МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК БЕЗ ПОПЕРЕЧНОГО АРМУВАННЯ ТА З ЗОВНІШНЬОЮ КОМПОЗИТНОЮ АРМАТУРОЮ

Вегера П.І., к.т.н., асистент,

Pavlo.I.Vehera@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-3437-1825

Вашкевич Р.В., к.т.н., доцент,

Rostyslav.V.Vashkevych@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-9962-7580

Хміль Р.Є., к.т.н., докторант,

Roman.Y.Khmil@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-7578-8750

Бліхарський З.Я., д.т.н., професор,

Zinovii.Y.Blikharskyi@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-4823-6405

Національний університет «Львівська політехніка»

Анотація. При визначенні несучої здатності похилих перерізів залізобетонних балок (згідно діючих норм) є наведені значення окремих рекомендованих величин, які не залежать від параметрів зразка чи навантаження. В даній статті описано методологію визначення міцності на зріз з пропозиціями щодо визначення коефіцієнта $C_{Rd,c}$ та кута нахилу умовного стиснутого елемента Θ при розрахунку залізобетонних зразків з використанням «фермової моделі». Розрахунок з використанням лише величин наведених в нормах показав значну розбіжність результатів. Використовуючи уточнені значення параметрів наведених вище, збіжність результатів становить 16-29% в бік завищення експериментальних даних. Розрахунок композитної системи підсилення показав завищення 23%, що знаходиться в тих же межах, що і для контрольних зразків.

Ключові слова: залізобетонні балки, похилі перерізи, підсилення, композитні матеріали.

Вступ. Розрахунок залізобетонних конструкцій вимагає високої точності та надійності. Такі вимоги є актуальними через неоднорідність залізобетону як матеріалу, невелику роботу в «пружній» стадії, крихкість та раптовість вичерпання несучої здатності. Особливо, це стосується похилих перерізів в залізобетонних згинаних елементах. Визначення несучої здатності елементів, що працюють на зріз без поперечного армування ускладнюються ще і складним напружено-деформованим станом елемента. Розроблення та вдосконалення методів оцінки несучої здатності похилих перерізів є актуальною задачею в інженерні галузі.

Аналіз останніх джерел досліджень та публікацій. Залізобетон це один з найпоширеніших будівельних матеріалів в Україні та світі. Його широке застосування викликано дешевизною матеріалів, простотою у виготовленні конструкцій та монтажі складних елементів. Проте під час експлуатації залізобетонні конструкції отримують пошкодження та дефекти, що знижують його несучу здатність та довговічність [1]. Тому, з часом залізобетонні елементи потребують відновлення чи збільшення несучої здатності шляхом підсилення. Найбільш поширеними способами є підсилення шляхом влаштування залізобетонної обойми. Проте, такий спосіб є тривалий в часі та збільшує масу конструкції в цілому. Сучаснішим та ефективнішим є застосування композитних систем підсилення [2]. В їх основу покладено використання високоміцних матеріалів на основі карбону чи Р.В.О. волокон. Застосування цих матеріалів є актуальним оскільки вони мають високу міцність, низьку власну вагу та малі геометричні розміри. Значне поширення такі системи підсилення набули для згинаних залізобетонних елементів [3, 4]. Менш поширеним та складнішим випадком є підсилення залізобетонних балок на зріз. Виконання таких досліджень є складним з огляду складного напруженого деформованого стану похилих перерізів [5], особливо при внесенні додаткового фактору у вигляді композитного армування. Отже, основну увагу в цій статті приділено

методиці розрахунку залізобетонних балок на зріз без та з підсиленням FRCM системою.

Мета та завдання досліджень. Метою даної статті є апробація розрахунку похилих перерізів залізобетонних балок для відносного прольоту зрізу в межах від $a/d=1$ до $a/d=2$, та апробація «фермової моделі» розрахунку для можливості застосування при визначенні несучої здатності підсилених похилих перерізів з використанням композитних матеріалів. При необхідності надати рекомендації та пропозиції до розрахунку.

Для досягнення поставленої мети поставлені наступні задачі досліджень:

- провести аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень;
- провести аналіз методики розрахунку похилих перерізів згідно діючих норм [6, 7];
- навести рекомендації, щодо застосування розрахунку при визначенні несучої здатності похилих перерізів без поперечного армування;
- запропонувати застосування «фермової моделі» розрахунку для обчислення несучої здатності похилих перерізів підсилених залізобетонних балок.

Методика розрахунку несучої здатності похилих перерізів. Чинні норми [6, 7] регламентують розрахунок похилих перерізів за «фермовою моделлю». Несуча здатність перерізу в зоні дії поперечної сили, де відсутнє поперечне армування розглядаємо, як міцність бетону на зріз під кутом 45° .

Міцність похилих перерізів залізобетонних балок, розглядаємо як умову міцності:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c}, \quad (1)$$

де $V_{Ed} = Q$ – розрахункове значення поперечної сили від зовнішнього навантаження. Розрахункове значення поперечної сили, яку може сприйняти переріз без поперечного армування та без попередньо напруженої поздовжньої арматури чи осьової сили в перерізі, згідно норм [6], визначаємо за залежністю:

$$V_{Rd,c1} = \frac{\left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] \cdot b_w \cdot d}{\beta}. \quad (2)$$

Проте при значенні не меншому, ніж:

$$V_{Rd,c2} = v_{\min} \cdot b_w \cdot d, \quad (3)$$

де $C_{Rd,c}$ – міцність бетону на зріз, нормами [6, 8] рекомендується приймати 0.18;

$k = 1 + \sqrt{200/d}$ – коефіцієнт впливу висоти балки; $\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d}$ – коефіцієнт армування; A_{sl} –

площа розтягнутої арматури, мм^2 ; f_{ck} – характеристичне значення міцності бетону на стиск у віці 28 діб, МПа; b_w, d – відповідно найменша ширина перерізу у розтягнутій зоні та робоча висота перерізу, мм; $v_{\min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$ – мінімальне значення міцності на зріз, що може призвести до руйнування до настання текучості в поздовжній арматурі, МПа.

Поздовжнє армування враховували в розрахунок лише за умови його заведення на відстань l_{bd} за проекцію розрахункового перерізу під кутом 45° , де l_{bd} – мінімальна необхідна довжина анкерування поздовжньої арматури (рис. 1).

Рис. 1. Модель впливу факторів на міцність бетонного похилого перерізу [6, 8]

Коефіцієнт β , який дорівнює $\beta = a_v/2d$, та вводиться при завантаженні розрахункових елементів зверху в межах $0.5 \cdot d \leq a_v \leq 2 \cdot d$ (рис. 2), як понижуючий коефіцієнт поперечної сили V_{Ed} . В даному випадку, рекомендується його ввести в розрахунковий апарат визначення несучої здатності бетону $V_{Rd,c1}$, шляхом ділення визначеної несучої здатності на цей коефіцієнт.

Рис. 2. Прикладнення навантаження для коефіцієнта β [6, 8]

При використанні коефіцієнта β повинна виконуватись умова:

$$V_{Ed} \leq 0.5 \cdot b_w \cdot d \cdot \nu \cdot f_{cd}, \quad (4)$$

де f_{cd} – розрахункове значення міцності бетону на стиск, МПа; ν – коефіцієнт зниження міцності бетону на зсув з тріщинами. Коефіцієнт рекомендується визначати за залежністю [6]:

$$\nu = 0.6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]. \quad (5)$$

В даній методиці розрахунку відсутні будь які умови щодо визначення коефіцієнта $C_{Rd,c}$, а рекомендується використання в усіх випадках сталого значення 0.18 МПа. Для визначення впливу міцності бетону на зріз [9] на несучу здатність похилих перерізів, пропонується використовувати залежність, рекомендовану європейськими нормами 1997 року видання, яка враховує зміну міцності бетону на зріз при розтягу [10]:

$$C_{Rd,c} = \tau_{Rd} = 0.25 \cdot f_{ctk0.05}. \quad (6)$$

Основною характеристикою бетону є міцність на стиск, тому у залежності (6) перейдемо від міцності на розтяг до міцності на стиск за залежностями наведеними в цих же нормах:

$$f_{ctk0.05} = 0.7 \cdot f_{ctm}, \quad (7)$$

$$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3}. \quad (8)$$

В результаті отримаємо наступну залежність для міцності бетону на зріз:

$$C_{Rd,c} = 0.0525 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}. \quad (9)$$

Для розрахунку несучої здатності прийемо наступні передумови роботи підсиленого похилого перерізу:

- для підсиленого похилого перерізу є справедлива гіпотеза плоских перерізів;
- армування композитним матеріалом працює, як додаткове зовнішнє армування;
- система підсилення працює сумісно з бетоном в похилому перерізі.

Таким чином, зовнішня композитна арматура включається у фермову модель розрахунку як розтягнуті елементи решітки ферми.

За умови справедливості прийнятих передумов запропоновано виконувати розрахунок несучої здатності елемента підсилення, як для поперечного армування, тому для розрахунку несучої здатності системи підсилення використаємо формулу з норм [6, 8] для визначення несучої здатності на зріз за арматурою, підставивши параметри композитної тканини:

$$V_{Rd}^{add} = \frac{A_{sw}^{add}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd}^{add} \cdot \cot \theta. \quad (10)$$

Для підсилення під кутом до поздовжньої осі балки:

де $A_{fw} = (0.00455 \cdot 7) \cdot 2 = 0.0637 \text{ мм}^2$ – площа поперечного перерізу зовнішньої арматури;
 $s_f = 100 \text{ мм}$ – крок елементів підсилення.

При визначенні несучої здатності додаткового армування кут нахилу умовного стиснутого елемента становив 21.8° , згідно з експериментальними даними (рис. 3). Таке значення кута θ відповідає максимальному значенню $\cot \theta = 2.5$ [6, 8].

Рис. 3. Кут нахилу умовного стиснутого елемента в зразку БПК 1.4.1.

Розрахунковий опір композитної арматури визначали за формулою (11) згідно рекомендацій [11]:

$$f_{ywd}^{add} = k \cdot \varepsilon_{fd,e} \cdot E_{fud} = k \cdot \frac{\varepsilon_{fk,e}}{\gamma_f} \cdot 0.4 \cdot E_{fuk}, \quad (11)$$

де $\varepsilon_{fd,e}$ – розрахункові значення граничних деформацій для композитної арматури;

$\varepsilon_{fk,e} = \frac{\varepsilon_{f,e}}{\gamma_f}$ – характеристичне значення граничних деформацій для композитної арматури;

$\gamma_f = 1.3$ – коефіцієнт надійності за матеріалом, згідно рекомендацій *FIB*, який приймається при можливості проковзування тканини чи $\gamma_f = 1.35$ при можливості розриву тканини (у випадку неможливості настання вищеписаних умов коефіцієнт приймається рівним 1); $k = 0.8$ – понижуючий коефіцієнт, поданий в чинних нормах [4, 7] та в рекомендаціях *FIB* [11]; E_{fud} – розрахункові значення модуля пружності композитного матеріалу, яке приймається на рівні 40% від характеристичного значення.

Згідно рекомендацій *FIB* [11] сумісна робота бетону і елементів підсилення відбувається лише за такого заниження характеристичного значення модуля пружності композитного матеріалу.

Результати експериментальних досліджень. Дослідні зразки залізобетонні балки розмірами поперечного перерізу $200 \times 100 \text{ мм}$ з розрахунковим прольотом 1900 мм . Армування виконано у вигляді $2\text{Ø}18 \text{ мм A500C}$ – розтягнута арматура та $2\text{Ø}10 \text{ A500C}$ – стиснута арматура. У приопорній зоні поперечне армування відсутнє. В якості підсилення була використана композитна система FRCM, яка наносилася у вигляді смужок шириною 70 мм з кроком 100 мм . Такий тип підсилення був обраний з метою спостереження та фіксації процесу розкриття похилих тріщин в бетоні. Всього було випробувано 4 дослідних зразки. Змінними параметрами був відносний проліт зрізу a/d , що набував значень $a/d=2$, $a/d=1.5$ та $a/d=1$, а для останнього зразка виконувалось підсилення композитною системою при відносному прольоті зрізу $a/d=2$. Більш детально конструкція дослідних зразків та методика випробовування наведена в праці [12].

Апробація розрахунку. Розрахунок проводився з використанням залежності (2) та значень які рекомендовані нормами [6, 8]. Для порівняння та апробації запропонованого значення $C_{Rd,c}$ визначеного за формулою (9) було проведено повторний розрахунок за залежністю (2). Результати розрахунків наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати визначення несучої здатності дослідних зразків

Шифр балки	Відносний проліт зрізу, a/d	Експериментальна міцність на зріз, $V_{Ed}(Q)$, кН	Теоретична міцність на зріз за ДСТУ Б В.2.6-156:2010		Теоретична міцність на зріз з $C_{Rd,c}$ за Eurocode 2	
			$V_{Rd,c1}$, кН	$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,c1}}$	$V_{Rd,c1}$, кН	$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,c2}}$
БЗ 1.1	2	95.0	32.8	2.89	81.6	1.16
БЗ 1.2	1.5	140.5	43.7	3.22	108.8	1.29
БЗ 1.3	1	198.0	65.5	3.02	163.2	1.21

За проведеними розрахунками можна встановити, що розрахунок лише з використанням норм дає значне завищення результатів несучої здатності залізобетонних балок на зріз. Проте, з використанням значень $C_{Rd,c}$, які рекомендуються попередніми європейськими нормами [10] точність розрахунку становить 16-29% в сторону завищення експериментальних даних. Це є задовільним результатом при визначенні несучої здатності залізобетонних балок на зріз без поперечної арматури.

Порівняння теоретичних та експериментальних значень несучої здатності похилих перерізів балок без внутрішнього металевих поперечного армування підсилені композитною системою FRCM визначено за залежністю (11) наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати визначення несучої здатності дослідних зразків

Шифр дослідної балки	Теоретичні значення			Експериментальні		$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}}$	$\frac{V_{Ed}^{add}}{V_{Rd}^{add}}$
	$V_{Rd,c}$, кН	V_{Rd}^{add} , кН	V_{Rd} , кН	V_{Ed} , кН	V_{Ed}^{add} , кН		
БЗ 1.1	81.6	-	81.6	95	-	1.16	-
БПК 1.4		34.6	116.2	137.5	42.5	1.18	1.23

Розрахункова несуча здатність залізобетонних зразків підсилені композитною системою становить 116.2 кН, що є меншим на 18% від експериментальних даних. Даний результат знаходиться в межах похибки, яка отримана для непідсилені зразків. Розрахунок несучої здатності, що отримується за рахунок композитної системи показав збіжність результатів 23%, що теж є в межах розрахунку непідсилені зразків. Таким чином, запропонована методика розрахунку має задовільні передумови для використання при розрахунку конструкцій на зріз, що підсилені композитними матеріалами. Проте, дана методика потребує подальшого статистичного опрацювання на зразках інших дослідників з іншими параметрами.

Висновки. Розрахунок залізобетонних балок на зріз, використовуючи лише рекомендації діючих норм, показує значне завищення теоретичних значень над експериментальними при визначенні несучої здатності. Проте, використовуючи уточнені значення $C_{Rd,c}$ отримано збіжність результатів в межах 16-29% в бік завищення експериментальних даних. Для визначення міцності залізобетонних балок на зріз це задовільна точність. При розрахунку

залізобетонних балок підсилених системою FRCM, беручи за основу залежності з діючих норм, отримано збіжність 18%, що є в межах збіжності контрольних зразків. Розрахунок збільшення несучої здатності системою FRCM показує збіжність 23% в бік завищення експериментальних результатів, що свідчить про задовільну можливість для використання даної методики при розрахунку підсилених залізобетонних балок на зріз.

Література

1. Blikharsky Z. Corrosion of Reinforce Bars in RC Constructions / Z. Blikharsky, J. Selejdak, Y. Blikharsky, R. Khmil // *System Safety: Human - Technical Facility - Environment*. – 2019. – no.1. – pp. 277-283.
2. Selejdak J. Calculation of Reinforced Concrete Columns Strengthened by CFRP / J. Selejdak, Y. Blikharsky, R. Khmil, Z. Blikharsky // *Lecture Notes in Civil Engineering*. – 2020. – no. 47. – pp. 400- 410.
3. Ferrari V. J. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with carbon fibers reinforced polymer (CFRP) sheet bonded to a transition layer of high performance cement-based composite / V. J. Ferrari, J. B. de Hanai // *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. – 2012. – no. 5(5). – pp. 596-626.
4. Rossini M. Pedestrian bridge as clarifying example of FRP-RC/PC design / M. Rossini, S. Spadea, A. Nanni // *ACI:Special Publication*. – 2019. – no. 333. – pp. 96-118.
5. Blikharsky Z. Crack Resistance of RC Beams on the Shear / Z. Blikharsky, R. Vashkevych, P. Vegera, Y. Blikharsky // *Lecture Notes in Civil Engineering* – 2020. – no. 47. – pp. 17-24.
6. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б.В.2.6-156:2010. – [Чинний від 2011-06-01]. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2011. – 118 с. – (Національний стандарт України).
7. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинний від 2011-06-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 84 с. – (Національний стандарт України).
8. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules for buildings. 2004. EN 1992-1-1:2004 (E), 225.
9. Amadio C.A. Novel hybrid system with RC-encased steel joists / C. Amadio, L. Macorini, S. Sorgon, G. Suraci // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2011. – 15(10). – pp. 1433-1463.
10. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings (together with United Kingdom National Application Document). 1994 DD ENV 1992-1-1:1992, 194.
11. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report / [T. Triantafillou, S. Matthys, K. Audenaert, G. Balázs, and oth]. – St.: International Federation for Structural Concrete (fib), 2001. – 130 p.
12. Вегера П.І. Оптимізація методики експериментальних досліджень похилих перерізів залізобетонних балок / П.І. Вегера, Р.Є. Хміль, З.З. Бліхарський // *Теорія та практика будівництва*, 2015. – №823. – С. 38-43.

References

- [1] Z. Blikharsky, J. Selejdak, Y. Blikharsky, R. Khmil, "Corrosion of Reinforce Bars in RC Constructions", *System Safety: Human - Technical Facility – Environment*, no. 1, pp. 277-283, 2019.
- [2] J. Selejdak, Y. Blikharsky, R. Khmil, Z. Blikharsky, "Calculation of Reinforced Concrete Columns Strengthened by CFRP", *Lecture Notes in Civil Engineering*, no. 47, pp. 400-410, 2020.
- [3] V. J. Ferrari, J. B. de Hanai, "Flexural strengthening of reinforced concrete beams with carbon fibers reinforced polymer (CFRP) sheet bonded to a transition layer of high performance cement-based composite", *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, no. 5(5), pp. 596-626, 2012.
- [4] M. Rossini, S. Spadea, A. Nanni, "Pedestrian bridge as clarifying example of FRP-RC/PC

- design", *ACI: Special Publication*, no. 333, pp. 96-118, 2019.
- [5] Z. Blikharskyi, R. Vashkevych, P. Vegera, Y. Blikharskyi, "Crack Resistance of RC Beams on the Shear", *Lecture Notes in Civil Engineering*, no. 47, pp. 17-24, 2020.
- [6] Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkoho betonu. Pravyla proektuvannia: DSTU B.V.2.6-156:2010. [Chynnyi vid 2011-06-01]. Kyiv: DP «Ukrarkhbudininform», 2011. (Natsionalnyi standart Ukrainy).
- [7] Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia: DBN V.2.6-98:2009. [Chynnyi vid 2011-06-01]. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2011. (Natsionalnyi standart Ukrainy).
- [8] Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules for buildings. 2004. EN 1992-1-1:2004 (E), 225.
- [9] C. Amadio, L. Macorini, S. Sorgon, G. Suraci, "Novel hybrid system with RC-encased steel joists", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(10), pp. 1433-1463, 2011.
- [10] Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings (together with United Kingdom National Application Document). 1994 DD ENV 1992-1-1:1992, 194.
- [11] Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report / [T. Triantafillou, S. Matthys, K. Audenaert, G. Balázs, and oth]. St.: International Federation for Structural Concrete (fib), 2001.
- [12] P.I. Vegera, R.Ie. Khmil, Z.Z. Blikharskyi, "Optymizatsiia metodyky eksperymentalnykh doslidzhen pokhylykh pereriziv zalizobetonnykh balok", *Teoriia ta praktyka budivnytstva*, no. 823, pp. 38-43, 2015.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК БЕЗ ПОПЕРЕЧНОГО АРМИРОВАНИЯ И С ВНЕШНЕЙ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРОЙ

Вегера П.И., к.т.н., ассистент,

Pavlo.I.Vehera@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-3437-1825

Вашкевич Р.В., к.т.н., доцент,

Rostyslav.V.Vashkevych@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-9962-7580

Хмил Р.Е., к.т.н., доцент,

Roman.Y.Khmil@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-7578-8750

Блихарский З.Я., д.т.н., профессор,

Zinovii.Y.Blikharskyi@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-4823-6405

Национальный университет «Львовская политехника»

Аннотация. Определение несущей способности железобетонных балок по наклонному сечению (согласно действующим нормативным документам) включает конкретные рекомендуемые значения, которые не зависят от параметров образца или нагрузки. В данной статье описывается методика определения прочности по наклонному сечению с предложениями для расчета коэффициента C_{Rdc} и угла наклона условного сжатого сечения θ при расчете железобетонных элементов с использованием «ферменной модели». Для подтверждения методики были испытаны 4 железобетонных балки. Образцы для испытаний имели размеры поперечного сечения 200×100 мм и эффективный пролет 1900 мм. Армирование выполнено из $2\varnothing 18$ мм A500C – растянутые арматурные стержни и $2\varnothing 10$ A500C – сжатые арматурные стержни. В приопорных зонах, поперечная арматура отсутствует. Испытания проводились для того, чтобы исследовать каждое конкретное наклонное сечение отдельно. Переменным параметром был относительный пролет среза a/d , с его значениями $a/d = 2$, $a/d = 1,5$ и $a/d = 1$. Другим переменным параметром было использование композитной системы усиления, сделанной для относительного пролета среза $a/d = 2$. Образцы в виде однопролетных балок, подвергнутых кратковременной нагрузке. Внешнее композитное усиление вводится в расчетную

модель фермы, как элементы фермы, которые работают на растяжение. Если допущения выполнены, можно рассчитать несущую способность элементов усиления как для поперечной арматуры, следовательно, для расчета несущей способности системы усиления будет использована формула из норм. Для определения дополнительной несущей способности арматуры угол наклона сжатого элемента составил 21.8° , полученный с экспериментальных данных. Расчет с использованием только значений, приведенных в нормах, показал значительное расхождение результатов. Использование уточненных значений параметров обеспечило сходимость результатов в пределах 16-29% в сторону завышения экспериментальных данных. Расчет системы композитного усиления показал завышение на 23%, что находится в тех же пределах, что и для контрольных образцов.

Ключевые слова: железобетонные балки, наклонные сечения, усиления, композитные материалы.

SHEAR DEFORMABILITY OF REINFORCED CONCRETE BEAMS, STRENGTHENED BY FROM SYSTEM

Vehera P.I., PhD, Assistant Professor,

Pavlo.I.Vehera@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-3437-1825

Vashkevych R.V., Ph.D., Associate Professor,

Rostyslav.V.Vashkevych@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-9962-7580

Khmil R.Ye., Ph.D., Associate Professor,

Roman.Y.Khmil@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-7578-8750

Blikharskyy Z.Y., Doctor of Engineering, Professor,

Zinovii.Y.Blikharskyi@lpnu.ua ORCID: 0000-0002-4823-6405

Lviv National Polytechnic University

Abstract. Determination of shear-load-bearing capacity of reinforced concrete beams (according to the current normative documents), comprises particular recommended values, which do not depend on the parameters of the sample or load. This article describes the methodology for determination the shear strength with suggestions for calculation the coefficient $C_{Rd,c}$ and compressed element tilt angle Θ while reinforced concrete elements' calculation with the use of "truss model". In order to confirm the methodology 4 reinforced concrete beams were tested. The test samples had cross section dimensions of 200×100 mm and effective span of 1900 mm. Reinforcement was made as $2\emptyset 18$ mm A500C – tensed steel bars and $2\emptyset 10$ A500C – compressed steel bars. In the zones, close to supports, there is no transverse reinforcement. Tests were performed in order to investigate each particular inclined section separately. Variable parameter was the relative shear span a/d , with its values $a/d=2$, $a/d=1.5$ and $a/d=1$. Another parameter was the usage of composite strengthening system, made for relative shear span $a/d=2$. Samples were tested as single-span beams subjected to short-term loading. Therefore, the external composite reinforcement is introduced in truss calculation model as the truss elements, subjected to tension. If the assumptions are fulfilled it could be recommended to calculate the strengthening element bearing capacity as for the transverse reinforcement, therefore for strengthening system bearing capacity calculation will be used the formula from norms. For determination of additional reinforcement bearing capacity the compressed element tilt angle was 21.8° , according to experimental data. The calculation with the use only the values, given in norms showed significant divergence of results. Using the refined parameter values provided the convergence of results within 16-29% toward overestimation of the experimental data. The composite reinforcement system calculation showed the overestimation of 23%, which is within the same limits as for the control samples.

Keywords: reinforced concrete beam, shear strength, FRCM strengthening, calculation.

Стаття надійшла 25.11.2019