

ДЕФОРМАТИВНІСТЬ І МІЦНІСТЬ ДРІБНОЗЕРНИСТОГО СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ ЗА ОСЬОВОГО РОЗТЯГУ

DEFORMABILITY AND STRENGTH OF FINE GRAIN STEEL FIBRO CONCRETE UNDER AXIAL TENSION

Р. Кінаш, д.т.н., професор (AGH Університет у Кракові, Львівський національний університет природокористування), В. Білозір, к.т.н., доцент (Львівський національний університет природокористування), І. Біденко, аспірантка (Львівський національний університет природокористування)

R. Kinasz, Dr. Sc., Professor (AGH University of Krakow & Lviv National Environmental University); V. Bilozir, Ph. D., Associate Professor (Lviv National Environmental University); I. Bidenko, Ph.D. Student (Lviv National Environmental University)

Виконано експериментальні дослідження міцності та деформативності сталефібробетону, армованого фіброю типу HE1050, за дії короткотривалого розтягу. Показано, що відносні деформації, які відповідають піковій точці діаграми деформування, залежать від вмісту фібри. Запропоновані формули для розрахунку міцності сталефібробетону на розтяг і відносних деформацій, що відповідають піковій точці діаграми деформування.

The purpose of these studies is to study the influence of the coefficient of fiber reinforcement with bent ends of the HE1050 type by volume ρ_{fv} and the strength of the concrete-matrix $f_{c,prism}$ on the deformability and strength of steel-reinforced concrete under axial tension.

Taking into account the requirements of the standards for the design of steel fiber concrete constructions, fine-grained concrete of classes C20/25 and C30/35 was used in the experiment, since concrete classes in this range are used most often in real structures without pre-tensioning of rods. Coefficients of fiber reinforcement by volume are taken as $\rho_{fv} = 0.007; 0.0125$ and 0.018 , since at lower reinforcement coefficients the strength effect is practically absent, and at higher ones, structures cease to be competitive. Ukrainian-made steel fiber with bent ends 50 mm long and 1 mm in diameter (type HE1050) was used. The strength and deformability of steel-reinforced concrete under the action of short-term tension was studied by testing samples of 400 x 120 x 30 mm, since in the future the test results will be used to evaluate the stress-strain state of beam elements of a П-shaped section with a shelf to the bottom, the cross section of which is 120 x 30 mm.

The following composition was adopted for the production of samples from concrete class C20/25: M400 cement of "Ivano-Frankivskcement" with an activity of 41.2 MPa - 445 kg, sand with a coarseness modulus of 2.1 from the Yasinetsky quarry - 1645

kg, water - 240 l. To obtain concrete class C30/35, the following composition was adopted: cement grade M500 of "Ivano-Frankivskcement" with an activity of 52.3 MPa - 431 kg, sand with a coarseness modulus of 2.1 from the Yasynetsky quarry - 1724 kg, water - 216 liters. Fiber consumption per 1 m³ was equal to 54.95; 98.13 and 141.3 kg for reinforcement percentages of 0.7; 1.25 and 1.8, respectively.

Based on the results of the experiments, a regression equation was obtained to determine the relative deformations corresponding to the peak point of the deformation diagram of the stretched steel-reinforced concrete reinforced with fiber with bent ends of the HE1050 type. The proposed formula for determining the tensile strength of fiber concrete reinforced with steel fiber with bent ends of type HE1050 under short-term load action.

Ключові слова: дрібнозернистий бетон, дисперсне армування, фіброве армування, міцність, розтяг, деформації, методи розрахунку.

Keywords: fine-grained concrete, dispersed reinforcement, fiber reinforcement, strength, tension, deformations, calculation methods.

Постановка проблеми. Для розрахунку несучої здатності елементів конструкцій, дисперсно армованих сталевую фіброю, деформаційним методом необхідно мати обґрунтовані експериментально параметри діаграм деформування сталевіфібробетону як за стиску, так і за розтягу [1].

Відомо, що міцність сталевіфібробетону на розтяг залежить від виду фібри та її зчеплення з бетоном, що в свою чергу залежить також від складу бетону. Тому детальні дослідження міцності та деформативності дрібнозернистого бетону, армованого фіброю із загнутими кінцями типу HE1050, за розтягу, особливо на висхідній вітці деформування, є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати експериментально-теоретичних досліджень сталевіфібробетону як матеріалу, згинаних сталевіфібробетонних і комбіновано армованих елементів [2; 3] з урахуванням результатів досліджень [4], дозволили розробити деформаційну методику розрахунку балок, армованих стрижневою арматурою і фіброю із відходів сталевого листа [5 – 7]. У працях [8 – 10] запропоноване використання деформаційного методу для розрахунку згинаних елементів, армованих зовнішньою смуговою сталевую арматурою і фібрами зі загнутими кінцями, а також ПЕТ-фіброю.

Дослідження, виконані у ЛНТУ, також засвідчили доцільність використання вказаного методу, що дозволить ширше впроваджувати у практику будівництва комбіновано армовані фібробетонні конструкції балкового типу [11 – 13].

У праці [13] за результатами випробувань фібри на витягування з дрібнозернистого бетону запропонована уточнена формула для визначення

міцності сталевібробетону на розтяг, в якій враховано як зчеплення фібри типу HE1050 з бетоном на гладкій її частині, так і вплив кінцевих анкерів. Авторами вказано, що подальші експериментальні дослідження міцності сталевібробетону на розтяг дозволять, за необхідності, внести додаткові уточнення в запропонований розрахунковий апарат.

Таким чином, існує низка пропозицій щодо використання деформаційної методики розрахунку фібробетонних елементів, однак потребують детальнішого вивчення питання міцності і деформативності дрібнозернистого бетону, армованого фіброю, за розтягу, оскільки це впливатиме на точність розрахунку несучої здатності, наприклад, згинаних едементів і, відповідно, на надійність конструкцій

Постановка завдання. Завданням даних досліджень є вивчення впливу коефіцієнта армування фіброю із загнутими кінцями типу HE1050 за об'ємом ρ_{fv} і міцності бетону-матриці $f_{c,prism}$ на деформативність і міцність сталевібробетону за осьового розтягу.

Виклад основного матеріалу. З урахуванням вимог вимог ДСТУ [1] вирішено в експерименті:

- прийняти дрібнозернистий бетон класів C20/25 і C30/35, так як класи бетону в цьому діапазоні використовуються найчастіше в реальних конструкціях без попереднього натягу стрижнів;

- коефіцієнти фібрового армування за об'ємом прийняти $\rho_{fv} = 0,007; 0,0125$ і $0,018$, оскільки при менших коефіцієнтах армування силовий ефект практично відсутній, а при вищих – конструкції перестають бути конкурентноздатними [2; 3; 5; 7];

- використати сталеву фібру українського виробництва зі загнутими кінцями довжиною 50 мм і діаметром 1 мм (тип HE1050);

- міцнісність і деформативність сталевібробетону за дії короткотривалого розтягу вивчити за випробувань зразків $400 \times 120 \times 30$ мм, оскільки в подальшому результати випробувань будуть використані для оцінювання напружено-деформованого стану балкових елементів П-подібного перерізу з полицею до низу, поперечний переріз якої – 120×30 мм.

Склади бетону розраховували згідно з вимогами ДСТУ [17] та з урахуванням рекомендацій, поданих у праці [18]. Для виготовлення зразків з класу бетону C20/25 прийнято такий склад: цемент марки М400 ПрАТ “Івано-Франківськцемент” з активністю 41,2 МПа – 445 кг, пісок із модулем крупності 2,1 Ясинецького кар'єру – 1645 кг, вода – 240 л. Для отримання класу бетону C30/35 прийнято такий склад: цемент марки М500 ПрАТ “Івано-Франківськцемент” з активністю 52,3 МПа – 431 кг, пісок із модулем крупності 2,1 Ясинецького кар'єру – 1724 кг, вода – 216 л. Витрати фібри з розрахунку на 1 м^3 дорівнювали 54,95; 98,13 і 141,3 кг за відсотків армування 0,7; 1,25 і 1,8 відповідно.

Програма експериментальних досліджень дослідних зразків подана в таблиці 1.

Приготування сталевібробетонної суміші виконували у бетонозмішувачі гравітаційної дії об'ємом 250 л. Спочатку завантажували пісок, потім додавали цемент, а наприкінці – воду при працюючому бетонозмішувачі. Швидкість обертання ємності бетонозмішувача – 24 об/хв. Сталеву фібру до суміші додавали поступово. Час приготування суміші – 8 хвилин. Після вкладання суміші у форми для виготовлення розтягнутих зразків її ущільнювали поверхневим вібратором, вага якого дорівнювала 20 кг, зі швидкістю обертання 3000 об/хв протягом 35 с.

Таблиця 1
 Програма досліджень розтягнутих зразків

Клас бетону	Марки дослідних зразків			
	Коефіцієнт фібрового армування за об'ємом			
	$\rho_{fv} = 0$	$\rho_{fv} = 0,007$	$\rho_{fv} = 0,0125$	$\rho_{fv} = 0,018$
C20/25	T-1.0.1	T-1.1.1	T-1.2.1	T-1.3.1
	T-1.0.2	T-1.1.2	T-1.2.2	T-1.3.2
	T-1.0.3	T-1.1.3	T-1.2.3	T-1.3.3
C30/35	T-2.0.1	T-2.1.1	T-2.2.1	T-2.3.1
	T-2.0.2	T-2.1.2	T-2.2.2	T-2.3.2
	T-2.0.3	T-2.1.3	T-2.2.3	T-2.3.3

Маркування зразків: Т – розтягнутий зразок; перша цифра у маркуванні: 1, 2 – міцність бетону, що відповідає класам бетону C20/25 і C30/35 відповідно; друга цифра маркування – коефіцієнт фібрового армування: 0 – $\rho_{fv} = 0$; 1 – $\rho_{fv} = 0,007$; 2 – $\rho_{fv} = 0,018$; третя цифра – номери зразків-близнюків.

По середині висоти зразків, на відстані 200 мм від торців, виконували надрізи глибиною 10 мм, де встановлювали мессури з індикаторів із ціною поділки 0,001мм на базі 50 мм для вимірювання поздовжніх деформацій (рис. 1). У торцях зразків закладали арматуру Ø6В500 на глибину 100 мм.

Випробовували зразки на розривній машині Р-20 після 28 діб зберігання. За випробувань контролювали поздовжні деформації, ширину розкриття тріщин і навантаження. Навантажували зразки ступенями, які не перевищували 10% від руйнівних. Перед очікуваним утворенням тріщин і руйнуванням ступені навантаження зменшували до рівня 3-5% від руйнівних.

Результати випробувань розтягнутих зразків, подані в таблиці 1, свідчать, що підвищення відсотка фібрового армування за об'ємом ρ_{fv}

сприяє збільшенню міцності сталевібробетону на розтяг f_{cft} , початкового модуля пружності E_{cft} , відносних деформацій бетону за утворення видимих у мікроскоп тріщин $\epsilon_{cft,cr}$ і деформацій $\epsilon_{cft,L}$, що відповідають піковій точці діаграми деформування сталевібробетону за розтягу.

Були також виготовлені та випробувані на стиск бетонні призми з розмірами 100 x 100 x 400 мм з бетону класів С20/25 і С30/35. Середні значення міцності дорівнюють 23,15 МПа і 31,14 МПа відповідно.

У працях [2; 3] досліджено, що напруження, за яких утворюються тріщини у розтягнутому сталевібробетоні, несуттєво залежать від вмісту фібрової арматури, що можна виявити за використання тензорезисторів з різними базами (методика проф. Г. К. Хайдукова).



(а)



(б)

Рис.1. Розтягнутий сталевібробетонний зразок Т-1.2.1 під час випробувань (а) і бетонні та сталевібробетонні зразки Т-1.0 – Т-1.3 після випробувань (б)

Таблиця 1
 Таблиця 1

Результати випробувань розглянутих зразків за короткочасної дії навантаження

Марка зразка	ρ_{fv} , %	f_{eff} , МПа	$f_{eff,m}$, МПа	E_{eff} , 10^{-9} , МПа	$E_{eff,m}$, 10^{-9} , МПа	$\varepsilon_{eff,cr}$, $\cdot 10^5$	$\varepsilon_{eff,cr,m}$, $\cdot 10^5$	$\varepsilon_{eff,1}$, $\cdot 10^5$	$\varepsilon_{eff,1,m}$, $\cdot 10^5$
T-1.0.1		2,14		24,12		14		14	
T-1.0.2	0	2,10	2,11	24,06	24,09	13	14,67	13	14,67
T-1.0.3		2,09		24,09		17		17	
T-1.1.1		2,19		25,58		15		265	
T-1.1.2	0,7	2,24	2,23	25,49	25,56	19	17	269	265,33
T-1.1.3		2,26		25,61		17		262	
T-1.2.1		3,02		26,05		18		283	
T-1.2.2	1,25	3,06	3,01	26,11	26,07	21	19,33	289	287,67
T-1.2.3		2,95		26,05		20		291	
T-1.3.1		3,15		27,97		22		309	
T-1.3.2	1,8	3,10	3,13	27,9	27,94	24	23,33	313	309,67
T-1.3.3		3,14		27,95		24		307	
T-2.0.1		2,53		27,62		16		16	
T-2.0.2	0	2,49	2,51	27,58	27,59	11	14,33	11	14,33
T-2.0.3		2,51		27,57		16		16	
T-2.1.1		2,54		28,52		19		282	
T-2.1.2	0,7	2,52	2,54	28,54	28,54	19	19,67	289	284
T-2.1.3		2,56		28,56		20		281	
T-2.2.1		3,46		29,8		24		309	
T-2.2.2	1,25	3,42	3,43	29,75	29,78	22	23	306	308,67
T-2.2.3		3,41		29,79		23		311	
T-2.3.1		3,53		30,91		26		332	
T-2.3.2	1,8	3,51	3,51	31	30,95	23	25,67	329	332
T-2.3.3		3,49		30,94		28		335	

Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень засвідчив, що початковий модуль пружності практично лінійно залежить від вмісту фібрової арматури в одиниці об'єму бетону (рис. 2).

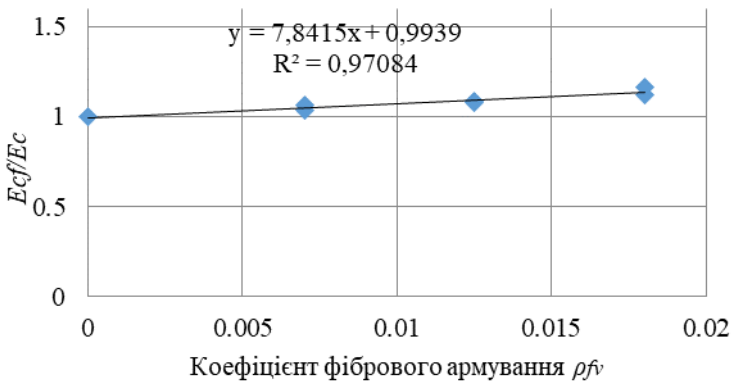


Рис. 2. Вплив вмісту фібрової арматури типу HE1050 на зміну початкового модуля пружності фібробетону за осевого розтягу

За деформаційного розрахунку згинаних сталевіфробетонних елементів важливим є якомога точніше врахування параметрів пікової точки діаграми деформування сталевіфробетону за розтягу. У зв'язку з цим використаємо дані таблиці 2 та математичну модель планованого повного двофакторного експерименту (ПФЕ 2^2) для оцінювання відносних деформацій сталевіфробетону у цій точці. Матриця ПФЕ 2^2 подана в таблиці 3.

Таблиця 3

Матриця ПФЕ 2^2

Точка плану	Фактори		Взаємодія факторів	Вихідний параметр
	x_1	x_2	$x_1 x_2$	y
1	+1	+1	+1	y_1
2	+1	-1	-1	y_2
3	-1	+1	-1	y_3
4	-1	-1	+1	y_4

Факторами X_1 та X_2 будуть призмova міцність бетону $f_{c,prism}$ та коефіцієнт фібрового армування за об'ємом ρ_{fv} . Тому умови планування експерименту мають вид, поданий в таблиці 4.

Таблиця 4

Умови планування експерименту

Фактор		Рівень варіювання			Інтервал варіювання
натуральний	кодований	-1	0	+1	
$f_{cm, prism}$ МПа	X_1	23,15	27,145	31,14	3,995
ρ_{fv}	X_2	0,007	0,0125	0,018	0,0055

Коефіцієнти рівняння регресії ПФЕ 2² обчислені за формулою [19]:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N \delta_{iu} y_u}{N}, \quad (1)$$

де δ_{iu} – значення i -го фактора в рядку матриці експерименту в u -му досліді.

Коефіцієнт парної взаємодії факторів можна визначити за формулою [19]:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N \delta_{iu} \delta_{ju} y_u}{N}, \quad (2)$$

де δ_{ju} – значення j -го фактора для u -го досліді.

Дисперсія відтворюваності вихідного параметра $S_{(y)}^2$ в ПФЕ 2² розраховується за формулою [19]:

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N(r-1)}, \quad (3)$$

де $\sum_{u=1}^N$ – сума за стовпцями матриці експерименту ПФЕ 2²;

$\sum_{i=1}^r$ – те ж саме, за рядками матриці ПФЕ 2²;

r – кількість дослідів у точці плану експерименту ПФЕ 2².

Середньоквадратичне відхилення вихідного параметра обчислюється за відомою формулою [19]:

$$S_{(y)} = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N(r-1)}} = \sqrt{S_{(y)}^2}. \quad (4)$$

Середньоквадратичну помилку обчислюють за формулою [19]:

$$S_{\{b_0\}} = S_{\{b_i\}} = S_{\{b_{ij}\}} = \frac{S_{(y)}}{\sqrt{N}}. \quad (5)$$

Далі обчислюють значення t -критерію Стьюдента (t_P) [19]:

$$t_{P\{b_0\}} = \frac{|b_0|}{S_{\{b_0\}}}, \quad (6)$$

$$t_{P\{b_i\}} = \frac{|b_i|}{S_{\{b_i\}}}, \quad (7)$$

$$t_{P\{b_{ij}\}} = \frac{|b_{ij}|}{S_{\{b_{ij}\}}}. \quad (8)$$

Коефіцієнти вважають значущими, коли t_p , що розраховують за формулами, які подані вище, будуть більшими за табличні значення t_T [19] і які є залежними від призначеного рівня значущості, а також від кількості ступенів свободи $f_{(y)}$. У дослідях, результати яких подані тут, призначили рівень значущості, який дорівнює 0,05. Тому кількість ступенів свободи знаходимо за формулою [19]:

$$f_{(y)} = N(r - 1). \quad (9)$$

У випадку, коли значення t_p виявилося би меншим за t_T , то цей коефіцієнт можна зовсім не враховувати і, відповідно, не перераховувати інших коефіцієнтів.

Дисперсія адекватності для лінійних рівнянь визначається за формулою [19]:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{r(\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_n)^2)}{N_1 - m}, \quad (10)$$

де m – кількість значущих коефіцієнтів у даному рівнянні регресії.

Адекватність моделі перевіряємо з урахуванням критерію Фішера (F -критерієм). Коли $S_{\text{ад}}^2 > S_{(y)}^2$, то:

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{(y)}^2}, \quad (11)$$

а коли $S_{\text{ад}}^2 < S_{(y)}^2$, то:

$$F_p = \frac{S_{(y)}^2}{S_{\text{ад}}^2}, \quad (12)$$

де $S_{(y)}^2$ - дисперсія відтворюваності для вихідного параметра.

Табличне значення критерію Фішера F_T залежить від довірчої імовірності. Її найчастіше приймають такою, що дорівнює 95%. Критерій Фішера залежить також від кількості ступенів свободи дисперсії адекватності $f_{\text{ад}}$. Її визначають для лінійних рівнянь за формулою [19]:

$$f_{\text{ад}} = N - m. \quad (13)$$

Рівняння вважають адекватним, якщо $F_p < F_T$.

Матриця планування повного двофакторного експерименту (ПФЕ 2²) і експериментальні значення відносних деформацій, що відповідають піковій точці діаграми деформування фібробетону за розтягу, подані в таблиці 5.

Вільний член рівняння регресії визначали за даними таблиці 5:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} = \frac{1191 \cdot 10^{-5}}{4} = 297,75 \cdot 10^{-5}.$$

Коефіцієнти рівняння регресії b_1, b_2, b_{12} визначали за формулами (1) та (2) і даними таблиці 5:

$$b_1 = \frac{41 \cdot 10^{-5}}{4} = 10,25 \cdot 10^{-5};$$

$$b_2 = \frac{92,34 \cdot 10^{-5}}{4} = 23,085 \cdot 10^{-5};$$

$$b_{12} = \frac{3,66 \cdot 10^{-5}}{4} = 0,918 \cdot 10^{-5}.$$

Таблиця 5

Матриця планування і експериментальні значення $\varepsilon_{cft,1}$

Марки зразків	Точка плану	Фактори		Відносні деформації, що відповідають піковій точці діаграми деформування сталевіфробетону за осьового розтягу $\varepsilon_{cft,1} \cdot 10^5$			Середнє значення $\varepsilon_{cft,1,m} \cdot 10^5$
		x_1	x_2	y_1	y_2	y_3	
Т-2.3	1	+1	+1	332	339	335	332
Т-2.1	2	+1	-1	282	289	281	284
Т-1.3	3	-1	+1	309	313	307	309,67
Т-1.1	4	-1	-1	265	269	262	265,33
Сума							1191
							$b_0 = 297,75 \cdot 10^{-5}$

Для визначення значущості цих коефіцієнтів визначаємо спочатку дисперсію відтворюваності за рядками матриці (таблиця 5).

Дисперсію відтворюваності вихідного параметра $S_{(y)}^2$ знаходили за формулою (3):

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{N(r-1)} = \frac{1,39333E-08}{4(3-1)} = 1,74167E-09$$

Середньоквадратичне відхилення визначаємо за формулою (6):

$$S_{(y)} = \sqrt{S_{(y)}^2} = \sqrt{1,74167E-09} = 4,17333E-05.$$

Середньоквадратична помилка (формула (7)):

$$S_{(b_0)} = S_{(b_1)} = S_{(b_{ij})} = \frac{S_{(y)}}{\sqrt{N}} = \frac{4,17333E-05}{\sqrt{4}} = 2,08666E-05$$

Табличне значення t -критерію Стьюдента за рівня значущості $\alpha = 0,05$ ($P = 95\%$) дорівнює 2,31 [19], що відповідає кількості ступенів свободи $f_y = N(r - 1) = 4(3 - 1) = 8$.

З таблиці 5 вибираємо значення коефіцієнтів рівняння регресії і знаходимо розрахункове значення t_p за формулами (6) – (8):

$$t_p = \frac{|b_1|}{S_{\{b_{3,4}\}}} = \frac{10,25 \cdot 10^{-5}}{2,08666 \cdot 10^{-5}} = 4,91 > t = 2,31.$$

$$t_p = \frac{|b_2|}{S_{\{13\}}} = \frac{23,085 \cdot 10^{-5}}{2,08666 \cdot 10^{-5}} = 11,06 > t = 2,31.$$

$$t_p = \frac{|b_{12}|}{S_{\{24\}}} = \frac{0,918 \cdot 10^{-5}}{2,08666 \cdot 10^{-5}} = 0,44 < t = 2,31.$$

Отже, коефіцієнт b_{12} є незначущим, і рівняння регресії у кодованому виді набуває вигляду:

$$\hat{y} = 297,75 \cdot 10^{-5} + 10,25 \cdot 10^{-5}x_1 + 23,085 \cdot 10^{-5}x_2. \quad (16)$$

Для перевірки адекватності отриманого рівняння регресії визначимо значення u для кожного рядка матриці і знаходимо суму квадратів відхилень розрахункових даних (таблиця 6).

Дисперсію адекватності визначаємо за формулою (10):

$$S_{\hat{a}\hat{a}}^2 = \frac{r(\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2)}{N_1 - m} = \frac{3 \cdot 1,39333 \text{E} - 08}{4 - 3} = 4,17999 \text{E} - 08,$$

де m – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні.

Оскільки $S_{\hat{a}\hat{a}}^2 = 4,17999 \text{E} - 08 > S_{\{y\}}^2 = 1,74167 \text{E} - 09$, то розрахункове значення критерію Фішера визначаємо за формулою (11):

$$F_p = \frac{S_{\{y\}}^2}{S_{\hat{a}\hat{a}}^2} = \frac{1,74167 \text{E} - 09}{4,17999 \text{E} - 08} = 4,167.$$

Таблиця 6

Коефіцієнти рівняння регресії функції $\varepsilon_{cft,1}$

Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів		
для лінійних членів		для взаємодій
$\bar{y}\bar{\delta}_1$	$\bar{y}\bar{\delta}_2$	$\bar{y}\bar{\delta}_1\bar{\delta}_2$
$+332 \cdot 10^{-5}$	$+332 \cdot 10^{-5}$	$+332 \cdot 10^{-5}$
$+284 \cdot 10^{-5}$	$-284 \cdot 10^{-5}$	$-284 \cdot 10^{-5}$
$-309,67 \cdot 10^{-5}$	$+309,67 \cdot 10^{-5}$	$-309,67 \cdot 10^{-5}$
$-265,33 \cdot 10^{-5}$	$-23,71 \cdot 10^{-5}$	$+23,71 \cdot 10^{-5}$
$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$
$+41 \cdot 10^{-5}$	$+92,34 \cdot 10^{-5}$	$+3,66 \cdot 10^{-5}$
$b_1 = +10,25 \cdot 10^{-5}$	$b_2 = +23,085 \cdot 10^{-5}$	$b_{12} = +0,915 \cdot 10^{-5}$

Таблиця 7

Розрахунок дисперсії відтворюваності функції за рядками матриці

Точки плану u	$(y_1 - \bar{y}_n)^2$	$(y_2 - \bar{y}_n)^2$	$(y_3 - \bar{y}_n)^2$	$\sum S_{(y_j)}^2$
1	0	4,9E-09	9E-10	5,8E-09
2	4E-10	2,5E-09	9E-10	3,8E-09
3	4,49E-11	1,11E-09	7,13E-10	1,86667E-09
4	1,09E-11	1,35E-09	1,11E-09	2,46667E-09
Сума				1,39333E-08

Таблиця 8

Розрахунок дисперсії адекватності для функції $\varepsilon_{cft,1}$

Точки плану	x_0	x_1	x_2	\hat{y}_u	\bar{y}_u	$\hat{y}_u - \bar{y}_u$	$(\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2$
1	$297,75 \cdot 10^{-5}$	$+10,25 \cdot 10^{-5}$	$+23,085 \cdot 10^{-5}$	$331,085 \cdot 10^{-5}$	$332 \cdot 10^{-5}$	$-0,915 \cdot 10^{-5}$	$8,37225 \cdot 10^{-11}$
2	$297,75 \cdot 10^{-5}$	$+10,25 \cdot 10^{-5}$	$-23,085 \cdot 10^{-5}$	$284,915 \cdot 10^{-5}$	$284 \cdot 10^{-5}$	$0,915 \cdot 10^{-5}$	$8,37225 \cdot 10^{-11}$
3	$297,75 \cdot 10^{-5}$	$-10,25 \cdot 10^{-5}$	$+23,085 \cdot 10^{-5}$	$310,585 \cdot 10^{-5}$	$309,67 \cdot 10^{-5}$	$0,915 \cdot 10^{-5}$	$8,37225 \cdot 10^{-11}$
4	$297,75 \cdot 10^{-5}$	$-10,25 \cdot 10^{-5}$	$-23,085 \cdot 10^{-5}$	$264,415 \cdot 10^{-5}$	$265,33 \cdot 10^{-5}$	$-0,915 \cdot 10^{-5}$	$8,37225 \cdot 10^{-11}$
Сума							$3,3489 \cdot 10^{-10}$

Табличне значення критерію Фішера F_T , якщо $f_1 = 4(3 - 1) = 8$ і $f_2 = 4 - 3 = 1$, дорівнює 5,32. Отже, $F_p = 4,167 < F_T = 5,32$, тому рівняння регресії є адекватним.

Натуральні X_i і кодовані значення x_i пов'язані залежністю [19]:

$$\tilde{\delta}_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (17)$$

де X_{i0} – значення нульової точки;

ΔX_{i0} – інтервал варіювання.

Звідси отримуємо:

$$x_1 = \frac{f_{c,prism} - 27,145}{3,995};$$

$$x_2 = \frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055}.$$

Рівняння регресії для визначення $\varepsilon_{cft,1}$ отримує вигляд:

$$\varepsilon_{cft,1} = 297,75 \cdot 10^{-5} + 10,25 \cdot 10^{-5} \frac{f_{c,prism} - 27,145}{3,995} + 23,085 \cdot 10^{-5} \frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055} \quad (18)$$

Експериментальні та теоретичні значення $\varepsilon_{cft,1}$ зразків за коефіцієнта фібрового армування по об'єму 0,0125, подані в таблиці 9, достатньо точно можна оцінити за використання рівняння регресії (18).

Таблиця 9

Експериментальні та теоретичні значення $\varepsilon_{cft,1}$ зразків за коефіцієнта фібрового армування по об'єму 0,0125

Марки зразків	Коефіцієнт фібрового армування ρ_{fv}	Призмova міцність бетону-матриці $f_{cf,prism}$, МПа	Експериментальні значення $\varepsilon_{cft,1,exp} \cdot 10^5$	Теоретичні значення $\varepsilon_{cft,1,theor} \cdot 10^5$	$\frac{\varepsilon_{cft,1,exp}}{\varepsilon_{cft,1,theor}}$
T-1.2.1	0,0125	23,15	283	288,34	0,981
T-1.2.2			289		1,002
T-1.2.3			291		1,009
T-2.2.1		31,14	309	308,84	1,001
T-2.2.2			306		0,991
T-2.2.3			311		1,007

У праці [14] запропоновано оцінювати міцність на розтяг сталевібробетону, армованого фіброю типу HE1050, з урахуванням результатів експериментів з дослідження зчеплення фібри з бетоном. Міцність сталевібробетону можна обчислювати за формулою [16]:

$$f_{cft} = k_{or} k_{cr} k_{an} \rho_{fv} f_f, \quad (19)$$

де k_{or} – коефіцієнт орієнтації фірової арматури

k_{cr} – коефіцієнт ймовірності перетину фіброю площини, по якій відбувається руйнування;

k_{an} – коефіцієнт анкеруючої здатності фібри;

f_f – міцність фібри на розтяг.

У вітчизняному стандарті [1] прийнято, що $k_{or} = k_{cr}$, тому формула (19) отримає вигляд:

$$f_{cft} = k_{or}^2 k_{an} \rho_{fv} f_f. \quad (20)$$

У праці [14] показано, що коефіцієнт анкеруючої здатності k_{an} для

фібри зі загнутими кінцями не є постійним за різної довжини анкерування фібри, оскільки анкер сприймає суттєво більше зусилля, ніж гладка частина фібри, а тому його при середній довжині закладання фібри $l_f/4$ запропоновано визначати за формулою:

$$k_{an} = \frac{1}{f_f} \left(0,806 \frac{f_{c,prism} l_f}{4 d_f} + 327,98 \right), \quad (21)$$

де $f_{c,prism}$ – призмova міцність бетону, МПа;

l_f – довжина фібри;

d_f – діаметр фібри.

Підставивши рівняння (21) у рівняння (20), отримуємо:

$$f_{cft} = k_{or}^2 \left(0,806 \frac{f_{c,prism} l_f}{4 d_f} + 327,98 \right) \rho_{fv}. \quad (22)$$

Аналіз результатів експериментів, поданих у таблиці 1, засвідчив, що у рівняння (22) потрібно внести поправковий коефіцієнт. Тому остаточно отримано:

$$f_{cft} = k_{or}^2 \left(0,806 \frac{f_{c,prism} l_f}{4 d_f} + 327,98 \right) \rho_{fv} (1,26 - 40,49 \rho_{fv}). \quad (23)$$

Таблиця 10

Порівняння експериментальних і теоретичних значень міцності

Марка зразка	ρ_{fv} , %	$f_{cft,exp}$ МПа	$f_{cft,theor}$ МПа	$\frac{f_{cft,exp}}{f_{cft,theor}}$
T-1.1.1	0,7	2,19	2,10	1,04
T-1.1.2		2,24		1,07
T-1.1.3		2,26		1,08
T-1.2.1	1,25	3,02	2,90	1,04
T-1.2.2		3,06		1,06
T-1.2.3		2,95		1,02
T-1.3.1	1,8	3,15	2,94	1,07
T-1.3.2		3,10		1,05
T-1.3.3		3,14		1,07
T-2.1.1	0,7	2,54	2,41	1,05
T-2.1.2		2,52		1,05
T-2.1.3		2,56		1,06
T-2.2.1	1,25	3,46	3,32	1,04
T-2.2.2		3,42		1,03
T-2.2.3		3,41		1,03
T-2.3.1	1,8	3,53	3,37	1,05
T-2.3.2		3,51		1,04
T-2.3.3		3,49		1,04

Ідеалізована діаграма деформування сталевібробетону (Рис. 3) містить три ділянки. Перша з них описується поліномом п'ятого ступеня [5; 7; 12], а друга і третя – прямими.

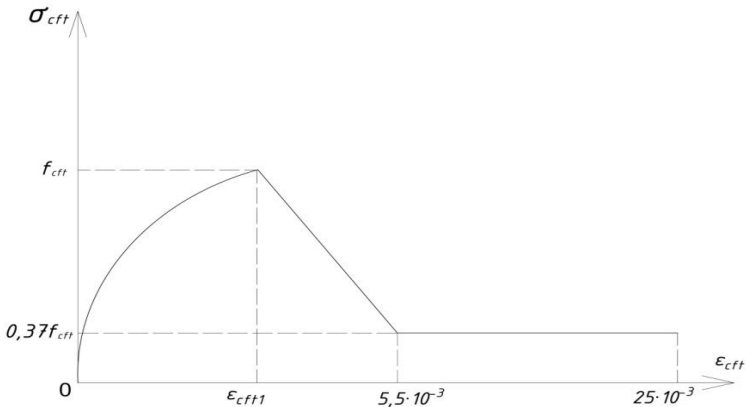


Рис. 3. Ідеалізована діаграма деформування сталевібробетону за осьового розтягу

Потрібно відмітити, що кут нахилу спадної вітки ідеалізованої діаграми деформування майже не впливатиме на несучу здатність згинаних сталевібробетонних елементів [20].

Висновки

1. За результатами експериментів отримано рівняння регресії для визначення відносних деформацій, що відповідають піковій точці діаграми деформування розтягнутого сталевібробетону, армованого фіброю зі загнутими кінцями типу HE1050.

2. Запропонована формула для визначення міцності вібробетону, армованого сталевіброю зі загнутими кінцями типу HE1050, на розтяг за короткотривалої дії навантаження.

References

1. DSTU-N B V.2.6-218:2016 Guidelines for the design and manufacture of structures from dispersed reinforced concrete. Kyiv: SE «UkrNDNC», 2017. 32 p. [Effective from 2017.04.01].

2. Bilozir V. V. Formation and opening of cracks in normal sections of bent steel-fiber-concrete elements on a fiber from a sheet: diss ... cand. tech. sciences. M., 1991. 164 p.

3. Bilosir W., Krapfenbauer R., Bölskey E. Festigkeit und Rissfestigkeit der Stahlfaserbetonbiegeelemente mit Fasern aus Blechabfällen. *Österreichische Ingenieur- und Architekten- Zeitschrift*. 1995. Jg.140. Nr. 2. S. 38 – 53.
4. Babych E. M., Drobysynets S. Ya. Work and calculation of bending steel fiber concrete elements. Monograph. – Lutsk: LNTU, 2012. – 194 p.
5. Bilozir V. V. Deformation method of calculation of bending steel fiber concrete elements. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Ser. Theory and practice of construction*. 2012. № 742. P. 18-24.
6. Bilozir V., Vysochenko A. Determination of the required length of fiber anchoring in concrete. *Bulletin of the Lviv National Agrarian University. Ser. Architecture and agricultural construction*. 2013. № 14. P. 64-70.
7. Kinash R., Bilozir V. Deformational calculation method of bearing capability of fiber-concrete steel bending elements. *Czasopismo Techniczne (Technical Transactions: Architecture)*, 2014. I. 8- A (15). № 111. P. 49 – 58.
8. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Vysochenko A. Suspensibility of Steel Fibre Reinforced Concrete Values with External Ribbed Armature. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 471 (5). 052047.
9. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bilozir V., Bidenko I. Examination of Concrete Elements Bending Strength Reinforced by Polyethylene Terephthalate (PET) Waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 603. 042041.
10. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bidenko I. Deformability of Steel-Fiber Beams with External Tape Reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. Vol. 960 (2). 022046.
11. Uzhegov S. O., Uzhegova O. A., Pasichnyk R. V., Andriichuk O. V., Drobysynets S. Ya. Calculation steelfiberconcrete bending elements by the strength of normal cross section. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 2015. Vol. 3. P.
12. Andriichuk O. V., Kislyuk D. Ya., Ninichuk M. V. Determination of bearing capacity of normal sections of combined-reinforced steel fibre concrete bending elements. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 2020. Issue. 13. P. 15 – 23.
13. Andriichuk O. V., Ninichuk M. V. Theoretical determination of stress-strain state characteristics and bearing capacity of normal sections of combined-reinforced steel fibre concrete bending elements. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 2020. Issue. 14. P. 26-35.
14. Kinasz R., Bilozir V., Bidenko I. Theoretical evaluation of tensile strength of concrete reinforced with steel fiber with bent ends. *Bulletin of the Lviv National Agrarian University. Ser. Architecture and agricultural construction*. 2021. No. 22. P. 17-22.
15. RILEM TC 162-TDF. “Design of steel fibre reinforced concrete using the ζ -w method – principles and applications (Chairlady L. Vandewalle).” *Materials and Structures*, Vol. 35, 2002, pp. 262-278.

16. Rabinovich F. N. Dispersion-reinforced concretes. Moscow: Stroyizdat, 1989. 174 p.
17. DSTU B V.2.7-215:2009. Concretes. Rules of composition selection. To replace GOST 27006-86; effective 2010-09-01. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 14 p.
18. Dworkin L. Y., Dworkin O. L. Design of concrete warehouses: monograph. Rivne: NUVHP, 2015. 353 p.
19. Dvorkin L. Y., Dvorkin O. L., Zhitkovskiy V. V. Solving construction and technological problems by methods of mathematical planning of the experiment: Study. Manual. Rivne: NUVHP, 2011. 174 p.
20. Bilozir V. Influentia descendentis rami distrahentis deformationis diagramma chalybeum concretum in capacitate radiorum onere ferentium confirmatum. Nomenclator Universitatis Agrariae Nationalis Leopoliensis. Ser. Architectura et constructione agriculturae. 2015. No. 16. P. 60-64.

Література

1. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016 Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 32 с. [Чинний з 2017.04.01].
2. Білозир В. В. Образование и раскрытие трещин в нормальных сечениях изгибаемых сталефибробетонных элементов на фибре из листа: дис... канд. техн. наук. М., 1991. 164 с.
3. Bilosir W., Krapfenbauer R., Bölskey E. Festigkeit und Rissfestigkeit der Stahlfaserbetonbiegeelemente mit Fasern aus Blechabfällen. *Österreichische Ingenieur- und Architekten- Zeitschrift*. 1995. Jg.140. Nr. 2. S. 38 – 53.
4. Бабич Є. М., Дробишинець С. Я. Робота і розрахунок згинальних сталефібробетонних елементів. Монографія. – Луцьк: ЛНТУ, 2012. – 194 с.
5. Білозир В. В. Деформаційний метод розрахунку згинальних сталефібробетонних елементів. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. Сер. Теорія і практика будівництва. 2012. № 742. С. 18 – 24.
6. Білозир В., Височенко А. Визначення необхідної довжини анкерування фібри в бетоні. *Вісник Львівського національного аграрного університету*. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. 2013. № 14. С. 64 – 70.
7. Kinasz R., Bilozir V. Deformational calculation method of bearing capability of fiber-concrete steel bending elements. *Czasopismo Techniczne (Technical Transactions: Architecture)*, 2014. I. 8- A (15). № 111. P. 49 – 58.
8. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Vysochenko A. Suspensibility of Steel Fibre Reinforced Concrete Values with External Ribbed Armature. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 471 (5). 052047.

9. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bilozir V., Bidenko I. Examination of Concrete Elements Bending Strength Reinforced by Polyethylene Terephthalate (PET) Waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 603. 042041.
10. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bidenko I. Deformability of Steel-Fiber Beams with External Tape Reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. Vol. 960 (2). 022046.
11. Ужегов С. О., Ужегова О. А., Пасічник Р. В., Андрійчук О. В., Дробишинець С. Я. Розрахунок сталевібробетонних згинальних елементів за міцністю нормальних перерізів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 2015. Вип. 3. С. 179 – 184.
12. Андрійчук О. В., Кислюк Д. Я., Нінічук М. В. Визначення несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих сталевібробетонних згинальних елементів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 2020. Вип. 13. С. 15 – 23.
13. Андрійчук О. В., Нінічук М. В. Теоретичне визначення характеристик напружено-деформованого стану та несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих згинальних елементів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 2020. Вип. 14. С. 26 – 35.
14. Кінаш Р., Білозір В., Біденко І. Теоретичне оцінювання міцності на розтяг бетону, армованого сталеву фібрую зі загнутими кінцями. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2021. № 22. С. 17 – 22.
15. RILEM TC 162-TDF. “Design of steel fibre reinforced concrete using the ζ -w method – principles and applications (Chairlady L. Vandewalle).” *Materials and Structures*, Vol. 35, 2002, pp. 262-278.
16. Рабинович Ф. Н. Дисперсно армированные бетоны. Москва: Стройиздат, 1989. 174 с.
17. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Бетони. Правила підбору складу. На заміну ГОСТ 27006-86; чинні 2010-09-01. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 14 с.
18. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Проектування складів бетонів: монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 353 с.
19. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв’язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту: Навч. Посібник. Рівне: НУВГП, 2011. 174 с.
20. Білозір В. Вплив низхідної вітки діаграми деформування сталевібробетону за розтягу на несучу здатність балок. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2015. № 16. С. 60 – 64.