

УДК 624.012.25

к.т.н. Андрійчук О.В., к.т.н., доцент Бондарський О.Г.,
Луцький національний технічний університет

ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДРІБНОЗЕРНИСТОГО СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ ТА ПОРІВНЯННЯ ЇХ ІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ОТРИМАНИМИ ДАНИМИ

Наведені результати теоретичних досліджень нормативного та розрахункового опору дрібнозернистого сталевібробетону осьовому стиску та осьовому розтягу. Проведено співставлення та порівняння теоретично отриманих даних із результатами експериментальних досліджень.

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

В останній час широкого розповсюдження набувають бетонні конструкції в які для збільшення міцності, тріщиностійкості та інших механічних властивостей додають сталеві фібри [1, 2, 3]. Відповідно і збільшується кількість науковців, що працюють в даному напрямку.

Під час проведення досліджень по вивченню роботи елементів кільцевого перерізу зі сталевібробетону (СФБ) [4, 5] згідно методики [6] велика увага приділялася правильному підбору складових для СФБ суміші. Паралельно із виготовленням елементів кільцевого перерізу зі СФБ були забетоновані необхідних розмірів зразки (куби та призми) для експериментального визначення механічних характеристик даного матеріалу.

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.

Для обчислення нормативного опору сталевібробетону на стиск (призмova міцність) рекомендується наступна залежність згідно [1, 7, 8]:

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

де $R_{b,ser}$ – нормативний опір бетону матриці осьовому стиску (призмova міцність, приймається згідно табл. 1);

k_f – коефіцієнт, що враховує роботу фібр в перерізі, перпендикулярному до напрямку зовнішньої сили.

μ_{fv} – коефіцієнт об'ємного армування;

$R_{f,ser}$ – нормативний 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:

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

Таблиця 1.

Механічні характеристики дрібнозернистого бетону, МПа.

Механічні характеристики	Клас бетону							
	B10	B12,5	B15	B20	B25	B30	B35	B40
Нормативний опір осьовому стиску (призмova міцність), $R_{b,ser}$	7,5	9,5	11	15	18,5	22	25,5	29
Нормативний опір осьовому розтягу, $R_{b,t,ser}$	0,85	1	1,15	1,4	1,6	1,8	1,95	2,1
Розрахунковий опір осьовому стиску (призмova міцність), R_b	6	7,5	8,5	11,5	14,5	17	19,5	22
Розрахунковий опір осьовому розтягу, $R_{b,t}$	0,57	0,66	0,75	0,9	1,05	1,2	1,3	1,4

Таблиця 2.

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 3.

Механічні характеристики сталевих фібр, МПа.

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

$$L = k_f^2 \cdot \mu_{fv} \cdot R_{f,ser} / R_{b,ser} \quad (3)$$

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:

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

де R_b – 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:

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

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 [7, 8] з врахуванням коефіцієнтів з [3]: $R_{sfb,t,ser} = m_2 \cdot R_{b,ser} \cdot [(k_0^2 \cdot \mu_{fv} \cdot l_f) / (4 \cdot \eta \cdot d_f) + 0,08 - 3,6 \cdot \mu_{fv}]$ (6) а при $l_{f,an} < l_f/2$ (умова розриву і висмикування частини фібр) за формулою:

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

де:

$$l_{f,an} = \eta \cdot d_f \cdot R_{f,ser} / R_{b,ser} \quad (8)$$

k_0 – коефіцієнт, що враховує орієнтацію фібр (згідно табл. 4);

Таблиця 4.

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):

$$l_{f,an} = 1,2 \cdot 0,8 \cdot 600 / 18,5 = 31,3 \text{ мм}; \quad l_f/2 = 50/2 = 25 \text{ мм}; \quad \text{в даному випадку}$$

$l_{f,an} \geq l_f/2$ тоді:

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

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

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

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

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: $R_{sfb,t} = m_2 \cdot R_b \cdot [(k_o^2 \cdot \mu_{fv} \cdot l_f) / (4 \cdot \eta \cdot d_f) + 0,08 - 3,6 \cdot \mu_{fv}]$ (9)

а при $l_{f,an} < l_f/2$ (умова розриву та висмикування частини фібр) за формулою: $R_{sfb,t} = m_1 \cdot [(k_o^2 \cdot \mu_{fv} \cdot R_f)(1 - l_{f,an}/l_f) + R_b \cdot (0,08 - 3,6 \cdot \mu_{fv})]$ (10)

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

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

$$l_{f,an} = 1,2 \cdot 0,8 \cdot 500 / 14,5 = 33,1 \text{ мм}; \quad l_f/2 = 50/2 = 25 \text{ мм};$$

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

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

Визначення розрахункового опору СФБ осьовому розтягу при відсотку армування стальними фібрами $\mu_{fv} = 1,5 \% (0,015)$: в даному випадку $l_{f,an} \geq l_f/2$ тоді:

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

Дані для табл. 1 – табл. 4 були відтворені з додатку [8]. Отримані результати під час теоретичного розрахунку, що проведений вище подано в табл. 5.

Таблиця 5.

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, $R_{sfb,t}$, МПа	1,59	1,73

Для співставлення та порівняння із теоретично розрахованими механічними характеристиками СФБ, що наведені в табл. 5, результати експериментального дослідження механічних характеристик СФБ подано в табл. 6.

Таблиця 6.

Експериментально отримані механічні характеристики СФБ.

Відсоток армування, μ_{fv}	Досліджувані параметри	
	Міцність на центральний стиск, МПа	Міцність на центральний розтяг, МПа
1,5	28,83	2,53
2,5	32,4	2,84

Нормативний опір сталевібробетону осьовому стиску ($R_{sfb,ser}$) теоретично розрахований за формулою (1) (табл. 5), як при $\mu_{fv} = 1,5 \%$ так і при $\mu_{fv} = 2,5 \%$, має добру збіжність із експериментально отриманими даними для міцності СФБ на стиск (табл. 6). Відхилення в цих значеннях становить 0,6 % (при $\mu_{fv} = 1,5 \%$) і 2,2 % (при $\mu_{fv} = 2,5 \%$). Експериментально отримана міцності СФБ на осьовий розтяг перевищує теоретично розрахований нормативний опір СФБ осьовому розтягу ($R_{sfb,t,ser}$). Так при $\mu_{fv} = 1,5 \%$ $R_{sfb,t,ser} = 2,19$ МПа, а експериментально отримане середнє значення міцності СФБ на центральний розтяг становить 2,84 МПа. Відхилення в значеннях – 29%. А при $\mu_{fv} = 1,5 \%$ $R_{sfb,t,ser} = 2,02$ МПа, а експериментально отримане значення становить 2,53 МПа. Відхилення в значеннях – 25 %.

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 геометрію сталевих фібр – анкерні, а відповідно і покращені їх механічні характеристики, що не в повній мірі враховується під час проведення теоретичних розрахунків.

Бібліографічний список

1. Рабинович Ф.Н. Дисперсно-армированный бетон. – М.: Стройиздат, 1989. – 176 с.
2. Сунак О.П. Сталевібробетонні конструкції. – К.: ІЗІМН, 1999. – 158 с.
3. Бабич Є.М., Дробишинець С.Я. Розрахунок сталевібробетонних і сталевіброзалізобетонних елементів: Рекомендації. Рівне: НУВГП, 2006. – 40 с.
4. 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.

5. Бабич Є.М., Андрійчук О.В. Про доцільність використання сталевібробетону для виготовлення безнапірних труб // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць – Рівне: НУВГП, 2009. – Випуск 18. – С. 119 – 126.

6. 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.

7. Сунак О.П. Прочность, трещиностойкость и деформативность нормальных сечений изгибаемых комбинированно армированных сталефибробетонных элементов: Дис ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Киев, 1986. – 175с.

8. Сакварелидзе А.В. Прочностные и деформационные свойства сталефибробетона // Бетон и железобетон. – 1985. – №11. – С. 12 – 13.

Аннотация

Приведены результаты теоретических исследований нормативного та расчетного сопротивления мелкозернистого сталефибробетона осевому сжатию та осевому растяжению. Проведено сопоставление та сравнение теоретически полученных данных с результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: сталефибробетон, нормативное сопротивление, расчетное сопротивление, осевое сжатие, осевое растяжение.

Abstract

The brought results over of theoretical researches of normative and calculation resistance of fine-grained steel-fiber-concrete to the axial clench and axial wricked. Comparison of in theory finding are conducted with the results of experimental researches.

Keywords: steel-fiber-concrete, normative resistance, calculation resistance, axial clench, axial wricked.