опасное загружение, уравнение равновесия.

В изгибаемых железобетонных элементах рассматривается два вида разрушений: по нормальному (в середине пролётной части элемента) и наклонному (в приопорной зоне элемента) сечениям см рис.1, поэтому расчёты традиционно ведут соответственно по нормальному и наклонному сечениям.

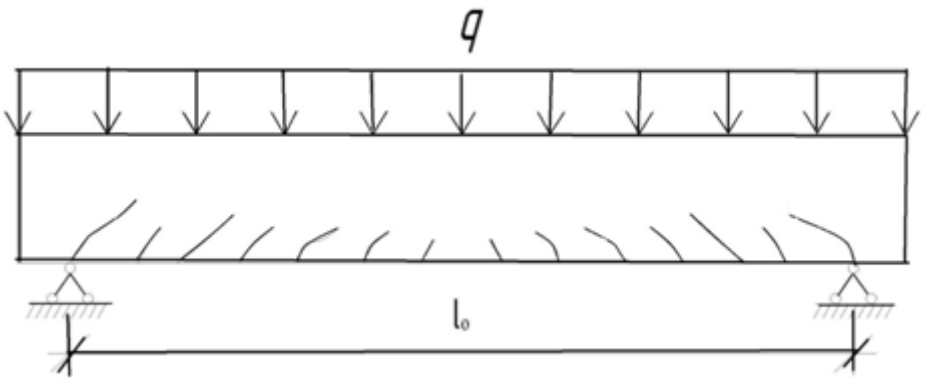

Рис. 1. Схема образования трещин в изгибаемом элементе при действии равномерно распределённой нагрузки.

В современном СП 63.13330.2012 [1] рекомендуется вести расчёт прочности ж/б элементов на основе модели наклонных сечений.

Расчётные сечения выведены из схем разрушения, наблюдаемых при изгибе балок, испытанных в лабораторных и натурных условиях. Расчёт по нормальному сечению на действие изгибающего момента предполагает одну расчётную модель, где действует максимальный изгибающий момент M_{max}. В то же время расчёт по наклонным сечениям предполагает три модели. Для обеспечения прочности элемента должны выполняться следующие условия прочности:

1) по полосе между наклонными сечениями (наклонная сжатая полоса между двумя соседними трещинами) рис.2;

2) по наклонным сечениям на действие поперечных сил рис.3;

3) по наклонным сечениям на действие изгибающих моментов рис.4.

Нас заинтересовала тема развития наклонных трещин и методика их расчёта на современном этапе.

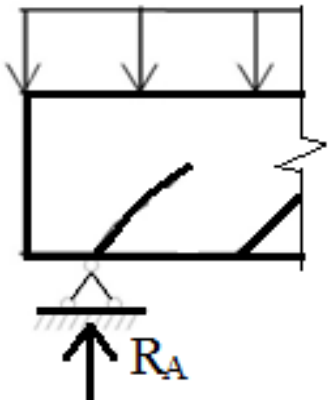

Рис. 2. Схема разрушения.

а) Условие прочности по полосе между наклонными сечениями:

$Q \leq \varphi_{b1} \cdot R_b \cdot b \cdot h_0$ (1),

где Q - поперечная сила в нормальном сечении элемента;

$\varphi_{b1} = 0{,}3$ – коэффициент в соответствии с формулой (8.55) [1];

R_b – призменная прочность бетона,

b, h_0 – ширина, рабочая высота поперечного сечения элемента соответственно.

При невыполнении условия (1) необходимо увеличить размеры поперечного сечения и класс бетона.

б) Условие прочности по наклонному сечению на действие поперечных сил:

$$Q \leq Q_b + Q_{sw}\ , \qquad (2)$$

где Q - поперечная сила в наклонном сечении с длиной проекции С на продольную ось элемента, определяемая от всех внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения. (Q определяется из наиболее опасного загружения в пределах наклонного сечения);

Q_b - поперечная сила, воспринимаемая бетоном в наклонном сечении

Q_{sw} - поперечная сила, воспринимаемая поперечной арматурой в наклонном сечении.

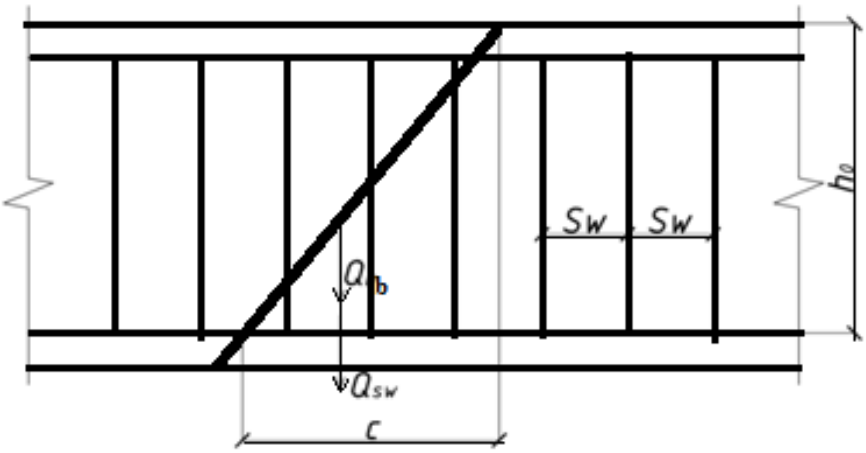

Рис. 3.Схема усилий при расчёте ж/б элементов по наклонному сечению на действие поперечных сил.

Поперечную силу Q_b определяют по формуле:

$$Q_b = \frac{\varphi_{b2} \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0^2}{C}\ , \qquad (3)$$

где φ_{b2} = 1,5. При этом сила Q_b должна быть в пределах:

$0{,}5R_{bt} \cdot b \cdot h_0 \leq Q_b \leq 2{,}5R_{bt} \cdot b \cdot h_0$

$$Q_{sw} = \varphi_{sw} \cdot q_{sw} \cdot C\ , \qquad (4)$$

где φ_{sw} = 0,75

q_{sw} - усилие в поперечной арматуре на единицу длины элемента, равное

$$q_{sw} = \frac{R_{sw} \cdot A_{sw}}{S_w}, \qquad (5)$$

Расчёт производят для ряда расположенных по длине элемента наклонных сечений при наиболее опасной длине проекции наклонного сечения С. В формуле (4):

$$h_0 \leq C \leq 2h_0$$

в) Условие прочности по наклонному сечению на действие моментов.

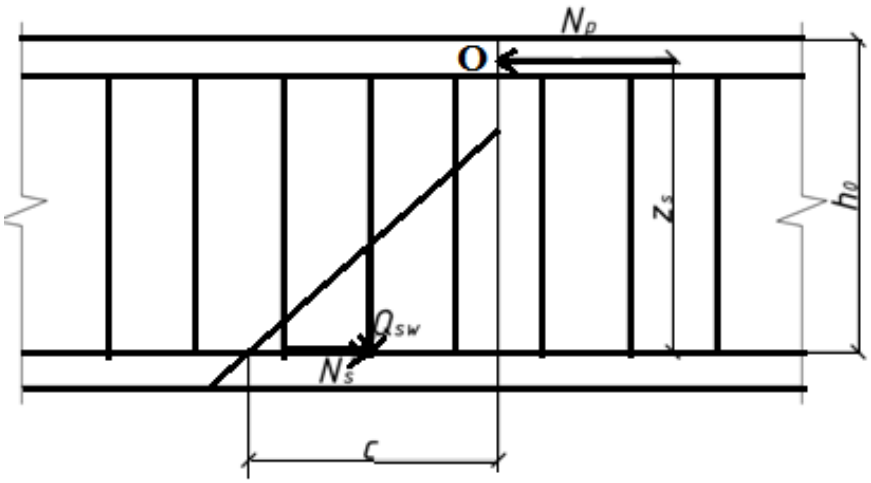

Рис. 4. Схема усилий при расчёте ж/б элементов по наклонному сечению на действие моментов.

Условие прочности:

$$M \leq M_s + M_{sw}\ , \qquad (6)$$

где М - момент в наклонном сечении длиной проекции С на продольную ось элемента, определяемый от всех внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения, относительно конца наклонного сечения (т.0), противоположного к концу, у которого располагается проверяемая продольная арматура, испытывающая растяжение от момента в наклонном сечении; при этом учитывают наиболее опасное загружение в пределах наклонного сечения;

M_s – момент, воспринимаемый продольной арматурой, пересекающей наклонное сечение, относительно противоположного конца наклонного сечения (т.0);

M_{sw} – момент, воспринимаемый поперечной арматурой, пересекающей наклонное сечение, относительно противоположного конца наклонного сечения (т.0).

$M_s = N_s \cdot Z_s = R_s \cdot A_s \cdot Z_s$;

z_s - плечо внутренней пары сил; допускается принимать $z_s = 0{,}9h_0$.

Упрощение: при С = $2h_o$ имеем

$q \cdot h_0(l_0 - 2h_0) \leq R_s \cdot A_s \cdot 0{,}9 + 0{,}5q_{sw} \cdot h_0$

$M_{sw} = 0{,}5Q_{sw} \cdot C = 0{,}5 \cdot q_{sw} \cdot C^2$

$h_0 \leq C \leq 2h_0$

Расчёт производят для наклонных сечений, расположенных по длине элемента на его концевых участках и в местах обрыва продольной арматуры, при наиболее опасной длине проекции наклонного сечения С, принимаемой в указанных выше пределах.

Допускается производить расчет наклонных сечений, принимая в условии (6) момент М в наклонном сечении при длине проекции С на продольную ось элемента, равной $2h_0$, а момент $M_{sw} = 0{,}5q_{sw} \cdot h_0^2$.

Условие прочности имеет вид:

$$M_{c=2h_0} = \frac{ql_0}{2} \cdot 2h_0 - q \cdot 2 \cdot h_0 \cdot \frac{2h_0}{2} = qh_0(l_0 - 2h_0)$$
$$\leq R_s \cdot A_s \cdot 0{,}9h_0 + 0{,}5 \cdot q_{sw} \cdot h_0^2$$

Предложение по расчету по наклонному сечению на одновременное действие Q и M . Так как рассматривается предельная стадия напряжённо-деформированного состояния работы элемента, сосредоточенная сила N_b действует в середине сжатой зоны бетона, на расстоянии x/2 от верхней кромки элемента, см рис.5.

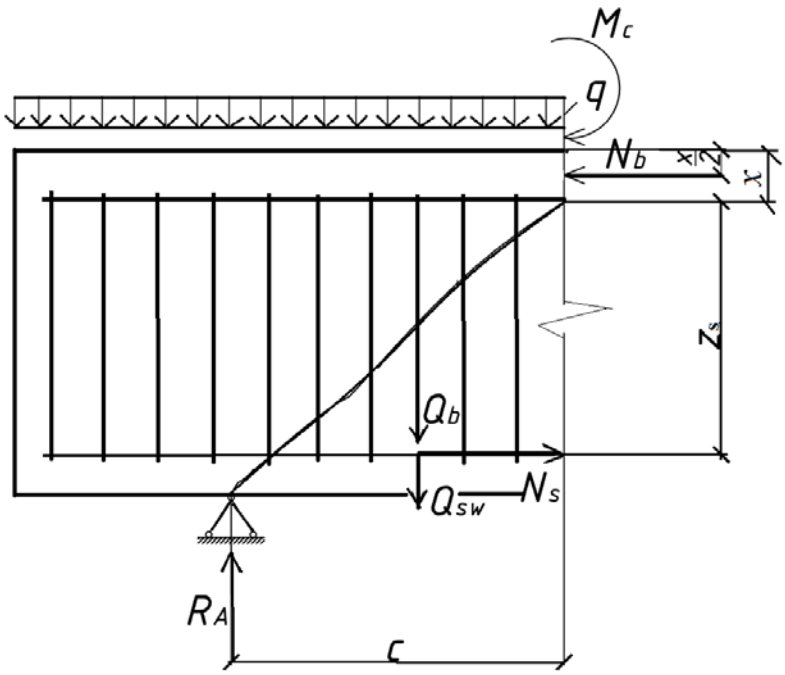

Рис. 5. Расчётная схема, предлагаемая авторами.

На участке *C* сила *Q* убывает от Q_{max} до Q_0. Целесообразно рассмотреть среднее значение: $Q_{\text{ср}} = \frac{Q_{max}+Q_0}{2}$ с плечом 0,5·*c*.

Тогда, учитывая особенности анизотропии в железобетонных элементах, уравнение равновесия моментов действующих сил и усилий относительно точки *O:*

$$Q_{\text{ср}} \cdot 0{,}5 \cdot \text{c} + M_0 - (Q_b + Q_{sw}) \cdot \frac{C}{2} - N_s \cdot z_s = 0;$$

$$M_0 + 0{,}5 \cdot c \cdot \left(Q_{\text{ср}} - Q_b - Q_{sw}\right) - N_s \cdot z_s = 0;$$

Отсюда

$$Q_{sw} = \frac{M_0 + 0{,}5 \cdot c \cdot \left(Q_{\text{ср}} - Q_b\right) - N_s \cdot z_s}{0{,}5 \cdot c} = Q_{\text{ср}} - Q_b + \frac{M_0 - N_s \cdot z_s}{0{,}5 \cdot c};$$

здесь $M_0 = Q_{max} \cdot c - q \cdot \frac{C^2}{2}$; $Q_{max} = 0{,}5 \cdot q \cdot l_0$;

$$Q_0 = Q_{max} - q \cdot c = 0{,}5q \cdot l_0 - q \cdot c = q \cdot (0{,}5 \cdot l_0 - c);$$

$$Q_{\text{ср}} = 0{,}5q \cdot l_0 - 0{,}5 \cdot q \cdot c = 0{,}5 \cdot q \cdot (l_0 - c);$$

$$Q_b = \frac{\varphi_{b2} \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0^2}{C};$$

$$\varphi_{b2} = 1{,}5.$$

$0{,}5 \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0 \leq Q_b \leq 2{,}5 \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0$; $\qquad h_0 \leq c \leq 2 \cdot h_0$

$N_s = R_{sw} \cdot A_s$; здесь расчётное сопротивление продольной арматуры $R_s = R_{sw} \leq 300$ МПа вследствие её неполной работы в наклонном сечении;

$z_s \approx 0{,}9h_0$.

Рассматривая два крайних расчётных значения:1) C=h_0 и 2) C= $2h_0$, проверяем условие прочности и определяем шаг и диаметр арматуры.

Составим уравнение равновесия моментов относительно точки *O*, места приложения усилия N_b:

$$0 = R_A \cdot C + M_c - (Q_b + Q_{sw}) \cdot \frac{C}{2} - N_s \cdot z_s;$$

$$R_A = Q_A = \frac{q l_0}{2}; \qquad M_c = Q \cdot C - q \cdot C \cdot \frac{C}{2} = C \cdot (Q - 0{,}5 \cdot q \cdot C)$$

$$Q_b = \frac{\varphi_{b2} \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0^2}{C};$$

$$Q_{sw} = \varphi_{sw} \cdot q_{sw} \cdot C = \frac{0{,}75 \cdot R_{sw} \cdot A_{sw} \cdot C}{S_w};$$

$$Q_b = \frac{1{,}5 \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0^2}{C};$$

$N_s = R_s \cdot A_s$; при $R_s = R_{sw}$, ;

1) C=h_0 и 2) C=$2h_0$

1) Для случая C=h_0 имеем:

$$\frac{q \cdot l_0}{2} \cdot h_0 + h_0 \left(\frac{q \cdot l_0}{2} - 0{,}5q \cdot h_0 \right) -$$

$$- \left(1{,}5 \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0 + \frac{0{,}75 \cdot R_{sw} \cdot A_{sw} \cdot h_0}{S_w} \right) \cdot \frac{h_0}{2} - R_{sw} \cdot A_s \cdot 0{,}9h_0 = 0$$

Отсюда находим S_w или, задавшись S_w , определяем A_{sw}

2) Для случая C=$2h_0$:

$$\frac{q \cdot C_0}{2} \cdot 2h_0 + 2h_0 \left(\frac{q \cdot l_0}{2} - 0{,}5 \cdot q \cdot 2h_0 \right)$$

$$- \left(\frac{1{,}5 \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0^2}{2h_0} + \frac{0{,}75 \cdot R_{sw} \cdot A_{sw}}{S_w} \right) - R_{sw} \cdot A_s \cdot 0{,}9h_0 = 0$$

Второе уравнение после упрощения примет вид:

$$q \cdot l_0 \cdot h_0 + 2h_0(0{,}5 \cdot q \cdot l_0 - q \cdot h_0) - 0{,}75\left(R_{bt} \cdot b \cdot h_0 + 2\frac{R_{sw} \cdot A_{sw} \cdot h_0}{S_w}\right) \cdot h_0 - 0{,}9R_{sw} \cdot A_{sw} \cdot h_0 = 0$$

Решение: 1) при заданном числе поперечных стержней в поперечном сечении, их классе и диаметре определяется S_w;

2) при заданном шаге поперечной арматуры S_w определяется A_{sw}. Наибольшего эффекта экономии металла можно добиться, применяя поперечную арматуру, расположенную перпендикулярно наклонным сечениям (ожидаемым трещинам): отгибы или дугообразные хомуты[2].

Все математические зависимости выведены для изгибаемого элемента, загруженного равномерно распределённой нагрузкой.

Выводы:

1.Предложена расчётная модель наклонного сечения, в которой учитывается наличие двух силовых факторов M и Q.

2. Значения расчётного сопротивления продольной арматуры в наклонном сечении предполагается принимать пониженным: R_{sw} вместо $R_{s.}$

3. Учёт работы продольной арматуры в наклонном сечении предполагает меньшее количество или диаметр поперечной арматуры по сравнению с нормами [1], следовательно – её экономию.

Литература

1. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М.: Минрегион России -2013.

2. Корчагин О.П., Зонина С.В. О рациональном армировании приопорных участков изгибаемых железобетонных элементов. /О.П.Корчагин,С.В. Зонина // Материалы Международной науч.–практ. конф. (г. Ижевск, 19.05.2016 г.). – Ч.2. – Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2016. – с.188-191.

Korchagin O.P., candidate of technological Sciences, assistant professor, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga region) Federal University,
Zonina S.V., the senior teacher of high school, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga region) Federal University.

ABOUT SPECIFICS OF CALCULATIONS OF THE BENT REINFORCED CONCRETE DESIGNS FOR INCLINED SECTIONS

Abstract: In article the method of calculation on inclined section of the bent ferro-concrete elements, promising savings of cross-section armature owing to the account of work of longitudinal armature with the lowered value of rated resistance is offered and at the specified value of cross-section force in section.

Key words: Strength, Inclined sections, Cross-section force, Action of an instant, The equation of balance.