

ОПІР БАЛКОВИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА ПОХИЛИМИ ПЕРЕРІЗАМИ

STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAM ELEMENTS IN INCLINED SECTIONS

Швайковський В.Л., аспірант, ORCID 0000-0002-0566-9999,
Довженко О.О., к.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-2266-2588
(Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)

Shvaikovskiy V.L., post graduate student, ORCID 0000-0002-0566-9999,
Dovzhenko O.O., Phd, Professor, ORCID: 0000-0002-2266-2588
(National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic")

Наведені результати експериментальних досліджень у похилих перерізах балкових залізобетонних елементів при відносних прольотах зрізу $1,4 \leq c/d \leq 3,2$ та шляхи удосконалення розрахунку їх граничного опору з врахуванням висоти стиснутої зони у похилому перерізі, кута нахилу небезпечної тріщини та її проєкції на поздовжню вісь елемента.

The results of experimental studies of the beam reinforced concrete members strength in inclined sections to the action of shear forces when changing the relative shear spans in the interval $1.4 \leq c/d \leq 3.2$ with different intensities of shear reinforcement are presented. 6 experimental beams of two series were tested using the “pure bending” scheme. The deformed state of the compressed zone of concrete in an inclined section near the point of force application and shear reinforcement crossing the crack was investigated at different loading levels using strain gauges. A significant increase in the plastic component of the relative strain of compressed concrete at the stages preceding failure and the achievement of the yield stress in the shear reinforcement has been established. The failure of beams occurs by shearing concrete above a dangerous inclined crack. The basis for improving the calculation of the ultimate strength of beam reinforced concrete members in areas near the supports behind a dangerous inclined crack when shearing concrete in the compressed zone, taking into account the combined work of concrete and shear reinforcement, has been determined. Based on the results of experimental and theoretical studies, the calculation parameters of the inclined section were determined, which require introduction into the dependence to determine the limiting value of strength. A relationship has been established between the parameters that determine the outline of a

dangerous inclined crack: the height of the compressed zone near the crack tip, the angle of its inclination, and the projection of the crack onto the longitudinal axis of the beam element depending on the shear span.

Ключові слова:

Зусилля, деформація, модель, тріщина, проєкція, проліт, зріз, дослідний зразок, стиснута зона.

Force, strain, model, crack, projection, span, shear, test specimen, compressed zone.

Вступ. Ефективність будівництва із збірного та монолітного залізобетону значною мірою залежить від рівня досконалості конструктивних рішень балкових елементів несучих систем будівель і споруд. Перспективним у цьому напрямку є удосконалення та підвищення достовірності їх розрахунків.

Методи розрахунку конструкцій у похилому перерізі на ділянках біля опор при дії поперечних сил останнім часом зазнали суттєвих змін. У чинних нормах [1] за основу прийнята модель «фермової аналогії», в якій робота бетону та поперечної арматури розглядається окремо. Але деформований стан та характер руйнування балкових залізобетонних елементів в експериментальних дослідженнях вказують на їх сумісний вплив на опір. Зазначене приводять до суттєвої різниці розрахункових та експериментальних величин граничного опору, особливо при кутах нахилу похилого перерізу $\cot\theta > 1,5$. Тому існує необхідність у подальшому проведенні досліджень із систематизацією розрахункових факторів і їх урахуванням при визначенні несучої здатності конструкцій.

Аналіз публікацій. Класична «фермова аналогії», запропонована Е.Мершем знайшла подальше вдосконалення шляхом урахування змінності кутів нахилу підкосу та зменшення опору бетону при наявності нього тріщин, що знайшло відображення в ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [1] та Eurocod 2 [2]. Модель «модифікованої фермової аналогії» враховує також тертя між бетонними підкосами [3]. У [4] J.A. Ramires і J.E. Vreen поперечне зусилля пропонують визначати як суму опорів бетону й арматури. У нормах США [5] використовується метод «критичної похилої тріщини». У CSA [6] розрахунок базується на «модифікованій теорії полів стиску». Модель «розпірки-тяжі» використовує траєкторії напружень та характерну схему тріщиноутворення [7]. У [8-10] балкова конструкція розглядається як «диско-в'язева» модель. При її розвитку розрахункові залежності враховують нагельний ефект у поздовжній арматурі, зачеплення в берегах похилої тріщини та зусилля в бетоні стиснутої зони. Існує підхід, який рекомендує застосування методу розрахункових опорів залізобетону [11]. Вказане свідчить про неоднозначність підходів до розрахунку балкових конструкцій у похилих перерізах.

Мета досліджень. На основі експериментального вивчення напружено-деформованого стану залізобетонних балок на ділянках біля опор при відносних прольотах зрізу $1,4 \leq c/d \leq 3,2$ та теоретичного дослідження зрізу моделей стиснутої зони над небезпечною похилою тріщиною встановити та систематизувати додаткові фактори впливу для вдосконалення розрахунку граничного опору балкових елементів на дію поперечної сили.

Методика досліджень. У лабораторії кафедри будівельних конструкцій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» проведено випробування 6-ти залізобетонних балок довжиною $l=1500$ мм з розмірами поперечного перерізу $b \times h=120 \times 190$ мм. Передбачено 2-ї серії дослідних зразків з армуванням двогілковими хомутами $\varnothing 6,5$ мм, встановленими з кроком $s=100$ і 150 мм. Поздовжнє армування: 2 $\varnothing 22$ мм класу А500С. Балки випробувалися за схемою «чистого згину». Прольот зрізу $c=220, 300, 400$ і 500 мм. На кожній ступені визначалися відносні деформації бетону стиснутої зони та хомутив за допомогою тензорезисторів типу ПКБ з базою 50 мм (рис. 1) і 5 мм (рис. 2). Зразки випробувалися двічі: спочатку підсилювалася одна ділянка (рис. 3), а після руйнування іншої хомути переставлялися.

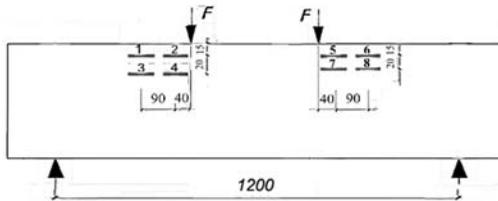


Рис. 1. Схеми розміщення тензорезисторів на бетоні стиснутої зони

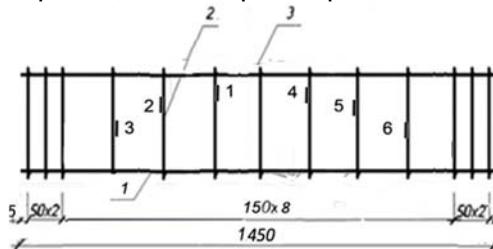


Рис. 2. Схеми розміщення тензорезисторів на арматурі:

1 – поздовжня арматура; 2 – поперечна арматура; 3 – розподільча арматура



Рис. 3. Зразок у силувій установці

Результати досліджень. Перша похила тріщина утворювалася при рівні $0,5...0,6$ від величини руйнівного навантаження F_u поблизу нейтральної осі. Після рівня $\approx 0,7F_u$ спостерігався інтенсивний ріст небезпечної тріщини у напрямку до сили. Із збільшенням прольоту зрізу c зафіксоване зміщення тріщини від опори, котре на рівні поздовжньої арматури складало приблизно: 20 мм при $c=220$ мм; 50 мм за $c=300$ мм; 80 мм при $c=400$ мм; 115 мм за $c=500$ мм. Обрис тріщини при зміні відстані від опори до місця прикладання сили залишався незмінним: за $c=220$ і 300 мм кут клину стиснутої зони у місці прикладання сили (нахилу похилої тріщини) складає $\alpha \approx 15^\circ$; при $c=400$ мм – $\alpha \approx 7,5^\circ$; за $c=500$ мм – $\alpha \approx 5^\circ$. Висота клиноподібної стиснутої зони у місці прикладання сили F із зростанням відстані від опори до сили зменшувалася і складала приблизно: 55 мм при $c=220$ мм; 45 мм при $c=300$ мм; 35 мм при $c=400$ мм; 30 мм при $c=500$ мм.

Величина деформації бетону стиснутої зони над небезпечною похилою тріщиною на різних ступенях навантаження представлена на рис. 4.

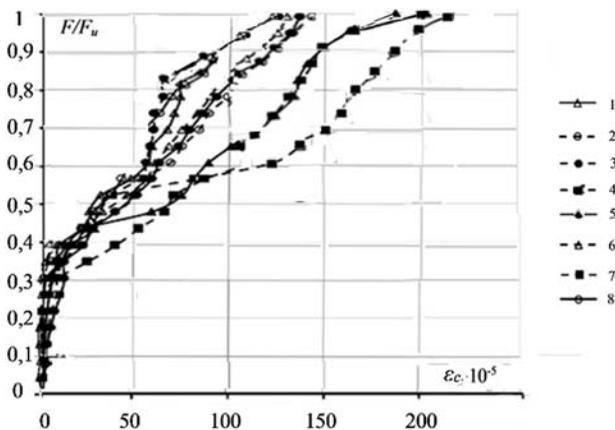


Рис. 4. Деформування бетону стиснутої зони над похилою тріщиною

Зафіксовано суттєве зростання пластичної складової деформації при рівні навантаження від $(0,7...0,8) F_u$. Деформація стиснутого бетону на останній стадії випробування балок досягає величини $\varepsilon_c = 1,3...2,2\%$ із збільшенням ε_c при розміщенні тензорезистора ближче до сили F . Деформація поперечної арматури, котра перетинає похилу тріщину, при руйнуванні балки складає $\varepsilon_s = 1,4...2,2\%$. У найбільш напружених хомутах напруження досягають встановленої за результатами випробування арматурних стержнів межі текучості 370 МПа, що відповідає деформації 1,8%) при рівні навантаження $0,8F_u$. При цьому зафіксована нерівномірність деформації хомутиків за довжиною похилої тріщини.

Характер руйнування дослідних зразків на ділянках біля опор проілюстровано на рис. 5.

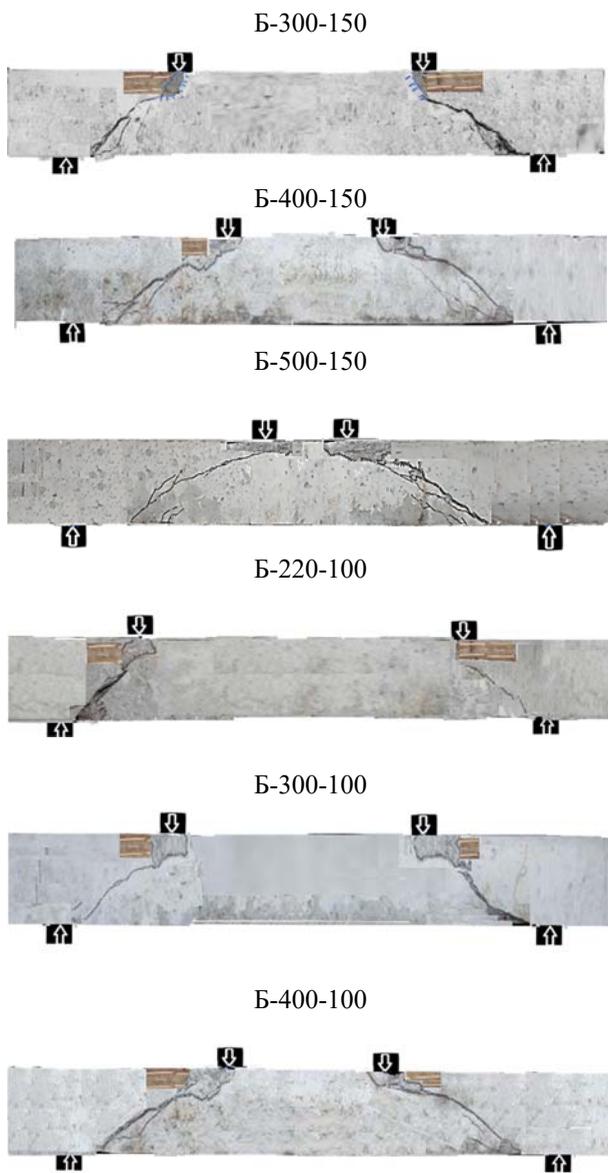


Рис. 5. Характер руйнування балок за похилим перерізом

Для визначення зусиль, що сприймаються бетоном стиснутої зони балок у похилому перерізі, розв'язана задача опору зрізаного бетонного клину, завантаженого зусиллями V_c і N_c , який моделює роботу стиснутої зони [12].

Результати випробувань приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати випробувань дослідних балок

Шифр балки	c/d	$f_{cm,prizm}$, МПа	f_{cm} , МПа	A_{sw} , мм ²	f_y , МПа	V_u , кН
Б-300-150-1	1,91	29,6	2,7	66,4	370	1,087
Б-300-150-2						1,041
Б-400-150-1	2,55					0,966
Б-400-150-2						1,054
Б-500-150-1	2,18					0,971
Б-500-150-2						0,934
Б-220-100-1	1,4					0,951
Б-220-100-2						0,98
Б-300-100-1	1,91					0,973
Б-300-100-2						0,942
Б-400-100-1	2,55					0,867
Б-400-100-2						0,919

Гранична величина зусилля V_c при розрахунку за небезпечною похилою тріщиною на дію поперечної сили встановлюється із рівняння:

$$\frac{V_c}{f_c b x} = \frac{\tan(\gamma' + \psi') - \tan \gamma'}{\tan \gamma' - \tan \alpha} \left(\bar{d} \frac{\sqrt{1 + 4 \tan^2 \psi'}}{\tan \psi'} - \bar{m} \right) \frac{\tan \beta}{1 + \tan(\gamma' + \psi') \tan \beta}, \quad (1)$$

де b і x – ширина і висота зрізаної грані клину; $\tan \beta = V_c / N_c$; α – кут клину; $\bar{m} = 1 - f_{ctd} / f_{cd}$, $\bar{d} = \sqrt{(f_{cd}^2 - f_{cd} f_{ctd} + f_{ctd}^2)} / 3$, тут f_c і f_{ct} – міцність бетону на стиск і розтяг; γ – кут поверхні зрізу до напрямку дії зусилля N_c ; ψ – кут напрямку на кінематичній схемі руху жорсткої області до поверхні зосередженої пластичної деформації.

Результати визначення граничних зусиль, які сприймають бетонні клини, та розрахункових параметрів-характеристик приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри-характеристики розрахунку бетонних клинів при відношенні $f_{ct} / f_c = 0,09$ за умови $\beta = \alpha / 2$

$\alpha, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	\bar{d}	\bar{m}	$\psi, ^\circ$	$\gamma, ^\circ$	$V_c / \sigma_c b x$
5	2,5	0,551	0,01	14,74	43,38	0,046
7,5	3,75			14,17	43,54	0,071
15	7,5			12,39	56,06	0,151

Аналіз результатів експериментальних досліджень балкових залізобетонних елементів, які руйнуються від дії поперечної сили на ділянках біля опор [9, 10, 13, 14] та проведених автором випробувань балок надав можливість представлення небезпечної похилої тріщини у вигляді ламаної з кутами нахилу α до поздовжньої осі елемента у його верхній частині, що зменшуються по мірі віддалення від опори до 5° [12].

Поперечне зусилля V_u^{calc} , що сприймає бетон стиснутої зони, встановлюється на основі розв'язання задачі опору клиноподібних моделей та отриманих експериментально залежностей висоти стиснутої зони x , кута нахилу небезпечної тріщини α та її проєкції на поздовжню вісь елемента c_0 від прольоту зрізу c .

Для визначення проєкції похилої тріщини c_0 пропонується залежність:

$$c_0 = c - (c - d) / 3. \quad (2)$$

Висота стиснутої зони x у похилому перерізі дорівнює:

$$x / d = \eta - (c_0 / d - \delta) \tan \alpha, \quad (3)$$

тут $\eta = 0,45$, $\delta=1$ і $\alpha=15^\circ$ при $1 \leq c/d \leq 1,75$; $\eta = 0,25$, $\delta=1,75$ і $\alpha=7,5^\circ$ при $1,75 \leq c/d \leq 2,15$; $\eta = 0,2$, $\delta=2,15$ і $\alpha=5^\circ$ при $2,15 \leq c/d \leq 3,2$.

Висновки. На основі аналізу існуючих методів розрахунку опору балкових залізобетонних елементів у похилих перерізах на дію поперечних сил та результатів експериментальних і теоретичних досліджень встановлено:

1. Опір у похилому перерізі балок визначає велика кількість факторів. Спрощення отриманих емпіричним шляхом розрахункових залежностей або їх ускладнення багатьма розрахунковими параметрами приводять до певних неточностей чи підвищення складності отримання результатів. Вплив визначальних факторів необхідно систематизувати на теоретичній основі.

2. Характер руйнування та величина граничного навантаження, отримані експериментально, вказують на сумісну роботу в похилому перерізі як поперечної арматури, так і бетону стиснутої зони над похилою тріщиною, котрі вносять спільний вклад в опір залізобетонних елементів.

3. Для уточнення складової опору бетону над похилою тріщиною необхідно враховувати висоту стиснутої зони у місці прикладання зосередженого навантаження, кут її нахилу та проєкцію небезпечної похилої тріщини на поздовжню вісь елемента залежно від прольоту зрізу та результати розв'язання задачі опору зрізаного бетонного клину.

1. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проєктування. – К.: Мінрегіонбуд України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2011. – 118 с. – (Національний стандарт України).

DSTU B V.2.6-156:2010. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkoho betonu. Pravyly proektuvannia. – K.: Minrehionbud Ukrainy, Derzhavne pidpriumstvo «Ukrarkhбудінформ», 2011. – 118 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

2. Eurocode 2. Design of Concrete Structures. Part 1. General Rules and Rules for Buildings: EN 1992 – 1:2001. – Brussels, 2002. – 230 p.

3. Rangan B.V. Crushing of reinforced and prestressed concrete beams/ B.V.Rangan //ACI Structural Journal. – 1991. – V. 88. – №1. – Pp. 12–16.
4. Ramires J.A. Evaluation a modified truss-model approach for beam in shear/ J.A. Ramires, J.E. Breen//ACI Structural Journal. – 1991. – V. 88. – №5. – Pp. 562–571.
5. ACI 318-14. Building Code Requirements for Structural Concrete for Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete. – American Concrete Institute, 2014. – 519 p.
6. CSA A 23.3-04. Design of Concrete Structures. – 2004. – 200 p.
7. Williams, C. Strut-and-Tie Model Design Examples for Bridges: Final Report FHWA/TX-12/5-5253-01-1 / C. Williams, D. Deschenes, O. Bayrak. – Center for Transportation Research, The University of Texas, Austin. – June 2012.
8. Торьяник М. С. Прочность и деформативность железобетонных балок, разрушающихся по наклонной трещине / М. С. Торьяник, В. П. Митрофанов // Бетон и железобетон. – 1970. – №2. – С. 39–41.
Toryanik M. S. Prochnost i deformativnost zhelezobetonnikh balok, razrushayushchikhsya po naklonnoi treshchine / M. S. Toryanik, V.P. Mitrofanov // Beton i zhelezobeton. – 1970. – №2. – С. 39–41.
9. Дорощев В.С. Прочность, деформативность и трещиностойкость приопорных участков внецентренно растянутых и сжатых железобетонных балок / В.С. Дорощев, В.М. Карпюк, Н.Н. Петров. – Одесса: «Внешрекламсервис», 2011. – 184 с.
Dorofeev V.S. Prochnost, deformativnost i treshchiioostokost priopornikh uchastkov vnetsentrenno rastyanutikh i szhatikh zhelezobetonnikh balok / V.S. Dorofeev, V.M.Karpyuk, N.N. Petrov. – Odessa: «Vneshreklamservis», 2011. – 184 с.
10. Клімов Ю. Експериментальні дослідження міцності залізобетонних елементів при дії поперечних сил / Ю. Клімов, Д. Смorkалов // Збірник наукових праць «Будівельні конструкції. Теорія і практика». Вип. 14. – К.: КНУБА, 2024. – С. 4–18.
Klimov Yu. Eksperymentalni doslidzhennia mitsnosti zalizobetonnykh elementiv pry dii poperechnykh syl / Yu. Klimov, D. Smorkalov // Zbirnyk naukovykh prats «Budivelnii konstruktzii. Teoriia i praktyka». Vyv. 14. – K.: KNUBA, 2024. – С. 4–18.
11. Кочкаръов Д.В. Розрахунок похилих перерізів залізобетонних балок методом розрахункових опорів залізобетону / Д.В. Кочкаръов // Ресурсоекономні матеріали, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Вип. 29. – Рівне, 2012. – С. 202–207.
Kochkarov D.V. Rozrakhunok pokhilykh pereriziv zalizobetonnykh balok metodom rozrakhunkovykh oporiv zalizobetonu / D.V..Kochkarov // Resursoekonomni materialy, budivli ta sporudy: Zbirnyk naukovykh prats. – Vy D.V p. 29. – Rivne, 2012. – С. 202–207.
12. Погрібний В.В. Методологія розрахунку несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій з використанням умов екстремуму деформування: монографія / В.В. Погрібний. – Полтава: ПП «Астрая», 2022. – 388 с.
Pohribnyi V.V. Methodology for calculating the bearing capacity of reinforced concrete and masonry structures using extreme deformation conditions: monograph / V.V. Pohribnyi. – Poltava: PP "Astraya", 2022. – 388 p.
13. Mohammed A.O.I. Experimental studies of strength inclined sections bent elements from autoclaved aerated concrete / A.O.I. Mohammed // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079. – Chapter 1, 022062.
14. Kuo W.W. Shear strength of reinforced concrete beams / W.W. Kuo, T. C. H. Thomas, S. J. Hwang // ACI Structural Journal. – 2014. – Vol. 111. – Pp. 809–818.