

УДК 624.012.45:620.191.33

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ШИРИНИ РОЗКРИТТЯ НОРМАЛЬНИХ ТРІЩИН У КОСОЗІГНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ НА ОСНОВІ ДБН В.2.6-98:2009

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ НОРМАЛЬНЫХ ТРЕЩИН В КОСОИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ НА ОСНОВЕ ДБН В.2.6-98:2009

PECULIARITIES OF NORMAL CRACKS WIDTH CALCULATION OF BIAxIAL BENDED REINFORCED CONCRETE BEAMS TO DBN V.2.6-98:2009

Павліков А. М., д.т.н., проф., Федоров Д. Ф., аспірант (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, м. Полтава)

Павликов А. Н., д.т.н., проф., Федоров Д. Ф., аспирант (Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г.Полтава)

Pavlikov A. M., D.Eng., Professor, Fedorov D. F., postgraduate student (Poltava National Technical University named after Yuri Kondratuk)

Запропонований алгоритм розрахунку ширини розкриття тріщин, нормальних до осі залізобетонної балки при її косому згинанні, що базується на нелінійній деформаційній моделі.

Предложен алгоритм расчета ширины раскрытия трещин, нормальных к оси железобетонной балки при косом ее изгибе, которая основывается на нелинейной деформационной модели.

The algorithm of normal crack width analysis of skew bended reinforced concrete beams based on nonlinear deformation model is proposed.

Ключові слова:

Залізобетон, балка, тріщина, діаграми стану матеріалу.

Железобетон, балка, трещина, диаграммы состояния материала.

Reinforced concrete, beam, crack, constitutive stress-strain diagrams.

Постановка проблеми. Процес утворення і розкриття тріщин у елементах, що зазнають косоного згинання, має свої особливості, пов'язані з більш складними розрахунковими моделями їх напружено-деформованого стану.

Дослідження тріщиностійкості залізобетонних елементів при косому їх згинанні проводилися на кафедрі залізобетонних і кам'яних конструкцій ПолтНТУ М. С. Торяником, П. Ф. Вахненком, Л. І. Сердюком, М. Л. Яровим [1], А. М. Павліковим [2], О. В. Семком [3] та іншими. У цих дослідженнях було розроблено метод розрахунку ширини розкриття тріщин, що базувався на передумовах чинних на той час нормативних документів та емпіричних коефіцієнтах нерівномірності напружень арматури ψ_s та бетону ψ_b .

У той же час у Європі [4], США [5], Канаді [6] теорія розрахунку розкриття тріщин для випадку плоского згину була спрямованою на отримання аналітичних залежностей. Запропонована на її основі методика базується на ефекті збільшення жорсткості арматурного стержня на певну величину Δ у залізобетонному елементі з тріщинами порівняно із вільним арматурним стержнем [4 – 6]. Порівняльний аналіз показує, що величини ψ_s і Δ мають подібний фізичний зміст, хоча й отримані з різних передумов.

Теорія аналітичного визначення коефіцієнту ψ_s в Україні розвивається в працях В. М. Бондаренка і В. І. Колчунова [7].

Уведення в дію нових національних нормативних документів [8, 9], які значною мірою базуються на нормах об'єднаної Європи [10], вимагає переглянути методики розрахунку залізобетонних елементів і конструкції як за першою, так і за другою групами граничних станів. Однак норми [8, 9, 10] обмежують застосування запропонованих у них формул лише випадком плоского (прямого) згинання.

Метою статті є уточнення розрахункових параметрів при визначенні ширини розкриття нормальної тріщини для елементів, що працюють в умовах косоного згинання.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо залізобетонний елемент, завантажений зовнішнім згинальним моментом M_β , що діє в площині, нахилений під кутом β до вертикальної осі симетрії нормального перерізу. При цьому, якщо

$$M_\beta > M_{crc}, \quad (1)$$

то елемент працює з нормальними тріщинами у розтягнутій зоні.

Методика обчислення величини M_{crc} на основі нелінійної деформаційної моделі наведена у роботі [11].

У загальному випадку ширина розкриття утворених нормальних тріщин визначається за інтегральною залежністю умови сумісності деформацій

$$w_m = \int_{s_{rm}} (\varepsilon_s - \varepsilon_{ct}) dx, \quad (2)$$

де s_{rm} – середнє значення відстані між сусідніми тріщинами;

ε_s – значення відносних деформацій арматури;

ε_{ct} – значення відносних деформацій розтягнутого бетону на ділянці між тріщинами.

Замінивши дійсний нелінійний розподіл деформацій арматури на ділянці між тріщинами його серединною поверхнею, матимемо

$$w_m \approx \varepsilon_{sm} \cdot s_{rm}, \quad (3)$$

тут ε_{sm} – середні відносні деформації арматури на ділянці s_{rm} з урахуванням впливу на них деформацій бетону навколо арматурної зони. Їх значення можна обчислити за формулою, приведеною в [12]:

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_s \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{crc}}{M_\beta} \right)^2 \right], \quad (4)$$

де ε_s – деформації найвіддаленішого від нейтральної лінії арматурного стержня у перерізі з тріщиною;

β_1 – коефіцієнт, що залежить від умов зчеплення бетону з арматурою; для арматури періодичного профілю $\beta_1 = 1,0$; для гладкої арматури $\beta_1 = 0,5$;

β_2 – коефіцієнт, що враховує тривалість навантаження; наприклад, при короткочасній дії навантаження $\beta_2 = 1,0$;

Величина відстані між тріщинами залежить у загальному випадку від рівня навантаження [7]. Для практичного оцінювання тріщиностійкості важливою є найбільша кінцева відстань s_{rm} , значення котрої для залізобетонних елементів при косому згинанні можна визначити за ДСТУ [9]:

$$s_{rm} = 2c_{nom} + 0,125k_1 \varnothing_s \frac{A_{c,eff}}{A_s}, \quad (5)$$

де c_{nom} – товщина захисного шару бетону;

\varnothing_s – діаметр арматурного стержня, найвіддаленішого від нейтральної лінії;

A_s – площа розтягнутої арматури;

$A_{c,eff}$ – ефективна площа розтягнутого бетону навколо арматурної зони;

k_1 – коефіцієнт, що враховує вплив умов зчеплення бетону з арматурою, рівний 0,8 для стержнів періодичного профілю і 1,6 – для гладкої арматури.

У даній роботі пропонується величину ефективної площі $A_{c,eff}$ розтягнутого бетону навколо арматурної зони в перерізі елемента, що зазнає косоного згинання, приймати залежно від значення висоти

$$h_{c,eff} = \min \left[2,5H - d_\theta; (H - X) / 3; H / 2 \right]. \quad (6)$$

де $H = b \sin \theta + h \cos \theta$ – висота перерізу в напрямі перпендикулярному до нейтральної лінії;

d_θ – відстань від крайньої стиснутої фібри бетону до рівнодійної напружень арматури A_s в напрямі перпендикулярному до нейтральної лінії (рис. 1).

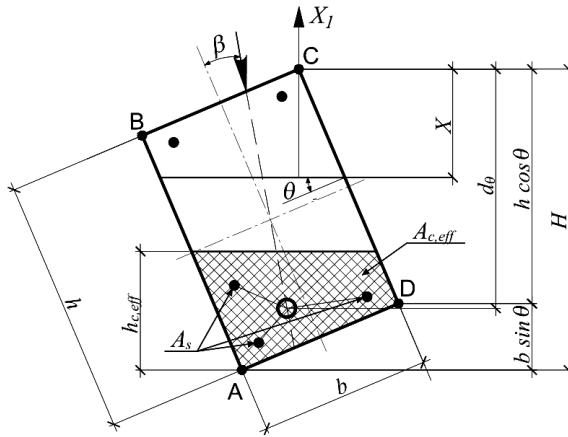


Рис. 1. Ефективна розтягнута зона бетону

При цьому якщо

$$h_{c,eff} \leq b \sin \theta, \quad \text{то} \quad A_{c,eff} = \frac{h_{c,eff}^2}{\sin 2\theta}; \quad (7)$$

якщо ж

$$h_{c,eff} > b \sin \theta, \quad \text{то} \quad A_{c,eff} = \frac{b^2 \sin^2 \theta}{\sin 2\theta} \left(\frac{2h_{c,eff}}{b \sin \theta} - 1 \right). \quad (8)$$

Підставивши (4) та (3) у (2) отримаємо

$$w_m = \varepsilon_s \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{crc}}{M_\beta} \right)^2 \right] \cdot \left[2c_{nom} + 0,125k_1 \varnothing_s \frac{A_{c,eff}}{A_s} \right]. \quad (9)$$

Таким чином, розрахунок ширини розкриття нормальних тріщин у залізобетонному елементі, що зазнає косоного згинання, зведено до задачі визначення параметрів напружено-деформованого стану елемента в нормальному перерізі: деформацій ε_s найбільш розтягнутого арматурного стержня; кута θ повороту нейтральної лінії та висоти стиснутої зони X .

Для розв'язання поставленої задачі були удосконалені практично можливі розрахункові моделі напружено-деформованого стану косозігнутої залізобетонної балки у нормальному перерізі з тріщиною (рисунок 2). Вони базуються на передумовах нелінійної деформаційної моделі за ДБН [8]. Відомими при цьому вважають розміри поперечного перерізу $b \times h$, площа A_{st}

і координати розміщення $(x_{1si}; y_{1si})$ арматурних стержнів, величина зовнішнього моменту M_β та кут β нахилу до вертикальної осі симетрії перерізу площини його дії, міцнісні та деформативні характеристики матеріалів f_c, E_c, K, f_y, E_s .

Невідомими вважалися: деформації бетону $\varepsilon_{c(1)}$ крайньої стиснутої фібри, кут θ повороту нейтральної лінії, висоту стиснутої зони бетону X , деформації ε_{si} і напруження σ_{si} у арматурних стержнях, функція розподілення напружень у бетоні стиснутої зони σ_c .

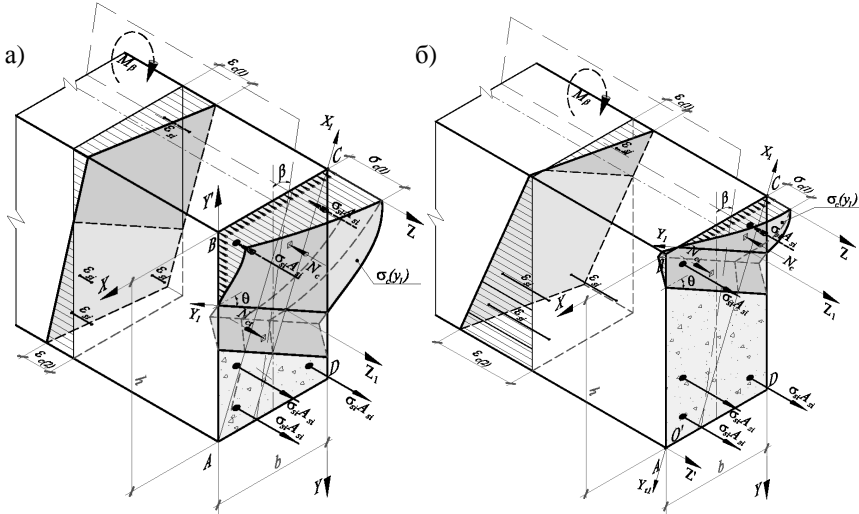


Рис. 2. Розрахункові моделі напружено-деформованого стану косозігнутої залізобетонної балки у нормальному перерізі в стадії II при а) трапецієподібній формі стиснутої зони; б) трикутній формі стиснутої зони

Система рівнянь, котра дозволяє вирішити поставлену задачу включає – рівняння рівноваги нормального перерізу

$$\sum Z_1 = \int_{A_c} \sigma_c(x_1; y_1) dx_1 dy_1 + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} = 0; \quad (10)$$

$$\sum M_{X1} = \int_{A_c} \sigma_c(x_1; y_1) x_1 dx_1 dy_1 + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} y_{s1i} - M_\beta \sin(\beta - \theta) = 0; \quad (11)$$

$$\sum M_{Y1} = \int_{A_c} \sigma_c(x_1; y_1) y_1 dx_1 dy_1 + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} x_{si} - M_\beta \cos(\beta - \theta) = 0; \quad (12)$$

– геометричне співвідношення, за гіпотезою плоских перерізів

$$\frac{\varepsilon_{si}}{x_{1si} - X} = \frac{\varepsilon_c}{x_1} = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{X}; \quad (13)$$

– залежність між напруженнями і деформаціями у арматурі

$$\sigma_{si} = \begin{cases} E_s \varepsilon_{si}, & \text{при } 0 \leq |\varepsilon_{si}| < f_y / E_s; \\ f_y \cdot \text{sign}(\varepsilon_{si}), & \text{при } f_y / E_s \leq |\varepsilon_{si}| < \varepsilon_{s2}; \end{cases} \quad (14)$$

– залежність між напруженнями і деформаціями у бетоні, котру приймають на основі апроксимації діаграми стану стиснутого бетону дробово-раціональною функцією за ДБН [8]:

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = f_c \frac{K_c (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1}) - (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1})^2}{1 + (K_c - 2)(\varepsilon_c / \varepsilon_{c1})}. \quad (15)$$

Таким чином, отримана нелінійна система шести рівнянь із шістьма невідомими. Аналітичне її вирішення в загальному випадку не виражається через елементарні функції. Отримати рішення цієї системи можливо за допомогою комп'ютерних програм (Maple, Mathematica, MathCAD, MS Excel та інші).

Висновки. Формула (9) та рівняння (10) – (15) дозволяють обчислити середнє значення w_m ширини розкриття тріщини в залізобетонному елементі, що зазнає косоного згинання, на основі нелінійних діаграм фізичного стану бетону за ДБН [8].

Характеристичне значення величини w_k , котре визначається у практичних розрахунках становитиме (при рівні забезпеченості 0,95)

$$w_k = w_m (1 + 1,64 \cdot V_w) \approx 1,75 w_m, \quad (16)$$

де V_w – коефіцієнт варіації ширини розкриття тріщин.

Для випадку плоского згинання V_w складає 0,4 [4, 5, 6, 12]. Для випадку ж косоного згинання залізобетонних елементів, його значення набувають більших значень. Так, за даними проведених експериментальних досліджень косозігнутих залізобетонних балок $V_w = 0,45$ для експлуатаційних рівнів завантаження (0,6...0,9 M_R), що й пропонується приймати в розрахунках.

1. Расчет железобетонных конструкций при сложных видах деформаций / [Торжник М. С., Вахненко П. Ф., Фалеев Л. В. и др.]; под ред. М. С. Торяника. – М.: Стройиздат, 1974. – 297 с. 2. Павликов, А. Н. Экспериментально-теоретические исследования прочности, деформативности, образования и раскрытия трещин по сечениям, нормальным к продольной оси косоизгибаемых керамзитобетонных

элементов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А. Н. Павликов – Полтава, 1979. – 226 с.

3. Семко А.В. Образование и раскрытие трещин, нормальных к продольной оси косоизгибаемых железобетонных элементов таврового и Г-образного сечения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А. В. Семко – Полтава, 1988. – 184 с.

4. Borges J. F. Formation of Cracks in Beams with Low Percentage of Reinforcement / J.F. Borges, J. Arga e Lima // RILEM-Symposium on Bond and Crack Formation in Reinforced Concrete – Stockholm: 1957 – Vol. II – P. 461 – 472.

5. Nawy E. G. Serviceability Behavior of Post-Tensioned Beams / E.G. Nawy, J.Y. Chiang // PCI Journal. – 1980. – January-February. – P. 74 – 95.

6. MacGregor, J.G. Cracking of reinforced and Prestressed Concrete Wall Segments : A Technical Report to the AEC Board / J. G. MacGregor, S. H. Rizkalla, S. H. Simonds. – Ottawa : Univ. of Alberta, 1980. – 206 p.

7. Бондаренко, В. М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. – М.: АСВ, 2004.

8. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення : ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинні від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіобуд України, 2011. – 71 с. – (Державні будівельні норми України).

9. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6-156:2011 – [Чинний від 2011-06-01]. – К.: Мінрегіобуд України, 2011. – 118 с. – (Національний стандарт України).

10. Design of concrete structures: EN 1992-1-1. Eurocode 2. – Part 1: General rules and rules for buildings. – Brussels, 2002. – 230 p.

11. Павліков А. М. Дослідження впливу нелінійних властивостей бетону на величину пружно-пластичного моменту опору в балкових елементах при косому деформуванні / А. М. Павліков, Д. Ф. Федоров // Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону: зб. наук. праць 6-ї Всеукраїнської науково-технічної конференції НДІБК. – К.: ДП НДІБК, 2011. – Вип. 74. – Книга 1. – С. 210 – 216.

12. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования : уч. пособ. / [Н.П. Блещик, Д.Д. Жуков, Д.Н. Лазовский и др.]; под ред. Т.М. Пецольда и В.В. Тура. – Брест : БГТУ, 2003. – 380 с.