

УДК 624.012

МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕТ-ФІБРОБЕТОНУ ЗА КОРОТКОТРИВАЛОГО СТИСКУ

В. Білозір, аспірант

ORCID ID: 0000-0003-1926-9520

Львівський національний університет природокористування

<https://doi.org/10.31734/architecture2023.24.052>

Білозір В. Механічні характеристики ПЕТ-фібробетону за короткотривалого стиску

Досліджено вплив відсотка ПЕТ-фібрового армування за об'ємом ρ_{fv} на міцність і деформативність дрібнозернистого бетону за короткотривалого стиску. На основі планованого повного двофакторного експерименту (ПФЕ 2²) отримано рівняння регресії для розрахунку міцності на стиск ПЕТ-фібробетону.

Бетоном-матрицею слугував дрібнозернистий бетон класів C20/25 і C30/35, як таких, що використовують у конструкціях без попереднього напруження стрижнів. Коефіцієнти ПЕТ-фібрового армування за об'ємом прийнято $\rho_{fv} = 0,01$ і $\rho_{fv} = 0,03$ з урахуванням результатів, отриманих раніше. Як дисперсну арматуру використано фібру розмірами $40 \times 3 \times 0,2$ мм, які обґрунтовані у наших попередніх дослідженнях. Міцність та деформативність ПЕТ-фібробетону за короткотривалого стиску вивчали за випробувань призм $100 \times 100 \times 400$ мм.

Для отримання класу бетону C20/25 з розрахунку на 1 м^3 прийнято такий склад: цемент ПрАТ «Івано-Франківськцемент» марки M400 активністю 42,3 МПа – 444,5 кг; пісок з модулем крупності 2,1 Ясинецького кар'єру – 1644,4 кг; вода – 239,2 л. Для отримання класу бетону C30/35 з розрахунку на 1 м^3 прийнято такий склад: цемент ПрАТ «Івано-Франківськцемент» марки M500 активністю 53,1 МПа – 433,2 кг; пісок з модулем крупності 2,1 Ясинецького кар'єру – 1724,3 кг; вода – 215,6 л.

Показано, що підвищення відсотка фібрового армування збільшує міцність ПЕТ-фібробетону, початковий модуль пружності ПЕТ-фібробетону, зменшує відносні деформації за конкретної інтенсивності напружень. Запропонована математична модель для визначення міцності ПЕТ-фібробетону на основі планованого експерименту. Уточнена формула для розрахунку міцності ПЕТ-фібробетону, яку раніше використовували за розрахунку міцності на стиск сталевих фібробетону. Вказано на доцільність використання формули норм проектування залізобетонних конструкцій для опису діаграми «напруження – відносні деформації» ПЕТ-фібробетону за короткотривалої дії стиску.

Ключові слова: ПЕТ-фібра, ПЕТ-фібробетон, випробування, стиск, напруження, початковий модуль пружності, відносні деформації, діаграма деформування.

Bilozir V. Mechanical characteristics of PET fiber concrete under short-term compression

The study aimed to investigate the effect of the volume percentage of PET fiber reinforcement on the strength and deformability of fine-grained concrete under short-term compression. The research adopted a complete two-factor experiment resulting in a regression equation for calculating the compressive strength of PET fiber concrete.

The research used fine-grained concrete of classes C20/25 and C30/35 as the matrix concrete, which is commonly used in structures without prestressing the rods. The research used fiber with dimensions of $40 \times 3 \times 0.2$ mm as a dispersive reinforcement, and the coefficients of PET fiber reinforcement were taken as $f_v = 0.01$ and $f_v = 0.03$. The strength and deformability of PET fiber concrete under short-term compression were tested by testing $100 \times 100 \times 400$ mm prisms.

To obtain concrete class C20/25, based on 1 m^3 , the following composition was adopted: cement PrJSC «Ivano-Frankivskcement» brand M400 with an activity of 42.3 MPa – 444.5 kg; sand with a grain size module of 2.1 from the Yasinetsky quarry – 1644.4 kg; water – 239.2 l. To obtain concrete class C30/35 based on 1 m^3 , the following composition was adopted: cement PJSC «Ivano-Frankivskcement» brand M500 with an activity of 53.1 MPa – 433.2 kg; sand with a grain size module of 2.1 from the Yasinetsky quarry – 1724.3 kg; water – 215.6 l.

The study found that increasing the percentage of fiber reinforcement leads to an increase in the strength of PET fiber concrete, the initial modulus of elasticity of PET fiber concrete, and a reduction in relative deformations at a specific stress intensity. The study proposed a mathematical model for determining the strength of PET fiber concrete based on a planned experiment. The author specified the formula for calculating the strength of PET fiber concrete, which was previously used to calculate the compressive strength of steel fiber concrete. The study also indicated the expediency of using the norm formula for designing reinforced concrete structures to describe the «stress – relative deformations» diagram of PET fiber concrete under short-term compression.

Key words: PET fiber, PET fiber concrete, test, compression, stress, initial modulus of elasticity, relative deformations, deformation diagram.

Постановка проблеми. Для реалізації деформаційного методу розрахунку згинаних бетонних елементів, армованих фіброю з використаних поліетилентерефталатних пляшок (ПЕТ-пляшок) необхідні аналітичні вирази, які описують діаграми деформування ПЕТ-фіробетону за розтягу і стиску. Для цього потрібні відповідні експериментальні дані. Тому актуальність досліджень міцності та деформативності ПЕТ-фіробетону за короткотривалого стиску очевидна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перші експериментально-теоретичні дослідження міцності та деформативності ПЕТ-фіробетону в Україні провели науковці Львівського національного університету природокористування. У працях [1–4] висвітлено питання згинальної міцності ПЕТ-фіробетону, теоретично обґрунтовані оптимальні геометричні розміри ПЕТ-фібри та мінімальний відсоток армування дрібнозернистого бетону за об'ємом ПЕТ-фіброю, показано позитивний вплив такого армування на несучу здатність згинаних ПЕТ-фіробетонних елементів. У праці [1] обґрунтовано, що за ширини ПЕТ-фібри 3 мм для бетонів класів С20/25, С25/30, С30/35 довжину фібри доцільно призначити 40 мм.

Результати досліджень південно-корейських науковців [5] свідчать, що для ПЕТ-фіробетону характерні підвищена тривала міцність на стиск і розтяг за багаторазових заморожувань-відтавань, дії хімічних речовин порівняно зі звичайним бетоном.

Автори праць [6; 7] вказують на зниження міцності за стискання фіробетону на ПЕТ-фібри розмірами $50 \times 1,2 \times 0,3$ мм за об'ємного відсотка армування від 1,5 до 3,6 %.

Науковці з Іраку стверджують, що введення ПЕТ-фібри в суміш дещо підвищує міцність на стиск за об'ємного відсотка фібрового армування, меншого за 1,5, а за вищого відсотка армування міцність на стиск зменшується [8]. Вказано також на складність вкладання ПЕТ-фіробетону за всіх відсотків армування, що може свідчити про необхідність правильного підбору складу бетону. Також вказано на в'язкий характер руйнування балкових зразків, які мали ПЕТ-фіброве армування, що добре кореспондується з нашими результатами [3; 4].

У праці [9] подано результати випробувань кубів, армованих ПЕТ-фіброю, з шириною поперечного перерізу фібри 2 мм і довжиною фібри 5, 10, 15 і 20 мм та вмістом фібри в

масі неавтоклавного пінобетону $700...800 \text{ г/м}^3$, $900...1000 \text{ г/м}^3$ і $1100...1200 \text{ г/м}^3$). Показано, що за витрат фібри $700...800 \text{ г/м}^3$ і $900...1000 \text{ г/м}^3$ спостерігався приріст кубової міцності порівняно з неармованим пінобетоном, проте за витрат фібри 1150 г/м^3 міцність дещо зменшилася. Потрібно зауважити, що прийняті витрати фібри дуже малі. Адже за 1 % ПЕТ-фібрового армування витрати фібри дорівнюють $13,9 \text{ кг/м}^3$, а міцність на згин ПЕТ-фіробетону ледь перевищує міцність неармованого бетону [3; 4].

Стислий огляд останніх досліджень свідчить про те, що одні дослідники вказують на зниження міцності ПЕТ-фіробетону на стиск порівняно з неармованим бетоном, а інші стверджують, що такого зниження немає. Геометричні розміри фібри автори приймали без теоретичних обґрунтувань. Практично в усіх статтях подано склад бетону, однак у жодній статті немає даних про режим ущільнення ПЕТ-фіробетонної суміші, що суттєво впливає на зчеплення арматури з бетоном і, як наслідок, на міцність композиту.

Постановка завдання. Наше завдання – вивчення впливу коефіцієнта армування за об'ємом ρ_{fv} за використання ПЕТ-фібри розмірами $40 \times 3 \times 0,2$ мм, які обґрунтовані в праці [1], на міцність та деформативність ПЕТ-фіробетону за короткотривалого стиску.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи вимоги ДСТУ [1], прийняті такі умови експерименту:

- бетоном-матрицею слугували дрібнозернистий бетон класів С20/25 і С30/35 як такі, що використовують у конструкціях без попереднього напруження стрижнів;

- коефіцієнт фібрового армування за об'ємом – $\rho_{fv} = 0,01$ і $\rho_{fv} = 0,03$ з урахуванням результатів, отриманих нами раніше [1–4];

- фібра розмірами $40 \times 3 \times 0,2$ мм, які обґрунтовані у праці [1];

- вивчення міцності та деформативності ПЕТ-фіробетону за короткотривалого стиску за випробувань призми $100 \times 100 \times 400$ мм. Склади дрібнозернистого бетону розраховували за ДСТУ [10] і з урахуванням рекомендацій [11]. Для виготовлення зразків використано цемент ПрАТ «Івано-Франківськцемент» марок М400 і М500 активністю 42,3 МПа і 53,1 МПа відповідно, пісок Ясинецького кар'єру з модулем крупності 2,1. Склади бетону подані в табл. 1.

Склади бетону дослідних зразків

Клас бетону	Витрати матеріалів з розрахунку на 1 м ³ суміші			
	Цемент, кг	Марка цементу	Пісок, кг	Вода, л
C20/25	444,5	M400	1644,4	239,2
C30/35	433,2	M500	1724,3	215,6

Витрати фібри з розрахунку на 1 м³ дорівнювали 13,90 кг і 41,70 кг за відсотків армування 1 і 3 відповідно. Фібру виготовляли з використанням шредера Alligator 713 S Plus (рис. 1 а), за допомогою якого отримували ПЕТ-

смужки шириною 3 мм (рис. 1 б), а потім ці смужки ножицями нарізали довжиною 40 мм (рис. 2).

Програма експериментальних досліджень дослідних призм подана в табл. 2.



Рис. 1. Шредер Alligator 713 Plus (а)
і ПЕТ-смужки шириною поперечного перерізу 3 мм (б)



Рис. 2. ПЕТ-фібра розмірами 40 × 3 × 0,2 мм

Програма досліджень зразків-призм

Клас бетону	Марки дослідних призм		
	Коефіцієнт фібрового армування за об'ємом		
	$\rho_{fv} = 0$	$\rho_{fv} = 0,01$	$\rho_{fv} = 0,03$
C20/25	P-1.0.1	P-1.1.1	P-1.2.1
	P-1.0.2	P-1.1.2	P-1.2.2
	P-1.0.3	P-1.1.3	P-1.2.3
C30/35	P-2.0.1	P-2.1.1	P-2.2.1
	P-2.0.2	P-2.1.2	P-2.2.2
	P-2.0.3	P-2.1.3	P-2.2.3

ПЕТ-фіробетонну суміш (рис. 3, а) готували у примусовому бетонозмішувачі гравітаційної дії об'ємом 250 л. Після завантажування піску додавали цемент при працюючому бетонозмішувачі, а потім – воду. Швидкість обертання ємності бетонозмішувача дорівнювала 24 об/хв. ПЕТ-фібру в суміш додавали поступово. Загальний час приготування суміші дорівнював 8 хв. Після вкладання у форми для виготовлення призм суміш ущільнювали поверхневим площинним вібратором вагою 20 кг зі швидкістю обертання 3000 об/хв. протягом 30 с (рис. 3, б).

Маркування зразків: Р – призма; перша цифра у маркуванні: 1, 2 – міцність дрібнозернистого бетону, яка відповідає класові бетону C20/25 і C30/35 відповідно; друга цифрамаркування – коефіцієнт фібрового армування: 0 – $\rho_{fv} = 0$; 1 – $\rho_{fv} = 0,01$; 2 –

$\rho_{fv} = 0,03$; третя цифра – номер зразка-близюка.

Призми на стиск випробовували на пресі П-125 згідно з вимогами ДСТУ [12] після 28 діб зберігання. Для вимірювання поздовжніх деформацій використовували індикатори з ціною поділки 0,001 мм, а тензорезистори з базою 50 мм – для вимірювання поздовжніх і поперечних деформацій (рис. 4). За випробувань контролювали поздовжні та поперечні деформації та навантаження. За навантажень, які досягали приблизно 90 % від руйнівних, ступені навантажень зменшували до рівня 4–5 % від руйнівних.



Рис. 3. Фіробетонна суміш (а) і ПЕТ-фіробетонні призми після виготовлення (б)

Після досягання максимального навантаження призму розвантажували до навантаження, що дорівнювало 80–90 % від руйнівного. Потім довантажували призму багатора

зовими навантаженнями зі зняттям відліків по тензорезисторах і мікроіндикаторах. Руйнування призм, армованих ПЕТ-фіброю, було в'язким.



Рис. 4. ПЕТ-фібробетонна призма під час випробувань

За результатами випробувань призм (табл. 3) визначали призмову міцність зразків $f_{cf,prism}$, середнє значення призмової міцності для призм-близнюків $f_{cf,prism,m}$, початковий модуль пружності кожного зразка E_{cf} , середній початковий модуль пружності для призм-близнюків $E_{cf,m}$, коефіцієнт Пуассона ν для кожного зразка і його середнє значення ν_m , відносні деформації, що відповідають максимальним напруженням $\epsilon_{cf,1}$, і їх середні значення для зразків-близнюків $\epsilon_{cf,1,m}$.

Підвищення коефіцієнта ПЕТ-фібрового армування за об'ємом з 0 до 0,03 посприятило підвищенню міцності призм на 4,98 % за класу

бетону С20/25 і на 3,84 % за класу бетону С30/35. Початковий модуль деформацій E_{cf} , коефіцієнт поперечних деформацій ν і відносні деформації, що відповідають максимальним напруженням $\epsilon_{cf,1}$, також дещо збільшувались за підвищення коефіцієнта армування за об'ємом ρ_{fv} .

Для оцінювання впливу міцності дрібнозернистого бетону-матриці $f_{c,prism,m}$ і коефіцієнта ПЕТ-фібрового армування ρ_{fv} на міцність ПЕТ-фібробетону $f_{cf,prism,m}$ використали математичну модель повного двофакторного експерименту (ПФЕ 2^2) [13] (табл. 4).

Рівняння регресії ПФЕ 2^2 має вигляд [13]:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2, \quad (1)$$

де b_0, b_1, b_2, b_{12} – коефіцієнти рівняння регресії ПФЕ 2^2 ; x_1, x_2 – кодовані значення факторів $f_{c,prism,m}$ і ρ_{fv} відповідно.

У рівнянні регресії ПФЕ 2^2 (1) вільний член обчислюється за формулою [13]:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_u}{N}, \quad (2)$$

де \bar{y}_u – середнє значення для трьох призм-близнюків вихідного параметра в точці u плану ПФЕ 2^2 ; N – кількість точок плану ПФЕ 2^2

Результати випробувань призм на короткочасну дію навантаження

Марка призми	ρ_{fv}	$f_{cf,prism}$ МПа	$f_{cf,prism,m}$ МПа	$E_{cf} \cdot 10^{-3}$, МПа	$E_{cf,m} \cdot 10^{-3}$, МПа	ν	ν_m	$\varepsilon_{cf,1} \cdot 10^3$	$\varepsilon_{cf,1,m} \cdot 10^3$
P-1.0.1	0	23,37	23,28	24,17	24,15	0,203	0,202	1,99	1,99
P-1.0.2		23,36		24,11		0,201		1,98	
P-1.0.3		23,11		24,17		0,201		1,99	
P-1.1.1	0,01	23,76	23,71	25,04	25,05	0,195	0,196	2,18	2,20
P-1.1.2		23,74		25,02		0,196		2,21	
P-1.1.3		23,63		25,09		0,197		2,20	
P-1.2.1	0,03	24,37	24,44	26,11	26,09	0,194	0,193	2,41	2,43
P-1.2.2		24,49		26,18		0,193		2,44	
P-1.2.3		24,46		25,98		0,193		2,45	
P-2.0.1	0	30,97	31,29	27,74	27,61	0,202	0,201	2,03	2,03
P-2.0.2		31,37		28,02		0,203		2,05	
P-2.0.3		31,53		27,07		0,199		2,02	
P-2.1.1	0,01	31,63	31,72	28,55	28,62	0,198	0,198	2,27	2,26
P-2.1.2		31,75		28,64		0,199		2,26	
P-2.1.3		31,78		28,67		0,196		2,25	
P-2.2.1	0,03	32,29	32,49	29,78	29,81	0,191	0,194	2,44	2,47
P-2.2.2		32,52		30,05		0,196		2,50	
P-2.2.3		32,66		29,6		0,195		2,47	

Матриця ПФЕ 2²

Точка плану	Фактори		Взаємодія	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

Коефіцієнти при лінійних членах рівняння регресії ПФЕ 2² обчислюють за формулою [13]:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N \tilde{\delta}_{iu} \bar{y}_u}{N}, \quad (3)$$

де $\tilde{\delta}_{iu}$ – значення i -го фактора в рядку матриці ПФЕ 2² експерименту в u -му досліді.

Коефіцієнт парної взаємодії факторів ПФЕ 2² визначають за формулою [13]:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N \tilde{\delta}_{iu} \tilde{\delta}_{ij} \bar{y}_u}{N}, \quad (4)$$

де $\tilde{\delta}_{ij}$ – значення j -го фактора в u -му досліді.

Дисперсію відтворюваності вихідного параметра $S_{(y)}^2$ у ПФЕ 2² знаходять за формулою [13]:

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N(r-1)}, \quad (5)$$

де $\sum_{u=1}^N$ – сума за стовпцями матриці ПФЕ 2²; $\sum_{i=1}^r$ – те саме, за рядками; r – кількість дослідів у точці плану ПФЕ 2².

Середнє квадратичне відхилення вихідного параметра [13]:

$$S_{\{(y)\}} = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N(r-1)}} = \sqrt{S_{(y)}^2}. \quad (6)$$

Середньоквадратична помилка визначається за формулою [13]:

$$S_{\{b_0\}} = S_{\{b_i\}} = S_{\{b_{ij}\}} = \frac{S_{(y_u)}}{\sqrt{N}}. \quad (7)$$

Розрахункове значення t -критерію Стьюдента (t_p) визначають за формулами [13]:

$$t_{p\{b_0\}} = \frac{|b_0|}{S_{\{b_0\}}}, \quad (8)$$

$$t_{p\{b_i\}} = \frac{|b_i|}{S_{\{b_i\}}}, \quad \dots(9)$$

$$t_{p\{b_{ij}\}} = \frac{|b_{ij}|}{S_{\{b_{ij}\}}}. \quad \dots(10)$$

Коефіцієнти вважають значущими, якщо розрахункові значення t_p більші, ніж табличні t_T [13], і залежать від призначеного рівня значущості та кількості ступенів свободи $f_{(y)}$. У наших дослідях призначено рівень значущості 0,05. Кількість ступенів свободи знаходимо за формулою [13]:

$$f_{(y)} = N(r-1). \quad (11)$$

Якщо значення t_p менше за t_T , то цей коефіцієнт можна відкинути, не перераховуючи інших коефіцієнтів.

Дисперсію адекватності для лінійних рівнянь визначають за формулою [13]:

$$S_{\hat{a}\hat{a}}^2 = \frac{r(\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_u)^2)}{N_1 - m}, \quad \dots(12)$$

де m – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії.

Адекватність моделі перевірять за критерієм Фішера (F -критерієм). Якщо $S_{aa}^2 > S_{(y)}^2$, то:

$$F_p = \frac{S_{aa}^2}{S_{(y)}^2}, \quad \dots(13)$$

а якщо $S_{aa}^2 < S_{(y)}^2$, то:

$$F_p = \frac{S_{(y)}^2}{S_{aa}^2}, \quad \dots\dots\dots (14)$$

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

Табличне значення критерію Фішера F_T залежить від довірчої ймовірності. Її найчастіше приймають такою, що дорівнює 95 %. Критерій Фішера залежить також від кількості ступенів свободи дисперсії адекватності $f_{ад}$. Її визначають для лінійних рівнянь за формулою [13]:

$$f_{ад} = N - m. \quad (15)$$

Рівняння вважають адекватним, якщо $F_p < F_T$.

Отже, з огляду на дані табл. 3, 4 формуємо умови планування ПФЕ 2^2 (табл. 5)

Таблиця 5

Умови планування експерименту

Фактор		Рівень варіювання			Інтервал варіювання
натуральний	кодований	1 ⁻	0	1 ⁺	
$f_{cm,prism}$ МПа	X_1	2 ² 3,28	2 7,285	3 1,29	4,005
ρ_{fv}	X_2	0 ⁰ ,01	0 02	0 ⁰ ,03	0,01

Матриця планування повного двофакторного експерименту (ПФЕ 2^2) і експериментальні значення призмової міцності ПЕТ-фібробетону $f_{cf,prism}$ подано в табл. 6.

Вільний член рівняння регресії визначали за формулою (2) і даними табл. 6:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_u}{N} = \frac{112,36}{4} = 28,09.$$

Коефіцієнти рівняння регресії b_1, b_2, b_{12} визначали за формулами (3) та (4) і даними табл. 7:

$$b_1 = \frac{16,06}{4} = 4,015;$$

$$b_2 = \frac{1,5}{4} = 0,375;$$

$$b_{12} = \frac{0,04}{4} = 0,01.$$

Для визначення значущості цих коефіцієнтів визначаємо спершу дисперсію відтворюваності за рядками матриці (табл. 8).

Дисперсію відтворюваності вихідного параметра $S_{(y)}^2$ знаходимо за формулою (5):

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N(r-1)} = \frac{0,1}{4(3-1)} = 0,0125$$

Середньоквадратичне відхилення визначаємо за формулою (6):

$$S_{(y)} = \sqrt{S_{(y)}^2} = \sqrt{0,0125} = 0,11803.$$

Середньоквадратична помилка (формула (7)):

$$S_{(b_0)} = S_{(b_i)} = S_{(b_{ij})} = \frac{S_{(y_u)}}{\sqrt{N}} = \frac{0,11803}{\sqrt{4}} = 0,059.$$

Табличне значення t -критерію Стьюдента за рівня значущості $\alpha = 0,05$ ($P = 95\%$) дорівнює 2,31 [13], що відповідає кількості ступенів свободи

$$f_y = N(r - 1) = 4(3 - 1) = 8.$$

Із табл. 7 вибираємо значення коефіцієнтів рівняння регресії і знаходимо розрахункове значення t_p за формулами (8) – (10):

$$t_p = \frac{|b_1|}{S_{(b_{24})}} = \frac{4,015}{0,059} = 68,06 > t = 2,31.$$

$$t_p = \frac{|b_2|}{S_{(13)}} = \frac{0,375}{0,059} = 6,36 >> t = 2,31.$$

$$t_p = \frac{|b_{12}|}{S_{(24)}} = \frac{0,01}{0,059} = 0,17 < t = 2,31.$$

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

$$\hat{y} = 28,09 + 4,015x_1 + 0,375x_2. \quad \dots (16)$$

Для перевірки адекватності отриманого рівняння регресії визначимо значення u для кожного рядка матриці і знаходимо суму квадратів відхилень розрахункових даних (табл. 9).

Дисперсію адекватності визначасмо за формулою (12):

$$S_{\hat{a}\hat{a}}^2 = \frac{r(\sum_{i=1}^{N_i} (\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2)}{N_1 - m} = \frac{3 \cdot 0,0004}{4 - 3} = 0,0012,$$

де m – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні.

Оскільки $S_{\hat{a}\hat{a}}^2 = 0,0012 < S_{\hat{y}}^2 = 0,0125$, то розрахункове значення критерію Фішера визначасмо за формулою (14):

$$F_p = \frac{S_{\hat{a}\hat{a}}^2}{S_{\hat{y}}^2} = \frac{0,0012}{0,0125} = 0,096.$$

Таблиця 7

Коефіцієнти рівняння регресії функції $f_{cf,prism}$

Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів		
для лінійних членів		для взаємодій
$\bar{y}\delta_1$	$\bar{y}\delta_2$	$\bar{y}\delta_1\delta_2$
+32,49	+32,49	+32,49
+31,72	-31,72	-31,72
-24,44	+24,44	-24,44
-23,71	-23,71	+23,71
$\Sigma = +16,06$	$\Sigma = +1,5$	$\Sigma = +0,04$
$b_1 = +4,015$	$b_2 = +0,375$	$b_{12} = +0,01$

Таблиця 8

Розрахунок дисперсії відтворюваності функції $f_{cf,prism}$ за рядками матриці

Точки плану u	$(y_1 - \bar{y}_n)^2$	$(y_2 - \bar{y}_n)^2$	$(y_3 - \bar{y}_n)^2$	$\sum S_{\hat{y}}^2$
1	0,04	0,0009	0,0289	0,0698
2	0,0081	0,0009	0,0036	0,0126
3	0,0049	0,0025	0,0004	0,0078
4	0,0025	0,0009	0,0064	0,0098
Сума				0,1

Таблиця 9

Розрахунок дисперсії адекватності для функції $f_{cf,prism}$

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	28,09	+4,015	+0,375	32,48	32,49	-0,01	0,0001
2	28,09	+4,015	-0,375	31,73	31,72	0,01	0,0001
3	28,09	-4,015	+0,375	24,45	24,44	0,01	0,0001
4	28,09	-4,015	-0,375	23,7	23,71	-0,01	0,0001
Сума							0,0004

Табличне значення критерію Фішера F_T , якщо $f_1 = 4(3 - 1) = 8$ і $f_2 = 4 - 3 = 1$, дорівнює 5,32. Отже, $F_p = 0,048 < F_T = 5,32$, тому рівняння регресії адекватне.

Натуральні X_i і кодовані значення x_i пов'язані залежністю [13]:

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

де X_{i0} – значення нульової точки; ΔX_i – інтервал варіювання.

Звідси отримуємо:

$$x_1 = \frac{f_{cm,prism} - 27,285}{4,005};$$

$$x_2 = \frac{\rho_{fv} - 0,02}{0,01}.$$

Рівняння регресії для визначення призмової міцності ПЕТ-фібробетону отримує вигляд:

$$f_{cf,prism} = 28,09 + 4,015 \frac{f_{cm,prism} - 27,285}{4,005} + 0,375 \frac{\rho_{fv} - 0,02}{0,01}. \quad \dots\dots\dots (18)$$

Оцінимо також призмову міцність $f_{cf,prism}$ за формулою [14]:

$$f_{cf,prism} = f_{c,prism} + (k_n^2 \varphi_f \rho_{fv} f_f), \quad \dots \quad \dots \quad (19)$$

де k_n – коефіцієнт, що приймається за таблицею 7.2 [15] (за довжини фібри 40 мм і поперечного перерізу призми 100 x 100 мм дорівнює 0,408); φ_f – коефіцієнт ефективності армування фібрами, який визначають за формулою:

$$\varphi_f = \frac{5+L}{1+4,5L}, \quad (20)$$

де

$$L = \frac{k_n^2 \rho_{fv} f_f}{f_{cf,prism}}; \quad \dots\dots\dots (21)$$

f_f – міцність ПЕТ-фібри на розтяг (середнє значення за результатами, поданими в праці [16] – 80 МПа).

Порівняємо розраховані за формулами (19)–(21) значення міцності ПЕТ-фібробетону на стиск з експериментальними даними (табл. 10). Теоретичні значення в 1,01–1,03 рази більші, ніж експериментальні. Тому формулу (20) скоректуємо так:

$$\varphi_f = \frac{3+L}{1+6L}. \quad \dots\dots\dots (22)$$

Це дозволяє отримати дещо менші теоретичні значення міцності ПЕТ-фібробетону за експериментальні (табл. 11).

ПЕТ-фіброве армування позначилося також на початковому модулі пружності ПЕТ-фібробетону E_{cf} (рис. 5). Наприклад, якщо початкові модулі пружності дрібнозернистого бетону класу С20/25 в середньому дорівнювали $24,15 \cdot 10^3$ МПа, то за 3% ПЕТ-фібрового армування – $26,09 \cdot 10^3$ МПа, тобто приріст дорівнював 8 %.

За результатами експериментів (рис. 5) пропонуємо початковий модуль пружності ПЕТ-фібробетону E_{cf} визначати за формулою:

$$E_{cf} = E_c (1 + 2,59 \rho_{fv}). \quad (23)$$

У праці [17] для сталеві фібробетону на фібри з відходів листа отримано:

$$\dots \dots \dots E_{cf} = E_c (1 + 7,8 \rho_{fv}). \quad (24)$$

Це означає, що армування сталевію фіброю дає більший приріст початкового модуля пружності порівняно з армуванням ПЕТ-фіброю.

Порівняння експериментальних і теоретичних значень міцності сталевібробетону на стиск

Марки призм	k_n	ρ_{fv}	f_f	$f_{c,prism}$	L	φ_f	$f_{cf,prism}$	$f_{cf,prism}^{exp}$	$\frac{f_{cf,prism}}{f_{cf,prism}^{exp}}$
P-2.2	0,408	0,03	80	31,29	0,013	4,740	33,18	32,49	1,02
P-2.1		0,01		31,29	0,004	4,910	31,94	31,72	1,01
P-1.2		0,03		23,28	0,017	4,657	25,14	24,44	1,03
P-1.1		0,01		23,28	0,006	4,880	23,93	23,71	1,01

Таблиця 11

Порівняння експериментальних і теоретичних значень міцності ПЕТ-вібробетону на стиск з урахуванням скоректованого значення φ_f

Марки призм	k_n	ρ_{fv}	f_f	$f_{c,prism}$	L	φ_f	$f_{cf,prism}$	$f_{cf,prism}^{exp}$	$\frac{f_{cf,prism}}{f_{cf,prism}^{exp}}$
P-2.2	0,408	0,03	80	31,29	0,013	2,794	32,43	32,49	0,998
P-2.1		0,01		31,29	0,004	2,928	31,68	31,72	0,999
P-1.2		0,03		23,28	0,017	2,730	24,40	24,44	0,998
P-1.1		0,01		23,28	0,006	2,904	23,68	23,71	0,999

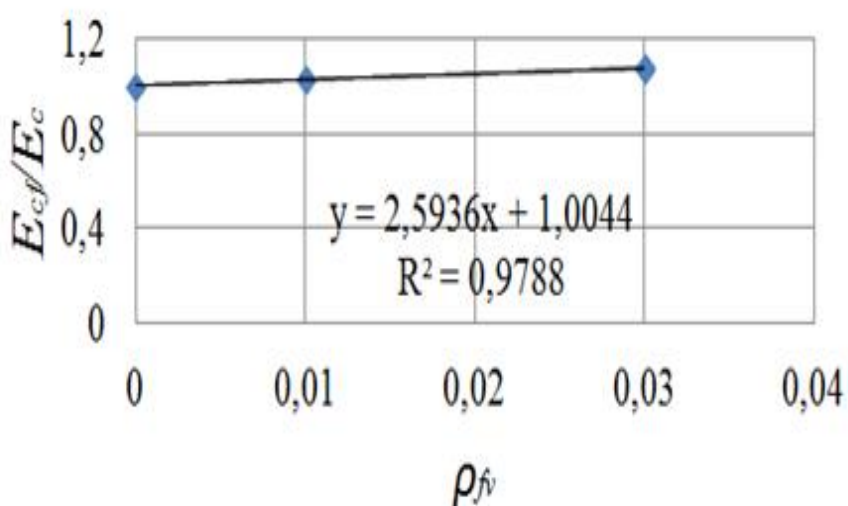


Рис. 5. Вплив вмісту фібрової арматури на початковий модуль пружності ПЕТ-вібробетону

На кожному з етапів навантаження вміст ПЕТ-фібри в одиниці об'єму бетону позитивно впливав на деформативність призми (рис. 6, 7). Діаграми деформування ПЕТ-

фіробетону доцільно описувати поліномом п'ятого ступеня, як це було запропоновано для сталевіробетону у праці [18]:

$$\sigma_{cf} = f_{cf} \sum_{k=1}^5 a_k \eta_c^k, \quad (25)$$

де σ_{cf} – напруження за стиску; $\eta_c = \frac{\varepsilon_{cf}}{\varepsilon_{cf,1}}$ – відношення відносних деформацій ε_{cf} до відносних деформацій, що відповідають піковій точці діаграми деформування $\varepsilon_{cf,1}$.

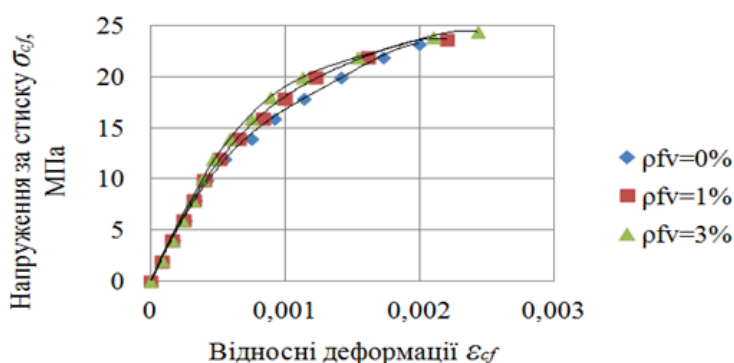


Рис. 6. Діаграми деформування ПЕТ-фіробетону на висхідній вітці (матриця – дрібнозернистий бетон класу C20/25)

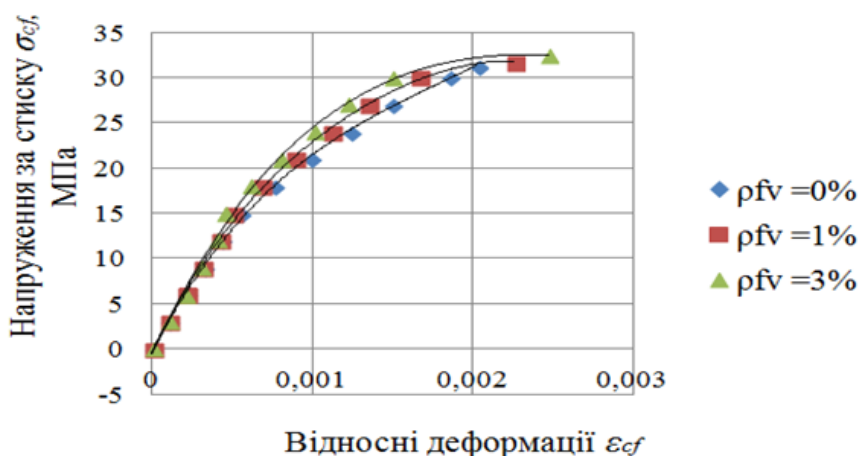


Рис. 7. Діаграми деформування ПЕТ-фіробетону на висхідній вітці (матриця – дрібнозернистий бетон класу C30/35)

Висновки. Вивчено вплив вмісту ПЕТ-фібри в одиниці об'єму на міцність і деформативність ПЕТ-фіробетону. Показано, що підвищення відсотка фібрового армування збільшує міцність ПЕТ-фіробетону, початковий модуль пружності ПЕТ-фіробетону, зменшує відносні деформації за конкретної інтенсивності напружень. Запропонована математична модель для визначення міцності ПЕТ-фіробетону на основі планованого

експерименту. Уточнена формула для розрахунку міцності ПЕТ-фіробетону, яка раніше використовувалася за розрахунку міцності на стиск сталевіробетону. Вказано на доцільність використання модифікованої формули норм проектування залізобетонних конструкцій для опису діаграми «напруження відносні деформації» ПЕТ-фіробетону за короткотривалої дії стиску.

Бібліографічний список

1. Білозір Віт., Білозір Вол. Обґрунтування параметрів фібрового армування з використаного поліетилентерефталату. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2016. № 17. С. 66–71.
2. Шмиг Р. А., Білозір В. В. Теоретичне оцінювання міцності ПЕТ-фібробетону на розтяг. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2022. Вип. 18. С. 199–212.
3. Shmyh R., Bilozir V., Vysochenko A., Bilozir V. Carrying capacity of bending concrete elements reinforced by fibro and stripes taken from used polyethyleneterephthalate bottles. *International Scientific and Practical Conference World Science*. 2018. No 2 (30). Vol. 1. P. 88–93.
4. 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.
5. Won J. P., Jang C. I., Lee S. W. Long-term performance of recycled PET fibre-reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*. 2009. No 24. P. 660–665.
6. Kim J., Park C., Lee S. Effects of the geometry of recycled PET fibre reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites*. 2008. No 39. P. 442–450.
7. Pacheco-Torgal F., Ding Y., Jalali S. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. *Construction and Building Materials*. 2012. No 30. P. 714–724.
8. Adnan H. M., Dawood A. O. Strength behavior of reinforced concrete beam using recycle of PET wastes as synthetic fibers. *Case Studies in Construction Materials*. 2020. No 13.
9. Sobczak-Piąstka J., Famulyak Y., Demchyna B. The application of non-traditional reinforcement in structural elements made of cellular concrete. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2949.
10. 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.
11. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Проектування складів бетонів: монографія. Рівне: НУВГП, 2015. 353 с.
12. ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 17 с. (Національний стандарт України).
13. 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.
14. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций. Москва: НИИЖБ Госстроя СССР, 1987. 148 с.
15. 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].
16. Foti D. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. No 96. P. 396–404.
17. Билозир В. В. Образование и раскрытие трещин в нормальных сечениях изгибаемых сталефибробетонных элементов на фибре из листа: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 1991. 164 с.
18. 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). No 111. P. 49–58.

Стаття надійшла 24.08.2023