

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МІЦНОСТІ ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗІВ ПРОГІННИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Карпюк В.М., *д.т.н., проф.,* **Костюк А.І.,** *к.т.н., доц.,*
Кушнарєва Г.О., *к.т.н., доц.,* **Албу К.І.,** *здоб.*

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

У дослідників ще не склалася єдина думка про вплив багатьох конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на характер деформування, тріщиноутворення та руйнування припорних ділянок прогінних залізобетонних елементів при дії статичного навантаження і, тим більше, динамічного. Зокрема, недостатньо вивченим є перерозподіл внутрішніх сил на цих ділянках перед руйнуванням вказаних елементів, величина «нагельного» ефекту поздовжньої арматури, сил зчеплення по берегах небезпечної похилої тріщини, залежність форми чи схеми їх руйнування від співвідношення конструктивних чинників та факторів зовнішнього впливу тощо.

Детальний аналіз виконаних досліджень по проблемі, що розглядається, дозволяє також зробити висновок про те, що подальший розвиток теорії міцності похилих перерізів залізобетонних стержневих елементів та пошук відповідних розрахункових моделей у теперішній час здійснюється за трьома основними напрямками:

- накопичення нових експериментальних даних та урахування або вдосконалення емпіричних залежностей методики М.С. Боришанського, яка добре (у порівнянні із зарубіжною методикою ферменної чи розпірної аналогії) зарекомендувала себе ще у 50-ті роки минулого століття;

- поглиблене дослідження природи та характеру тріщиноутворення та руйнування залізобетонних елементів на ділянках сумісної дії згинального і крутного моментів, поперечної та поздовжньої сил; розробка аналітичного апарату, що розвиває інженерну методику розрахунку за граничним станом, та її основи за допомогою реального напружено-деформованого стану бетону й арматури на припорних ділянках дослідних елементів;

- розвиток та вдосконалення деформаційного методу розрахунку прогінних залізобетонних конструкцій, який дозволяє з єдиних позицій прогнозувати тріщиностійкість, деформативність та міцність нормальних і похилих перерізів.

Очевидно, що найбільш перспективними для подальшого розвитку науки про залізобетон є другий і третій напрямки.

Реалізований системний підхід [1] до експериментально – теоретичного визначення напружено – деформованого стану стержневих прогінних залізобетонних конструкцій дозволив зробити достовірну кількісну і якісну оцінку впливу конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на їх міцність, жорсткість, тріщиностійкість та інші параметри працездатності як зокрема, так і у взаємодії один з одним, суттєво уточнити фізичну модель роботи вказаних конструкцій при їх статичному навантаженні. Зокрема встановлено:

- для забезпечення однакової ймовірності одночасного руйнування непереармованих прогінних залізобетонних конструкцій за нормальними і похилими перерізами при використанні найбільш розповсюджених класів бетону (С20/25, С30/35) коефіцієнти відповідного армування досічно приймати: $\rho_w \geq 0,0044(BpI)$; $\rho_f = 0,0013 \dots 0,023(A500C)$; для звичайних однопрогінних елементів $\rho_f = 0,006 \dots 0,013(A500C)$; а для нерозрізних балок – як вище вказана розтягнута арматура (над середніми опорами);

- в плосконапружених балочних залізобетонних елементах згинальний момент має привалююче значення на міцність та деформативність їх приопорних ділянок порівняно з впливом поперечної сили. Тому, при поперечному навантаженні у вигляді зосереджених сил їх слід розташовувати якомога ближче до опор;

- збільшення міцності бетону з метою підвищення несучої здатності приопорних ділянок, зокрема, є економічно не обґрунтованим і відповідний клас бетону слід приймати з урахуванням усіх конструктивних та технологічних вимог до конструкції;

- з точки зору несучої здатності приопорних ділянок попередньо напружених таврових залізобетонних елементів відносно ширину стиснутої полицки досічно обмежити співвідношення $b_f / b \leq 2$, а її товщину – $h_f / h \leq 0,18$;

- по – можливості, слід уникати появи поздовжніх розтягуючих сил високих рівнів (до $0,35N_{cu}$) у балочних конструкціях, оскільки вони радикально (до 3,5 разів) зменшують не тільки міцність приопорних ділянок, а й їх тріщиностійкість;

- поздовжня стискаюча сила величиною до $0,6N_{cu}$, прикладена з ексцентриситетом $0,25h_0$, який створює розвантажувальний порівняно з основним поперечним навантаженням момент, збільшує несучу здатність приопорних ділянок дослідних елементів до 20%;

- збільшення рівня попереднього напруження $P / (f_{ck} b h_0)$ від 0 до 0,6

зменшує стрілу прогинів в дослідних попередньо напружених таврових залізобетонних елементах до 2 разів (до 1/420);

- наявність крутного моменту високого рівня (до 0,6Т_и) не тільки радикально (до 2 разів) зменшує несучу здатність дослідних зразків – балок при стисненому крученні їх приопорних ділянок, а й підвищує їх прогини до 75%, сприяє обертанню опорного перерізу до 6,6° (8,4° при вільному крученні балки від опори до опори);

- нерозрізність прогінних залізобетонних конструкцій дозволяє зменшити в них прогини до 4...5 разів за рахунок перерозподілу згинальних моментів;

- поздовжня розтягуюча сила та крутний момент, з одного боку, спроможні самі по собі визвати утворення тріщин, відповідно, нормальних та просторових спіралеподібних, а з іншого боку, їх наявність суттєво знижує тріщиностійкість нормальних та похилих перерізів прогінних залізобетонних елементів від дії зовнішнього поперечного навантаження у порівнянні зі звичайними балками, в середньому, відповідно, в 4,7 та до 2,3 разів;

- середня ширина розкриття нормальних тріщин на рівні центру ваги робочої арматури у неперearмованих дослідних елементах перед руйнуванням їхніх приопорних ділянок не перевищувала допустимих значень і коливалася в межах 0,16...0,22м;

- ширина розкриття похилих тріщин посередині висоти перерізу дослідних балок при «експлуатаційному» рівні ($^w0,65F_{\text{в}}$) поперечного навантаження не перевищувала 0,3мм за винятком елементів, приопорні ділянки яких окрім поперечного згину випробували ще й деформацію стисненого кручення або позацентрового стиску, де середня ширина розкриття цих тріщин при такому навантаженні становила, відповідно, 0,50 та 0,55мм. Перед руйнуванням приопорних ділянок значення середньої ширини розкриття небезпечних похилих тріщин коливалися в межах 0,67...0,79мм при короткочасному навантаженні, а просторових спіралеподібних – 1...2мм, що свідчить про необхідність приймати, насамперед, кількість поперечної арматури $\rho_w \geq 0,0044(Bpl)$, тим більш, з урахуванням тривалої дії навантаження.

Середня приведена довжина небезпечної похилої тріщини на поздовжню вісь у плосконапружених звичайних, позацентрово розтягнутих і стиснутих, а також попередньо напружених таврових і нерозрізних дослідних залізобетонних балках c_0/h_0 складала, відповідно, 1,14; 1,25; 1,43; 1,70; 1,37. Середня величина кутів нахилу цієї небезпечної тріщини до поздовжньої осі вказаних елементів дорівнює, відповідно, 42, 39, 35, 30 і 36°.

Наявність похилої тріщини в кінці прольоту зрізу плосконапружених дослідних елементів, в середньому, на 20% зменшує висоту стиснутої зони бетону у порівнянні з такою посередині прольоту. При цьому, середнє значення відносної висоти стиснутої зони бетону під зосередженою силою перед руйнуванням приопорних ділянок попередньо напружених таврових залізобетонних балках дорівнювало 0,20, у позacentрово розтягнутих і стиснутих елементах, відповідно, 0,27 і 0,56, у звичайних однопрогінних та нерозрізних балках – 0,35 та 0,38 (на середній опорі) і 0,46 (в прольоті).

Наявність крутного моменту призводить до нахилу нейтральної лінії в напрямку кута обертання балки. При цьому, вертикальна проекція стиснутої зони бетону в кінці прольоту зрізу має, як правило, вид прямокутної трапеції, яка при високих рівнях крутного моменту ($\sim 0,6T_u$) і мінімальній кількості верхньої монтажної арматури ($\rho'_f=0,006$) перетворюється у прямокутний трикутник, верхня сторона якого при вільному крученні залишається рівною ширині балки. При стисненому крученні тільки приопорних ділянок дослідних елементів стиснута зона бетону перед їх руйнуванням приймала, як правило, вид прямокутного трикутника у якому нейтральна лінія перетинала горизонтальну грань балки, а в прямому куті утворювалася зона концентрації головних стискаючих напружень (до $1,5f_{ck}$), що огортає один із стержнів монтажної арматури.

У непереармованих плосконапружених дослідних елементах спостерігається незначний нагельний ефект (до 5%) у нижній розтягнутій від згину і в верхній стиснутій поздовжній арматурі перед їх руйнуванням, насамперед, тому, що значення коефіцієнтів ρ_f і ρ'_f у дослідних елементах знаходяться в оптимальній для балок області, а ρ_w – не набагато менші від потрібних. При цьому, майже достатня кількість поперечної арматури не дозволяла вільно перегинатися поздовжній арматурі. В момент руйнування таких елементів, який, як правило, супроводжувався текучістю поперечних стержнів, цей ефект різко зростав, але він уже був не в змозі компенсувати роботу поперечної арматури, яка виключилася з роботи.

При руйнуванні складнонапружених дослідних елементів за складною, як правило, несиметричною поверхнею чітко виражених локальних перегинів поздовжньої арматури не спостерігали. Тому нагельний ефект в їх арматурних стержнях був ще меншим, ніж у звичайних непереармованих балках і ним можна знехтувати у практичних розрахунках.

Різноманітність складного напружено-деформованого стану та форм руйнування навіть при статичному пропорційному навантаженні

унеможливило створення простої і, в той же час, універсальної розрахункової моделі припорних ділянок для різних типів конструкцій, яка відображала б вплив як конструктивних чинників, так і факторів зовнішнього впливу на їхню несучу здатність. Спрощені розрахункові моделі вимагають застосування емпіричного підходу.

Практика показала, що чисельні методи розрахунку конструкцій, які спираються на загальну механіку залізобетону з тріщинами, носять універсальний характер, дозволяють моделювати любий напружено-деформований стан та простежити за усіма етапами роботи конструкції, включаючи її руйнування.

У залежності від співвідношення конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії руйнування припорних ділянок плосконапружених прогінних залізобетонних елементів при статичному навантаженні може відбутися за однією з представлених на рис. 1 схем [1]:

- за схемою $A-1/N_b$ або $A-2/N_n$ за нормальними перерізами внаслідок текучості, відповідно, верхньої або нижньої поздовжньої арматури при недостатній її кількості або наявності надмірної розтягуючої поздовжньої сили;

- за схемою B/M за похилим перерізом при переважній дії згинального моменту при мінімальній (до 1%) і недостатній (до 0,3%) кількості поперечної арматури;

- за схемою C/V за похилим перерізом при переважній дії поперечної сили від зрізу (зсуву) або подрібнення бетону стисненої зони при середній ($\geq 1,5\%$) та великій кількості поздовжньої арматури;

- за схемою $D//c_m$, тобто за похилою стислою смугою між зосередженою силою та опорою в позацентрово стиснутих та попередньо напружених елементах з прольотом зрізу $a \leq 2h_0$;

- за схемою F/V від продавлювання над середньою опорою у вигляді перевернутої трапеції з можливим утворенням «пластичних шарнірів» над середньою опорою і в прольотах, а також перерозподілом внутрішніх зусиль.

Руйнування складнонапружених прогінних залізобетонних елементів відбувається за схемами $E/T_{стисн.}$ (рис. 6) або $E/T_{вільн.}$ за складними просторовими поверхнями. При співпаданні знаків дотичних напружень, зумовлених діями крутного моменту T і поперечної сили V , первинні спіралеподібні тріщини на одній з бічних граней розриваються поглиблюються, а на другій - навпаки, закриваються і перед руйнуванням припорної ділянки за складною поверхнею появляється нова перехресна тріщина від переважної дії V , яка з'єднає кінці спіралеподібних тріщин на верхній та нижній гранях елемента.

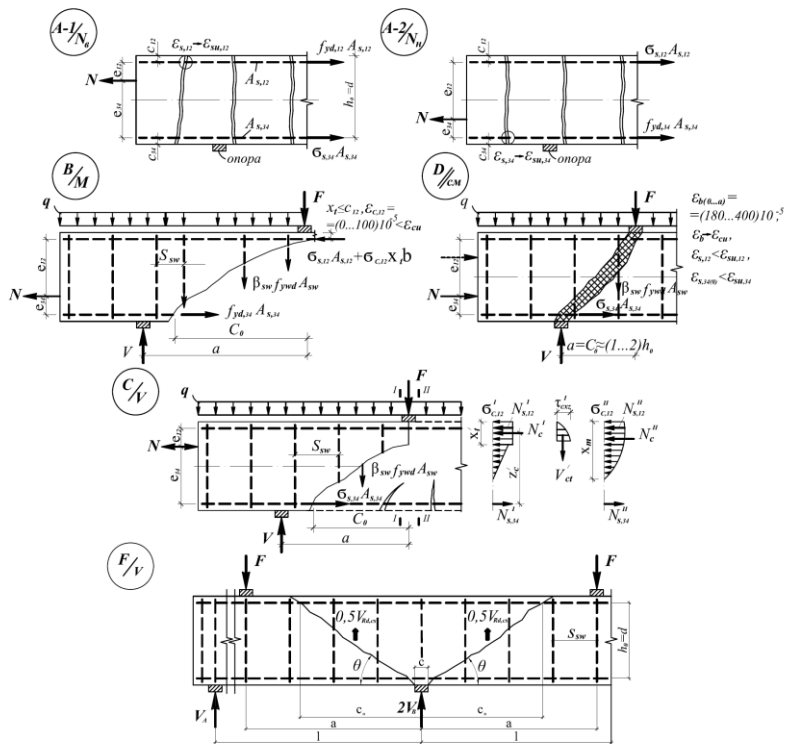


Рис.1 Основні схеми руйнування однопрогінних позакентровано розтягнутих і стиснутих, звичайних та поперечно напружених залізобетонних балок

Для кожної з виявлених схем руйнування розроблені інженерні методи розрахунку, які об'єднані в один загальний інженерний метод, суть якого полягає в тому, що по чергово розглядаються найбільш імовірні схеми руйнування припорних ділянок конструкції. Обчислюються величини руйнівного поперечного навантаження в якості розрахункового приймається мінімальне його значення.

Аналіз опублікованих робіт [2] показав, що наявних робіт по дослідженню несучої здатності залізобетонних елементів, що згинаються за похилими перерізами при впливі багаторазово повторюваних навантажень недостатньо. Вони, в основному, спрямовані на дослідне визначення форм втомного руйнування в прольоті зрізу та вивчення впливу окремих факторів на міцність залізобетонних елементів при дії багаторазово повторюваних навантажень на базі $2 \cdot 10^6$ циклів. Однак, експе-

риментальні дослідження з вивчення несучої здатності залізобетонних елементів, що згинаються за похилими перерізами у діапазоні від $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^5$ циклів багаторазово повторюваних навантажень в технічній літературі відсутні.

Методика СНиП-2.03.01-84* при розрахунку на дію багаторазово повторюваних навантажень не ураховує ряд факторів, що впливають на несучу здатність елементів, що згинаються за похилими перерізами: прольоту зрізу, коефіцієнта поздовжнього і поперечного армування, міцнісних властивостей бетону та арматури, умов навантаження та ін. Існуючі методи розрахунку мають суттєву розбіжність з дослідними даними оцінки втомної міцності похилих перерізів залізобетонних балок.

У діючих нормах розрахунків на втомну міцність перерізів, нахилених до поздовжньої осі елемента, виконується без урахування зміни напружено-деформованого стану в приопорних зоні під час програми багаторазово повторюваних завантажень за рахунок накопичення пластичних деформацій у бетоні, поздовжній і поперечній арматурі в місці перегину їх похилою тріщиною; а також коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження.

Наявні експериментальні дані по вимірюванню висоти стиснутої зони бетону носять суперечливий характер. Немає експериментальних даних по визначенню висоти стиснутої зони бетону в залежності від міцності бетону, кількості поздовжньої і поперечної арматури, параметрів багаторазового повторюваного навантаження.

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що дослідження втомної міцності залізобетонних елементів за похилими перерізами при багатоциклового навантаженні в діапазоні від $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^5$ циклів є актуальним. Оцінка несучої здатності залізобетонних балок в зоні дії поперечних сил і згинального моменту має важливе значення. Ця проблема актуально для багатьох залізобетонних конструкцій, а в сейсмічних районах - охоплює всі конструкції, визначаючи кількість поперечної і поздовжньої арматури. При розрахунку і проектуванні не враховується оцінка втомної міцності похилих перерізів залізобетонних конструкцій, виготовлених з місцевих матеріалів, відмінність в армуванні, різні конструктивні форми. Всі вказані недоліки проводять або до переоцінки несучої здатності залізобетонних елементів, або до недостатньої їх надійності.

У зв'язку з цим, необхідна розробка рекомендацій щодо практичного розрахунку несучої здатності конструкції при дії на них багатоциклового навантаження, що базуються на визначенні фактичного напружено-деформованого стану перерізів залізобетонних елементів у прио-

порних зонах, дійсних напружень, встановлення цілісної системи розрахунку для всього діапазону повторних впливів, починаючи від малої кількості навантажень до необмежено великої, з визначанням розрахункових характеристик у прямій залежності від числа циклів багаторазово повторюваних навантажень.

Експериментальні та теоретичні дослідження [3] нерозрозрізних залізобетонних балок при дії короткочасних одноразових і повторних навантажень дозволяють зробити такі висновки:

- розрахунок залізобетонних балок за методом граничної рівноваги є прогресивним, пройшов багаторічні випробування, але його умови досягнення граничного стану не відповідають сучасним уявленням про повні діаграми деформування бетону і арматури;

- за методом граничної рівноваги у розрахункову схему напружено деформованого стану нормального перерізу покладена прямокутна епюра напружень у бетоні стиснутої зони, яка є умовною. Насправді така епюра має криволінійну характер;

- прийнята у СНиП 2.03.01.84* методика розрахунків не дає можливості визначати напружено деформований стан поперечного перерізу балок на будь-якій стадії;

- у розрахунках залізобетонних балок при дії повторних малоциклових навантажень не урахується зміна механічних характеристик бетону та арматури, які обумовлені дією таких навантажень, а так саме вплив повторних навантажень на прогини і ширину розкриття тріщин.

Ураховуючи вищезазначене, існує необхідність за мету розробити методику визначення напружено деформованого стану нормальних і похилих перерізів залізобетонних балок та їх міцності при дії повторних малоциклових навантажень, базуючись на сучасній розрахунковій деформаційній моделі перерізів, і підтвердити прийнятність розробленої у [3] методики власними експериментальними даними і даними досліджень інших авторів.

Для цього необхідно вирішувати такі завдання:

- отримати нові експериментальні дані про роботу прогінних залізобетонних елементів за дії повторних малоциклових навантажень і вивчити характер перерозподілу зусиль і напружено деформованого стану опорних і прогінних перерізів на всіх стадіях роботи балок;

- обґрунтувати граничні деформаційні умови балочних конструкцій за методом граничної рівноваги;

- обґрунтувати передумови та розробити методику визначення напружено деформованого стану і міцності як нормальних, так і похилих перерізів балок на основі деформаційної моделі при повторних навантаженнях;

- виконати порівняння отриманих розрахункових даних з результатами власних експериментальних досліджень і даними інших авторів, виконати статистичну оцінку прийнятності розробленої методики.

Висновок

1. Для визначення міцності приопорних ділянок прогінних залізобетонних конструкцій при статичній дії навантаження доцільно використовувати загальний метод [1], який ураховує найбільш вірогідні схеми їх руйнування та комплексний вплив конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії.

2. Для визначення достовірної несучої здатності похилих перерізів залізобетонних балочних конструкцій необхідно узагальнити наявні експериментально-теоретичні дані з технічної літератури, виконати, при необхідності, системні експериментально-теоретичні дослідження їх роботи при динамічній дії навантаження, суттєво уточнити існуючу деформаційну модель їх розрахунку з позицій загальної механіки залізобетону та суттєво вдосконалити існуючі методи інженерного розрахунку.

Summary

This paper focuses on the study of the status and prospects for calculating the strength of reinforced concrete beam sections in reference structures under static and alternating small proportion of cyclic transverse load.

1. Карпюк В.М. Розрахункові моделі прогінних залізобетонних конструкцій при складному напружено-деформованому стані приопорних ділянок. – Автореф. дис. док. тех. наук. Одеса, 2012, -42с.

2. Кушнарёва Г.О. Несущая способность и расчет железобетонных балок на известняковом песке по наклонным сечениям при действии многократ-но повторяющихся нагрузок.- Диссер. канд. техн. наук. Одесса, 1991, -249с.

3. Бабич В.Е. Напряженно деформированное состояние и прочность неразрезных железобетонных балок при одноразовых и повторных нагрузках. Диссер. канд. техн. наук. Ровно, 2005, -213с.