

ОСОБЛИВОСТІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ МАЛО ЦИКЛОВОМУ ПОПЕРЕЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Жмудюк О.О., Савов С.С, Семенюк Е.Г.

Науковий керівник – Карнюк В.М.

Мета. Дослідити та проаналізувати поведінку приопорних ділянок прогінних залізобетонних балкових елементів за дії малоциклових знакопостійних і знаковмінних навантажень з урахуванням конструктивних чинників та чинників зовнішньої дії задля подальшого використання отриманих результатів при вдосконаленні інженерної методики їх розрахунку.

Методика. Для вивчення зазначеної проблеми виконано 3 серії експериментальних досліджень. Дослідні зразки – це залізобетонні балки прямокутного перерізу з розмірами 200x100 мм, довжиною 1975 мм, армовані двома плоскими зварними каркасами з симетрично розташованою поздовжньою нижньою та верхньою арматурою 2 \varnothing 14A500С і поперечною 2 \varnothing 3, 4, 5 ВрІ з відносними прольотами зрізу $a/h_0 = 1, 2, 3$, виготовлені з важкого бетону класів $C 16/20, C 30/35, C40/50$ та випробувані короточасним статичним, малоцикловим знаковмінним ($\eta = \pm 0,50; \pm 0,65; \pm 0,80$) та циклічним знакопостійним ($\eta = 0 \dots 0,50; 0 \dots 0,65; 0 \dots 0,85$) навантаженнями.

Результати. В приведеному матеріалі розглядаються та аналізуються отримані та оброблені експериментальні дані, які роковують вплив малоциклових знакопостійних та знаковмінних навантажень високих рівнів на основні показники тріщиностійкості та міцності похилих і нормальних перерізів приопорних ділянок прогінних залізобетонних конструкцій, урахуовуючи зміну обраних при плануванні експерименту конструктивних факторів та факторів зовнішньої дії.

Наукова новизна. В статті приведені дослідні дані, які відображають нові особливості роботи залізобетонних балкових елементів за дії навантажень вказаних видів.

Практична значимість. Результати досліджень за обраною тематикою отримують розповсюдження при проектуванні та розрахунках приопорних ділянок прогінних залізобетонних елементів,

які зазнають дії малоциклових навантажень, а також можуть бути використані у навчальному процесі ВНЗ технічного профілю.

Ключові слова: малоциклове знакозмінне навантаження; циклічне знакопостійне навантаження; міцність; тріщиностійкість; математична модель; залізобетонна балка.

Вступ. У зв'язку з тим, що малоциклові знакопостійні та знакозмінні навантаження виникають доволі часто та діють на елементи залізобетонних конструкцій специфічним чином – їхній вплив на механічні та деформативні параметри зразків потребує детального та ґрунтовного вивчення та аналізу. Адже процеси, які проходять в елементі за дії вказаного виду навантаження зумовлені нелінійністю деформування, мікротріщиноутворенням, накопиченням залишкових деформацій, малоцикловою втомленістю, розуцільненням бетону та ін.

Постановка проблеми. Потрібно зауважити, що у національних вітчизняних і закордонних нормативних документах повною мірою особливості дії циклічних знакопостійних, а особливо, знакозмінних навантажень не враховуються, не дивлячись на певні відмінності дії вказаних навантажень від дії короткочасних одноразових. Тому є доцільним проведення досліджень у цьому напрямку та поповнення банку експериментальних даних заради вдосконалення інженерних методик розрахунку припорних ділянок залізобетонних балкових елементів при вказаних умовах.

Аналіз останніх досліджень. Достатньо багато вітчизняних та закордонних вчених проводили дослідження відносно вказаного питання. Ще з 1961 року проблемою опору залізобетону дії циклічного навантаження зайнявся Л. П. Макаренко та його учні: Є. М. Бабич, Н. М. Бітько, А. В. Гергель, В. В. Масліченко, Г. Х. Масюк, В. Н. Рубель, І. Д. Свиаренко, Г. А. Фенко та ін.

У питанні побудови діаграм деформування бетону за дії малоциклових навантажень значних успіхів дійшли М. І. Карпенко [14], Т. М. Пецольд, В. В. Тур [23], Ю. Г. Болошенко [3] та ін.

Відомі роботи Є. М. Бабича [1], Г. Х. Масюка [21], Й. Й. Лучка [20], В. С. Дорофєєва [6, 7, 26], В. М. Карпюка [15-17], П. С. Гомона [5], О. О. Заречанського [10], М. С. Зінчука [11], С. Х. Карапетяна [13], О. І. Корнійчука [19], П. І. Герба [4], С. Я. Дробишинця [8], В. Є. Бабича [2], Я. І. Ковальчика [18], В. Ю. Каравана [12], О. Н. Кухнюка, Ю. М. Панчука, І. Т. Мирсаяпова [22] та ін. по вивченню працездатності складнонапружених залізобетонних конструкцій в умовах одноразових, повторних малоциклових та інших навантажень, звичайних, підсилених, при підвищених температурах тощо.

Серед робіт іноземних науковців можна відмітити роботи R. C. Fenwick, A. Fong, J. A. O. Barros, F. Aslani, R. Jowkarmeimandi [24], W. Trapko, T. Trapko [25] та ін.

Не дивлячись на достатньо великий доробок вчених стосовно обраного питання, поки що не існує загальноприйнятого методу розрахунку залізобетонних конструкцій в умовах малоциклових навантажень.

Мета роботи – встановити вплив конструктивних чинників та чинників зовнішньої дії на показники міцності, тріщиностійкості та деформативності залізобетонних балкових конструкцій за дії малоциклових знакопостійних і знакозмінних навантажень.

Методика досліджень. Задля вирішення означеного питання згідно з прийнятою методологією [17] було заплановано та виконано 3 серії експериментальних випробувань на дію статичного короткочасного, малоциклового знакозмінного, та циклічного знакопостійного навантажень. В якості змінних факторів були обрані наступні: величина відносного прольоту зрізу a/h_0 , яка змінювалась на трьох рівнях: $a = h_0, 2h_0$ і $3h_0$; клас важкого бетону трьох видів $C 16/20, C 30/35, C 40/50$; кількість поперечного армування на приопорних ділянках $\rho_{sw} = 0,0016; 0,0029; 0,0044$ ($2\emptyset 3, 4$ і 5 Вр1); рівень знакозмінного: $\eta = \pm 0,50; \pm 0,65; \pm 0,80$ та знакопостійного: $\eta = 0 \dots 0,50; 0 \dots 0,65; 0 \dots 0,85$ навантажень від фактичної міцності балок, тобто величини поперечного навантаження напередодні руйнування, при якому ширина розкриття похилих тріщин w_k перевищувала $0,4$ мм, а стріла прогинів $f \geq l/150$.

Спочатку почергово випробували 25 дослідних балок першої

серії на дію одноразового короткочасного ступеневого навантаження, практично, до руйнівного стану за вказаними вище ознаками. Надалі випробували аналогічні дослідні балки другої та третьої серій на дію, відповідно, знакозмінного та знакопостійного небагатоповторного поперечного навантаження згідно плану експерименту. Кількість циклів знакозмінного і знакопостійного навантажень складала не менше 10, якщо зразки не руйнувалися при меншому числі циклів.

Результати

В результаті обробки отриманих експериментальних даних, вилучення незначимих та перерахунку тих коефіцієнтів, що залишилися, за допомогою ефективної комп'ютерної програми COMPEX, розробленої проф. В. А. Вознесенськими, отримали адекватні математичні моделі міцності, тобто руйнуючої поперечної сили V_u :

$$\hat{Y}(V_{u,1}) = 98 - 41X_1 + 12X_2 + 6X_3 + 16X_1^2 - 7X_2^2 - 5X_3^2 - 7X_1X_2, \text{ кН} \quad (1)$$

$$\hat{Y}(V_{u,1} / bh_0) = 5,60 - 2,34X_1 + 0,69X_2 + 0,34X_3 + 0,91X_1^2 - 0,40X_2^2 - 0,29X_3^2 - 0,40X_1X_2, \text{ МПа} \quad (1,a)$$

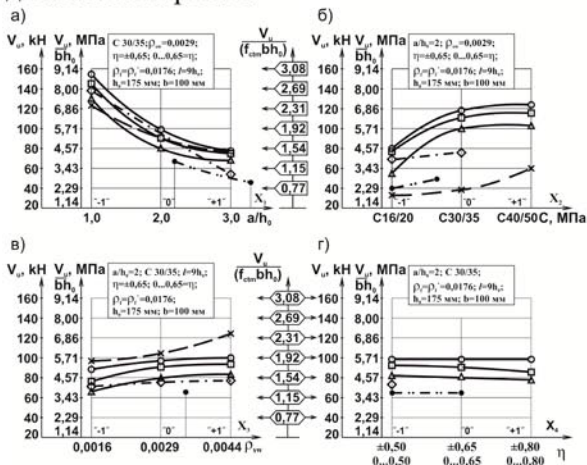
$$\hat{Y}(V_{u,2}) = 80 - 33X_1 + 13X_2 + 6X_3 - 2X_4 + 21X_1^2 - 12X_2^2 - 5X_3^2 - 7X_1X_2, \text{ кН} \quad (2)$$

$$\hat{Y}(V_{u,2} / bh_0) = 4,57 - 1,89X_1 + 0,74X_2 + 0,34X_3 - 0,11X_4 + 1,20X_1^2 - 0,69X_2^2 - 0,29X_3^2 - 0,40X_1X_2, \text{ МПа} \quad (2,a)$$

$$\hat{Y}(V_{u,3}) = 90 - 36X_1 + 10X_2 + 7X_3 - 3X_4 + 18X_1^2 - 6X_2^2 - 6X_3^2 - 2X_4^2 - 8X_1X_2 + 2X_1X_4, \text{ кН} \quad (3)$$

$$\hat{Y}(V_{u,3} / bh_0) = 5,14 - 2,06X_1 + 0,57X_2 + 0,40X_3 - 0,17X_4 + 1,03X_1^2 - 0,34X_2^2 - 0,34X_3^2 - 0,11X_4^2 - 0,46X_1X_2 + 0,11X_1X_4, \text{ МПа} \quad (3,a)$$

Геометрична інтерпретація приведеної несучої здатності припорних ділянок дослідних зразків-балок частково може бути представлена на рис. 1.



Умовні позначення:

- — дані Е. І. Албу, Д.С. Даниленка, Ю.А. Сєминой при однократному статическому навантаженні (1 серія);
- ▲ — дані Е. І. Албу при знакоперемінній малоциклової навантаженні (2 серія);
- — дані Ю.А. Сєминой при знакопостійному небагатократно повторному навантаженні (3 серія);
- × — дані А.С. Залєсова і Ю.А. Климова;
- ◇ — дані Н.М. Ярошевич;
- — дані А.І. Корнейчука.

Рис. 1. Вплив конструктивних факторів (прольоту зрізу(а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г) на міцність припорних ділянок випробуваних балок

Серед конструктивних чинників найбільший вплив на несучу здатність припорних ділянок дослідних елементів має прольот зрізу (рис. 1, а). В цілому, підтверджується виявлена О.С. Залєсовим, Ю.А. Климовим [9] та іншими дослідниками [4-8, 10-13, 14-22] закономірність нелінійного (затухаючого) зменшення міцності похилих перерізів балок зі збільшенням прольоту зрізу.

З підвищенням класу бетону від C16/20 до C40/50 відбувається нелінійне затухаюче (непропорційне) збільшення міцності вказаних ділянок у всіх серіях (рис. 1, б).

Аналогічна картина спостерігається з підвищенням коефіцієнту поперечного армування ρ_{sw} від 0,0016 до 0,0044 (рис. 1, в).

Фактори зовнішнього впливу, насамперед, характер циклічного навантаження, має суттєвий вплив на вихідний параметр, що розглядається. Так, якщо при знакопостійному малоцикловому навантаженні середнє значення міцності припорних ділянок дослідних зразків зменшується на 8,2% порівняно з несучою здатністю балок першої серії, випробуваних без повторного навантаження, то при знакозмінному циклічному навантаженні – на 18,4%. Така тенденція зберігається у всіх діапазонах зміни дослідних факторів (рис. 1, а, б, в, г). При цьому, величина рівнів знакозмінного та знакопостійного навантаження ($\eta = \pm 0,50 \dots \pm 0,80; 0 \dots 0,80$) мало впливає на кінцевий результат (рис. 1, г).

Під час випробувань дослідних зразків-балок на дію короткочасного одноразового та малоциклового навантаження слідкували за утворенням, розвитком та шириною розкриття тріщин на їхній поверхні.

Максимальна ширина розкриття нормальних тріщин на рівні розтягнутої арматури в зоні чистого згину при заданих планом рівнях навантаження майже не залежить від його виду і може бути охарактеризована наступною математичною моделлю:

$$\hat{Y}(w_{cr 1,2,3}^{1,\eta Fu}) = 0,14 + 0,02X_1 + 0,03X_2 + 0,01X_3 + \\ + 0,05X_4 + 0,01X_1^2 - 0,03X_2^2 + 0,02X_4^2 + 0,01X_1X_3 + \\ + 0,01X_1X_4 + 0,02X_2X_4 + 0,01X_3X_4, \text{ мм} \quad (4)$$

геометрична інтерпретація якої може бути представлена рис. 2.

Аналіз математичної моделі (4) показує, що максимальна ширина розкриття нормальних тріщин в зоні чистого згину в зазначених серіях збільшується порівняно з середнім значенням 0,14 мм при середніх значеннях дослідних факторів:

- зі збільшенням величини відносного прольоту зрізу a/h_0 від 1 до 3 на 29%;

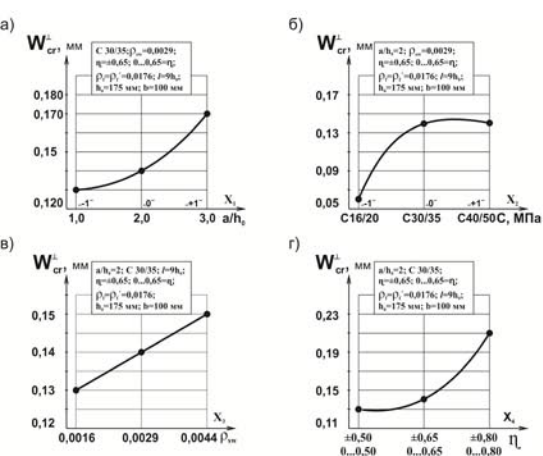


Рис. 2. Вплив величини відносного прольоту зрізу (а), міцності бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г) на максимальну ширину розкриття нормальних тріщин в зоні чистого згину при заданих планом рівнях навантаження

- зі збільшенням класу бетону від C 16/20 до C 40/50 (власне, до C 30/35) на 43%;
- зі збільшенням кількості поперечного армування ρ_{sw} від 0,0016 до 0,0044 на 14%;
- з підвищенням рівня навантаження η від 0,5 до 0,8 F_u на 71%;
- одночасним збільшенням:
 - величини відносного прогону зрізу і кількості поперечного армування в зазначених межах на 7%;
 - величини відносного прогону зрізу і рівня навантаження на 7%;
 - класу бетону внаслідок збільшення несучої здатності і рівня навантаження на 14%;
 - кількості поперечного армування за тією ж причиною і рівня навантаження на 7%.

Максимальна ширина розкриття похилих тріщин посередині висоти приопорних ділянок при заданих планом рівнях навантаження у серіях, що розглядаються, може бути охарактеризована трьома подібними за структурою математичними моделями:

$$\hat{Y}(w_{cr,l}^{\eta F_u}) = 0,35 - 0,06X_1 - 0,03X_2 - 0,01X_3 - 0,14X_4 - 0,01X_1X_3 - 0,03X_2X_4 -$$

$$-0,02X_3X_4, \text{ мм} \quad (5)$$

$$\hat{Y}(w_{cr,2}^{\eta Fu}) = 0,63 + 0,05X_1 + 0,05X_2 - 0,06X_3 + \\ + 0,24X_4 - 0,02X_2^2 + 0,02X_3^2 + 0,02X_4^2 + \\ + 0,11X_1X_2 - 0,03X_1X_3 - 0,06X_3X_4, \text{ мм} \quad (6)$$

$$\hat{Y}(w_{cr,2}^{\eta Fu}) = 0,40 - 0,05X_1 - 0,03X_2 + 0,16X_4 - \\ - 0,03X_1X_3, \text{ мм} \quad (7)$$

геометрична інтерпретація яких відображена на рис. 3.

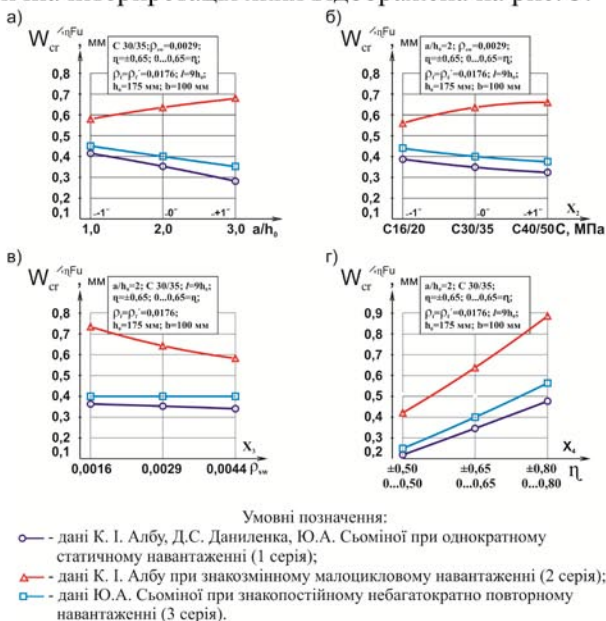


Рис. 3. Залежність максимальної ширини розкриття похилих тріщин на приопорних ділянках при заданих планом рівнях навантаження від відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г)

Для можливості порівняння отриманих експериментальних даних з результатами досліджень інших авторів абсолютно представити максимальні довжини проєкцій та кути нахилу небезпечних похилих тріщин до поздовжньої осі дослідних

елементів у вигляді приведених до робочої висоти перерізу лінійних моделей по серіях:

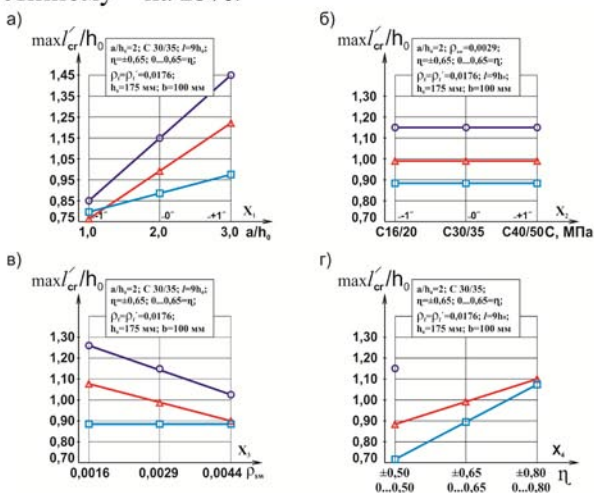
$$\hat{Y}(\max l'_{cr,1} / h_0) = 1,15 + 0,30X_1 - 0,11X_3 - 0,02X_1X_2 - 0,13X_1X_3 \quad (8)$$

$$\hat{Y}(\max l'_{cr,2} / h_0) = 0,99 + 0,23X_1 - 0,09X_3 + 0,11X_4 + 0,09X_1X_2 - 0,04X_1X_3 \quad (9)$$

$$\hat{Y}(\max l'_{cr,3} / h_0) = 0,89 + 0,07X_1 + 0,19X_4 + 0,16X_1X_4 \quad (10)$$

графічне відображення яких представлено на рис. 4.

Аналіз представлених моделей показує, що середні значення небезпечної похилої тріщини при малоцикловому знакозмінному навантаженні зменшуються на 14%, а при знакопостійному – на 23%.



Умовні позначення:

- - дані К. І. Албу, Д.С. Даниленка, Ю.А. Сьоміної при однократному статичному навантаженні (1 серія);
- △ - дані К. І. Албу при знакозмінному малоцикловому навантаженні (2 серія);
- - дані Ю.А. Сьоміної при знакопостійному небагатократно повторному навантаженні (3 серія).

Рис. 4. Залежність максимальної довжини проекції небезпечної похилої тріщини на поздовжню вісь балки перед руйнуванням від величини відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г)

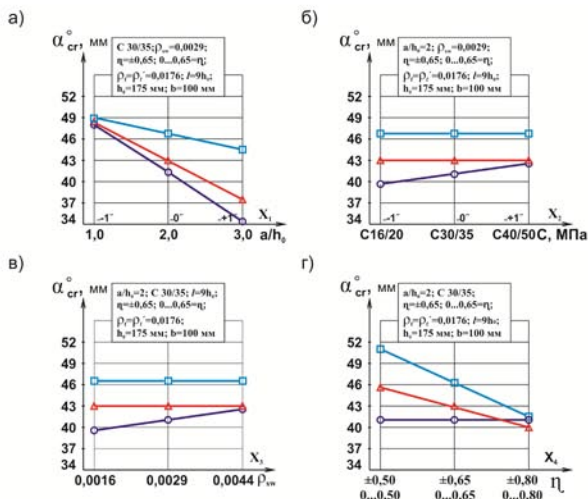
Обробка експериментальних значень кутів нахилу небезпечної похилої тріщини до поздовжньої осі елемента у дослідних серіях дозволила отримати наступні математичні моделі:

$$\hat{Y}(\alpha_{cr,1}^{\circ}) = 41,2 - 6,8X_1 + 1,6X_2 + 2X_3, \text{ град.} \quad (11)$$

$$\hat{Y}(\alpha_{cr,2}^{\circ}) = 43,0 - 5,3X_1 - 2,9X_4, \text{ град.} \quad (12)$$

$$\hat{Y}(\alpha_{cr,3}^{\circ}) = 46,5 - 2,1X_1 - 5,2X_4, \text{ град.} \quad (13)$$

геометрична інтерпретація яких наведена на рис. 4.



Умовні позначення:

- — дані К. І. Албу, Д.С. Даниленка, Ю.А. Сьоміної при однократному статичному навантаженні (1 серія);
- ▲ — дані К. І. Албу при знакозмінному малоцикловому навантаженні (2 серія);
- — дані Ю.А. Сьоміної при знакопостійному небагатократно повторному навантаженні (3 серія).

Рис. 5. Вплив величини відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г) на кут нахилу небезпечної похилої тріщини до поздовжньої осі елемента

Аналіз досить простих лінійних моделей (11)...(13) показує, що кути нахилу небезпечних похилих тріщин зменшуються по

відношенню до своїх середніх значень 41,2°; 43,0°; 46,5°, відповідно, у 1, 2 і 3 серіях дослідів:

- при збільшенні відносного прогону зрізу a/h_0 від 1 до 3 на 33, 25 і 9%;

- при збільшенні рівнів малоциклового знакозмінного і знакопостійного навантажень від 0,5 до 0,8, відповідно, на 13 і 22%;

- при зменшенні класу бетону від C 40/50 до C 16/20 на 8% і кількості поперечної арматури ρ_{sw} від 0,0044 до 0,0016 на 10% у серії дослідів при однократному статичному ступеневому зростаючому навантаженні.

Відносні відстані між нормальними тріщинами в зоні чистого згину в проведених дослідженнях можуть бути охарактеризовані моделями:

$$\hat{Y}(l_{cr,1}^{\perp\perp} / h_0) = 0,39 - 0,03X_1 + 0,01X_2 + 0,02X_1X_3 \quad (14)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,2}^{\perp\perp} / h_0) = 0,41 - 0,014X_1 + 0,011X_2 - 0,01X_3 \quad (15)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,3}^{\perp\perp} / h_0) = 0,38 - 0,02X_1 + 0,01X_2 - 0,01X_3 - 0,03X_4 - 0,01X_1X_2 \quad (16)$$

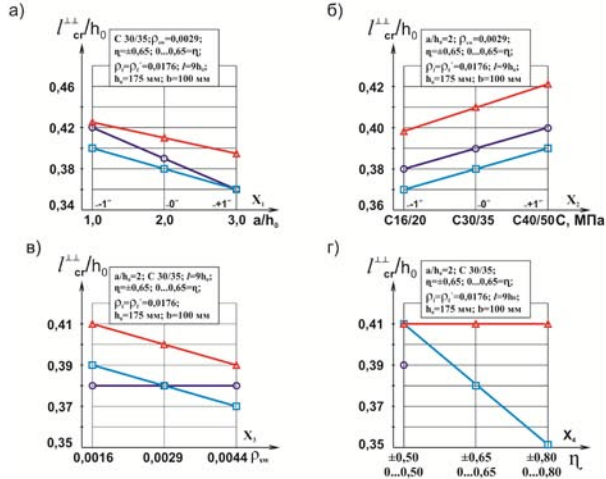
геометричне відображення яких представлено на рис. 6.

Як видно з моделей (14)...(16), приведені до h_0 середні відстані між вказаними тріщинами є досить близькими по серіях і коливаються у межах 0,38...0,41. Окрім того, характер впливу дослідних факторів по серіях, як видно з рис. 6, а, б, в, є однотипним.

Аналогічні математичні моделі відносних віддалей між похилими тріщинами на припорних ділянках дослідних елементів мають вигляд:

$$\hat{Y}(l_{cr,1}^{//} / h_0) = 0,55 + 0,15X_1 + 0,01X_2 - 0,02X_3 \quad (17)$$

$$\hat{Y}(l_{cr,2}^{//} / h_0) = 0,56 + 0,13X_1 - 0,03X_3 + 0,04X_1X_2 - 0,02X_1X_3 - 0,03X_2X_3 \quad (18)$$



Умовні позначення:

- — дані К. І. Албу, Д.С. Даниленка, Ю.А. Сьоміної при однократному статичному навантаженні (1 серія);
- ▲ — дані К. І. Албу при знакозмінному малоцикловому навантаженні (2 серія);
- — дані Ю.А. Сьоміної при знакопостійному небагатократно повторному навантаженні (3 серія).

Рис. 6. Залежність відносної відстані між нормальними тріщинами в зоні чистого згину від величини відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в), а також рівнів та режимів навантаження (г)

$$\hat{Y}(l_{cr,3}^{II}/h_0) = 0,38 + 0,07X_1 + 0,01X_2 - 0,01X_3 - 0,02X_1X_3 \quad (19)$$

геометрична інтерпретація яких відображена на рис. 7.

Характерним для означених моделей є те, що рівень як одноразового статичного (1 серія), так і малоциклових повторних навантажень (2 і 3 серія) виявився малозначимим при визначенні цього параметру. При цьому, якщо середні віддалі між похилими тріщинами у 1 і 2 серіях є, практично, однакові (0,55 і 0,56), то при малоцикловому знакопостійному навантаженні у 3 серії цей параметр зменшується на 32% у зв'язку з більшою концентрацією силового потоку стискаючих і розтягуючих напружень.

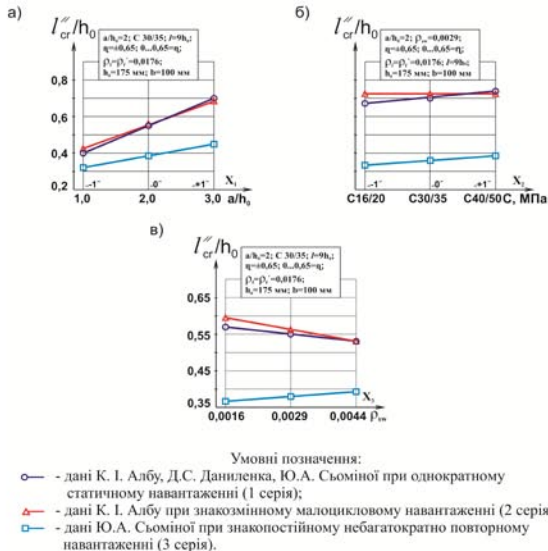


Рис. 7. Вплив величини відносного прольоту зрізу (а), класу бетону (б), кількості поперечної арматури (в) на величину відносної віддалі між похилими тріщинами на приопроних ділянках дослідних зразків-балок

Наукова новизна та практична значимість. Проведені експериментальні дослідження та аналіз їхніх результатів дозволили розкрити нові особливості характеру деформування, тріщиноутворення та руйнування дослідних зразків-балок, що зазнають дії циклічних знакозмінних та знакопостійних навантажень, виявити механізм та нові схеми руйнування цих елементів, а також встановити їх залежність від відповідного співвідношення дослідних факторів.

Результатом досліджень у вказаному напрямку стане вдосконалений авторами загальний інженерний метод розрахунку міцності похилих і нормальних перерізів залізобетонних конструкцій при малоцикловому знакозмінному і знакопостійному навантаженнях високих рівнів, який базуватиметься на виборі найбільш імовірних схем руйнування у залежності від реального співвідношення дослідних факторів, а також розвиток деформаційної моделі розрахунку їх несучої здатності, вдосконалення чинних нормативних документів.

Висновки

В ході аналізу викладеного матеріалу можна відмітити наступні положення:

1. Стосовно несучої здатності зразків встановлено, що при знакопостійному малоцикловому навантаженні середнє значення міцності припорних ділянок дослідних зразків зменшується на 8,2% порівняно з несучою здатністю балок першої серії, випробуваних без повторного навантаження, а при знаковмінному циклічному навантаженні – на 18,4%;

2. Практичне значення математичних моделей (8)...(10) полягає у більш-менш точному визначенні довжини проєкції небезпечної похилої тріщини, яка перетинається зі стержнями поперечної арматури і яка приймає безпосередню участь у сприйнятті поперечної сили, що знайде своє відображення в уточненій авторами інженерній методиці розрахунку міцності припорних ділянок дослідних елементів;

3. Представлені в моделях (11)...(13) дані про кути нахилу небезпечних похилих тріщин мають практичне значення при вдосконаленні інженерних методів розрахунку міцності похилих перерізів прогінних залізобетонних конструкцій, зокрема тих, що базуються на фермовій аналогії;

4. Представлені моделі (14)...(16) разом з виразом (4) можна використати для уточнення деформацій розтягнутої арматури і бетону, а також коефіцієнта ψ_s , який ураховує сумісну роботу розтягнутої арматури і бетону.

Література

1. Бабич Є.М. Робота і розрахунок несучої здатності згинальних залізобетонних елементів таврового профілю при дії повторних навантажень / Є.М. Бабич, П.С. Гомон, С.В. Філіпчук. – Рівне: НУВГП, – 2012. – 108с.

2. Бабич В.Є. Особливості роботи нерозрізних залізобетонних балок при повторних навантаженнях / В.Є. Бабич // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – Київ: НДІБК, 2003. – Вип. 58. – С. 8-13.

3. Болошенко Ю.Г. Расчёт прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, на основе трансформированных диаграмм деформирования бетона / Ю.Г. Болошенко // Науково-технічне та організаційно-економічне сприяння реформам у будівництві та житлово-комунальному господарстві: збірник III Міжнародної конференції. – Макіївка: ДонНАСА, 2012. – Ч. 1. – С. 16-18.

4. Герб П.І. Вплив повторних навантажень на міцність, деформативність та тріщиностійкість підсилених у розтягнутій зоні залізобетонних балок із бетонів на відходах збагачення залізних руд / П.І. Герб, О.І. Валовой // Вісник Криворізького технічного університету: зб. наук. пр. – Кривий Ріг: КТУ, 2010. – Вип. 25. – С. 87-92.

5. Гомон П.С. Робота згинальних залізобетонних елементів таврового перерізу за дії повторного навантаження: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Гомон Петро Святославович; НУ «Львівська політехніка». – Львів, 2013. – 20 с.

6. Дорофеев В.С. Прочность, трещиностойкость и деформативность предварительно напряжённых тавровых железобетонных элементов / В.С. Дорофеев, В.М. Карпюк, Ф.Р. Карпюк. – Одесса: Эвен, 2010. – 223 с.: ил. – ISBN 978-966-8169-43-4.

7. Дорофеев В.С. Прочность, деформативность и трещиностойкость приопорных участков внецентренно растянутых и сжатых железобетонных балок / В.С. Дорофеев, В.М. Карпюк, Н.Н. Петров. – Одесса: Эвен, 2011. – 183 с. граф. – ISBN 978-966-8169-49-9.

8. Дробишинець С.Я. Робота сталевібробетонних та сталевіброзалізобетонних балок при одноразовому та повторних малоциклових навантаженнях / С.Я. Дробишинець, Є.М. Бабич // Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація: зб. наук. пр. – Кривий Ріг: КТУ, 2004. – Вип. 6. – С. 65-71.

9. Залесов А.С. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил / А.С. Залесов, Ю.А. Климов. – Киев: Будівельник, 1989. – 104 с.

10. Заречанський О.О. Особливості роботи стиснуто-зігнутих залізобетонних елементів при одноразових і повторних малоциклових навантаженнях: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Заречанський Олег Олегович. НУ «Львівська політехніка». – Львів, 2008. – 20 с.

11. Зінчук М.С. Міцність та деформативність залізобетонних згинальних елементів за малоциклових навантажень в умовах підвищених температур: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Зінчук Микола Степанович. НУ «Львівська політехніка». – Львів, 2008. – 18 с.

12. Караван В.В. Результати експериментальних досліджень тріщиностійкості і деформативності згинальних залізобетонних елементів під дією малоциклових знакозмінних навантажень / В.В. Караван // Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація: зб. наук. пр. – Кривий Ріг: КТУ, 2002. – Вип. 5. – С. 168-172.

13. Карапетян С.Х. Міцність і стійкість позацентрово стиснутих залізобетонних стержнів в умовах небагаторазово повторних навантажень: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Карапетян Смбаг Хачатурович. ДП НДУБК. – Київ, 2009. – 20 с.

14. Карпенко Н.И. Методика расчёта параметров деформирования бетона при разгрузке с напряжений сжатия / Н.И. Карпенко, В.А. Ерышев, Е.В. Латышева // Вестник МГСУ. – Москва, 2014. – Вып. №3. – С. 168-178.

15. Карпюк В.М. Розрахункові моделі прогінних залізобетонних конструкцій при складному напружено-деформованому стані приопорних ділянок: дис. д-ра техн. наук: 05.23.01 / Карпюк Василь Михайлович; Одеська держ. ак. буд-ва та арх.-ри. - Одеса, 2012. – 365 с. – Бібліогр. С. 284-326.

16. Карпюк В.М. Розрахункові моделі силового опору прогінних залізобетонних конструкцій у загальному випадку напруженого стану (монографія) / В.М. Карпюк. – Одеса: ОДАБА, 2014. – 352 с. зіл. – ISBN № 978-617-7195-08-4.

17. Карпюк В.М. Методика експериментальних досліджень напружено-деформованого стану приопорних частин залізобетонних балок при малоцикловому навантаженні / В. М. Карпюк, Е. І. Албу, Ю. А. Сєміна, А. К. Кицак // (28.11.2013) Сб. мат-в V Республ. науко-техн. конф. – Бендери: Бендерський ПФ ГОУ «ПГУ ім. Т. Г. Шевченка». – С. 3-10.

18. Ковальчик І.Я. Дослідження тріщиностійкості попередньо напружених залізобетонних балок при дії малоциклових навантажень / І.Я. Ковальчик, П.М. Коваль // Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей: наук. нотатки. – Луцьк, 2014. – № 45. – С. 282-287.

19. Корнійчук О. І. Міцність та тріщиностійкість похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів при дії малоциклових знакозмінних навантажень: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Корнійчук Олександр Іванович; Полт. НТУ імені Юрія Кондратюка. – Полтава, 2009. – 21 с.

20. Лучко Й.Й. Температурні поля та напружений стан залізобетонних балкових конструкцій мостів / Й.Й. Лучко, В.В. Ковальчук // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса, 2013. Вип. № 49. – С. 221-236.

21. Масюк Г.Х. Напружено-деформований стан похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів, що зазнають дії малоциклових знакозмінних навантажень / Г.Х. Масюк, О.І. Корнійчук // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2008. – Вип. 17. – С. 204-211.

22. Мирсаяпов И.Т. Выносливость железобетонных конструкций при действии поперечных сил: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Мирсаяпов Илшлат Талгатович; – Казань: КГАСУ, 2009. – 38 с.

23. Пецольд Т.М. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчёта и конструирования / Т.М. Пецольд, В.В. Тур. – Брест: БГТУ, 2003. – 379 с.

24. Aslani F. Stress-strain model for concrete under cyclic loading / F. Aslani, R. Jowkarmeimandi // Magazine of Concrete Research. – Wollongong, Australia, 2012. – Vol. 64, Issue 8. – Pp. 673-685.

25. Trapko W. The bearing capacity of reinforced concrete elements under repeated compressive load, reinforced with carbon strips / W. Trapko, T. Trapko // Civil engineering and management: scientific magazine. – Wroclaw, Poland, 2012. – Vol. 4. – Pp. – 590-597.

26. Dorofeev V. Their capacity steel cross-section eccentrically shrink or stretch beams / V. Dorofeev, V. Karpyuk, N. Petrov // Materials of 18 Conference «Theoretical Foundations of Civil Engineering», Polish – Ukrainian – Lithuanian Transactions – Warsaw, September, 2010. – P. 345-352.