

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УСАДКИ
СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ**

**EXPERIMENTAL STUDY FIBER STEEL CONCRETE
ELEMENTS**

**Сунак О.П., к.т.н., доцент (Луцький НТУ, м. Луцьк), Сунак П.О.,
к.т.н., доцент (Луцький НТУ, м. Луцьк)**

**Sunak O.P., Ph.D., senior lecturer (Lutsk National Technical
University, Lutsk), Sunak P.O., Ph.D., senior lecturer (Lutsk National
Technical University, Lutsk)**

Наведено результати експериментальних досліджень сталевібробетону. Проаналізовано фактори, що впливають на змінюваність цієї характеристики.

The results of experimental studies steelfibreconcrete. Factors that affect the variability of characteristics. The basis of experimental studies on symmetric composite plan. Observations of deformations of shrinkage of fine-grained concrete and concrete show that their shrinkage is different. The fibers contribute to the attenuation of the shrinkage deformations. Comparing the ultimate warp shrinkage of fine-grained concrete and concrete, we can conclude that prrove more intense reinforcement constrains deformation at low grades of concrete matrix and thus a smaller cross-sectional dimensions of the element.

Ключові слова: фактори, сталевібробетон, статистика, усадка
Keywords: Factors steelfibreconcrete, statistics, shrinkage

В основу експериментальних досліджень покладено симетричний композиційний план типу Вк (див.табл.1, табл.2 та табл.3.)

Таблиця 1

Рівні змінюваності факторів

Рівні факторів	Ф а к т о р и			
	Діаєм тр фібр, мм	Об'ємний відсоток армування фібрами, %	Клас дрібнозернистого бетону матриці	Масштабний фактор (розміри призми), мм
1	2	3	4	5
Основний рівень X_{i0}	0,5	2,0	B20	70x70x280
Інтервал зміни, ΔX_i	0,25/0,3	0,5	10	30x30x120
Верхній рівень $X_i=+1$	0,8	2,5	B30	100x100x400
Нижній рівень $X_i=-1$	0,25	1,5	B10	40x40x160

Таблиця 2

Симетричний композиційний план 2^4 типу Вк з зірковими точками

№ дослід	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_4^2	Примітка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	План 2^4
2.	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	
3.	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	
4.	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	
5.	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	
6.	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+	
7.	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	
8.	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	
9.	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	
10.	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	
11.	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+	
12.	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	
13.	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	
14.	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	

15	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
16	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
17	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0
18	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0
19	+	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0
20	+	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0
21	+	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0
22	+	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0
23	+	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+
24	+	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+
25	x	x	x	+	+	Порівнювальні випробовування з дрібнозернистого бетону матриці									
26	x	x	x	+	0										
27	x	x	x	+	-										
28	x	x	x	0	+										
29	x	x	x	0	0										
30	x	x	x	0	-										
31	x	x	x	-	+										
32	x	x	x	-	0										
33	x	x	x	-	-										

“+” – верхній рівень; “-” – нижній рівень; “0” – основний рівень змінюваності факторів (див. табл.1); “x” – факторів немає

Таблиця 3

Матриця експерименту в натуральному масштабі

№ дослідю	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄
	Діаметр фібр, мм	Об’ємний відсоток армування, %	Масштабний фактор М (розміри призми), мм	Клас бетону матриці
1	2	3	4	5
1.	0,8	2,5	100x100x400	B30
2.	0,25	2,5	100x100x400	B30
3.	0,8	1,5	100x100x400	B30
4.	0,25	1,5	100x100x400	B30
5.	0,8	2,5	40x40x160	B30
6.	0,25	2,5	40x40x160	B30
7.	0,8	1,5	40x40x160	B30
8.	0,25	1,5	40x40x160	B30
9.	0,8	2,5	100x100x400	B10
10.	0,25	2,5	100x100x400	B10
11.	0,8	1,5	100x100x400	B10
12.	0,25	1,5	100x100x400	B10
13.	0,8	2,5	40x40x160	B10
14.	0,25	2,5	40x40x160	B10
15.	0,8	1,5	40x40x160	B10

16.	0,25	1,5	40x40x160	B10
17.	0,8	2,0	70x70x280	B20
18.	0,25	2,0	70x70x280	B20
19.	0,5	2,5	70x70x280	B20
20.	0,5	1,5	70x70x280	B20
21.	0,5	2,0	100x100x400	B20
22.	0,5	2,0	40x40x160	B20
23.	0,5	2,0	70x70x280	B30
24.	0,5	2,0	70x70x280	B10

Деформації усадки вимірювали механічним способом індикаторами годинникового типу з ціною поділки 0,001 мм і тензометрами Аістова починаючи з третього дня після виготовлення зразків. Зразки знаходилися на протязі 28 діб у приміщенні з температурою 20...22⁰С при вологості 100%. Далі зразки зберігалися в лабораторії в звичайних умовах. Показники з вимірювальних приладів знімали на протязі 240 діб. Результати випробовування бетонних та сталевібробетонних призм в залежності від класу бетону матриці, діаметра фібр, об'ємного відсотку армування та масштабного фактору наведені в табл. 4.

Таблиця 4
Результати визначення "кінцевих" усадочних деформацій в бетонних та сталевібробетонних призмах

Марка серії	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	Деформації усадки $\epsilon_{sh} \cdot 10^5$			Примітка
	d, мм	μ , %	КБ	М, мм	№1	№2	серед.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПФ-1	0,8	2,5	B30	+1	64	60	62	План 2 ⁴
ПФ-2	0,25	2,5	B30	+1	58	62	60	
ПФ-3	0,8		B30	+1	65	71	68	
ПФ-4	0,25		B30	+1	67	65	66	
ПФ-5	0,8	2,5	B10	+1	53	51	52	
ПФ-6	0,25	2,5	B10	+1	51	49	50	
ПФ-7	0,8		B10	+1	54	58	56	
ПФ-8	0,25		B10	+1	51	57	54	
ПФ-9	0,8	2,5	B30	-1	84	80	82	
ПФ ₄ -2	0,25	2,5	B30	-1	78	82	80	
ПФ ₄ -3	0,8		B30	-1	88	84	86	
ПФ ₄ -4	0,25		B30	-1	83	85	84	
ПФ ₄ -5	0,8	2,5	B10	-1	72	68	70	
ПФ ₄ -6	0,25	2,5	B10	-1	66	70	68	
ПФ ₄ -7	0,8		B10	-1	81	75	78	

ПФ ₄ -8	0,25		B10	-1	77	73	75	Зіркові точки
ПФ ₇ -9	0,8	2,0	B20	0	60	58	59	
ПФ ₇ -10	0,25	2,0	B20	0	58	56	57	
ПФ ₇ -11	0,5	2,5	B20	0	57	53	55	
ПФ ₇ -12	0,5	1,5	B20	0	63	67	65	
ПФ ₇ -13	0,5	2,0	B30	0	67	69	68	
ПФ ₇ -14	0,5	2,0	B10	0	55	54	55	
ПФ-15	0,5	2,0	B20	+1	57	66	62	
ПФ ₄ -14	0,5	2,0	B20	-1	65	68	66	
ПБ-1	-	-	B30	+1	68	66	67	Призми з дрібнозернистого бетону
ПБ-2	-	-	B20	+1	68	64	66	
ПБ-3	-	-	B10	+1	55	57	56	
ПБ ₄ -1	-	-	B30	-1	89	93	91	
ПБ ₄ -2	-	-	B20	-1	90	88	89	
ПБ ₄ -3	-	-	B10	-1	85	87	86	
ПБ ₇ -1	-	-	B30	0	76	70	73	
ПБ ₇ -2	-	-	B20	0	66	70	68	
ПБ ₇ -3	-	-	B10	0	60	64	62	

Умовні позначення: "М" – масштабний фактор; +1 – розміри призм 100x100x400 мм; -1 – розміри призм 40x40x160 мм; 0 – розміри призм 70x70x280 мм.

Дані спостережень за деформаціями усадки ДЗБ та СФБ свідчать про те, що усадка ДЗБ та СФБ протікає по різному. Фібри сприяють затуханню усадочних деформацій. Так, у середньому за серіями, деформації усадки в сталевібробетонних призмах на 7-му добу склали 12% від кінцевих величин, на 14-у – 16%, на 28-у – 35% і на 60-у – 60%. В бетонних призмах відповідно: на 7-у – 13,5%, на 14-у – 22%, на 28-у – 46%, на 60-у – 69%. По закінченню досліджень різниця між деформаціями усадки сталевібробетонних та бетонних призм розміром 100x100x400мм становила 7%, розміром 70x70x280мм – 10%, розміром 40x40x160мм – 12,5%.

Як видно із табл. 4 різниця між кінцевими деформаціями усадки для серій з різними діаметрами фібр при однаковому відсотку армування незначна. Так для серій ПФ-1 і ПФ-2, ПФ₄-5 і ПФ₄-6 вона складає лише 2 одиниці, для серій ПФ-3 і ПФ-4 – 3 одиниці, для серій ПФ-15 і ПФ-16 – 1 одиницю і т.д. Отже діаметр фібр на деформації усадки СФБ впливає не суттєво. До такого ж висновку приходимо, проаналізувавши сповільнення деформацій усадки в СФБ у залежності від зміни діаметра фібр.

Відсоток армування фібрами впливає на деформації усадки СФБ суттєво (див. табл.4) і сприяє більш швидкому затуханню деформацій усадки.

Так само на деформації усадки СФБ впливає масштабний фактор. Із зменшенням розмірів призм фіброве армування більш ефективно впливає на сповільнення та зменшення кінцевих значень деформацій усадки СФБ.

Для побудови математичної моделі скористаємося методикою, викладеною в роботі (1).

Коефіцієнти моделі визначаємо за формулою

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u}}{N}, \quad u = 0,1,2,\dots,k \quad . \quad (1)$$

Вони складають $b_0 = 68,1$; $b_1 = 1,125$; $b_2 = -2,75$; $b_3 = 5,375$; $b_4 = -9,75$; $b_{12} = 0$; $b_{13} = -0,125$; $b_{14} = 0$; $b_{23} = 0,25$; $b_{24} = 0,125$; $b_{34} = 0,25$.

Дисперсію визначення цих коефіцієнтів визначаємо за формулою

$$S_{bi} = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} (y_{u_g} - \bar{y}_u)^2}{Nf_u}, \quad (2)$$

де y_{u_g} – результат g -го повторення u -го дослідження; \bar{y}_u – середнє арифметичне значення всіх n_u дублів u -го дослідження; f_u – число ступенів вільності при визначенні u -ої дисперсії $S_{y_u}^2$.

Підрахувавши ці значення і визначивши при $\alpha = 0,05$ і $f_1 = 16$ табличне значення t -критерія, виявилось, що значущими слід прийняти коефіцієнти моделі, які перевищують значення $\Delta b_i = 1,10$.

Таким чином отримана математична модель в кодовому масштабі має вигляд

$$y = 68,1 + 1,125 x_1 - 2,75 x_2 + 5,375 x_3 - 9,75 x_4 \quad . \quad (3)$$

При перевірці за критерієм Фішера модель виявилася адекватною.

В рівнянні (3) x_i в кодовому масштабі зв'язане з натуральним масштабом співвідношенням

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (4)$$

де X_i – істинне значення фактора; X_{i0} – основний рівень фактора; ΔX_i – інтервал змінюваності (див. табл.1).

Підставивши в рівняння (3) значення факторів за (4), отримаємо залежність деформацій усадки СФБ від діаметра і відсотку армування фібрами, класу бетону матриці та масштабного фактору:

$$\varepsilon_{sh} \cdot 10^5 = 66,5 + 3,75d - 5,5\mu + 0,54R - 9,75M, \quad (5)$$

де d – діаметр фібр, мм; μ – відсоток армування, %; R – кубикова міцність бетону матриці (клас ДЗБ); M – масштабний фактор, при товщині 40мм і менше дорівнює -1 , при товщині 100мм і вище дорівнює $+1$, проміжні значення приймаються за інтерполяцією. Вплив факторів на кінцеві деформації усадки СФБ показаний на рис. 1.

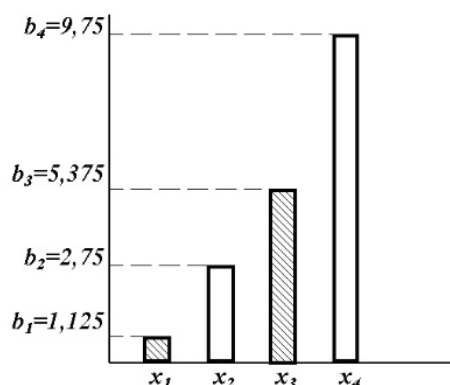


Рис. 1. Гістограма впливу факторів на кінцеві деформації усадки сталевібробетону: x_1 – діаметр фібр; x_2 – відсоток армування; x_3 – клас бетону матриці; x_4 – масштабний фактор; заштриховано – пряма пропорційна залежність; не заштриховано – обернена пропорційна залежність

З рівняння (5) та з рис.1 витікає, що кінцеві деформації усадки мало залежать від діаметра фібр. Найбільший вплив має масштабний фактор, далі іде клас бетону матриці та відсоток армування. Кінцеві деформації усадки зменшуються із збільшенням відсотку армування та із зменшенням класу бетону матриці, розмірів зразка і діаметра фібр.

Для визначення деформацій усадки СФБ в будь-який момент часу можна скористатися залежністю

$$y(t) = b_0(t) + b_1(t)x_1 + b_2(t)x_2 + b_3(t)x_3 + b_4(t)x_4, \quad (6)$$

де коефіцієнти $b_i(t)$ визначають за табл. 5.

Таблиця 5

Значення коефіцієнтів $b_i(t)$ для визначення деформацій усадки сталевібробетону в будь-який момент часу

Час, днів	Коефіцієнти				
	$b_0(t)$	$b_1(t)$	$b_2(t)$	$b_3(t)$	$b_4(t)$
1	2	3	4	5	6
30	23,6	0,56	-0,50	1,00	-2,00
90	43,5	0,80	-1,10	2,20	-4,40
180	63,6	0,95	-2,20	4,40	-8,80
>240	68,1	1,125	-2,75	5,375	-9,75

Таблиця 6

Порівняння кінцевих деформацій сталевібробетону та дрібнозернистого бетону матриці

Клас бетону матриці	Масштабний фактор, мм	Деформації усадки $\epsilon_{sh} \cdot 10^5$			
		ДЗБ	СФБ	для серій	у т.ч. середнє
1	2	3	4	5	6
В10	40x40x160	86	73	18	12,3
	70x70x280	62	55	12	
	100x100x400	56	53	7	
В20	40x40x160	89	78	14	10,0
	70x70x280	68	62	10	
	100x100x400	66	62	6	
В30	40x40x160	91	83	10	7,3
	70x70x280	73	68	7	
	100x100x400	67	64	5	

Порівнявши кінцеві деформації усадки ДЗБ та СФБ (табл. 6), можна зробити висновок, що фіброве армування більш інтенсивно стримує деформації при низьких класах бетону матриці і менших розмірах поперечного перерізу елемента.

1. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. –М., Наука, 1965. 2. Сунак О.П. Прочность, трещиностойкость и деформативность нормальных сечений изгибаемых комбинированно армированных сталевібробетонных элементов. Диссер. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Киев, КИСИ, 1986.