

УДК 69.07

**МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК
ПО НАКЛОННЫМ СЕЧЕНИЯМ ПРИ ДЕЙСТВИИ ОСОБЫХ НАГРУЗОК**

**FAILURE MECHANISM OF REINFORCED CONCRETE BEAMS
ON THE INCLINED SECTIONS UNDER THE EMERGENCY LOADS**

В.И. ЖАРНИЦКИЙ, С.О. КУРНАВИНА
V.I. JARNYTSKY, S.O. KURNAVINA

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет)
(National Research Moscow State University of Civil Engineering)
E-mail: KurnavinaSO@mgsu.ru

Отношение поперечной силы в сжатой зоне бетона к продольному усилию в этой зоне является критерием механизма разрушения бетона над наклонной трещиной. Существуют граничные кривые, разделяющие зоны

возможного разрушения от сжатия и от среза и определяемые на основе теории малых упругопластических деформаций. Для оценки механизма разрушения бетона сжатой зоны над трещиной в изгибаемых элементах и влияния на него различных факторов выполнены расчеты балок на статическую и динамическую нагрузку. Для экспериментальной проверки предложенных зависимостей проведены испытания консольных балок на действие статической и динамической нагрузки.

The shear force to longitudinal force ratio in compressed zone of concrete is a convenient criterion, characterizing a destruction mechanism of concrete above the inclined crack. There are two border curves that divide zones of probable shear destruction of concrete and of probable failure due to compression. They are determined on the basis of the theory of small elasto-plastic deformations. In order to evaluate the failure mechanism of compressed concrete above the shear crack in bended elements and an influence of different factors on this mechanism the calculations of beams on static and dynamic loads were carried out. The experimental tests of cantilever beams were made in order to check the offered functions.

Ключевые слова: наклонные трещины, механизм разрушения бетона сжатой зоны над трещиной, теория малых упругопластических деформаций.

Keywords: shear cracks, the failure mechanism of compressed concrete above the shear crack, the theory of small elastoplastic deformations.

Актуальной проблемой является изучение работы железобетонных конструкций по наклонным сечениям при воздействиях аварийного характера, характеризующихся развитием значительных пластических деформаций [1].

Сжатая зона бетона над наклонной трещиной находится в условиях плоского напряженного состояния, и возможны два механизма ее разрушения: от сжатия или от среза [2]. В первом случае разрушение изгибаемой конструкции происходит постепенно вследствие последовательного разрушения от сжатия каждого слоя по высоте сечения, начиная от сжатой грани. Во втором случае разрушение происходит мгновенно, при этом предельное состояние достигается во всех точках по высоте сечения.

В каждом слое по высоте сечения действует нормальное и касательное напряжение. Предельные напряжения в любой точке связаны между собой кривой прочности и зависят от граничных условий [3]. Для определения напряженно-деформированного состояния в бетоне сжатой зоны использовалась теория малых упругопластических деформаций [4]. Согласно этой теории интенсивность напряжений является функцией от интенсивности деформаций:

$$\sigma_u = \Phi(\varepsilon_u). \quad (1)$$

Вид функции $\Phi(\varepsilon)$ для каждой точки при сложном напряженном состоянии принимается таким же, как при простом.

Предполагается, что главные оси напряжений совпадают с главными осями деформаций. Пусть в точке сечения с координатой y главная ось напряжения σ_1 образует с осью x угол $\theta(y)$ (рис. 1 – ориентация главных осей).

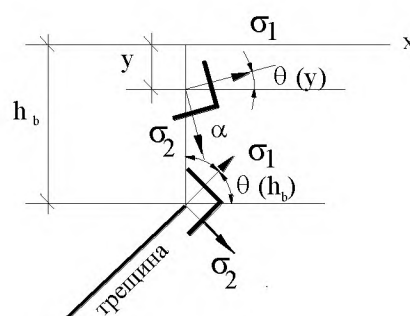


Рис. 1

Введем безразмерные величины, характеризующие напряжения $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{R_b}$, $\bar{\tau} = \frac{\tau}{R_b}$ и деформации $\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ub}}$, $\bar{\gamma} = \frac{\gamma}{\varepsilon_{ub}}$.

В этом случае справедливы уравнения:

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_x = \frac{1}{2}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2) + \frac{1}{2}(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2) \cos(2\theta), \\ \bar{\sigma}_y = \frac{1}{2}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2) - \frac{1}{2}(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2) \cos(2\theta), \\ \bar{\tau}_{xy} = -\frac{1}{2}(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2) \sin(2\theta), \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon}_x = \frac{1}{2}(\bar{\varepsilon}_1 + \bar{\varepsilon}_2) + \frac{1}{2}(\bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_2) \cos(2\theta), \\ \bar{\varepsilon}_y = \frac{1}{2}(\bar{\varepsilon}_1 + \bar{\varepsilon}_2) - \frac{1}{2}(\bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_2) \cos(2\theta), \\ \bar{\gamma}_{xy} = -\frac{1}{2}(\bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_2) \sin(2\theta), \end{cases} \quad (3)$$

где σ_1, σ_2 – главные напряжения (причем $\sigma_1 > \sigma_2$); $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – главные деформации; γ_{xy}, τ_{xy} – деформация сдвига и касательное напряжение.

Зависимость между напряжениями и деформациями определяется теорией малых упругопластических деформаций для плоского напряженного состояния:

$$\begin{cases} (\sigma_1 - \sigma_2) = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \frac{2 \sigma_u}{3 \varepsilon_u}, \\ \tau_{xy} = \gamma_{xy} \frac{1 \sigma_u}{3 \varepsilon_u}. \end{cases} \quad (4)$$

С учетом условия несжимаемости материала $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$ можно получить зависимость между главными напряжениями и главными деформациями:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_2}{2} \right) \frac{\varepsilon_u}{\sigma_u}, \\ \varepsilon_2 = \left(\sigma_2 - \frac{\sigma_1}{2} \right) \frac{\varepsilon_u}{\sigma_u}. \end{cases} \quad (5)$$

Чтобы однозначно описать напряженно-деформированное состояние точки, необхо-

димо принять геометрическую гипотезу, описывающую изменение деформаций $\varepsilon_x(y)$ по высоте сечения, и зависимость $\theta(y)$, а также использовать кривую прочности бетона.

В данном исследовании кривая прочности была принята в форме, предложенной В.П. Митрофановым для плоского напряженного состояния в главных напряжениях [5]:

$$\sigma_1 \sigma_2 + K(R_{bt} \sigma_1 - R_b \sigma_2 - R_{bt} R_b) = 0, \quad (6)$$

где $K=4/3$.

С целью получения деформаций в наклонном сечении использовалась гипотеза билинейных сечений. Для нормального сечения деформации в каждом волокне можно определить по формуле:

$$\begin{cases} \varepsilon_x(y) = \varepsilon_x(h_b) + A(h_b - y)\chi, & (0 \leq y \leq h_b), \\ \varepsilon_x(y) = (y - h_b)\chi, & (h_b < y \leq h), \end{cases} \quad (7)$$

где A – эмпирический коэффициент; χ – кривизна. При $A = 1$ гипотеза билинейных сечений переходит в известную гипотезу плоских сечений.

Так как над наклонной трещиной вдоль ее верхнего берега действуют сжимающие напряжения σ_1 , и, следовательно, имеют место деформации ε_1 , то в точке излома сечения $y = h_b$ зависимость изменяется скачком (рис. 2 – гипотеза билинейных сечений).

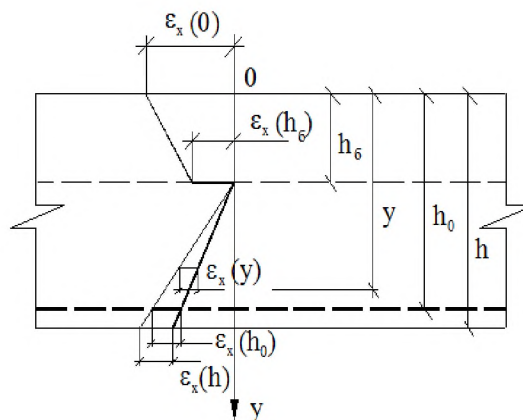


Рис. 2

В этой точке скачком меняются также напряжения $\sigma_x(y)$. Для ломаного сечения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x(y) &= \varepsilon_x(h_b) + A(h_b - y)\chi, & (0 \leq y \leq h_b), \\ \varepsilon_x(y) &= (y - h_b)\chi, & (h_b < y \leq h). \end{aligned} \quad (8)$$

Рассмотрены четыре варианта очертания кривой $\theta(y)$, удовлетворяющие условиям $\theta(0) = 0$, $\theta(h_b) = \theta_{\max} = \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)$. Результаты расчетов показали, что при всех рассмотренных зависимостях $\theta(y)$ сохраняется качественная картина работы сечения, что позволяет считать достаточно надежными полученные теоретические результаты.

Удобной общей характеристикой механизма разрушения сжатой зоны является отношение предельных усилий Q^{np}/N^{np} [5], где:

$$\begin{cases} Q^{np} = \int_0^{h_b} b\tau_{xy}(y) dy, \\ N^{np} = \int_0^{h_b} b\sigma_x(y) dy. \end{cases} \quad (9)$$

Если точка, соответствующая отношению Q_b/N_b , лежит выше прямой, описываемой зависимостью

$$\frac{Q^{np}}{N^{np}} = 1,3 \frac{\theta_{\max}}{\pi}, \quad (10)$$

то разрушение может происходить только от среза. Если эта точка лежит ниже прямой, описываемой зависимостью

$$\frac{Q^{np}}{N^{np}} = 1,1 \frac{\theta_{\max}}{\pi}, \quad (11)$$

то разрушение может происходить только от сжатия. В промежутке между предельными кривыми разрушение возможно как от сжатия, так и от среза.

Для определения возможного механизма разрушения изгибаемого элемента в процессе нагружения написана программа,

и проведен расчет балок на действие квазистатических и динамических нагрузок.

Рассматривалась дискретная модель, состоящая из элементов в форме трапеций, образованных полем трещин, угол наклона которых подчиняется определенным закономерностям. Предполагалось, что трещина может распространяться из любой точки по пролету изгибаемого элемента. Расчетному направлению трещины соответствует минимум внешней нагрузки, необходимой для раскрытия трещины, которая выражается из уравнения сохранения энергии и варьируется по углу наклона трещины к горизонтали α .

Усилия в бетоне над трещиной вычислялись путем интегрирования напряжений по высоте сечения:

$$N_{b1,i} = \int_0^h \sigma_{b1}(y) b dy. \quad (12)$$

Поперечная сила в бетоне сжатой зоны наклонного сечения Q_{b1} определялась из условия равенства нулю проекций всех сил в сечении на продольную ось $\Sigma x = 0$:

$$N_{sc1,i} + N_{b1,i} \cos \alpha_i + Q_{b1,i} \sin \alpha_i - N_{s,i} = 0, \quad (13)$$

где N_s и N_{sc} – соответственно усилия в растянутой и сжатой продольной арматуре.

Усилия в бетоне сжатой зоны вычислялись из условия равновесия треугольного элемента над трещиной, образованного наклонным и вертикальным сечением, проходящим через ее вершину:

$$\begin{cases} N_{b,i} = N_{b1,i} \cos \alpha_i + Q_{b1,i} \sin \alpha_i, \\ Q_{b,i} = q_i h_{cr} \operatorname{tg} \alpha_i - N_{b1,i} \sin \alpha_i + Q_{b1,i} \cos \alpha_i - m_i \ddot{y}_i, \end{cases} \quad (14)$$

где N_b и Q_b – усилия в бетоне в вертикальном сечении над трещиной.

Для экспериментальной проверки предложенных зависимостей испытано 20 образцов консольных балок на действие статической и 14 образцов на действие ударной сосредоточенной силы [6]. На рис. 3 (положение экспериментальных точек в

осях $Q_b / N_b - \theta_{\max}$; статические испытания) и рис. 4 (положение экспериментальных точек в осях $Q_b / N_b - \theta_{\max}$; динамические испытания) представлены результаты статических и динамических испытаний. Черные точки на графике соответствуют разруше-

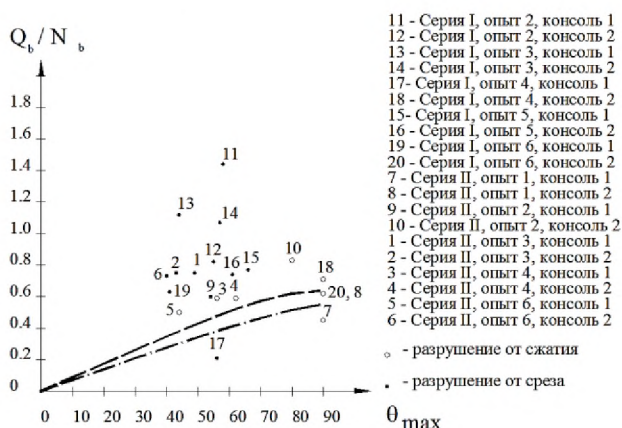


Рис. 3

ВЫВОДЫ

1. По окончании формирования трещины отношение Q_b / N_b остается постоянным в процессе нагружения при действии квазистатических нагрузок или колеблется около постоянного положения при действии динамических нагрузок вплоть до начала текучести в растянутой арматуре. Рассматривались балки с различными параметрами и различные законы изменения нагрузки во времени. Во всех случаях общий вид зависимости Q_b / N_b аналогичен. Этот критерий дает возможность определить возможный механизм разрушения бетона сжатой зоны.

2. После начала текучести в арматуре Q_b и N_b практически остаются постоянными до начала разгрузки при любой зависимости нагрузки от времени. Исходя из этого, можно сделать вывод о невозможности разрушения бетона сжатой зоны от среза после начала текучести в арматуре.

3. Увеличение количества поперечной арматуры снижает отношение Q_b / N_b при больших углах наклона трещины. При малых углах поперечная арматура практически не оказывает влияния на механизм разрушения.

нию опытного образца от среза, а белые – разрушению от сжатия. Угол разворота главных площадок на графике определялся как $\theta_{\max} = \frac{\pi}{2} - \alpha$.

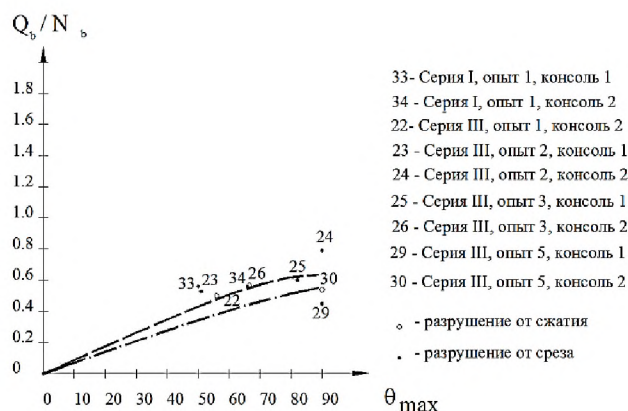


Рис. 4

4. Значения коэффициента A гипотезы билинейных сечений для условий эксперимента (консоли с отношением длины к высоте $l/h = 0.8 \dots 2$) можно принять равными 2, в том числе и для нормальных сечений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирсаяпов И.Т., Тамразян А.Г. К разработке научных основ теории выносливости железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. – 2017, № 1. С. 50...56.
2. Залесов А.С., Климов О.А. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил. – Киев: Будивэльнык, 1989.
3. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching method of optimization of bending reinforced concrete slabs with simultaneous assessment of criterion function and the boundary conditions // Applied Mechanics and Materials. – V. 467, 2014. P. 404...409.
4. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. – Л.: Машиностроение, 1978.
5. Жарницкий В.И. Развитие теории расчета упругопластических железобетонных конструкций на особые динамические воздействия: Дис.... докт. техн. наук. – М.: МИСИ, 1988.
6. Жарницкий В.И., Беликов А.А., Курнавина С.О. Экспериментальные исследования сопротивления железобетонных балок перерезывающей силе // Промышленное и гражданское строительство. – 2011, № 3.

REFERENCES

1. Mirsajapov I.T., Tamrazjan A.G. K razrabotke nauchnyh osnov teorii vynoslivosti zhelezobetonnyh konstrukcij // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2017, № 1. S. 50...56.

2. Zalesov A.S., Klimov O.A. Prochnost' zhelezobetonnyh konstrukcij pri dejstvii poperechnyh sil. – Kiev: Budivjel'nyk, 1989.

3. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching method of optimization of bending reinforced concrete slabs with simultaneous assessment of criterion function and the boundary conditions // Applied Mechanics and Materials. – V. 467, 2014. P. 404...409.

4. Smirnov-Aljaev G.A. Soprotivlenie materialov plasticheskomu deformirovaniyu. – L.: Mashinostroenie, 1978.

5. Zharnickij V.I. Razvitie teorii rascheta uprugoplasticheskikh zhelezobetonnyh konstrukcij na osobyie dinamicheskie vozdejstvija: Dis... dokt. tehn. nauk. – M.: MISI, 1988.

6. Zharnickij V.I., Belikov A.A., Kurnavina S.O. Jeksperimental'nye issledovanija soprotivlenija zhelezobetonnyh balok pererezyvajushhej sile // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2011, № 3.

Рекомендована кафедрой железобетонных и каменных конструкций. Поступила 10.04.17.
