

УДК 624.012.45

РОБОТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ В ЗОНІ СПІЛЬНОЇ ДІЇ ЗГИНАЛЬНИХ МОМЕНТІВ І ПОПЕРЕЧНИХ СИЛ ПРИ РІЗНИХ ПРОЛЬОТАХ «ЗРІЗУ» ЗА ДІЇ ЦИКЛОВИХ ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ І ПОБУДОВА РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ

РАБОТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ЗОНЕ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ ИЗГИБАЕМЫХ МОМЕНТОВ И ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ ПРИ РАЗНЫХ ПРОЛЁТАХ «СРЕЗА» ЗА ДЕЙСТВИЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ ПОВТОРЯЕМЫХ НАГРУЗОК И ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

WORK CONCRETE STRUCTURES IN THE AREA JOINT ACTION BENDING MOMENTS AND SHEAR FORCES AT DIFFERENT SPANS "CUT" FOR THE CYCLIC REPEATED LOADING AND BUILDING OF COMPUTATIONAL MODELS

Масюк Г.Х., к.т.н., проф., Алексієвєць І.І., асистент, Дзюра А.І., студент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Масюк Г.Х., к.т.н., проф., Алексієвєц И.И., асистент, Дзюра А.И., студент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ривне)

Masyuk G.Kh., candidate of technical sciences, professor, Aleksyevets I.I., assistant, Dzyura A.I., student (National university of water management and nature resources use, Rivne)

За результатами експериментальних досліджень розглянута основа побудови розрахункової моделі похилих перерізів згинальних елементів за дії циклових навантажень при малих прольотах «зрізу».

За результатами експериментальних досліджень розглянута основа побудови розрахункової моделі нахилених сечень вигнутих елементів при дії циклических навантажень при малих прольотах «среза».

Based on the results of experimental studies the basics of building computational models of inclined sections bending elements for the actions of cyclic loads at low spans «cut».

Ключові слова:

Бетон, арматура, похилий переріз, циклічні навантаження.
Бетон, арматура, наклонное сечение, циклические нагрузки.
Concrete, reinforcement, downhill section, cyclic loading.

Вступ. Існуючі методи розрахунку похилих перерізів не в повній мірі відображають реальний характер роботи залізобетонних конструкцій при повторних, а тим більше при циклових знакозмінних навантаженнях в зоні спільної дії згинальних моментів і поперечних сил. Тому що вони не можуть враховувати специфіку роботи залізобетонних конструкцій при циклових навантаженнях і не дають гарантій отримання надійних і водночас економічних рішень. Як показує аналіз вказаних недоліків, вони являються наслідком відсутності в даний час фізичних і розрахункових моделей опору залізобетонних елементів дії поперечних сил, які б коректно відображали їх реальну роботу з урахуванням реального деформування бетону і арматури в складі залізобетонного елемента при різних прольотах «зрізу».

При циклічних навантаженнях тривала міцність бетону і арматури зменшується, а також збільшується повзучість бетону, що приводить до збільшення залишкових деформацій бетону. При цьому, як результат, розвиток деформацій повзучості бетону в стиснутих умовах, в процесі циклічного навантаження викликає непереривну зміну напружено-деформованого стану і межі витривалості бетону і арматури.

Після кожного пів циклу навантажень ми маємо конструкцію з іншими фізико-механічними характеристиками матеріалів порівняно з першим навантаженням. Це вже не така конструкція, яка була при першому навантаженні, а інша. Тому, після кожного напівциклу завантаження ми маємо нібито нові конструкції. В зв'язку з цим в кожний момент часу необхідно одночасно оцінювати внутрішні зусилля (напруження) і стан бетону і арматури (залишкову міцність) в складі конструкції.

Мета і задачі: на основі аналізу експериментальних досліджень автора і інших авторів побудувати розрахункову модель залізобетонного згинального елемента дії поперечних сил при різних прольотах «зрізу».

Основна частина. Результати експериментів у вигляді основних параметрів, які характеризують напружено-деформований стан зони сумісної дії згинального моменту і поперечної сили, а також методика випробувань наведені в роботі [1].

Як відомо, в теорії залізобетону створення методів розрахунку починається з експерименту і аналізу схем руйнування і на основі цих даних будуються фізичні і розрахункові моделі. Від того наскільки ці розрахункові моделі коректно відображають роботу залізобетонних конструкцій в зоні спільної дії згинальних моментів і поперечних сил при циклічних навантаженнях, настільки будуть коректні умови міцності, які будуть записані для цих об'єктів.

Аналізуючи експериментальні дані роботи балок за дії циклових знако-

змінних навантажень при різних прольотах «зрізу» бачимо, що напружено-деформований стан похилих перерізів буде не однаковим при одному і тому ж рівні. У балках з прольотом «зрізу» більшим за $c_0 > 3d$ напруження в похилих перерізах будуть меншими ніж у балках з прольотом «зрізу» $c_0 < 2d$. Робота балок з малими прольотами «зрізу» подібна до роботи «коротких» (високих) елементів.

Для практичних розрахунків «коротких» елементів найбільш простим рішенням задачі являє собою створення розрахункової моделі у вигляді каркасно-стержневої системи (КСС), яка складається із похилих стиснутих полос і розтягнутих арматурних поясів, що замикаються в місцях прикладення зовнішнього навантаження і опорних реакціях. Каркасно-стержневий аналог широко використовується також в практиці проектування залізобетонних конструкцій за кордоном.

Аналізуючи результати випробувань звичайних балок з малим прольотом «зрізу» ($c_0 < 2d$) багатьох авторів і аналогію з «короткими» елементами, на основі існуючих розрахункових моделей «коротких» елементів для статичного навантаження норм ЄКБ-ФІП і інших дослідників (Т.І. Баранової, О.С. Залесова, О.В. Старчевського, В.М. Сахарова) каркасно-стержнева модель опору звичайних балок дії поперечних сил при малих прольотах «зрізу» можна подати в такому вигляді (рис.1).

Моделюючи роботу при опорної зони залізобетонної балки при малих прольотах «зрізу» каркасно-стержневою моделлю елемента можна доводити, що міцність згинального елемента в зоні дії поперечних сил визначається міцністю кожного елемента КСС: похилих стиснутих полос і поздовжньої розтягнутої арматури.

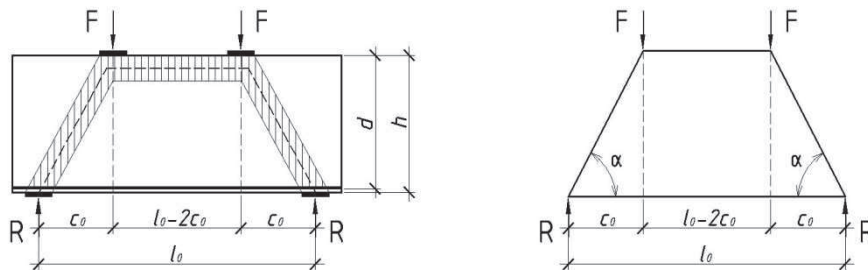


Рис.1. Розрахункова каркасно-стержнева модель балки з малим прольотом «зрізу» за дії повторних навантажень

Аналіз результатів експериментів показує, що при циклічних повторних навантаженнях в залізобетонних елементах з малим прольотом «зрізу» ($c_0 < 2d$) руйнування в зоні дії поперечних сил дійсно відбувається або по похилій стиснутій полосі або по розтягнутій зоні в результаті розриву поздовжньої арматури в місці перетину з похилою тріщиною або в результаті пору-

шення анкерування арматури за похилою тріщиною. Тому для забезпечення міцності і витривалості таких елементів необхідно визначати напруження в середині похилого стискаючого силового потоку і в поздовжній арматурі в місці перетину з похилою тріщиною. Діючі напруження обмежувати значеннями межі міцності і витривалості бетону, арматури і їх зчеплення між собою, тобто для забезпечення довговічності таких залізобетонних конструкцій необхідно дотримуватись умов:

$$\sigma_{1c}^{max}(t) \leq f_{cd, fat}(t), \sigma_s^{max}(t) \leq f_{yd}(t), \sigma_{sa}^{max}(t) \leq f_{bd}(t) \quad (1)$$

де, $\sigma_{1c}^{max}(t)$ - стискаючі напруження в похилому стискаючому силовому потоці;

$\sigma_s^{max}(t)$ - максимальні розтягуючі напруження в найбільш навантажених волокнах поздовжньої арматури в місці перетину її з похилою тріщиною;

$\sigma_{sa}^{max}(t)$ - максимальні осьові розтягуючі напруження в поздовжній арматурі в місці перетину її з похилою тріщиною;

$f_{cd, fat}(t)$ - межа витривалості бетону на місцевий стиск при циклічних навантаженнях;

$f_{yd}(t)$ - розрахункова міцність арматури на межі текучості;

$f_{bd}(t)$ - межа витривалості анкерування поздовжньої арматури.

Як показують експериментальні дослідження, напружено-деформований стан всередині похилого стискаючого потоку подібний напружено-деформованому стану в плоских елементах за дії місцевого навантаження. Тому для оцінки міцності похилої стиснутої полоси за дії циклічних навантажень можна застосувати розрахункову модель втомленого опору і рівняння об'єктивної міцності залізобетону за дії місцевого циклового навантаження стиску. В зв'язку з викладеним, якщо вісь «1» направити вздовж поздовжньої вісі похилого стискаючого силового потоку, а вісь «2» - в ортогональному напрямку, можна відобразити розрахункову модель в такому вигляді (рис.2).

Оскільки розвиток деформацій повзучості $\varepsilon_{1c,p}(t_0)$ в стиснутому бетоні в напрямку дії напружень $\sigma_{1c}^{max}(t_0)$ як і при місцевому стисненні відбувається у вільних умовах і ніщо не перешкоджає їх розвитку, то на підставі цього можна записати наступне:

$$\sigma_{1c}^{dos}(t) = 0; \sigma_s^{dos}(t) \approx 0; \sigma_{1c}^{max}(t) = \sigma_{1c}^{max}(t_0); \sigma_s^{max}(t) \approx \sigma_s^{max}(t_0) \quad (2)$$

де, $\sigma_{1c}^{max}(t_0), \sigma_s^{max}(t_0)$ дуже легко визначаються при першому статичному навантаженні із умов рівноваги на основі розрахункової моделі втомленого опору залізобетону.

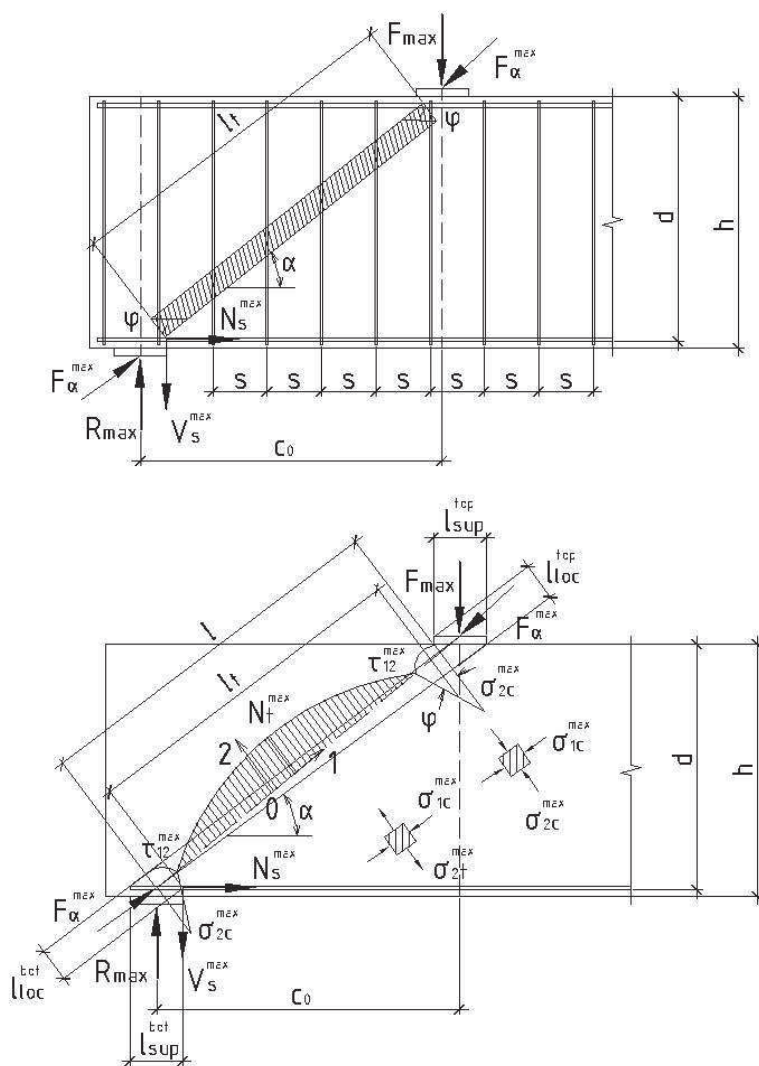


Рис.2. Розрахункова модель втомленого опору залізобетонних згинальних елементів дії поперечних сил при малому прольоті «зрізу»

В зв'язку з тим, що напружено-деформований стан в середині похилої стиснутої полоси і характер втомленого руйнування в плосконапружених елементах за дії місцевого навантаження, то рівняння для визначення об'єктивної межі витривалості похилої стиснутої полоси на певний момент

часу t отримаємо аналогічно як і рівняння об'єктивної міцності залізобетону при місцевому циклічному навантаженні в спрощеному вигляді:

$$f_{cd, fat} = \frac{(\gamma_{def}(t) + \gamma_{irr}(t) \cos \alpha) l_t \operatorname{ctg} \varphi}{l_{exp} \sin \alpha \sqrt{\pi l(t) U(t)}} \times \left\{ \left(1 - \left[\frac{G_{cd} L_{\varepsilon}}{\sin^2 \varphi} + \frac{G E_s l_s L_{\varepsilon} n \sin \alpha \cos(\varphi - \alpha)}{\sin \varphi \left(d_s^4 \sqrt{\frac{E_s}{E_{cd}}} (1,4 + 1,25 \sqrt{\frac{d_s}{d_s}}) \right)^3} \right] \right)^{-1} d_s \right\} \quad (3)$$

де, γ_{def} – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень в стиснутому бетоні стиснутої похилої полоси;

γ_{irr} – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, який характеризує стримування впливу поперечних стержнів на розвиток тріщин в середині похилого стискаючого потоку;

L_{ε} – довжина анкерування арматури;

d_s – захисний шар бетону;

d_s – діаметр поздовжньої арматури;

α – кут нахилу стиснутої полоси;

n – кількість циклів.

Процес циклової втомленості арматури характеризується утворенням і розвитком мікротріщин в ній. Начало втомлених мікротріщин виникає в результаті інтенсивного пластичного деформування арматури в локальних об'ємах концентрації напружень в арматурі, основним джерелом яких являється періодичний профіль арматури. Це приводить до значних замкнених петель гістерезиса, площа яких дорівнює енергії, яка розсіяна протягом одного циклу завантаження. Після вичерпання пластичного ресурсу в цих локальних пластично деформованих об'ємах утворюються мікротріщини, одна з яких може перерости в магістральну тріщину. При подальшому збільшенні циклічного навантаження виникає розвиток магістральної тріщини до критичних розмірів. В зв'язку з цим для аналітичного опису процесу втомленого руйнування і зміну міцності втомлення сталевий арматури в складі залізобетонного елемента при циклічних навантаженнях залучаються методи механіки руйнування. Межа витривалості (об'єктивна міцність) поздовжньої арматури в даний момент часу t в місці перетину з похилою тріщиною в умовах плоского напруженого стану визначаємо як:

$$f_{yd}(t) = \sigma_s K_{scf}(t) / \sqrt{(U(t) \sigma_s)^2 l_s(t) + k_f^2(t)}, \quad (4)$$

де, K_{scf} – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень при циклічному навантаженні на даний момент часу t .

Процес циклової втомленості анкерування арматури характеризується

утворенням і розвитком тріщин втомленості в контактній зоні між арматурою і бетоном. Якщо рівень напружень щеплення арматури з бетоном буде високим τ_q і вони будуть більше межі витривалості щеплення, тобто $\tau_q/\tau_{щп} > 1$, то відбувається зародження і розвиток декількох конусоподібних тріщин втомленості в контактній зоні арматури з бетоном. Утворення таких тріщин пов'язано з роботою бетону під виступами арматури, а значить і сили щеплення виступів арматури необхідно визначати як функцію довжини конусотворної тріщини $l(t)$, яка постійно збільшується зі збільшенням кількості циклів. Для аналітичного опису процесу втомленого руйнування контактної зони і зміну втомленої міцності анкерування поздовжньої арматури за дії циклічних навантажень використовують методи механіки руйнування.

Межу витривалості анкерування поздовжньої арматури в любий момент часу визначаємо за умовою:

$$f_{bd}(t) = k_{def}(t) \operatorname{ctg} \varphi \left(\frac{1,5a}{\cos \varphi_k} - \frac{c_r}{\sin \varphi_k} \sin \varphi \cos \varphi \right) (d + 2c_r + 0,75a - 0,5c_r \operatorname{ctg} \varphi_k \sin \varphi \cos \varphi) (1,5(1 + \sin \alpha_r) - \sqrt{\sin \alpha_r}) \cdot \frac{2\tau_q(d + 2c_r)(L + L_{pl})}{d^2} (\pi l(t, \tau) U(l) s_r (d + 2c_r) 2\varphi_k \sin \alpha_r)^{-1} \cdot \left(1 - \frac{G_{ca}(3a \operatorname{ctg} \varphi_k - 2c_r \sin \varphi \cos \varphi) \cdot A_{sk}}{c_r \cos \varphi \sin^2 \varphi} \cdot \frac{A_{sk}}{A_c} \right) \quad (5)$$

де c_r , s_r , α_r – відповідно висота, крок і кут нахилу виступів арматури.

Висновки. В основу побудови розрахункової моделі опору залізобетону в похилих перерізах за дії поперечної сили покладено накопичений об'єм дослідних даних своїх та інших авторів.

1. Корнійчук О.І. Міцність та тріщиностійкість похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів при дії малоциклових знакозмінних навантажень: Дис. канд. техн. наук. – Рівне: 2009.-191с. 2. Мирсаянов Ил.Т. Физические модели усталостного сопротивления железобетонных элементов действию поперечных сил // Изв. ВУЗов: «Строительство». – Новосибирск, 2006, №8. – с.4-13.