

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ НАПРАВЛЕНИЙ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ

ENERGY METHOD FOR DETERMINING THE DIRECTION OF CRACKS IN REINFORCED CONCRETE BEAMS

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

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

В статье предлагается метод, позволяющий определить единственно возможное направление развития трещины из конкретной точки по пролету изгибаемого элемента с учетом одновременного действия как изгибающего момента и поперечной силы.

This article proposes a method to determine the only possible direction for the development of a crack from a specific point along the span of a bent element, taking into account the simultaneous action of both a bending moment and shear force.

Ключевые слова: несущая способность по наклонным сечениям, поле направлений трещин, расчетный угол наклона трещины.

Keywords: bearing capacity for inclined sections, field of crack directions, calculated angle of inclination of the crack.

Работе изгибаемых элементов по наклонным сечениям посвящено большое количество исследований [2], [3], [5], [7...9]. Одним из наиболее существенных факторов в расчете изгибаемых конструкций по наклонным сечениям является направление опасной наклонной трещины, с учетом которого определяются предельные усилия в элементе. Поле направлений трещин переменн по пролету изгибаемого элемента. Для определения их траекторий предлагаются различные модели [2], [3], [6]. В действующих в настоящее время в России нормативных документах величина проекции опасного наклонного сечения определяется из условия наименьшей несущей способности сечения по поперечной силе [1]. При этом расчет на действие поперечной силы и изгибающего момента по наклонному сечению проводится независимо. Бетон сжатой зоны работает по-разному, в зависимости

от условий загрузки, а также температурных воздействий [10].

Расчетному направлению трещины соответствует минимум внешней нагрузки, вызывающей ее раскрытие. Величина нагрузки находится из уравнения сохранения энергии и варьируется по углу наклона трещины к вертикали α .

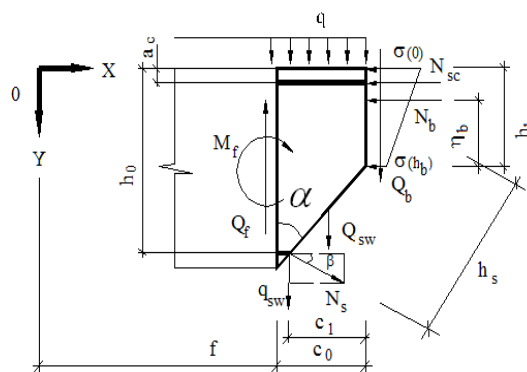


Рис. 1

Предположим, что известна высота сжатой зоны бетона над трещиной, и она не зависит от угла наклона трещины α . Тогда, выразив усилия в трапецидальном элементе (рис. 1) из уравнений равновесия, и с учетом напряженно-деформированного состояния бетона над наклонной трещиной, можно определить ее возможное направление [3].

Уравнение сохранения энергии:

$$W_s + W_{sc} + W_{sw} + W_{sh} + W_{bt} + W_{bc} = A_q, \quad (1)$$

где W_s – потенциальная энергия деформирования растянутой продольной арматуры; W_{sc} , W_{sw} – то же для сжатой и поперечной арматуры; W_{bc} – потенциальная энергия деформирования сжатого бетона над трещиной; W_{bt} – энергия разрушения растянутого бетона; W_{sh} – энергия сдвига бетона над трещиной; A_q – работа внешней нагрузки.

Энергия деформирования продольной растянутой арматуры:

$$W_s = \frac{1}{2} N_s \varepsilon_s = \frac{1}{2} E_s A_s \varepsilon_s^2, \quad (2)$$

где E_s , A_s , ε_s – соответственно модуль упругости, площадь и продольная деформация растянутой арматуры.

Энергия деформирования сжатой арматуры:

$$W_{sc} = \frac{1}{2} N_{sc} \varepsilon_{sc} = \frac{1}{2} E_{sc} A_{sc} \varepsilon_{sc}^2, \quad (3)$$

где E_{sc} , A_{sc} , ε_{sc} – соответственно модуль упругости, площадь и продольная деформация сжатой арматуры.

Для получения деформаций в наклонном сечении использовалась гипотеза билинейных сечений [4]. Для нормального сечения деформации в каждом волокне можно определить по формуле:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x(y) &= \varepsilon_x(h_b) + A(y - h_b)\chi, \quad (0 \leq y \leq h_b), \\ \varepsilon_x(y) &= (y - h_b)\chi, \quad (h_b < y \leq h), \end{aligned} \quad (4)$$

где A – эмпирический коэффициент; χ – кривизна. При $A = 1$ гипотеза билинейных

сечений переходит в известную гипотезу плоских сечений.

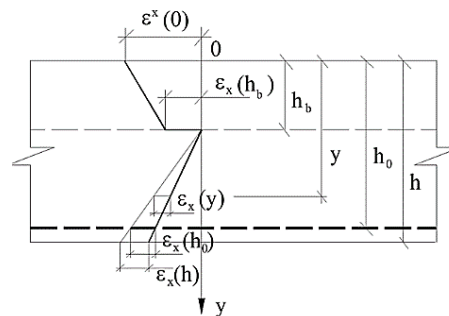


Рис. 2

Так как над наклонной трещиной вдоль ее верхнего берега действуют сжимающие напряжения, и, следовательно, имеют место деформации, то в ломаном сечении в точке его излома $y = h_b$ деформации по оси X изменяются скачком (рис. 2). В этой точке скачком меняются также напряжения $\sigma_x(y)$.

Для ломаного сечения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x(y) &= \varepsilon_x(h_b) + A(y - h_b)\chi, \quad (0 \leq y \leq h_b), \\ \varepsilon_x(y) &= (y - h_b)\chi, \quad (h_b < y \leq h). \end{aligned} \quad (5)$$

В этом случае:

$$W_{sc} = \frac{1}{2} E_{sc} A_{sc} A^2 \left(\frac{1}{1 - k_\varepsilon} - \frac{a}{h_b} \right)^2 \left(\frac{h_b}{h_0 - h_b} \right)^2 \varepsilon_s^2, \quad (6)$$

где a – расстояние от сжатой грани до центра тяжести сжатой арматуры; h_0 – рабочая высота сечения; $k_\varepsilon = \frac{\varepsilon_x(h_b)}{\varepsilon_x(0)}$.

Энергия деформирования поперечной арматуры:

$$W_{sw} = \frac{1}{2} Q_{sw} \frac{2}{3} \varepsilon_{sw} = \frac{1}{6} E_{sw} f_{sw} (h_0 - h_b) \text{tg}^3 \alpha \varepsilon_s^2, \quad (7)$$

где Q_{sw} – суммарное усилие в поперечной арматуре; ε_{sw} – максимальная деформация поперечных стержней; E_{sw} , f_{sw} – соответственно модуль упругости, погонная площадь поперечной арматуры.

Энергия деформирования бетона по высоте h_b при сжатии:

$$W_{bc} = \frac{1}{2} \int_0^h \sigma_x(y) \varepsilon(y) dy, \quad (8)$$

где $\sigma_x(y)$ и $\varepsilon_x(y)$ – напряжения и деформации бетона сжатой зоны. Предполагаем, что процесс формирования трещины завершается до начала развития значительных пластических деформаций в бетоне сжатой зоны. В этом случае:

$$W_{bc} = \frac{1}{2} b h_b E_b \frac{\left(k_\varepsilon + (1 - k_\varepsilon) \frac{1}{3} \right)}{(1 - k_\varepsilon)^2} A^2 \left(\frac{h_b}{h_0 - h_b} \right)^2 \varepsilon_s^2. \quad (9)$$

Энергия сдвига сжатой зоны бетона:

$$W_{sh} = \frac{1}{2} Q_b \phi_{sh} = \frac{1}{2} \frac{Q_b^2}{b h_b G_b}, \quad (10)$$

где ϕ_{sh} – угол сдвига; G_b – модуль сдвига бетона; Q_b – перерезывающая сила в сжатой зоне, которая определяется из уравнения равновесия вертикальных сил.

Энергия разрушения растянутого бетона:

$$W_{bt} = \frac{2}{3} R_{bt} \varepsilon_{ubt} b \ell_{crc} = \frac{2}{3} R_{bt} \varepsilon_{ubt} \frac{b(h - h_b)}{\cos \alpha}, \quad (11)$$

где ℓ_{crc} – длина наклонной трещины.

Момент от внешней нагрузки M_f в точке с координатой f , воспринимаемый наклонным сечением, можно выразить через величину изгибающего момента M^* в каком-либо сечении и функцию формы эпюры моментов $\Phi(x)$.

В этом случае работа внешней нагрузки:

$$A_q = \frac{1}{2} M^* \Phi_{f+c} (1 + m_m) \frac{\varepsilon_{crc}}{\ell_{crc}}, \quad (12)$$

где ε_{crc} – деформации в направлении, нормальном к траектории трещины.

Положение опасной наклонной трещины определяется из условия $\frac{dM^*}{d\alpha} = 0$.

Для оценки влияния различных факторов на угол наклона трещины составлена программа, и проведены расчеты шарнирно опертых и защемленных балок при действии равномерно распределенной нагрузки и сосредоточенных сил. Варьировалось отношение высоты сечения к пролету балки, величина пролета среза ℓ_{sh} , количество продольной и поперечной арматуры, величина коэффициента A гипотезы билинейных сечений.

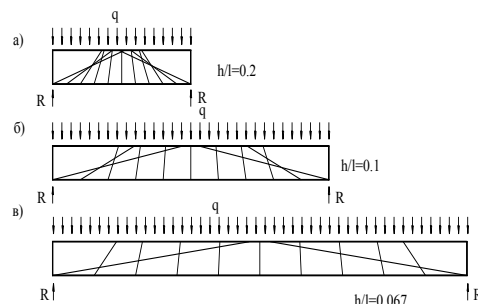


Рис. 3

На рис. 3 показано теоретическое поле направлений трещин в шарнирно опертой балке при действии равномерно распределенной нагрузки для различных отношений пролета к высоте.

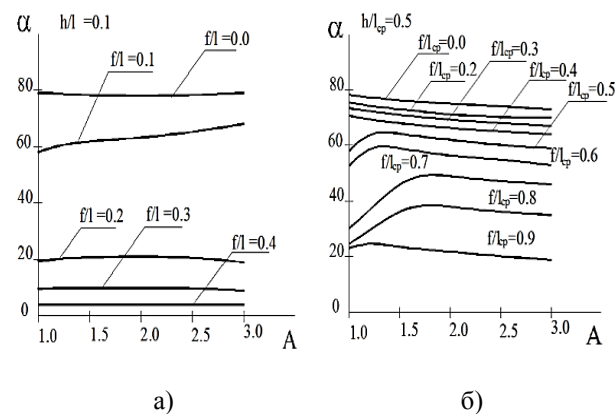


Рис. 4

По результатам расчетов построены зависимости теоретического угла наклона трещины от коэффициента A гипотезы билинейных сечений для шарнирно опертых балок под действием распределенной нагрузки (рис. 4-а) и сосредоточенной силы (рис. 4-б).

ВЫВОДЫ

1. В случае действия сосредоточенной силы величина коэффициента A гипотезы билинейных сечений оказывает существенное влияние на угол α только в зоне от $0,4...0,8 \ell_{sh}$ при отношении $\ell_{sh}/h > 2$.

2. В случае действия равномерно распределенной нагрузки количество поперечной арматуры μ_{sw} практически не влияет на угол наклона трещины в сечениях, находящихся в пределах $0,3...0,7\ell$. В пределах от $0,2\ell$ до $0,3\ell$ углы α возрастают с увеличением μ_{sw} . В приопорной зоне (от 0 до $0,15\ell$) с увеличением μ_{sw} значения α убывают, проекция наклонной трещины на горизонтальную ось уменьшается.

3. С увеличением отношения ℓ/h углы наклона трещин α в пролете уменьшаются, а у опоры увеличиваются. При отношении $\ell/h > 10$ большие углы наклона возможной трещины сохраняются только в опорном сечении.

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: ГУП ЦПП, 2011.

2. Залесов А.С., Климов О.А. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил. – Киев: Будивэльныйк, 1989.

3. Жарницкий В.И. Развитие теории расчета упругопластических железобетонных конструкций на особые динамические воздействия: Дис....докт. техн. наук. – М.: МИСИ, 1988.

4. Жарницкий В.И., Курнавина С.О. Механизм разрушения железобетонных балок по наклонным сечениям при действии особых нагрузок // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 2.

5. Mohamed Zakaria, Tamon Ueda, Zhimin Wu, Liang Meng. Experimental Investigation on Shear Cracking Behavior in Reinforced Concrete Beams with Shear Reinforcement // Journal of Advanced Concrete Technology. – V. 7, № 1, 2009.

6. Jang Hoon Kim, John B. Mander. Theoretical crack angle in reinforced concrete elements subjected to strong earthquakes // Mat. of 12-th World Conference on Earthquake Engineering. – Aucland, New Zealand, 2000.

7. Mari A.R., Bairan J.M., Cladera A., Oller E. Shear design and assessment of reinforced and prestressed concrete beams based on a mechanical model // Journal of Structural Engineering. – 2016.

8. Тамразян А.Г., Орлова М.А. К остаточной несущей способности железобетонных балок с трещинами // Жилищное строительство. – 2015, № 6. С.32...34.

9. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы // Промышленное и гражданское строительство. – 2014, № 7. С. 51...54.

10. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. – V. 475...476, 2014. P.1563...1566.

REFERENCES

1. SP 63.13330.2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozhenija. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.01.07-85*. – M.: GUP CPP, 2011.

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

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

4. Zharnickij V.I., Kurnavina S.O. Mehanizm razrusheniya zhelezobetonnyh balok po naklonnym sechenijam pri dejstvii osobykh nagruzok // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2017, № 2.

5. Mohamed Zakaria, Tamon Ueda, Zhimin Wu, Liang Meng. Experimental Investigation on Shear Cracking Behavior in Reinforced Concrete Beams with Shear Reinforcement // Journal of Advanced Concrete Technology. – V. 7, № 1, 2009.

6. Jang Hoon Kim, John B. Mander. Theoretical crack angle in reinforced concrete elements subjected to strong earthquakes // Mat. of 12-th World Conference on Earthquake Engineering. – Aucland, New Zealand, 2000.

7. Mari A.R., Bairan J.M., Cladera A., Oller E. Shear design and assessment of reinforced and prestressed concrete beams based on a mechanical model // Journal of Structural Engineering. – 2016.

8. Tamrazjan A.G., Orlova M.A. K ostatochnoj nesushhej sposobnosti zhelezobetonnyh balok s treshhinami // Zhilishhnoe stroitel'stvo. – 2015, № 6. S.32...34.

9. Tamrazjan A.G. Beton i zhelezobeton: problemy i perspektivy // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2014, № 7. S. 51...54.

10. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. – V. 475...476, 2014. P. 1563...1566.

Рекомендована кафедрой железобетонных и каменных конструкций. Поступила 15.04.18.