

УДК 691.328.1

ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДРІБНОЗЕРНИСТОГО СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕЛКОЗЕРНИСТОГО СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

DETERMINATION OF MECHANICAL DESCRIPTIONS OF FINE-GRAINED STEEL-FIBRE-CONCRETE

Андрійчук О.В., к.т.н., ст. викл. (Луцький національний технічний університет)

Андрийчук А.В., к.т.н., ст. препод. (Луцкий национальный технический университет)

Andriychuk A.V., candidate of technical sciences, senior lecturer (Lutsk National Technical University, Lutsk)

В статті представлені результати визначення нормативного та розрахункового опору дрібнозернистого сталевібробетону осьовому стиску та осьовому розтягу. Проведено співставлення та порівняння теоретично отриманих даних із результатами експериментальних досліджень.

В статье представлены результаты определения нормативного и расчетного сопротивления мелкозернистого сталефибробетона осевому сжатию и осевому растяжению. Проведено сопоставление и сравнение теоретически полученных данных с результатами экспериментальных исследований.

In the article the presented results of determination of normative and calculation resistance of fine-grained steel-fibre-concrete to the axial clench and axial wricked. Comparison and comparison of the data obtained in theory are conducted with the results of experimental researches

Ключові слова: сталевібробетон, нормативний опір, розрахунковий опір, осьовий стиск, осьовий розтяг.

Сталевібробетон, нормативное сопротивление, расчетное сопротивление, осевое сжатие, осевое растяжение.

Steel-fiber-concrete, normative resistance, calculation resistance, axial clench, axial wricked.

В останній час широкого розповсюдження набувають бетонні конструкції в які для збільшення механічних властивостей додають сталеві фібри. Основні властивості сталевих фібр: велика потенціальна міцність на розтяг та підвищений модуль пружності. Відповідно конструкції виготовлені зі сталевібробетону (СФБ) можуть мати більшу міцність, тріщиностійкість, меншу деформативність і т.д. Зі збільшенням актуальності сталевібробетону, як матеріалу для будівельних конструкцій – відповідно і збільшується кількість науковців, що працюють в даному напрямку [1 - 5].

Під час проведення досліджень по вивченню роботи елементів кільцевого перерізу зі СФБ, що описано в [6] згідно методики [7] велика увага приділялася правильному підбору складових для СФБ суміші. Паралельно із виготовленням елементів кільцевого перерізу зі СФБ були забетоновані відповідних розмірів зразки (куби: 10x10x10 см та призми: 10x10x60 см) для експериментального визначення механічних характеристик даного матеріалу, а саме – міцності на осьовий стиск та осьовий розтяг.

Разом із проведенням експериментальних досліджень для визначення механічних характеристик СФБ актуальним є і проведення теоретичного розрахунку опору СФБ осьовому стиску та осьовому розтягу – для їх взаємного співставлення та порівняння. Це і є ціллю даної роботи.

Зразки зі СФБ були виготовлені з двома різними відсотками армування по об'єму, а саме: $\mu_{fv} = 1,5$ та $\mu_{fv} = 2,5$. Для приготування СФБ за матрицю використовувався дрібнозернистий бетон класу С25/30.

Випробування кубів на центральний стиск проводилося на гідравлічному пресі ПСУ-125 Армавірського заводу з ціною поділки 2 кН згідно з "ГОСТ 28840-90. Машини для испытання материалов на растяжения, сжатие и изгиб. Технические условия". Призми випробовували проводили при одноразовому навантаження до руйнування на центральний розтяг, використовуючи методику Л.П. Макаренко та Г.А. Фенко (згідно авторського свідоцтва СРСР №387248 від 1973 року. Дослідження виконували в гідравлічній розривній машині УММ-50 з ціною поділки 1 кН.

Міцність зразків на центральний стиск та розтяг досліджувалася на 28 день після їх виготовлення. Результати дослідів подані в табл. 1.

Таблиця 1.

Експериментально отримані механічні характеристики СФБ

Відсоток армування, μ_{fv}	Досліджувані параметри	
	Кубикова міцність на центральний стиск, МПа	Призмova міцність на центральний розтяг, МПа
0	31,5	2,02
1,5	32,4	2,53
2,5	36,0	2,83

Для обчислення нормативного опору сталевібробетону на стиск (призмова міцність) рекомендується наступна залежність згідно [5, 8]:

$$R_{sfb,ser} = f_{ck,prism} + k_f^2 \cdot \varphi_f \cdot \mu_{fv} \cdot f_{ck,prism} \quad (1)$$

де $f_{ck,prism}$ – нормативний опір бетону матриці осьовому стиску (призмова міцність, приймається згідно табл. 2);

Таблиця 2.

Механічні характеристики дрібнозернистого бетону, МПа.

Механічні характеристики	Клас бетону						
	C8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/35	C32/40
Нормативний опір осьовому стиску (призмова міцність), $f_{ck,prism}$	7,5	11	15	18,5	22	25,5	29
Нормативний опір осьовому розтягу, $f_{ctk,0,05}$	0,85	1,15	1,4	1,6	1,8	1,95	2,1
Розрахунковий опір осьовому стиску (призмова міцність), f_{cd}	6	8,5	11,5	14,5	17	19,5	22
Розрахунковий опір осьовому розтягу, $f_{ctd,0,05}$	0,57	0,75	0,9	1,05	1,2	1,3	1,4

k_f – коефіцієнт, що враховує роботу фібр в перерізі, перпендикулярному до напрямку зовнішньої сили (згідно табл. 3);

μ_{fv} – коефіцієнт об'ємного армування;

f_{fk} – нормативний опір фібр розтяганню (приймається за результатами експериментальних досліджень, а при їх відсутності згідно табл. 4);

φ_f – коефіцієнт ефективності фібрового армування, який визначається за формулою:

$$\varphi_f = (5+L)/(1+4,5 \cdot L) \quad (2)$$

$$L = k_f^2 \cdot \mu_{fv} \cdot f_{fk} / f_{cd} \quad (3)$$

Таблиця 3.

Значення коефіцієнта умов роботи k_f .

a / l_f	Значення коефіцієнта k_f при b / l_f							
	0,5	1	2	3	5	10	20	> 20
0,2	0,980	0,930	0,780	0,732	0,695	0,665	0,651	0,637
0,4	0,970	0,920	0,770	0,724	0,686	0,658	0,642	0,628
0,6	–	0,910	0,760	0,718	0,681	0,653	0,638	0,624
0,8	–	0,900	0,750	0,707	0,671	0,643	0,628	0,615
1,0	–	0,870	0,730	0,687	0,652	0,624	0,610	0,597
1,5	–	–	0,690	0,649	0,615	0,589	0,577	0,564
2,0	–	–	0,670	0,630	0,597	0,573	0,559	0,548
3,0	–	–	–	0,612	0,580	0,556	0,543	0,532
5,0	–	–	–	–	0,556	0,543	0,520	0,510
10	–	–	–	–	–	0,533	0,520	0,510
20	–	–	–	–	–	–	0,516	0,505
> 20	–	–	–	–	–	–	–	0,500

l_f – довжина фібр; a і b – відповідно менший і більший розміри поперечного перерізу елемента.

Таблиця 4.

Механічні характеристики сталевих фібр, МПа.

Механічні характеристики окремих видів сталевих фібр	Вид сталевих фібр		
	Маловуглицевий дріт	Сталевий лист	Із відпрацьованих канатів
Нормативний опір розтягу, f_{fk}	600	250	800
Розрахунковий опір розтягу, R_f	500	200	550
Модуль пружності, $E_f \cdot 10^{-3}$	200	210	180

Розрахунок нормативного опору СФБ осьовому стиску при відсотку армування сталевими фібрами $\mu_{fv} = 2,5$ (0,025):

$$L = (0,643^2 \cdot 0,025 \cdot 600) / 18,5 = 0,335;$$

$$\varphi_f = (5 + 0,335) / (1 + 4,5 \cdot 0,335) = 2,127;$$

$$R_{sfb,ser} = 18,5 + 0,643^2 \cdot 2,127 \cdot 0,025 \cdot 600 = 31,69 \text{ МПа};$$

Розрахунок нормативного опору СФБ осьовому стиску при відсотку армування сталевими фібрами $\mu_{fv} = 1,5$ % (0,015):

$$L = (0,643^2 \cdot 0,015 \cdot 600) / 18,5 = 0,201;$$

$$\varphi_f = (5 + 0,201) / (1 + 4,5 \cdot 0,201) = 2,73;$$

$$R_{sfb,ser} = 18,5 + 0,643^2 \cdot 2,73 \cdot 0,015 \cdot 600 = 28,66 \text{ МПа};$$

Розрахунковий опір СФБ осьовому стиску R_{sfb} (призмova міцність) визначають за формулами:

$$R_{sfb} = f_{cd} + k_f^2 \cdot \varphi_f \cdot \mu_{fv} \cdot R_f \quad (4)$$

де f_{cd} – розрахунковий опір бетону матриці осьовому стиску (призмova міцність, приймається згідно табл. 1);

k_f – коефіцієнт, що враховує роботу фібр в перерізі, перпендикулярному до напрямку зовнішньої стискаючої сили (приймається згідно табл. 2);

μ_{fv} – коефіцієнт об'ємного армування;

R_f – розрахунковий опір фібр розтягання (приймається за результатами експериментальних досліджень, а при їх відсутності згідно табл. 3);

φ_f – коефіцієнт ефективності фібрового армування, який визначається за формулою (2);

L для формули (2) визначається за формулою:

$$L = k_f^2 \cdot \mu_{fv} \cdot R_f / f_{cd} \quad (5)$$

Отже розрахунковий опір СФБ осьовому стиску при відсотку армування $\mu_{fv} = 2,5$ (0,025) згідно формул (4), (2) та (5):

$$L = (0,643^2 \cdot 0,025 \cdot 500) / 14,5 = 0,356;$$

$$\varphi_f = (5 + 0,356) / (1 + 4,5 \cdot 0,356) = 2,058;$$

$$R_{sfb,ser} = 14,5 + 0,643^2 \cdot 2,058 \cdot 0,025 \cdot 500 = 25,13 \text{ МПа};$$

Розрахунковий опору СФБ осьовому стиску при відсотку армування сталевими фібрами $\mu_{fv} = 1,5$ % (0,015):

$$L = (0,643^2 \cdot 0,015 \cdot 500) / 14,5 = 0,214;$$

$$\varphi_f = (5 + 0,214) / (1 + 4,5 \cdot 0,214) = 2,66;$$

$$R_{sfb} = 14,5 + 0,643^2 \cdot 2,66 \cdot 0,015 \cdot 500 = 22,74 \text{ МПа};$$

Міцність СФБ на осьовий розтяг залежить від об'ємного коефіцієнта армування, виду, розмірів і характеру поверхні фібр, класу бетону матриці, а також від геометричних розмірів перерізу елемента. При цьому, розрізняють два випадки руйнування СФБ елемента: перший – висмикування усіх фібр, другий – розрив і висмикування частини фібр.

У першому випадку, при $l_{f,an} \geq l_f/2$, нормативний опір сталевібробетону на центральний розтяг визначають за формулою згідно [8] з врахуванням коефіцієнтів з [3]:

$$R_{sfb,t,ser} = m_2 \cdot f_{ck,prism} \cdot [(k_o^2 \cdot \mu_{fv} \cdot l_f) / (4 \cdot \eta \cdot d_f) + 0,08 - 3,6 \cdot \mu_{fv}] \quad (6)$$

а при $l_{f,an} < l_f/2$ (умова розриву і висмикування частини фібр) за формулою:

$$R_{sfb,t,ser} = m_1 \cdot [(k_0^2 \cdot \mu_{fv} \cdot f_{fk})(1 - l_{f,an}/l_f) + f_{cd,prism}(0,08 - 3,6 \cdot \mu_{fv})] \quad (7)$$

де: $l_{f,an} = \eta \cdot d_f \cdot f_{fk} / f_{cd,prism} \quad (8)$

k_0 – коефіцієнт, що враховує орієнтацію фібр (згідно табл. 5);

Таблиця 5.

Значення коефіцієнта орієнтації фібр k_0 .

a / l_f	Значення коефіцієнта k_0 при b / l_f							
	0,5	1	2	3	5	10	20	> 20
0,2	0,126	0,263	0,449	0,511	0,560	0,597	0,616	0,636
0,4	0,122	0,259	0,444	0,506	0,555	0,597	0,610	0,629
0,6	0,122	0,257	0,441	0,502	0,551	0,589	0,606	0,624
0,8	0,122	0,253	0,429	0,494	0,542	0,578	0,596	0,614
1,0	0,118	0,247	0,422	0,480	0,527	0,563	0,580	0,597
1,5	0,110	0,232	0,399	0,454	0,498	0,531	0,548	0,565
2,0	0,110	0,226	0,387	0,440	0,484	0,517	0,532	0,549
3,0	0,105	0,219	0,375	0,428	0,470	0,510	0,517	0,532
5,0	0,100	0,214	0,367	0,418	0,458	0,490	0,504	0,520
10	0,100	0,210	0,360	0,410	0,449	0,481	0,495	0,510
20	0,100	0,207	0,356	0,406	0,446	0,475	0,490	0,505
> 20	0,100	0,205	0,356	0,401	0,442	0,470	0,485	0,500

l_f – довжина фібр; a і b – відповідно менший і більший розміри поперечного перерізу елемента.

Нормативний опір СФБ осьовому розтягу при відсотку армування сталевими фібрами $\mu_{fv} = 2,5\%$ (0,025) згідно формул (8) та (6):

$$l_{f,an} = 1,2 \cdot 0,8 \cdot 600 / 18,5 = 31,3 \text{ мм};$$

$$l_f/2 = 50/2 = 25 \text{ мм};$$

в даному випадку $l_{f,an} \geq l_f/2$ тоді:

$$R_{sfb,t,ser} = m_2 \cdot f_{ck,prism} \cdot [(k_0^2 \cdot \mu_{fv} \cdot l_f) / (4 \cdot \eta \cdot d_f) + 0,08 - 3,6 \cdot \mu_{fv}] = 1,2 \cdot 18,5 \cdot ((0,578^2 \cdot 0,025 \cdot 50) / (4 \cdot 1,2 \cdot 0,8)) + 0,08 - 3,6 \cdot 0,025 = 2,19 \text{ МПа};$$

Нормативний опір СФБ осьовому розтягу при відсотку армування сталевими фібрами $\mu_{fv} = 1,5\%$ (0,015):

залежність $l_{f,an} \geq l_f/2$ зберігається, а отже:

$$R_{sfb,t,ser} = m_2 \cdot f_{ck,prism} \cdot [(k_0^2 \cdot \mu_{fv} \cdot l_f) / (4 \cdot \eta \cdot d_f) + 0,08 - 3,6 \cdot \mu_{fv}] = 1,2 \cdot 18,5 \cdot ((0,578^2 \cdot 0,015 \cdot 50) / (4 \cdot 1,2 \cdot 0,8)) + 0,08 - 3,6 \cdot 0,015 = 2,02 \text{ МПа};$$

Перед визначення розрахункового опору СФБ осьовому розтягу $R_{sfb,t}$ (аналогічно, як і при визначенні нормативного опору) досліджується співвідношення між $l_{f,an}$ та $l_f/2$.

При $l_{f,an} \geq l_f/2$ (умова висмикування всіх фібр) розрахунковий опір СФБ визначають за формулою:

$$f_{cfd} = m_2 \cdot f_{cd} \cdot [(k_o^2 \cdot \mu_{fv} \cdot l_f) / (4 \cdot \eta \cdot d_f) + 0,08 - 3,6 \cdot \mu_{fv}] \quad (9)$$

а при $l_{f,an} < l_f/2$ (умова розриву та висмикування частини фібр) за формулою:

$$f_{cfd} = m_1 \cdot [(k_o^2 \cdot \mu_{fv} \cdot R_f)(1 - l_{f,an}/l_f) + f_{cd} \cdot (0,08 - 3,6 \cdot \mu_{fv})] \quad (10)$$

$$l_{f,an} = \eta \cdot d_f \cdot R_f / f_{cfd} \quad (11)$$

Визначення розрахункового опору СФБ осьовому розтягу при відсотку армування сталйними фібрами $\mu_{fv} = 2,5\%$ (0,025):

$$l_{f,an} = 1,2 \cdot 0,8 \cdot 500 / 14,5 = 33,1 \text{ мм};$$

$$l_f/2 = 50/2 = 25 \text{ мм};$$

в даному випадку $l_{f,an} \geq l_f/2$ тоді:

$$f_{cfd} = m_2 \cdot f_{cd} \cdot [(k_o^2 \cdot \mu_{fv} \cdot l_f) / (4 \cdot \eta \cdot d_f) + 0,08 - 3,6 \cdot \mu_{fv}] = 1,2 \cdot 14,5 \cdot ((0,578^2 \cdot 0,025 \cdot 50) / (4 \cdot 1,2 \cdot 0,8)) + 0,08 - 3,6 \cdot 0,025 = 1,73 \text{ МПа};$$

Визначення розрахункового опору СФБ осьовому розтягу при відсотку армування сталйними фібрами $\mu_{fv} = 1,5\%$ (0,015):

в даному випадку $l_{f,an} \geq l_f/2$ тоді:

$$f_{cfd} = m_2 \cdot f_{cd} \cdot [(k_o^2 \cdot \mu_{fv} \cdot l_f) / (4 \cdot \eta \cdot d_f) + 0,08 - 3,6 \cdot \mu_{fv}] = 1,2 \cdot 14,5 \cdot ((0,578^2 \cdot 0,015 \cdot 50) / (4 \cdot 1,2 \cdot 0,8)) + 0,08 - 3,6 \cdot 0,015 = 1,59 \text{ МПа};$$

Дані для табл. 2 ... табл. 5 були відтворені з додатку [9].

Отримані результати під час теоретичного розрахунку, що проведений вище подано в табл. 6.

Таблиця 6.

Теоретично розраховані механічні характеристики СФБ.

Механічні характеристики	Відсоток армування, μ_{fv}	
	1,5	2,5
Нормативний опір СФБ осьовому стиску, $R_{sfb,ser}$, МПа	28,66	31,69
Розрахунковий опір СФБ осьовому стиску, R_{sfb} , МПа	22,74	25,13
Нормативний опір СФБ при осьовому розтяганні, $R_{sfb,t,ser}$, МПа	2,02	2,19
Розрахунковий опір СФБ при осьовому розтяганні, f_{cfd} , МПа	1,59	1,73

Результати експериментального дослідження механічних характеристик СФБ приведено в табл. 1.

Експериментально отримана міцність сталевібробетону на осьовий стиск при $\mu_{fv} = 1,5$ (32,4 кН) є на 13 % більша за нормативний опір

сталефібробетону осьовому стиску ($R_{sfb,ser}$) теоретично розрахований за формулою (1) (табл. 6), а одержана міцність СФБ при $\mu_{fv} = 2,5$ виявилася на 14 % більша за теоретично розрахований нормативний опір СФБ осьовому стиску ($R_{sfb,ser}$).

Експериментально отримана міцності СФБ на осьовий розтяг також перевищує теоретично розрахований нормативний опір СФБ осьовому розтягу ($R_{sfb,t,ser}$). Так при $\mu_{fv} = 1,5$ $R_{sfb,t,ser} = 2,02$ МПа, а експериментально отримане середнє значення міцності СФБ на центральний розтяг становить 2,53 МПа. Відхилення в значеннях – 25%. А при $\mu_{fv} = 2,5$ $R_{sfb,t,ser} = 2,19$ МПа, а експериментально отримане значення становить 2,83 МПа. Відхилення в значеннях – 29 %.

Якщо розбіжність при визначенні міцності на стиск СФБ теоретичним шляхом становить 13...14 % від експериментально отриманої, то можна говорити про задовільну збіжність.

До причини, за якою, експериментальна міцність СФБ на осьовий розтяг виявилася більшою майже на 25 ... 29 % ніж теоретично розрахований нормативний опір СФБ на осьовий розтяг ($R_{sfb,t,ser}$) можна віднести: отриману вищу механічну міцність матриці-бетону ніж закладено в розрахунок; недосконалий алгоритм теоретичного розрахунку, що базується на використанні великої кількості допоміжних коефіцієнтів. А також не повністю врахований під час проведення теоретичних розрахунків вплив сталевих анкерних фібр на збільшення міцності СФБ (точніше їх геометрію – анкерні, відповідно мають підвищену механічна міцність).

1. Андрійчук О.В., Бабич Є.М. Сталефібробетонні безнапірні труби // Монографія. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2012. – 150 с. 2. Бабич Є.М., Андрійчук О.В. Проектування та виготовлення безнапірних труб із сталевібробетону: рекомендації. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2012. – 32 с. 3. Дворкін Л.Й. Розрахунок складу бетону зі сталевою фіброю / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, В.В. Жатковський // Бетон и железобетон в Украине: Научно-технический и производственный журнал – Полтава: ПЦНТІЕ 2012, – Випуск 2 (54). – С. 2 – 4. 4. Дорошенко О. Дисперсно – армований бетон – надійний та ефективний матеріал для транспортного будівництва / О. Дорошенко, Ю. Дорошенко, Н. Чиженко, К. Гудименко // Транспортное строительство Украины. – 2007. – №1 (5). – С. 16 – 19. 5. Сунак О.П. Сталефібробетонні конструкції / О.П. Сунак // Навч. посібн. – Луцьк: Media, 1999. – 158 с. 6. Бабич Є.М., Андрійчук О.В. Дослідження роботи сталевібробетонних елементів кільцевого перетину при одноразовому і повторному навантаженні // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць – Рівне: НУВГП, 2009. – Випуск 19. – С. 82 – 90. 7. Андрійчук О.В. Методика експериментальних досліджень роботи елементів кільцевого перерізу зі сталевібробетону при повторних навантаженнях // Наукові нотатки: Збірник наукових праць – Луцьк: ЛНТУ, 2010. – Випуск 28. – С. 24 – 27. 8. Сакварелидзе А.В. Прочностные и деформационные свойства сталевібробетона // Бетон и железобетон. – 1985. – №11. – С. 12 – 13. 9. Бабич Є.М., Дробішинець С.Я. Розрахунок сталевібробетонних і сталевібро-залізобетонних елементів: Рекомендації. Рівне: НУВГП, 2006. – 40 с.