

УДК 624.0.12.4

Скорук О.М.,

Київський національний університет будівництва і архітектури

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ТЕОРІЙ РОЗРАХУНКУ СТАЛЕФІБРОБЕТОНА

Розглянуті різноманітні методики вітчизняних і закордонних авторів, які описують роботу сталевібробетону на різних етапах завантаження конструкції. Представленні основні концептуальні напрямки кожної з теорій.

Ключові слова – композитний матеріал, сталевібробетон, фібра.

В умовах бурхливого росту будівельної індустрії, з'являється необхідність широкого впровадження нових, ефективних будівельних матеріалів і конструкцій.

До найбільш ефективних сучасних будівельних матеріалів можна віднести сталевібробетон.

Сталевібробетон – це різновид дисперсно-армованого бетону, що виготовляється з дрібнозернистого бетону з армуванням його сталевими фібрами, що рівномірно розподілені по об'єму. При виготовленні конструкцій може використовуватись комбіноване армування фібрами та стержневою або проволочною арматурою, у тому числі попередньо-напруженою.

Ефективність застосування сталевібробетону досягається в результаті зниження трудозатрат, насамперед за рахунок часткового або повного виключення арматурних робіт і зниження матеріалоемності конструкцій, а також зниження їхньої вартості при одночасному підвищенні експлуатаційних якостей і довговічності конструкцій.

Області застосування сталевібробетонних конструкцій визначаються такими характеристиками сталевібробетона, як висока міцність на розтяг, тріщиностійкість й ударна в'язкість, високий опір стиранню й впливу високих температур, висока морозостійкість і водонепроникність й тощо.

У теперішній час відомо чотири способи виготовлення фібр:

- з проволочи з різкою і профілюванням на спеціальних станках;
- зі сталевий смуги заданої ширини з поперечною різкою спеціальними фрезами;
- зі сталевий зливку шляхом фрезування;
- витяжкою волокон з розплаву.

Фібра може мати різні види поперечного перерізу – круглий, овальний, прямокутний та інші, з розмірами від 0,2 мм до 1,6 мм і довжину від 5 мм до 160 мм. Міцність на розтяг – 400-1100 МПа.

Для конструкцій рекомендується дрібнозернистий бетон середньої щільності не менше 2200 кг/м^3 з крупністю зерен по 5 мм і водопоглиненням до 8 %.

Для виробництва сталевібробетонних конструкцій у якості звичайної фібри поряд зі спеціальними, можуть використатися відпрацьовані канати й троси, відходи металообробних верстатів й інші волокна.

Застосування фібрової арматури у конструкціях дозволяє частково заощаджувати стержневу арматуру. Але при цьому в великопрольотних конструкціях, елементах, що зазнають ударних або динамічних навантажень, а також у відповідальних спорудах повна заміна стержневої арматури фібровою неприпустима, тому що остання в незначній ступені забезпечує пружнопластичну роботу конструкції.

Існуючі методики, які описують роботу сталевібробетону на різних етапах завантаження, ґрунтуються, як правило, на розроблених раніше теоріях міцності бетону і композитних матеріалів.

В нових теоріях розрахунку враховуються особливості, викликані наявністю сталевих волокон, які суттєво покращують структуру бетонної матриці, даючи можливість у більшості випадків суттєво покращити основні показники роботи сталевібробетону.

Серед відомих теорій можливо виділити наступні напрямки:

- структурний;
- статистичний;
- феноменологічний;
- метод використання діаграм матеріалу.

Структурна теорія міцності або теорія механіки руйнування ґрунтується на тому, що міцність бетону в значній ступені залежить від наявності внутрішніх дефектів (пор, мікротріщин, тощо), які в свою чергу, в результаті прикладання навантаження в переважній більшості є причиною росту тріщин і руйнування зразка.

З допомогою теорії механіки руйнування кількісно описуються механізми, які ведуть до нестабільного росту тріщин.

Критерій руйнування, сформульований Гріффітсом, вказує на те, що нестабільне зростання тріщин відбувається тоді, коли в середовищі з тріщиною $2a$, швидкість звільнення накопиченої пружної енергії U , більша чим швидкість поглинання поверхневої енергії V , необхідної для утворення нових тріщин. Даний взаємозв'язок можливо виразити через рівняння:

$$\pi\sigma^2 a / E_b = 2\gamma_0 , \quad (1)$$

де σ - напруження викликані зовнішнім навантаженням;

E_b - модуль пружності бетону;

a - половина довжини тріщини;

γ_0 - густина поверхневої енергії матеріалу.

При цьому напруження, які викликають появу тріщин, визначаються по формулі:

$$\sigma_{cr} = K_{cr} / \sqrt{a}, \quad (2)$$

Застосування коефіцієнта K дозволяє використовувати для різних напружених станів принцип суперпозиції шляхом простого доповнення значень:

$$K = \pm K_1 \pm K_2 \pm K_3 \pm \dots, \quad (3)$$

Для сталевібробетону Ромуальді і Ботсон запропонували враховувати вплив фібри через підвищення критичного коефіцієнта напруженості. Вони виходили з того, що напруження розтягу, яке виникає в основі тріщини зменшується завдяки наявності фібр. В цьому випадку приймається наступна розрахункова модель: тріщина, оточена з чотирьох боків сталевими фібрами, дивись рис. 1.

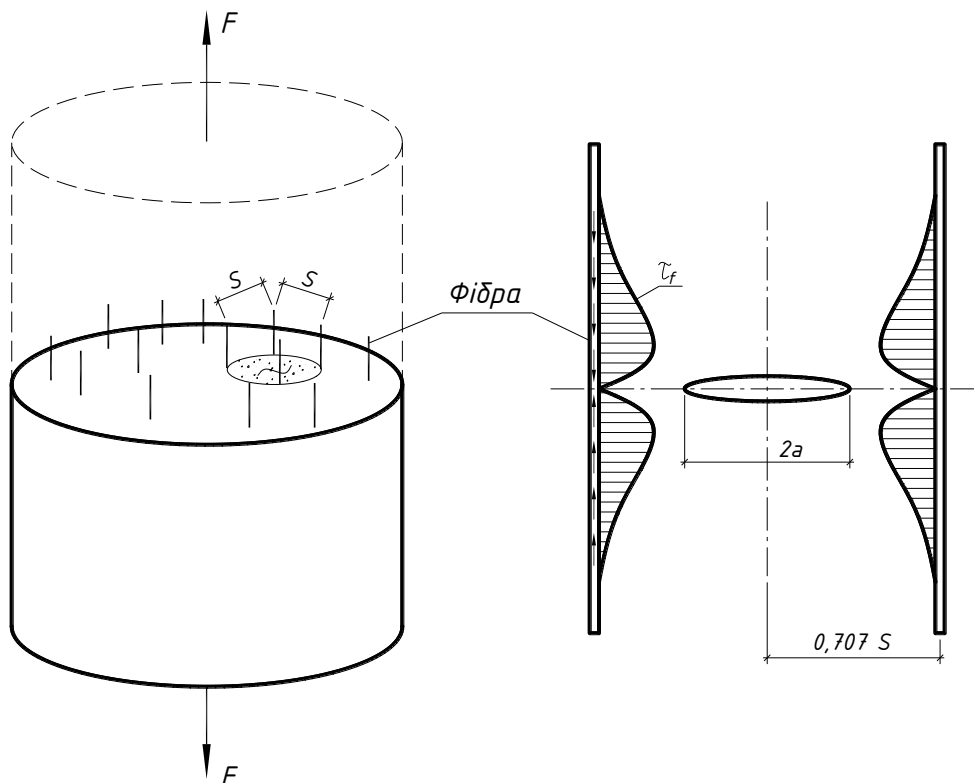


Рис. 1. Розрахункова модель роботи сталевібробетону на розтяг по Ромуальді – Ботсону.

Коефіцієнт K визначається по формулі:

$$K = K_{\sigma} - K_f, \quad (4)$$

де K_{σ} - коефіцієнт, що враховує вплив зовнішнього навантаження;

K_f - коефіцієнт, що враховує вплив фібр.

Важливим для теорії, запропонованої Ромуальді, є те що дефекти (пори, мікро тріщини і т.д.) збільшуються з збільшенням відстані між фібрами. Сама фібра розглядається, як захист від тріщин. Напруження, яке викликає появу тріщин в бетоні зі сталевими волокнами збільшується:

$$\sigma_{cr} = (K_{sc} + K_{fc}) / \sqrt{S/2}, \quad (5)$$

Дещо пізніше у своїх працях Ромуальді розвив теорію, що відносилася лише до фібри, яка розташована по напрямку напруження, застосувавши її до короткої фібри, хаотично розташованої по об'єму бетону (трьохмірна орієнтація). Кар і Поль розвили методику розрахунку шляхом врахування хаотичного розташування фібри в реальному поперечному перерізі (край, кут, середина).

Кайзер уточнив розроблену теорію шляхом врахування реального поверхневого зчеплення сталевих фібр з бетоном, на відміну від прийнятого раніше в розрахунковій моделі ідеального зчеплення фібр з бетонною матрицею.

У роботах різних авторів розглядалася **статистична теорія** міцності сталевібробетону. При цьому, реальний композитний матеріал сталевібробетон моделюється суцільною однорідною масою, властивості якої змінюються від точки до точки випадковим чином, а структура матеріалу різними науковцями задавалася двояко: або у вигляді регулярно розташованих включень або у вигляді статично-рівномірного розподілення по об'єму. Перший підхід застосовують у випадку однонаправленого армування. Другу модель – для сталевих фібр з об'ємною орієнтацією в об'ємі матеріалу. Фібри моделюють витягнутими еліпсоїдами обертання, що є загальноприйнятим в механіці композитних матеріалів. Для використання статичної теорії розрахунку сталевібробетону приймають ряд вимог:

- бетон і арматура приймаються лінійно-пружними, ізотропними, однорідними матеріалами;
- по лінії розділу компонентів існує повне зчеплення;
- при навантаженні поперек волокон в матриці і фібрах виникають однакові напруження.

За допомогою індикаторної випадковості, ізотропної функції координат, приймаючої значення одиниці на фібрах і нуля у іншій області, задають

геометричну структуру матеріалу. З її допомогою зв'язок напруження та деформацій представляється у вигляді:

$$\sigma_{ij} = 2\mu_2 e_{ij} + \lambda_2 \delta_{ij} e_{11} + \chi(2\mu e_{ij} + \lambda \delta_{ij} e_{11}), \quad (6)$$

де $\mu_2; \lambda_2$ - пружні постійні Ламе включень (фібр) і матриці.

Також, **феноменологічна (механічна) теорія** міцності розглядає руйнування як миттєвий процес, який співпадає з порушенням суцільності матеріалу. При цьому момент руйнування зазвичай зв'язують з досягненням деякої величини граничного значення. Для описання властивостей сталевібробетону використовується концепція композиту, в якому матеріал представлений у вигляді двухфазної системи:

$$\sigma_{bc} = \sigma_b(1 - V_f) + \sigma_f V_f, \quad (7)$$

де σ_b - напруження від зовнішнього навантаження в бетонній матриці;

σ_f - напруження від зовнішнього навантаження у сталевих волокнах;

V_f - об'ємний вміст сталевих волокон в бетонній матриці.

Вплив сталевих фібр на зміну напруження, що виникає у композитному матеріалі під дією навантаження, враховується за допомогою введення формули (7) до комплексу поправочних коефіцієнтів, що мають як правило емпіричну природу.

Описані раніше методики розрахунку міцності, розглядають роботу сталевібробетону під навантаженням і мають певні переваги і ряд недоліків. Теорія механіки руйнування дозволяє досить точно описати роботу матеріалу при малих рівнях навантаження (стадія пружної роботи матеріалу), а також в період мікротріщиноутворення. Однак, прийняті в розрахунковій моделі прямі залежності між розміром тріщини і відстанню між фібрами недооцінює границю міцності сталевібробетону при великих відстанях між фібрами. Крім того, теорія не може описати роботу сталевібробетону на низ спадаючій вітці, наявність якої є однією з особливостей роботи сталевібробетону. В статичній теорії міцності не розглядається реальна структура матеріалу і зв'язані з цим особливості напруженого стану – концентрації напруження навколо пор і зерен заповнювача, можливість появи початкових тріщин між заповнювачем і цементним каменем, що приводить до суттєвої різниці між розрахунковими і експериментальними даними.

Недоліком концентрації являється те, що коефіцієнти які враховують максимальне напруження зчеплення сталевих фібр з бетоном, визначаються як правило, з експериментальних даних, шляхом висмикування фібр з бетону і тому мають неточні значення. В дослідженнях німецьких вчених встановлено,

що фібра, яка пересікає мікро тріщину шириною розкриття 5-10 мкм, має інші напруження зчеплення, чим ті які визначаються при випробування на висмикування. Для роботи фібр в якості зменшення тріщиноутворення рішуче значення має не максимальне напруження зчеплення, що досягається при випробуваннях на висмикування, а скоріше деформації на контакті фібри з бетоном при відносно малих зміщеннях.

Метод використання діаграм матеріалу базується на використанні діаграм матеріалу, отриманих по результатам випробування на осьовий розтяг, стиск чи згин.

За кордоном існують норми і рекомендації по розрахунку властивостей сталевібробетону з використанням діаграм деформування зразків в осях “навантаження-прогин”, отриманих при випробуваннях балочок на згин. Графік “навантаження-прогин” отримують по результатам випробування сталевібробетонних балочок на згин. Для описання роботи сталевібробетону на графіці “навантаження-прогин” встановлюють три параметричних точки, дивись рис. 2. Точка 1 характеризує завершення процесу мікро-тріщиноутворення сталевібробетону, точка 2 характеризує рівень допустимих напружень матеріалу в стадії експлуатації, а точка 3 характеризує опір сталевібробетону в стадії, близькій до руйнування.

Положення точки 1 на графіці “навантаження-прогин” визначають наступним чином – через точку на осі абсцис, що відповідає прогину 0,1 мм, паралельно верх східній вітці проводиться пряма до перетину з кривою “навантаження-прогин”. Ордината точки 1 (F_u) відповідає максимальному значенню навантаження на ділянці графіка, що лежить між верх східною віткою і прямою. На осі абсцис відкладають прогин, рівний $\delta_1 + a$ (δ_1 абсциса точки 1; $a = l/2000$) і з'єднують знайдену точку 1 на графіці “навантаження-прогин”. Отримана площа під графіком D_{bz}^b є ідеальною роботою деформації бетону.

Положення точки 2 на графіці “навантаження-прогин” визначають, керуючись тим, що деформації розтягнутої грані згинального елемента в стадії експлуатації будуть складати $\approx 125 \times 10^{-5}$. Значення навантаження, яке прикладається до зразка в точці 2 (F_2) визначають як приведену величину по площі D_{bz2}^b використовуючи наступну формулу:

$$a q u F_2 = D_{bz2}^f / \delta_2, \quad (8)$$

де D_{bz2}^b - робота деформації сталевих фібр в тріщин на стадії експлуатації;
 δ_2 - 0,5 мм прогин.

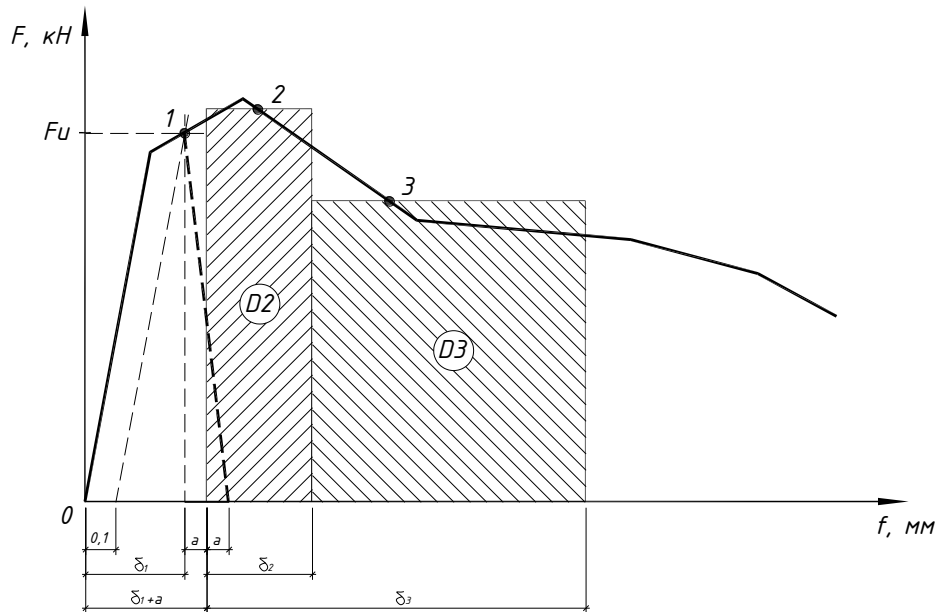


Рис. 2. Визначення параметричних точок на графіку “навантаження-прогин”.

Координати точки 3 на графіці “навантаження-прогин” визначають керуючись тим, що деформації розтягнутої зони згинального елемента в стадії, близькій до руйнування будуть складати $\approx 500 \times 10^{-5}$. Значення навантаження, яке прикладається до зразка в точці 3 (F_3) визначають як приведену величину по площі D_{bz3}^b використовуючи наступну формулу:

$$aquF_3 = D_{bz3}^f / \delta_3, \quad (9)$$

де D_{bz3}^b - робота деформації сталевих фібр в тріщин на стадії близькій до руйнування;

δ_2 - 3,0 мм прогин.

Опір сталевібробетону розтягу в стадії утворення тріщин (точка 1) визначають за формулою:

$$\sigma_{bz1} = (0,8 - \alpha)F_u l / bh^2, \quad (10)$$

де $\alpha = 0,25$ - для згинальних зразків.

Опір сталевібробетону розтягу в точці 2 і 3 визначають виходячи з реальної епюри розподілення напружень по перерізу зразка, дивись рис. 3. Якби матеріал працював пружньо, то момент який сприймає переріз визначався би по формулі:

$$M_1 = \sigma \times W = aqu\beta_{bz2,3}bh^2 / 6, \quad (11)$$

Але після утворення тріщини епюра розподілення напруження по перерізу згинального сталевібробетонного елемента змінюється і момент, який сприймає переріз і цьому випадку визначається:

$$M_2 = Z \times z = \beta_{bz2,3} \times 0,9bh \times 0,5h, \quad (12)$$

Методика дозволяє детально розглянути роботу сталевібробетону при згині і оцінити вплив виду, кількості фібри, міцності бетонної матриці і інших параметрів на форму і розміри графіка “навантаження-прогин”.

Висновки

- Розглянуті методики, які описують роботу сталевібробетону на різних етапах завантаження, основані на розроблених теоріях міцності бетону і композитних матеріалів.
- Виділені та описані особливості, для кожного з методу спричинені наявністю сталевих волокон, які покращують структуру бетонної матриці, даючи можливість у більшості випадків суттєво покращити основні показники роботи сталевібробетону.

Список літератури

1. ДСТУ-Н Б В.2.6-78:2009. Настанова з проектування та виготовлення сталевібробетонних конструкцій. – К.: Мінбуд України – 2009. – 63 с.
2. ДСТУ В.2.6-98-2011. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. / Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. – Київ, 2011.
3. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. / Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. – Київ, 2011.

Анотація

В статье рассматриваются разнообразные методы разных авторов, что описывают работу сталефибробетона на разных этапах нагрузки конструкций. Представлены основные концептуальные направления каждой из теорий

Ключевые слова: композитный материал, сталефибробетон, фибра.

Abstract

The article discusses various methods of different authors that describe the work at different stages fiber-reinforced concrete load designs. The basic conceptual directions of each of the theories.

Key words: fiber, composite material, fiber-reinforced concrete.