УДК 666.9:519.2

АНАЛІЗ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ТА ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ В ЗГИНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТАХ ПРИ ДІЇ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

ANALYSIS BEARING CAPACITY AND FRACTURE IN BENDING ELEMENTS UNDER THE ACTION OF CYCLIC LOADINGS

Неутов С.П., к.т.н., доцент, Кушнарьова Г.О., к.т.н., доцент (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

S. Neutov, Ph.D., associate professor, G. Kushnareva, Ph.D., associate professor (Odessa State Academy of Building and Architecture, Odessa)

Досліджено вплив циклічних навантажень на несучу здатність та тріщиноутворення похилих перерізів залізобетонних балок на вапняковому піску. Найбільший вплив не утворення магістральної тріщини та руйнування надає проліт зрізу, рівень навантаження та коефіцієнт асиметрії циклу.

The influence of static and frequently repeated loads on the bearing capacity and crack resistance of diagonal sections of reinforced concrete beams on crushed stone and calcareous sand is investigated. Two types of fatigue failure were obtained: fatigue concrete shear fracture over the tip of diagonal crack and fatigue break of cross rods, with following concrete destruction over the tip of diagonal crack. The destruction process is based on multiple concentration of micro-cracks, which lead to the main crack. So we have the necessity to add with the new strength calculation methods, taking into account the laws of crack birth and crack development and new material characteristics that evaluate the stage of fatigue failure. It is necessary to know the influence of different factors on the rate of the main crack's development. The dimension of cross distance, the level of cyclic loading and the coefficient of cycle asymmetry have the great influence on the main crack's development and failure.

Ключові слова:
Несуча здатність, тріщини, залізобетон, втомленість, перерізи.
Crack bearing capacity, reinforced concrete, fatigue, section.

Вступ. У нормативних документах розрахунок на витривалість залізобетонних елементів при дії згинального моменту і поперечної сили проводиться за методами пружного опору залізобетону з тріщинами шляхом

порівняння напруг від зовнішнього навантаження з розрахунковими характеристиками бетону та арматури.

Такий підхід знаходиться в протиріччі з реальним характером непружної роботи залізобетонних елементів.

Ця обставина викликає необхідність більш поглибленого теоретичного і експериментального вивчення роботи залізобетонних конструкцій в зоні дії поперечних сил при дії циклічних навантажень.

Постановка питання та мета дослідження. Автором [1] проведено комплекс досліджень щодо впливу величини зрізу, коефіцієнта поздовжнього армування, міцності бетону і коефіцієнта асиметрії циклу на міцність і утворення тріщин залізобетонних балок на карбонатному піску при дії циклічних навантажень.

Мета проведених експериментальних досліджень: з'ясувати ступінь впливу цих факторів на несучу здатність таких конструкцій.

Методика дослідження. З метою вивчення впливу циклічних навантажень в діапазоні від 10^3 до 10^5 циклів на міцність і деформативні характеристики залізобетонних балок на вапняковому піску, випробувані дослідні зразки балок прямокутного перерізу розміром 200 х 100 мм довжина 1400.

Частота додатки повторюваного навантаження приймалася постійною і становила 5,59 ГЦ.

Для отримання надійних експериментальних даних, достатніх для побудови математичної моделі процесу руйнування, до дослідження залучено теорія планованого експерименту. Варіювалися наступні фактори: коефіцієнт зрізу (1,14; 2,0; 2,86) h_0, міцність бетону f_{cd} (17; 21; 25) МПа, коефіцієнт асиметрії циклу (0,25; 0,33; 0,41).

Результати досліджень. В результаті аналізу результатів проведених експериментальних досліджень циклічного навантаження, отримані два види втомного руйнування:

- втомний зріз бетону над вершиною похилої тріщини;
- втомний розрив поперечних стрижнів з подальшим руйнуванням бетону над вершиною похилої тріщини.

Мінімальний з цих навантажень і визначає втомна міцність похилого перерізу.

Основні етапи розвитку процесу руйнування:

- відразу після прикладання до верхньої межі циклічного навантаження в балці розвивається процес зародження мікротріщин;
- при досягненні їх критичної концентрації (далі в деякій обмеженій області зразка) мікротріщини взаємодіють між собою і зливаються, що призводить до появи більш великих тріщин;
- цей процес укрупнення на певній стадії веде до появи магістральної тріщини, прискорений розвиток якої забезпечується зростання напружень в її вершини.

Втомне руйнування відбувається при циклічному навантаженні в результаті накопичення незворотних ушкоджень. Втома характеризується номінальними напругами межі міцності, число циклів до руйнування велике.

Процес руйнування під дією напруг, що розтягують незворотній. Розрив твердого тіла є процес поступового руйнування матеріалу під дією механічних зусиль, які в результаті призводять до втрати цілісності зразка і розриву його на частини.

Розрив є результатом безперервно розвиваючого під час процесу. Втрата міцності зразка під навантаженням передує поява мікровогнищ руйнування - мікротріщини.

Будь-який матеріал можна розглядати як той, що містить тріщини технологічного або експлуатаційного характеру і довговічність конструкцій визначається темпом зростання тріщини. У зв'язку з цим важливо знати вплив різних чинників на швидкість її розвитку.

Відомо, що руйнівне напруження при циклічному навантаженні менше, ніж при статичному. Розглядається одна з причин - взаємодія поля мікроруйнування від зовнішнього навантаження циклу з залишковими тріщинами, що виникають в тілі після попередніх циклів.

В основі процесу руйнування лежить множинне накопичення мікроскопічних тріщин.

При досягненні в навантаженому зразку певної концентрації стабільних мікротріщин відбувається їх взаємодія, злиття і укрупнення, що приводить до появи мікротріщини. Новоутворена мікротріщина розвивається також за участю мікротріщин, що знаходяться в її вершині, причому поле перенапруг, що створюється мікротріщини, сприяє додаткової генерації мікротріщин в її вершині і злиття їх з мікротріщин.

Виникла необхідність доповнити новими методами розрахунку на міцність, які враховують закони зародження і розвитку тріщин, і новими характеристиками матеріалу, що оцінюють стадію руйнування.

В реальних умовах розвиток наявних в тілі початкових тріщин може залежати від матеріалу, форми і розмірів тіла, способу - додатки зовнішнього навантаження, числа циклів навантаження, температури, ступеня агресивності зовнішнього середовища, швидкості і передісторії деформування і ін.

Момент руйнування залізобетонних балок встановлювали на підставі критеріїв:

- порушення помилки бетону;
- перетин похилих тріщин стиснутої зони бетону;
- різка зміна деформацією бетону.

Характер втомного руйнування елементів, що згинаються на вапняковому піску визначався конструктивними особливостями елемента і характеристиками циклічного навантаження. Балки з прольотом $1{,}14\,h_0$ і коефіцієнтом асиметрії циклу 0,41 руйнувалися від роздроблення бетону

стиснутої зони над вершиною похилої тріщини при рівні зовнішнього навантаження, рівному 0,3 статичної міцності похилого перерізу. У залізобетонних балках з параметрами 2,0 і 2,86 h_0 незалежно від коефіцієнта асиметрії циклу і коефіцієнта поздовжнього армування, руйнування відбувалося від розриву поперечних стрижнів.

Накопичення втомних пошкоджень відбувалося інтенсивно в бетоні стиснутої зони похилого перерізу над вершиною похилої тріщини. У похилому перерізі, руйнування одного із складових компонентів балки не призводить до її руйнування. При подальшому додатку пульсуючого навантаження руйнування відбувається після невеликої кількості циклів. Так, у балок з малим прольотом зрізу (1,14 h_0) руйнування бетону стиснутої зони відбулося при $5 \cdot 10^4$ циклів, а конструкція зруйнувалася після $13 \cdot 10^4$ циклів повторного навантаження від втомного розриву поперечних стрижнів. У балках з великим прольотом зрізу (2,86 h_0), похила тріщина досягла верхньої межі або $3 \cdot 10^3$ циклів, а руйнування всієї системи відбулося при $5 \cdot 10^3$ циклів навантаження. При огляді балки виявлено, що поздовжня арматура зазнає місцевий вигин, а повне руйнування походить від втомного розриву стержнів поперечної арматури. При досягненні похилій тріщиною верхньої межі балки, відбувається перерозподіл зусиль. Деформації в бетоні зменшуються і зовнішнє навантаження сприймає поздовжня і поперечна арматура. Похила тріщина розділяє елемент як би на два блоки, обмежених нормальним перетином, що проходить через кінець похилій тріщини. Блоки з'єднуються між собою і з іншою частиною балок бетоном стиснутої зони, поздовжньої і поперечної арматурою. Зона руйнування при циклічному навантаженні по довжині прольоту тим більше, чим більша кількість циклів навантаження потрібно для руйнування. Так, для дослідних зразків з прольотом зрізу 2,0 h_0 , руйнування сталося від розриву хомутів діагональної тріщині, яка перетинає проліт зрізу від опори до місця прикладання навантаження, з роздавлюванням бетону у торців похилій тріщини в стислій зоні біля місця прикладання навантаження і опори. Поздовжня і поперечна арматура після появи тріщини чинили опір поперечної силі, зростаючої зі збільшенням діаметра арматури.

У балок з малої призмовою міцністю (17МПа) стомлююче руйнування відбувалося за розчином без розколювання зерен щебеню. Передбачається, що деформації стиснення бетону в момент руйнування у таких елементів значно менше, ніж у розчину. Середні напруги в розчині не досягають межі міцності при однорідному стисненні.

У балок з великою призмовою міцністю стомлююче руйнування почалося з руйнуванням зерен щебеню. Мабуть, при руйнуванні бетону по заповнювачу розрив зерен щебеню відбувається в результаті дії зосереджених сил в місці контакту зерен. При цьому виникають деформації місцевого стиснення.

Експеримент здійснено за планом типу Боксу-Бенкіна з однієї центральною точкою при загальній кількості дослідів n = 25. Параметрами виходу є числові значення функцій статичних моделей, що відображають вплив прольоту зрізу $a(1{,}14;\ 2{,}0;\ 2{,}86)\,h_0$, коефіцієнт поздовжнього армування $(0{,}013;\ 0{,}017;\ 0{,}023)\,\mu_s$, міцності бетону f_{cd} (17; 21; 25) МПа; коефіцієнта асиметрії циклу ρ_a (0,25; 0,33; 0,41), рівень навантаження $\gamma = \dfrac{V_{\max}}{V_p}$, кількості циклів до руйнування *lgN* і відносний рівень навантаження $\gamma^1 = \dfrac{V_{\max}}{V_p - V_{\max}}$.

В результаті обробки дослідних даних отримані адекватні математичні моделі для визначення несучої здатності залізобетонних балок за похилими перетином при дії багаторазово повторюваних навантажень.

$$\hat{y}_1 = \left(\gamma = \frac{V_{\max}}{V_p}\right) = 0{,}36 + 0{,}1\cdot x_1 + 0{,}04\cdot x_1^2 - 0{,}03\cdot x_2^3 + 0{,}05\cdot x_1\cdot x_2 + $$
$$+ 0{,}05\cdot x_1\cdot x_3 \qquad (1)$$

$$\hat{y}_2 = (\lg N) = 3{,}29 - 0{,}71\cdot x_1 + 0{,}29\cdot x_2 + 0{,}14\cdot x_3 + 0{,}4\cdot x_1^2 - 0{,}18\cdot x_3^2 + $$
$$+ 0{,}21\cdot x_4^2 - 0{,}32\cdot x_1\cdot x_2 - 0{,}18\cdot x_1\cdot x_4 + 0{,}07\cdot x_2\cdot x_3 + 0{,}34\cdot x_2\cdot x_4 + $$
$$0{,}32\cdot x_3\cdot x_4 \qquad (2)$$

$$\hat{y}_3 = \left(\gamma = \frac{V_{\min}}{V_p - V_{\max}}\right) = 0{,}65 - 0{,}03\cdot x_1 - 0{,}06\cdot x_2 + 0{,}14\cdot x_4 + 0{,}78\cdot x_1^2 + $$
$$+ 0{,}8\cdot x_2^2 + 0{,}75\cdot x_3^2 + 0{,}84\cdot x_2^4 + 0{,}02\cdot x_1\cdot x_2 + 0{,}005\cdot x_1\cdot x_4 + 0{,}42\cdot x_3\cdot $$
$$\cdot x_4 \qquad (3)$$

Аналізуючи рівняння (1) приходимо до висновку:

- на величину рівня навантаження - $\gamma = \dfrac{V_{\max}}{V_p}$ при $V_{\max}$ = *const* надає проліт зрізу. Взаємодіють між собою три фактори: проліт зрізу, міцність бетону і коефіцієнт поздовжнього армування. При збільшенні прольоту зрізу від 1,14 до 2,86 h_0 міцності бетону від 17 до 25 МПа, коефіцієнті поздовжнього армування μ_s от 0,013 до 0,023 – рівень навантаження

$\gamma = \dfrac{V_{\max}}{V_p}$ зростає по відношенню до своїх середніх значень на 38,5%, а також при різному поєднанні перерахованих факторів. Наявність квадратичних факторів за межами варіювання носитиме загасаючий характер, за винятком прольоту зрізу. (Рис. 1).

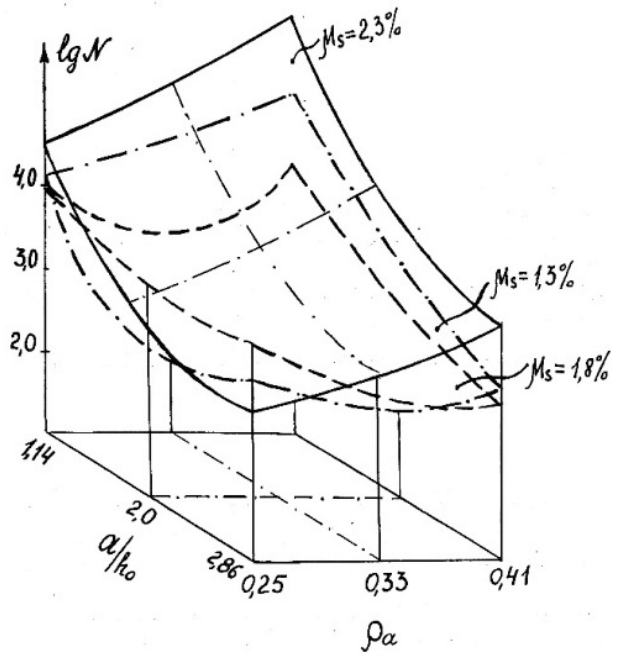

Рис.1. Залежність кількості циклів до руйнування при зміні величини прольоту зрізу (α) , коефіцієнта асиметрії циклу (ρ_a) при фіксованих значеннях відсотка поздовжнього армування (μ_S)

Розбіжність досвідчених значень і статистичних знаходилося в межах від 43% до 15% (0,71 - 1,18). Розбіжність досвідчених і розрахункових значень по ДСТУ [1] склало в середньому до 75%.

Аналізуючи рівняння (2) відзначаємо, на величину кількості циклів до руйнування впливають всі вибрані фактори і їх взаємодія. Залежність (2) має вигляд параболічної кривої. (Рис. 2).

За ступенем впливу чинники розташовані в наступній послідовності: проліт зрізу, потім коефіцієнт поздовжнього армування та коефіцієнт асиметрії циклу повторного навантаження і, нарешті, міцність бетону. При збільшенні прольоту зрізу від 1,14 до 2,86 h_0, коефіцієнта поздовжнього армування від 0,013 до 0,021, міцності бетону від 17 до 25 МПа, коефіцієнта асиметрії циклу від 0,25 до 0,41 - величина кількості циклів до руйнування збільшилася по відношенню до своїх середніх значень на 25%.

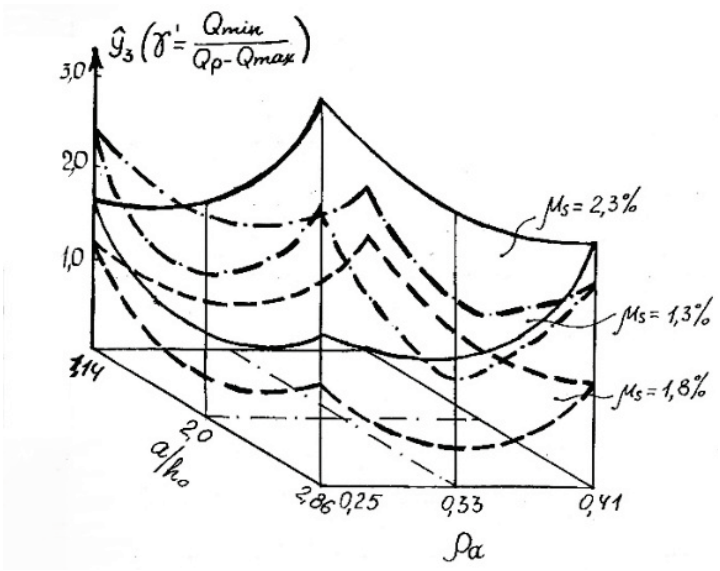

Рис.2. Залежність відносного рівня навантаження при зміні величини прольоту зрізу (α) , коефіцієнта асиметрії циклу (ρ_a) при фіксованих значеннях відсотка поздовжнього армування (μ_s)

Розбіжність досвідчених і статистичних значень отримано в межах від -24 до 21% при чисельних значеннях (0,81 - 1,28).

Аналіз рівняння (3) підтверджує справедливість гіпотези про залежність рівня навантаження $\gamma = \frac{V_{\max}}{V_p - V_{\max}}$ послідовно від прольоту зрізу, міцності бетону і коефіцієнта поздовжнього армування. Істотний вплив надає і їх взаємодія. Квадратичні ефекти свідчать про те, що область оптимуму знаходиться за межами виконаних досліджень. (Рис. 3).

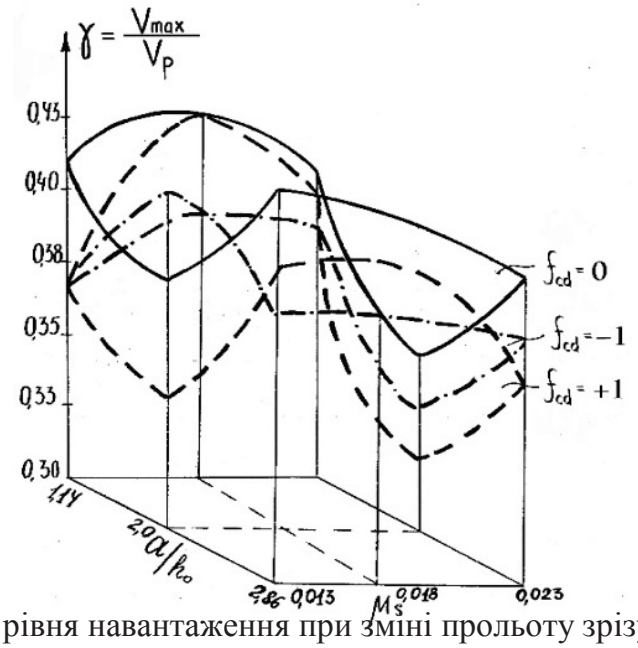

Рис.3 Залежність рівня навантаження при зміні прольоту зрізу (α), коефіцієнта поздовжнього армування розтягнутої зони (μ_s) при фіксованих значеннях міцності бетону (f_{cd})

Висновки:1. Результати експериментальних досліджень несучої здатності похилих перерізів згинальних елементів з бетонів на вапняковому піску при дії циклічних навантажень проаналізовані за допомогою застосування математичної статистики.

2. Експериментально встановлено факт зниження несучої здатності похилих перерізів дослідних балок. Відзначалася знижена опірність бетону на вапняковому піску розтягування і стиснення.

3. Зі збільшенням прольоту зрізу від 1,14 до 2,86 h_0 рівень навантаження $\gamma = \frac{V_{\max}}{V_p}$ збільшується. При цьому величина кількості циклів зменшується, що свідчить про зменшення несучої здатності по похилих перетинах залізобетонних балок.

4. Руйнуюча напруга при циклічному навантаженні менше, ніж при статичному. В основі процесу руйнування лежить множинне накопичення мікроскопічних тріщин. Одна з причин - взаємодія поля мікротріщин від зовнішнього навантаження циклу з залишковими тріщинами, що виникають в тілі після попередніх циклів.

5. Момент руйнування залізобетонних балок встановлений на підставі таких критеріїв:

- порушення суцільності бетону;
- перетин похилих тріщин стиснутої зони бетону;
- різка зміна деформацій бетону.

6. Характер втомного руйнування визначається конструктивними особливостями елемента і характеристиками циклічного навантаження.

1. Кушнарьова, Г. О. «Несуча здатність і розрахунок залізобетонних на вапняковому піску по похилих перетинах при дії багаторазово повторюваних навантажень.» Дисертація на здобуття наукового ступеня к.т.н. Одеса 1991. с. 249.

2. Бетонні та залізобетонні конструкції з Важко бетону. Правила проектування. ДСТУ Б В. 2.6 - НДІБК, 2010. Київ "МінрегіонбудУкраїні». - 156 с.

3. Дорофєєв В.С. «Дослідження елементів, що згинаються з дрібнозернистого вапнякового бетону при взаємодії поперечних сил» - Автореферат дисертації к.т.н., Одеса 1972-25с.

4. ДБН В.1.2-2: 2006 «Навантаження і впливи. Норми проектування» Мінбуд України - К: Видавництво «Сталь», 2006-с.60

5. Кушнарьова Г.О. Вплив дії багаторазово повторюваних навантажень на висоту стиснутої зони бетону. Вісник ОДАБА - №29, частина 2. Одеса. Зовнішрекламсервіс, 2008.

6. «Композиційні матеріали та конструкції: структура, самоорганізація, властивості» В.Н.Вировой, В.С.Дорофеев, В.Г. Суханов, Одеса 2010 с.169

7. Кушнарьова Г.О. «Стан та перспективи розвитку міцності Похил перерізів прогінніх залізобетонних елементів». Карпюк В.М. та інші, Вісник ОДАБА, Одеса Зовнішрекламсервіс 2013, с.