

УДК 624.012

МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ, АРМОВАНОГО ФІБРОЮ ТИПУ NE1050, ЗА КОРОТКОТРИВАЛОГО СТИСКУ**І. Біденко, аспірантка**

ORCID ID: 0000-0002-2418-353X

Львівський національний університет природокористування

<https://doi.org/10.31734/architecture2023.24.065>**Біденко І. Механічні характеристики сталевібробетону, армованого фіброю типу NE1050, за короткотривалого стиску**

Вивчено вплив коефіцієнта фібрового армування за об'ємом ρ_{fv} за використання сталевібро типу NE1050 зі загнутими кінцями українського виробництва на міцність та деформативність дисперсноармованого бетону за дії короткотривалого стиску. Розроблено пропозиції щодо розрахунку цієї міцності, аналітичного опису відповідної діаграми деформування.

Згідно з програмою досліджень міцність дрібнозернистого бетону прийнята класів C20/25 і C30/35, які найчастіше використовують у конструкціях без попереднього напруження стрижневої арматури; відсотки фібрового армування за об'ємом прийняті 0 %; 0,7 %; 1,25 %; 1,8 %, оскільки за менших відсотків фібрового армування ефекту від нього може не бути, а за більших відсотків конструкції неконкурентоспроможні. Міцнісні та деформативні характеристики сталевібробетону вивчали на стиснутих зразках-призмах $100 \times 100 \times 400$ мм.

Для виготовлення призми із класу бетону C20/25 прийнятий такий склад: цемент марки М400 з активністю 41,2 МПа – 445 кг, пісок з модулем крупності 2,1 – 1645 кг, вода – 240 л. Для отримання класу бетону C30/35 прийнято склад: цемент марки М500 з активністю 52,3 МПа – 431 кг, пісок з модулем крупності 2,1 – 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.

Показано, що підвищення коефіцієнта фібрового армування за об'ємом сприяє підвищенню міцності сталевібробетону, відносних деформацій, що відповідають піковій точці діаграми деформування, початкового модуля пружності сталевібробетону, зменшенню відносних деформацій за конкретного рівня напружень. Підтверджено доцільність використання модифікованої формули норм у вигляді полінома п'ятого ступеня для опису діаграми деформування сталевібробетону за короткотривалого стиску і встановлено коефіцієнти цього полінома.

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

Bidenko I. Mechanical characteristics of steel fiber concrete reinforced with fiber of NE1050 type under short-term compression

The article studies the influence of the coefficient of fiber reinforcement by volume ρ_{fv} when using steel fiber of the NE1050 type with bent ends of Ukrainian production on the strength and deformability of dispersed-reinforced concrete under short-term compression, and makes proposals for calculating the strength and analytical description of the corresponding deformation diagram.

According to the research program, the strength of fine-grained concrete is assumed to be of C20/25 and C30/35 classes, which are most often used in the structures without prestressing the core reinforcement; the percentages of fiber reinforcement by volume are 0 %, 0.7 %, 1.25 %; 1.8 %, since at lower percentages of fiber reinforcement, its effect may not be observed, and at higher percentages, the structures cease to be competitive. The strength and deformation characteristics of steel fiber concrete were studied on compressed prism specimens of $100 \times 100 \times 400$ mm.

To produce prisms of C20/25 class concrete, the following composition was adopted: M400 cement with an activity of 41.2 MPa – 445 kg, sand with a modulus of 2.1 – 1645 kg, and water – 240 liters. To obtain C30/35 class concrete, the following composition was adopted, particularly M500 cement with an activity of 52.3 MPa – 431 kg, sand with a particle size modulus of 2.1 – 1724 kg, and water – 216 liters. The fiber consumption per 1 m^3 was 54.95, 98.13, and 141.3 kg at the percentages of reinforcement of 0.7, 1.25, and 1.8, respectively.

It is shown that an increase in the coefficient of fiber reinforcement by volume contributes to an increase in the strength of steel fiber concrete, relative deformations corresponding to the peak point of the deformation diagram, the initial modulus of elasticity of steel fiber concrete, and a decrease in relative deformations at a specific stress level. The research confirms the expediency of using a modified formula of norms in the form of a fifth-degree polynomial to describe the deformation diagram of steel fiber concrete under short-term compression and determines the coefficients of this polynomial.

Key words: fiber, steel fiber concrete, compression, testing, stress, relative deformation, initial modulus of elasticity, deformation diagram.

Постановка проблеми. У вітчизняних нормах проектування фібробетонних конструкцій [7], як і в зарубіжних нормах та рекомендаціях [11; 13], запропоновано за розрахунку несучої здатності згинаних фібробетонних елементів у стиснутій зоні приймати максимальні напруження, що дорівнюють міцності бетону на стиск, хоча відомо, що фіброва арматура ефективно стримує розвиток поперечних деформацій за стиску, підвищуючи за рахунок цього міцність дисперсно-армованого бетону. Тому детальні експериментальні дослідження в цьому напрямі важливі та актуальні. Адже штучне зниження розрахункового опору на стиск може призвести до різних неточностей в оцінюванні напружено-деформованого стану конструкцій та їхніх елементів на стадії граничної рівноваги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У праці [9] зауважено позитивний вплив фібрового армування на міцність сталеві фібробетонних призм і запропоновано формулу для її визначення. Це також відображено у рекомендаціях з проектування та виготовлення сталеві фібробетонних конструкцій [10].

Про позитивний вплив армування сталеву фібру типу HE1050 на стискальну міцність бетону свідчать також результати досліджень, подані в працях [2; 8].

Оскільки системних досліджень впливу коефіцієнта фібрового армування за об'ємом ρ_{fv} під час використання сталеві фібри типу HE1050 зі загнутими кінцями українського виробництва на міцність і деформативність сталеві фібробетону на стиск не виконували, їх можна вважати актуальними.

Постановка завдання. Завданням досліджень є вивчення впливу коефіцієнта фібрового армування за об'ємом ρ_{fv} за використання сталеві фібри типу HE1050 зі загнутими кінцями українського виробництва на міцність та деформативність дисперсно-армованого бетону за дії короткотривалого стиску, розроблення пропозицій щодо розрахунку цієї міцності, аналітичного опису відповідної діаграми деформування.

Виклад основного матеріалу. Згідно з ДСТУ [7] вирішили прийняти такі умови експерименту:

- міцність дрібнозернистого бетону – класів С20/25 і С30/35, які найчастіше використовують у конструкціях без попереднього напруження стрижневої арматури;

- відсоток фібрового армування за об'ємом – $\rho_{fv} = 0\%; 0,7\%; 1,25\%; 1,8\%$, оскільки за менших відсотків фібрового армування ефекту від нього може не бути, а за більших – конструкції будуть неконкурентоспроможними;

- міцнісні та деформативні характеристики сталеві фібробетону вивчити на стиснутих зразках-призмах $100 \times 100 \times 400$ мм.

Склади дрібнозернистого бетону розраховані згідно з ДСТУ [4] і рекомендаціями [6]. Для виготовлення призм з класу бетону С20/25 прийнятий такий склад: цемент марки М400 з активністю 41,2 МПа – 445 кг, пісок із модулем крупності 2,1 – 1645 кг, вода – 240 л. Для отримання класу бетону С30/35 прийнято склад: цемент марки М500 з активністю 52,3 МПа – 431 кг, пісок з модулем крупності 2,1 – 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.

Програму досліджень зразків-призм подано в табл. 1.

Призми випробовували на стиск після 28 діб зберігання згідно з ДСТУ [6] на пресі П-125. Індикатори з ціною поділки 0,001 мм для вимірювання деформацій встановлювали на зразку за допомогою притискних рамок. Тензорезистори розташовували по два на кожній грані для вимірювання поздовжніх деформацій і одному – для вимірювання поперечних (рис. 1).

Під час випробувань контролювали навантаження, поздовжні та поперечні деформації на гранях призм. За навантажень, які досягали рівня 80–90 % від руйнівних, їхні ступені зменшували до рівня 3–5 % від руйнівних. Після досягання руйнівного навантаження частково розвантажували призму до навантаження, що приблизно дорівнювало 90 % від руйнівного.

Далі багаторазово навантажували призми зі зняттям відліків із тензорезисторів, розміщених паралельно до поздовжньої осі призми. Що більшим був відсоток армування, то в'язкішим було руйнування призм, які містили фібру.

Програма досліджень зразків-призм

Вид випробувань, розміри зразків, мм	Клас бетону	Відсоток фібрового армування, %			
		$\rho_{fv} = 0$	$\rho_{fv} = 0,7$	$\rho_{fv} = 1,25$	$\rho_{fv} = 1,8$
Стиск, 400 × 100 × 100	C20/25	P-1.0.1	P-1.1.1	P-1.2.1	P-1.2.1
		P-1.0.2	P-1.1.2	P-1.2.2	P-1.2.2
		P-1.0.3	P-1.1.3	P-1.2.3	P-1.2.3
		P-2.0.1	P-2.1.1	P-2.2.1	P-2.2.1
		P-2.0.2	P-2.1.2	P-2.2.2	P-2.2.2
		P-2.0.3	P-2.1.3	P-2.2.3	P-2.2.3

Умовні позначення маркування зразків:

P – призма; перша цифра у маркуванні: 1, 2 – міцність бетону-матриці, що відповідає класу бетону C20/25 і C30/35 відповідно; друга цифра маркування – відсоток фібрового армування: 0 – $\rho_{fv} = 0$; 1 – $\rho_{fv} = 0,7$; 2 – $\rho_{fv} = 1,25$; 3 – $\rho_{fv} = 1,8$; третя цифра маркування – номер зразка-близнюка.



Рис. 1. Сталефіробетонна призма під час випробувань

За результатами випробувань зразків за короткочасної дії навантаження, поданих у табл. 2, визначено призмову міцність кожного зі зразків $f_{cf,prism}$, середню призмову міцність $f_{cf,prism,m}$ для зразків-близнюків, початковий модуль деформацій для зразків-близнюків E_{cf} , середній початковий модуль деформацій $E_{cf,m}$ для зразків-близнюків, коефіцієнт поперечних деформацій (коефіцієнт Пуассона) для зразків-близнюків на початкові деформування ν і його середнє значення ν_m , а також відносні деформації, що відповідають піковій точці

діаграми деформування, ϵ_{cf1} і, відповідно, $\epsilon_{cf1,m}$.

Із табл. 2 випливає, що підвищення відсотка фібрового армування за об'ємом з 0 до 1,8 спричинило підвищення міцності призм на 11,98 % за класу бетону C20/25 і на 21,5 % за класу бетону C30/35. Зріс і початковий модуль деформацій E_{cf} , коефіцієнт поперечних деформацій ν і відносних деформацій, що відповідають піковій точці діаграми деформування, ϵ_{cf1} , за підвищення вмісту фібрової арматури в одиниці об'єму бетонної суміші.

Результати випробувань призми 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	ε_{cf1}	$\varepsilon_{cf1,m} \cdot 10^3$
P-1.0.1	0	23,68	23,15	24,17	24,15	0,201	0,202	1,95	1,97
P-1.0.2		23,31		24,11		0,201		1,97	
P-1.0.3		22,46		24,17		0,203		1,99	
P-1.1.1	0,7	25,33	25,17	25,54	25,58	0,197	0,196	2,18	2,21
P-1.1.2		24,91		25,61		0,196		2,23	
P-1.1.3		25,27		25,59		0,195		2,22	
P-1.2.1	1,25	27,55	27,43	26,11	26,09	0,183	0,183	2,51	2,52
P-1.2.2		27,73		26,18		0,184		2,53	
P-1.2.3		27,01		25,98		0,183		2,51	
P-1.3.1	1,8	28,3	28,04	26,99	27,98	0,174	0,174	2,67	2,67
P-1.3.2		27,79		28,03		0,175		2,67	
P-1.3.3		28,03		28,92		0,173		2,68	
P-2.0.1	0	30,97	31,14	27,74	27,61	0,205	0,202	2,06	2,06
P-2.0.2		31,89		28,02		0,202		2,05	
P-2.0.3		30,56		27,07		0,199		2,03	
P-2.1.1	0,7	35,14	34,88	28,44	28,59	0,195	0,196	2,28	2,27
P-2.1.2		34,55		28,53		0,198		2,28	
P-2.1.3		34,95		28,8		0,196		2,25	
P-2.2.1	1,25	36,04	35,65	29,78	29,81	0,188	0,188	2,48	2,48
P-2.2.2		35,52		30,05		0,187		2,5	
P-2.2.3		35,39		29,6		0,189		2,47	
P-2.3.1	1,8	37	37,84	31,05	30,97	0,178	0,178	2,61	2,60
P-2.3.2		37,98		31,29		0,181		2,59	
P-2.3.3		38,54		30,57		0,176		2,59	

У табл. 2 $f_{cf,prism}$ для зразків, які не містили фібри, призмova міцність – $f_{c,prism}$.

Призмovu міцність $f_{cf,prism}$ визначають за формулою [5]:

$$f_{cf,prism} = f_{c,prism} + (k_n^2 \varphi_f \rho_{fv} f_f), \quad .. (1)$$

де k_n – коефіцієнт, що враховує роботу фібр у перерізі, перпендикулярному до напрямку зовнішнього стискального зусилля, і приймається за таблицею [7] (за довжини фібри 50 мм і поперечного перерізу призми 100 x 100 мм дорівнює 0,387); φ_f – коефіцієнт ефективності непрямого армування фібрами, який визначається за формулою:

$$\varphi_f = \frac{5+L}{1+4,5L}, \quad (2)$$

де

$$L = \frac{k_n^2 \rho_{fv} f_f}{f_{cf,prism}}, \quad (3)$$

f_f – міцність фібри типу HE1050 на розтяг (середнє значення за результатами наших випробувань – 1112 МПа).

Порівнюючи розраховані за формулами (1) – (3) значення міцності сталefібробетону на стиск з експериментальними (табл. 3), можна дійти висновку, що формулу (2) потрібно скоригувати.

Таблиця 3

Порівняння експериментальних і теоретичних значень міцності сталefібробетону 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-1.1	0,387	0,007	1112	23,15	0,050	4,117	27,95	25,17	1,11
P-1.2		0,0125			0,090	3,624	30,69	27,43	1,12
P-1.3		0,018			0,129	3,241	32,87	28,04	1,17
P-2.1		0,007		31,14	0,037	4,311	36,17	34,88	1,04
P-2.2		0,0125			0,067	3,895	39,25	35,65	1,10
P-2.3		0,018			0,096	3,556	41,80	37,84	1,10

Отже, пропонуємо коефіцієнт φ_f розраховувати за формулою:

$$\varphi_f = \frac{3+L}{1+8L}. \quad (4)$$

Це дозволяє ліпше зблизити теоретичне значення міцності на стиск сталefібробетону з експериментальними значеннями (табл. 4).

Таблиця 4

Порівняння експериментальних і теоретичних значень міцності сталefібробетону на стиск з урахуванням скоректованого значення φ_f

Марка призм	k_n	ρ_{fv}	f_f , МПа	$f_{c,prism}$, МПа	L	φ_f	$f_{cf,prism}$, МПа	$f_{cf,prism}^{exp}$, МПа	$\frac{f_{cf,prism}}{f_{cf,prism}^{exp}}$
P-1.1	0,387	0,007	1112	23,15	0,050	2,174	25,685	25,17	1,02
P-1.2		0,0125			0,090	1,797	26,891	27,43	0,98
P-1.3		0,018			0,129	1,537	27,758	28,04	0,99
P-2.1		0,007		31,14	0,037	2,337	33,865	34,88	0,97
P-2.2		0,0125			0,067	1,998	35,300	35,65	0,99
P-2.3		0,018			0,096	1,749	36,384	37,84	0,96

Фіброве армування позитивно позначилося і на початковому модулі пружності сталefібробетону E_{cf} . Так, наприклад, якщо початковий модуль пружності дрібнозернистого бетону класу C20/25 E_c в середньому дорівнював $24,15 \cdot 10^3$ МПа, то за коефіцієнта фібрового армування 0,007 він дорівнював

$25,58 \times 10^3$ МПа, за коефіцієнта фібрового армування $0,0125$ – $26,09 \cdot 10^3$ МПа, а за коефіцієнта фібрового армування $0,018$ – $27,98 \cdot 10^3$ МПа.

На основі результатів експериментів (рис. 2) E_{cf} доцільно визначати за формулою:

$$E_{cf} = E_c (1 + 7,6 \rho_{fv}). \quad (5)$$

Це добре узгоджується з результатами досліджень початкового модуля пружності сталевібробетону на фібри з відходів листа, поданими у праці [7], де коефіцієнт біля ρ_{fv} дорівнює 7,8.

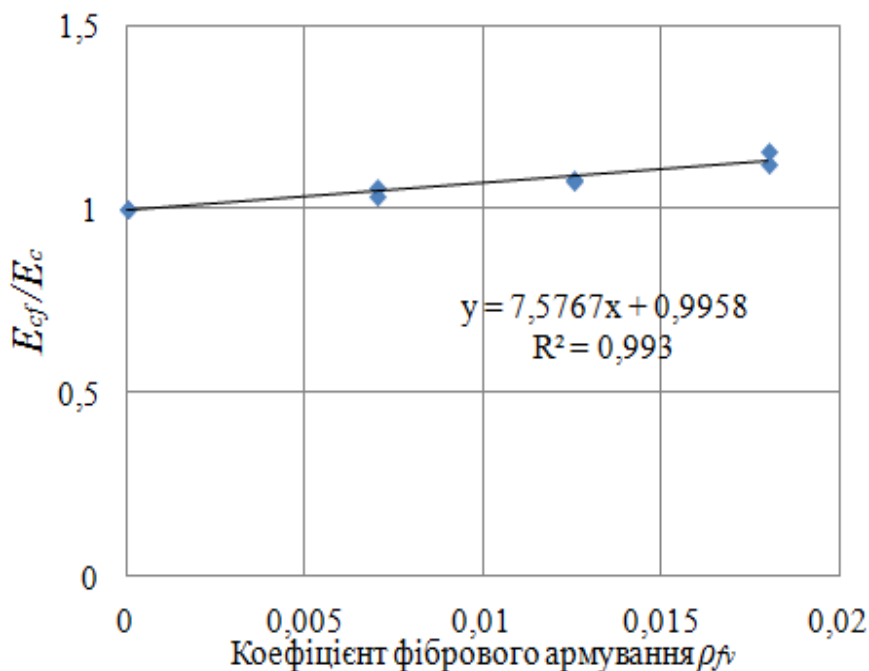


Рис. 2. Вплив вмісту фібрової арматури типу HE1050 на зміну початкового модуля пружності сталевібробетону

Армування сталеву фібрую зі загнутими кінцями типу HE1050 впливало як на деформації на кожному зі ступенів навантаження, так і на деформації, що відповідали піковій

точці діаграми деформування. Діаграми деформування призм із різним вмістом фібрової арматури типу HE1050 подані на рис. 3, 4.

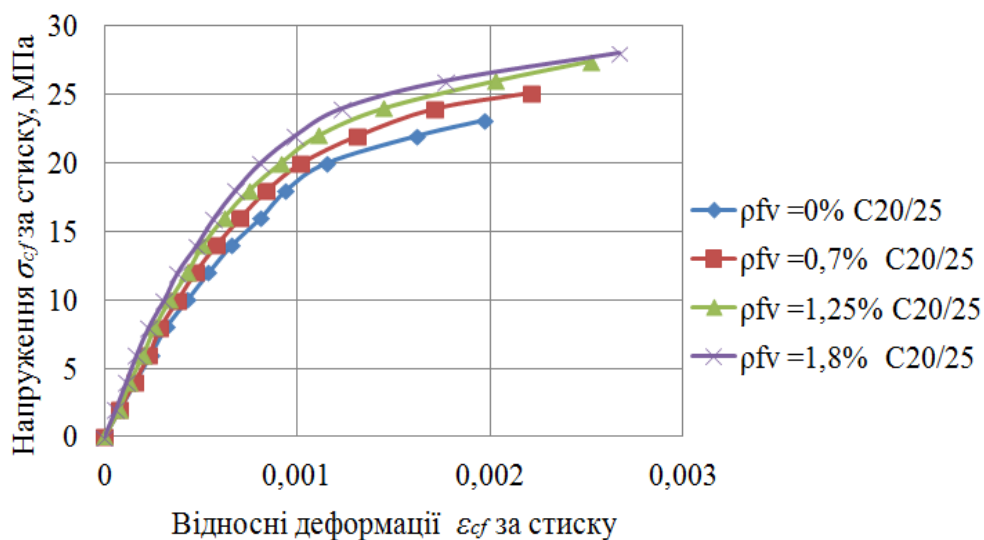


Рис. 3. Діаграми деформування сталевібробетону за класу дрібнозернистого бетону C20/25 на висхідній вітці

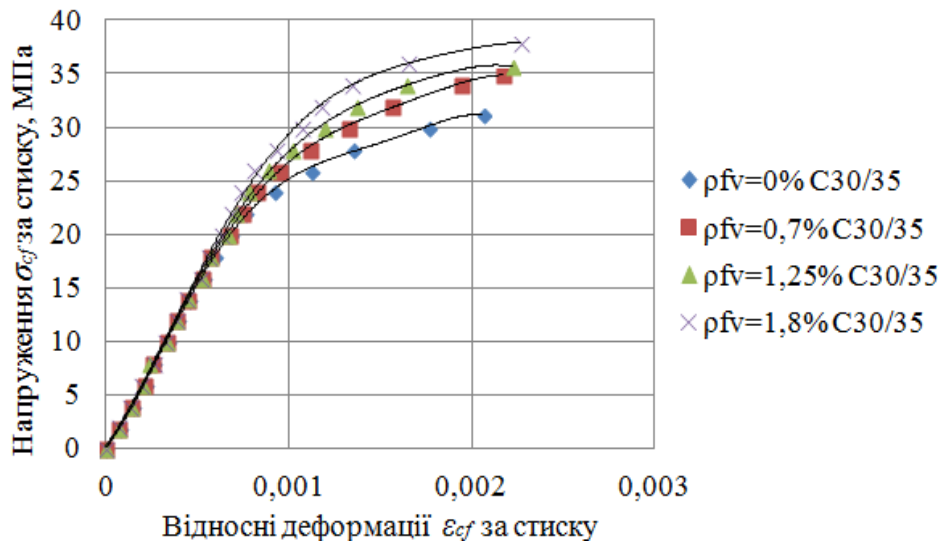


Рис. 4. Діаграми деформування сталевібробетону за класу дрібнозернистого бетону C30/35 на висхідній вітці

Для використання у розрахунках сталевібробетонних елементів деформаційного методу необхідно мати аналітичні вирази, які б описували діаграму деформування сталевібробетону за стиску і розтягу. Щодо стиснутої зони згинаних елементів, то діаграму деформування сталевібробетону доцільно описати поліномом п'ятого ступеня, як це прийнято в нормах проектування залізобетонних конструкцій [1] за пропозиціями проф. Бамбури

Напруження за стиску:

$$\sigma_{cf} = f_{cf} \sum_{k=1}^5 a_k \eta_c^k, \quad (6)$$

$$\text{де } \eta_c = \frac{\varepsilon_{cf}}{\varepsilon_{cf,1}},$$

a_k – коефіцієнти полінома.

У формулі (6) коефіцієнти a_k є коефіцієнтами полінома, розрахованими за методикою, прийнятою у праці [12], з урахуванням експериментальних даних, поданих у табл. 2, та пропозицій [1]:

$$a_1 = \frac{1,1E_{cf}\varepsilon_{cf,1}}{f_{cf}};$$

$$a_2 = 1 - a_1 - a_3 - a_4 - a_5;$$

$$a_3 = a_1 - 2a_4 - 3a_5 - 2$$

$$a_4 = \left\{ [k - 2a_1(3\gamma - 2) + 12\gamma - 6] - 2a_5(10\gamma^3 - 9\gamma + 2) \right\} / [2(6\gamma^2 - 6\gamma + 1)];$$

А. М. [3], а для сталевібробетонних елементів – за [12].

Параметри ідеалізованих діаграм деформування сталевібробетону на фібрі з відходів листа при стисковій [12] добре узгоджуються з результатами експериментальних досліджень, отриманих у праці [2], мають багато спільного з відповідними параметрами важкого конструкційного бетону. Тому використаємо такий самий підхід.

$$a_5 = \left\{ \left[k - 2a_1(2\gamma - 3\gamma) + 12\gamma - 6 \right] (\gamma - 1)^2 \gamma^2 - \left[\beta + a_1\gamma(2\gamma - \gamma^2 - 1) + \gamma^2(2\gamma - 3) \right] (6\gamma^2 - 6\gamma + 1) \right\} / \left\{ 2\gamma^2 \left[(10\gamma^3 - 9\gamma + 2)(\gamma - 1)^2 - (\gamma^3 - 3\gamma + 2)(6\gamma^2 - 6\gamma + 1) \right] \right\}$$

$$\text{де } \gamma = \frac{\varepsilon_{cf,1}}{\varepsilon_{fcc,1}};$$

$$\beta = \frac{1,1\varepsilon_{fccu,1}}{\varepsilon_{fcc,1}}.$$

За результатами експериментів, поданих у табл. 2, отримані значення коефіцієнтів полінома (6) (табл. 5). Експериментальні значення напружень, обчислені за формулою (6), тільки в окремих точках діаграм деформування не перевищують теоретичних, здебільшого ж вони більші (табл. 6). У середньому для призм Р-1.1 характерно, що теоретичні значення напружень лише на чотирьох ступенях

навантаження перевищували експериментальні значення на 1–3 %, на решті ступенів завантаження експериментальні значення напружень були рівними, або більшими – в межах 0–4 %. Поданий аналітичний опис діаграм деформування сталевібробетону можна використати за деформаційного розрахунку згинаних сталевібробетонних елементів.

Таблиця 5

Коефіцієнти полінома (6)

Марки призм	ρ_{fv}	$f_{cf,prism}$, МПа	$E_{cf,m} \cdot 10^{-3}$, МПа	Коефіцієнти полінома				
				a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Р-1.0	0	23,15	24,15	2,2606	-1,3969	-0,0609	0,27	-0,0729
Р-1.1	0,007	25,17	25,58	2,4706	-1,4537	-0,8153	1,1095	-0,311
Р-1.2	0,0125	27,43	26,09	2,6366	0,5319	-6,7167	6,2915	-1,7432
Р-1.3	0,018	28,04	27,98	2,9307	1,9638	-11,9677	11,3212	-3,248
Р-2.0	0	31,14	27,61	2,0091	-0,0753	-2,2614	1,712	-0,3845
Р-2.1	0,007	34,88	28,59	2,0467	0,8978	-4,8884	3,8965	-0,9527
Р-2.2	0,0125	35,65	29,81	2,2811	1,9065	-8,6071	7,3704	-1,9509
Р-2.3	0,018	37,84	30,97	2,3408	3,8081	-13,9246	12,0618	-3,2861

Висновки. Вивчено вплив вмісту фібрової арматури зі загнутими кінцями типу HE1050 і міцності бетону-матриці на міцність та деформативність сталевібробетону. Показано, що підвищення коефіцієнта фібрового армування за об'ємом сприяє підвищенню міцності сталевібробетону, відносних деформацій, що відповідають піковій точці діаграми деформування, початкового модуля пружності

сталевібробетону, зменшенню відносних деформацій за конкретного рівня напружень. Підтверджена доцільність використання модифікованої формули норм у вигляді полінома п'ятого ступеня для опису діаграми деформування сталевібробетону за короткотривалого стиску і встановлені коефіцієнти цього полінома.

Таблиця 6

Експериментальні і теоретичні значення напружень у призмах Р-1.1

Навантаження на призму N , кН	Експериментальні значення напружень σ_{cf}^{exp} , МПа	Відносні деформації ε_{cf}^{exp}	Теоретичні значення напружень σ_{cf}^{theor} , МПа	$\frac{\sigma_{cf}^{exp}}{\sigma_{cf}^{theor}}$
0	0	0	0	-
20	2	7,82E-05	1,94	1,03
40	4	0,000156	3,89	1,03
60	6	0,000235	5,91	1,02
80	8	0,000313	8,17	0,98
100	10	0,00038	10,27	0,97
120	12	0,00054	11,89	1,01
140	14	0,00067	14,08	0,99
160	16	0,00074	15,89	1,01
180	18	0,00094	17,91	1,01
200	20	0,0011	19,88	1,01
220	22	0,00135	22,13	0,99
240	24	0,00171	23,15	1,04
251,7	25,17	0,00221	25,16	1,00

Бібліографічний список

1. Бамбура А. М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону: дисс. ... докт. техн. наук: 05.23.01. Київ, 2005. 379 с.

2. 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.

3. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: [Чинний від 2011-07-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с. (Державні будівельні норми України).

4. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Проектування складів бетонів: монографія. Рівне: НУВГП, 2015. 353 с.

5. 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).

6. 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.

7. 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].

8. Журавський О. Д. Міцність, тріщиностійкість та деформації залізобетонних плит при складних навантаженнях: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Київ, 2021. 327 с.

9. Рабинович Ф. Н. Дисперсно армированные бетоны. Москва: Стройиздат, 1989. 174 с.

10. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций. Москва: НИИЖБ Госстроя СССР, 1987. 148 с.

11. СП 360.132580.2017 Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ, 2018. 70 с. [Введ. в действ. 2018.06.12].

12. 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.

13. RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*. 2003. Vol. 36. P. 560–567.

Стаття надійшла 14.08.2023