

Ф.Є. Клименко, Т.В. Бобало, Б.М. Ільницький*
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра будівельних конструкцій і мостів,
*кафедра гідравліки та сантехніки

НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗІВ СТАЛЕБЕТОННИХ БАЛОК

© Клименко Ф.Є., Бобало Т.В., Ільницький Б.М., 2007

Подано характеристику методик розрахунку міцності на дію поперечних сил сталобетонних балок. Застосовано існуючі методики розрахунку для визначення несучої здатності похилих перерізів сталобетонних балок з зовнішнім стрічковим армуванням без зчеплення з бетоном по довжині контакту та подано рекомендації з проектування таких балок.

Description of methods of calculation of durability is given on the action of transversal forces of beams of steel concretes. The primary objective of work is application of existent methods of calculation for determination of carry capabilities of sloping cuts of beams of steel concretes with external band re-enforcement without tripping with a concrete on length of contact and to give recommendations from planning of such beams.

Постановка проблеми. Під час досліджень залізобетонних елементів на дію поперечних зусиль було висунуто велику кількість пропозицій щодо розрахунку, які відрізняються не лише окремими положеннями і кількісними співвідношеннями, а також і принциповим підходом. Як наслідок, в нормативних документах різних країн використовуються дуже відмінні методики розрахунку, які дають результати, що значно відрізняються від дослідних. Такий стан можна пояснити складним характером явища, що виникає у залізобетонному елементі за дії поперечної сили.

Розрахунок міцності залізобетонних конструкцій на дію поперечної сили ведеться з умови рівноваги зовнішніх і внутрішніх сил та згинальних моментів у перерізі з критичною похилою тріщиною, за якою відбувається руйнування.

Зусилля в похилому перерізі можна розділити на:

- поперечні і поздовжні сили в бетоні стиснутої зони над похилою тріщиною;
- зусилля в поздовжній і поперечній арматурі, що перетинається похилою тріщиною;
- зусилля зачеплення вздовж берегів похилої тріщини, що виникає внаслідок зміщення частин балки (ці зусилля сьогодні до кінця ще не вивчені).

Аналіз проведених досліджень. Аналіз показує, що характерною особливістю деформованого стану елементів під час зминання бетону над похилою тріщиною наявними є зони концентрації деформацій бетону і арматури, де вони значно перевищують деформації інших частин елемента. Такий розподіл деформацій дає змогу розглядати залізобетонний елемент, що сприймає поперечну силу як дисково-зв'язкову систему з жорстких бетонних дисків (розділених похилою тріщиною), з'єднаних між собою податливими зв'язками. У цій моделі за критерій втрати несучої здатності по стиснутій зоні приймається вилучення з роботи зв'язку внаслідок роздроблення бетону стиснутої зони над похилою тріщиною.

Руйнування залізобетонних елементів по розтягнутій зоні відбувається внаслідок плинності поздовжньої розтягнутої арматури в місці її перетину похилою тріщиною, або за втрати зчеплення арматури з бетоном на приопорній ділянці елемента за похилою тріщиною.

Руйнування внаслідок сколювання бетону над похилою тріщиною (за досягнення дотичними напруженнями на довжині похилої тріщини граничної міцності бетону на зріз $R_s h$) спостерігається при прольотах зрізу $1,0 < a/h_0 < 2 \dots 2,5$ в елементах без поперечної арматури або з малим її вмістом.

У стиснутій зоні блоки з'єднані між собою бетоном, який і виключається як зв'язок під час руйнування, в розтягнутій – поздовжньою арматурою, по довжині критичної похилої тріщини – поперечною арматурою.

Стосовно елементів без зчеплення, то в нормативних документах такі рекомендації відсутні.

Мета роботи – дослідити доцільність застосування існуючих методик розрахунку для визначення несучої здатності похилих перерізів сталобетонних балок з зовнішнім стрічковим армуванням без зчеплення з бетоном по довжині контакту; дослідно виявити вплив “плеча зрізу”, а також різного співвідношення традиційної стрижневої і зовнішньої гладкої стрічкової арматури без зчеплення з бетоном на міцність, деформативність та тріщиностійкість дослідних елементів; експериментально оцінити вплив зовнішньої гладкої стрічкової арматури без зчеплення з бетоном на міцність похилих перерізів сталобетонних балок з важкого бетону в зоні дії поперечних сил за різних плечей зрізу, поперечного армування і різного співвідношення площ поздовжньої стрічкової та стрижневої арматури; провести експериментальне дослідження тріщиностійкості похилих перерізів сталобетонних балок без зчеплення зовнішньої стрічкової арматури з бетоном; подати рекомендації з проектування сталобетонних балок без зчеплення зовнішньої стрічкової арматури з бетоном.

Методи розрахунку. Методики розрахунку, які сьогодні запропоновані та використовуються, можна поділити на такі три групи:

- перша група – це методики з використанням різних умовних схем та аналогів. Це такі методики, які ґрунтуються на оцінці головних і дотичних напружень в залізобетонному елементі, методи, що використовують аналогії: фермові, аркові, розпірні системи, комбіновані методи тощо. Однак необхідно відзначити, що сьогодні панує думка про недостатню справедливість цього напрямку, оскільки він не розглядає фактичну роботу залізобетонного елемента в граничному стані;
- друга група – це методи, в основу яких покладено статистичний підхід (хоча усі сучасні методи використовують дослідні дані та статистичні прийоми їх обробки, тут йдеться про методи, що ґрунтуються лише на статистичному підході). Вони отримали певний розвиток, насамперед в працях А.П. Кудзиса, Е.Н. Львовського. Такі методи розв'язання задачі пов'язані з великими труднощами у виборі даних через відсутність у літературі детальної інформації про умови експериментів, що є вихідними під час статистичної обробки. Долають ці труднощі за допомогою запланованого експерименту. Однак кількість таких експериментів дуже обмежена. Одночасно відмова від фізичних уявлень і використання лише статичного матеріалу обмежує можливості для розв'язання задачі, потребує великої кількості моделей для усіх модифікацій залізобетонних елементів і, як наслідок, не дає повного універсального методу розрахунку;
- третя група – це моделі розрахунку, які використовують рівновагу зусиль в похилому перерізі за граничним станом. Підхід, заснований О.О. Гвоздевим і М.С. Боришанським, став значним кроком вперед порівняно з іншими методами, оскільки дав змогу перейти від умовних схем і напружень до фактичних зусиль в кожному перерізі. З моменту розробки цього методу проводяться дослідження, спрямовані на подальше вдосконалення розрахунку, що викликало значні зміни з часу його розробки. Вдосконалення уможливили підвищити точність розрахунку, і, з одного боку, зменшити витрати матеріалів, насамперед поперечної арматури, а з іншого, – підвищити надійність конструкцій, що проектуються.

Під час розрахунку за методом граничних станів виходять з двох можливих форм руйнування елемента:

- за бетоном стисненої зони над похилою тріщиною до появи текучості в поздовжній розтягнутій арматурі;
- внаслідок текучості розтягнутої арматури в місці її перетину похилою тріщиною з подальшим руйнуванням бетону над тріщиною.

В обох випадках розглядають рівновагу внутрішніх та зовнішніх (граничних) зусиль для відсіченої похилою площиною тріщини опорної частини елемента.

Під час руйнування бетону стиснутої зони над тріщиною розрахунок міцності, згідно з прийнятою у нас методикою, проводять за рівнянням рівноваги поперечних сил:

$$Q \leq Q_b + \sum R_{sw} A_{sw} + \sum R_{sw} A_{s,inc} \sin \theta, \quad (1)$$

де Q – поперечна сила; Q_b – поперечне зусилля, що сприймається бетоном; R_{sw} – розрахунковий опір поперечної арматури розтягу; A_{sw} – площа перерізу хомутив, розміщених в одній нормальній до поздовжньої осі елемента площині, що перетинає похилий переріз; $A_{s,inc}$ – площа перерізу відігнутих стрижнів, розміщених в одній похилій до поздовжньої осі елемента площині, що перетинає похилий переріз; θ – кут нахилу відгинів до поздовжньої осі елемента.

За незмінних розмірів перерізу після численних вдосконалень умова міцності має такий вигляд (за СНиП 2.03.01.-84*):

$$Q_{sw} + Q_b = q_{sw} \cdot c_0 + \frac{\varphi_b R_{bt} b h_0^2}{c}, \quad (2)$$

де q_{sw} – граничне зусилля в хомутах на одиницю довжини елемента в межах похилого перерізу:

$$q_{sw} = \frac{R_{sw} A_{sw}}{s}. \quad (3)$$

Граничні значення поперечної сили, що сприймаються хомутами Q_s , характеризуються найбільш небезпечною довжиною похилого перерізу. Зі збільшенням довжини Q_s зростає, а значення поперечної сили, що сприймається бетоном Q_b , падає. Критичну довжину отримують, шукаючи мінімум функції:

$$\frac{d(Q_{sw} + R_b)}{dc} = 0, \quad (4)$$

тобто

$$c_0 = \sqrt{\frac{\varphi_b R_{bt} b h_0^2}{q_{sw}}}. \quad (5)$$

Враховуючи, що в описаних залежностях формули для Q_b і c_0 є емпіричними, для їх застосування наклали ряд обмежень: розрахункове значення c_0 не повинно перевищувати довжини проекції найбільш небезпечного похилого перерізу і знаходитись в межах не більш як $2h_0$ і не менш як h_0 ; зусилля в бетоні Q_b приймають не меншим за несучу здатність елементів без поперечної арматури (за прольоту зрізу $a/h_0 = 2.5 \dots 5$).

Також СНиП 2.03.01.-84* враховує вплив інших чинників: поздовжньої стискаючої чи розтягуючої сили через коефіцієнт φ_n і наявність полицок в стиснутій зоні таврових і двотаврових перерізів коефіцієнтом φ_t .

Крім методики СНиП 2.03.01.-84*, сьогодні існують ще й інші способи оцінки міцності за похилим перерізом.

Г.І. Попов і О.С. Залесов пропонують використовувати спільну залежність c для бетону і арматури, враховуючи при цьому зменшення ефективності поперечної арматури з ростом довжини c . Беручи за основу рівняння третього ступеня для визначення зусилля Q_{sw} пропонують формулу

$$Q_{sw} = q_{sw} c - q \Delta c^3. \quad (6)$$

Враховуючи, що Q_{sw} досягає максимальної величини за $c = \theta h_0$, з умови $\frac{dQ_{sw}}{dc} = 0$ отримують

$$q \Delta = \frac{q_{sw}}{3(\theta h_0)^2}, \quad (7)$$

тоді

$$Q_{sw} = q_{sw} \left[c - \frac{c^3}{3(\theta h_0)^2} \right]. \quad (8)$$

Сумарна поперечна сила, що сприймається бетоном і хомутами:

$$Q_b + Q_{sw} = \frac{\varphi_b R_{bt} b h_0}{c} + \left[c - \frac{c^3}{3(\theta h_0)^2} \right]. \quad (9)$$

З умови (1.4) випливає залежність для найбільш небезпечного перерізу:

$$c = \theta \gamma h_0, \quad (10)$$

де

$$\gamma = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{1 - 4 \left(\frac{\zeta_0}{h_0} \right)}}{2}}; \quad \zeta_0 = \frac{c_0}{h_0};$$

$$c_0 = \sqrt{\frac{K R_{bt} b h_0^2}{q_{sw}}}; \quad \theta \geq 2 \zeta_0.$$

Для важкого бетону $k = 2$. Коефіцієнт θ уточнюється на основі експериментальних даних. Як свідчать дослідження, за $\theta = 4$ отримують результати, які знаходяться між старими і новими нормами. І ця методика дає змогу гнучкіше оцінити несучу здатність залізобетонних елементів на дію поперечних сил.

О.Г. Кумп'як пропонує оцінювати міцність похилих перерізів балок за допомогою регресивного аналізу і обчислювати її залежно від відсотка поперечного армування, класу бетону і арматури, анкерування поздовжньої арматури, розмірів поперечного перерізу конструкцій, співвідношення жорсткостей розтягнутої і стиснутої зон елемента, відносного прольоту зрізу a/h_0 тощо. З точки зору автора, методи математичної статистики дають змогу отримувати результати, що найбільше відповідають досліду. Основну залежність О.Г. Кумп'як записав у такому вигляді:

$$Q = \frac{1.75 R_{bt} b h_0}{a} + 0.51 q_{sw} a + 0.396 R_{bt} b h_0 \left(1 - 0.4885 \frac{a}{h_0} \right), \quad (11)$$

де q_{sw} – зусилля у хомутах на одиницю довжини елемента.

Спеціалісти Харківського НДІПромбудпроекту запропонували такі припущення для розрахунку міцності похилих перерізів залізобетонних елементів: поперечне зусилля, що сприймається бетоном за зміни довжини проєкцій похилого перерізу c , змінюється від максимального кінцевого значення Q_b^{\max} за $c \rightarrow 0$ до мінімального Q_b^{\min} за $c \rightarrow \infty$.

Основну залежність автори описують формулою як інтенсивність поперечної сили:

$$Q = A + \frac{B}{F c^n + 1} + q_{sw} \bar{c}, \quad (12)$$

де $\bar{c} = \frac{c}{h_0}$; A ; B ; F ; n – параметри, які визначаються з експерименту або за вимогами чинних норм.

О.С. Залесов і Ю.А. Климов пропонують розрахунок міцності похилих перерізів залізобетонних елементів, що враховує можливість руйнування в стиснутій і розтягнутій зонах, а також вздовж смуги між похилими тріщинами в тонких стінках таврів і двотаврів, а для коротких консолей – по похилій стиснутій смузі між опорою і вантажем.

За зосередженого навантаження, розташованого на відстані до $2h_0$ від осі опираючого згинаючого елемента, слід перевіряти виконання умови

$$Q \leq 0.75 R_b b \sin \varphi (1 + \eta_f), \quad (13)$$

де Q – поперечна сила, що викликається опорною реакцією; φ – кут нахилу лінії, що з'єднує точку прикладення зосередженої сили на верхній грані згинаючого елемента з точкою опираючого елемента на нижній грані; $\eta_f = \frac{0.75(b_t - b)h'_t}{bh_p}$ – коефіцієнт, що враховує форму поперечного перерізу елемента.

Висновки. Сьогодні, незважаючи на численні дослідження похилих перерізів, зокрема Львівською школою залізобетонних балкових конструкцій, а також сталобетонних, якими займалися, зокрема, М.С. Жуковський, Л.О. Дорошкевич, М.О. Казанцев, Б.М. Ониськів, Ф.С. Клименко, Н.І. Єршова, Г.М. Гладішев, Б.А. Шостак, В.М. Чубриков, Б.Ю. Максимович, І.М. Добуш, А.В. Мазурак, Т.Б. Боднарчук, Ю.Є. Фомуляк та інші і для яких розроблені методики розрахунку міцності, які оцінюють міцність похилих перерізів з достатньою точністю. Дослідження несучої здатності похилих перерізів попередньо напружених сталобетонних балок без зчеплення зовнішньої стрічкової арматури з бетоном по довжині контакту відсутні, хоча залізобетонні конструкції на несучу здатність похилих і нормальних перерізів та сталобетонні по нормальних перерізах без зчеплення зовнішньої стрічкової арматури з бетоном досліджувались А.А. Вайсфельдом, А.І. Мордичем, Л.В. Образцовим, А.Б. Пірадовим, А.А. Поляковим, Н.А. Поповичем, Ю.Г. Решетар, О.А. Рочняком, А.П. Слукой, Г.М. Спригіним, В.Б. Тітусом, А.Н. Хачатрянном, П.А. Школьніком, Н.Н. Яромічем, Р.І. Кінашем та ін. Б.М. Ільницьким досліджувались і сталобетонні ненапружені елементи без зчеплення робочої арматури з бетоном на дію поперечної сили.

1. Барабаш В.М., Клименко Ф.Э. Розробка, дослідження та застосування нового виду стрічкової арматури періодичного профілю в сталобетонних конструкціях // Проблеми теорії і практики залізобетону. – Полтава, 1997. – С. 37–41. 2. Клименко Ф.Е. Обычное и напрягаемое внешнее полосовое армирование сталобетонных балочных элементов и опытное их применение: Дис. ...д-ра техн. наук. – М., 1979. – 500 с. – Машинопись. 3. Байков В.Н. Сигналов Э.Е. Железобетонные конструкции. – М.: Стройиздат, 1991. – 767 с. 4. Барашиков А.Я., Климов Ю.А., Алебердиев Р.Д. Прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных элементов при повторных нагружениях поперечными силами. Работа бетона и железобетона с различными видами армирования на выносливость при многократно повторяющихся нагрузках // Тез. докл. Координационного совещания. – Львов, 1987. – 8 с. 5. Боднарчук Т.Б. Экспериментальне дослідження несучої здатності похилих перерізів сталобетонних балок баз поперечної арматури // Науково-технічна конференція. – Полтава, 1997. 6. Боднарчук Т.Б., Шмиг Р.А. Методика виготовлення та дослідження тришарових сталобетонних балок з зовнішнім стрічковим армуванням // Проблеми теорії і практики будівництва. – Львів, 1997. – Т. II. – С. 34–37. 7. Боднарчук Т.Б. Несуча здатність похилих перерізів звичайних сталобетонних балок: Дис. ...канд. тех. наук. – Львів, 1999. – С. 1–128. – Рукопис.