

ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ ПОЗАЦЕНТРОВО СТИСНЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ НЕСИМЕТРИЧНИМ ЗМІШАНИМ АРМУВАННЯМ

© Шпак М.М., 2007

Наведено результати дослідження зразків колон зі змішаним армуванням високоміцною напруженою і звичайною арматурою із м'якої сталі. Нерівномірний обтиск бетону позацентрово стиснених зразків колон підвищив їх тріщиностійкість більш ніж два рази, а ненапружена арматура краще розподіляє тріщини після їх появи.

The results of the research of concrete columns combined reinforced by high strength prestressed and non-prestressed mild steel reinforcement are presented. Non-uniform prestressing of concrete in the eccentrically loaded columns more than twice heighten the cracking resistance of columns. At the same time non-prestressed reinforcement better spreads the blow up cracks.

Постановка проблеми. Теперішня тенденція щодо використання високоміцних бетонів і арматурних сталей в стиснутих елементах веде до зменшення їх перерізів, а значить, до збільшення гнучкості і деформативності, що зменшує їх експлуатаційну надійність. Одним із способів усунення вказаної суперечності є використання змішаного армування [1], яке передбачає одночасне використання як високоміцної попередньо напруженої, так і звичайної арматур.

Для стиснених елементів, таких як палі, довговимірні колони багатоповерхових будинків [2], характерним є рівномірний обтиск бетону, попередньо напруженою арматурою. Однак у разі одностороннього ексцентриситету поздовжньої сили, як це зустрічається в елементах підпірних стін, крайніх колонах кранових естакад чи елементах портових споруд, раціональнішим може виявитися нерівномірне попереднє напруження, тобто несиметричне змішане армування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попереднє напруження стиснутих елементів дає змогу підвищити не тільки їх ефективність завдяки меншій витраті арматури, але й істотно покращати такі показники, як тріщиностійкість та деформативність на всіх стадіях роботи, включаючи експлуатацію, виготовлення, транспортування та монтаж. На відміну від попередньо напруженої арматури, яку вкорочувати технологічно складно, звичайну арматуру обривають, розташовуючи її в місцях найбільших зусиль від зовнішніх навантажень [3]. Співвідношення вказаних арматур характеризується коефіцієнтом k_{pp} часткового попереднього напруження:

$$k_{pp} = \frac{N_{sp}z_{sp}}{N_{sp}z_{sp} + N_s z_s}, \quad (1)$$

де N_{sp} , N_s – розрахункові зусилля відповідно в попередньо напруженій S_p та звичайній S_{np} арматурах за умови, що $N_{sp}z_{sp} + N_s z_s = const$; z_{sp} , z_s – плечі внутрішніх пар сил.

Отже, для звичайних залізобетонних елементів $k_{pp}=0$, для повністю попередньо напружених – $k_{pp}=1$. Звичайна арматура, виступаючи внутрішньою перпоною, зменшує деформації усадження та повзучості бетону і відповідно зменшує пов'язані з цим втрати попереднього напруження високоміцної арматури.

У [4, 5] вплив звичайної арматури на зменшення втрат попереднього напруження арматури від усадження в центрально обтиснених елементах типу колон зі змішаним армуванням рекомендується враховувати формулою

$$\sigma_{sh,r} = \varepsilon_{sh}(t)E_s B. \quad (2)$$

Тут

$$B = \frac{1 + \alpha_s \mu_s}{1 + \alpha_s \mu_s \gamma}, \quad (3)$$

де $\varepsilon_{sh}(t)$ – відносна деформація вільного усадження бетону на момент часу t визначення втрат попереднього напруження; $\sigma_{sh,r}$ – втрати попереднього напруження від усадження армованого бетону; γ – функція лінійної повзучості бетону, що визначається залежно від характеристики повзучості $\varphi_{cr}(t)$ та віку бетону τ_1 , який приймають за початок відліку часу її проявлення; $\mu_s = (A_{sp} + A_s) / A_b$ – загальний коефіцієнт армування.

У [6] одержано формули для визначення напружень, викликаних повзучістю бетону рівномірно обтиснених елементів, на рівні центра ваги усієї арматури S та відповідно S' :

$$\sigma_{cr} = \alpha_r (B_1 \sigma_{bp} - B_2 \sigma'_{bp}) \varphi_{cr}(t); \quad (4)$$

$$\sigma'_{cr} = \alpha_r (B_3 \sigma'_{bp} - B_4 \sigma_{bp}) \varphi_{cr}(t), \quad (5)$$

де $B_1 = A_1 / A_5$, $B_2 = A_2 / A_5$, $B_3 = A_3 / A_5$, $B_4 = A_4 / A_5$ – коефіцієнти.

В арматурі S_i довільного рівня напруження від повзучості визначають за формулою

$$\sigma_{cr,i} = \frac{E_{s,i}}{E_{s,red} h_s} \left[\sigma_{cr}(y'_b \pm y_{sb,i}) + \sigma'_{cr}(y_b \mp y_{sb,i}) \right], \quad (6)$$

де $y_{sb,i}$ – віддаль від центра ваги бетонного перерізу до i -го ряду арматури; верхні знаки приймають для нижньої арматури S_i , нижні знаки – для верхньої S'_i .

У [8] за симетричної звичайної арматури попередньо напружених колон зі змішаним армуванням втрати попереднього напруження від усадження бетону можна обчислити за такою спрощеною формулою:

$$\sigma_{sp,sh} = \frac{\varepsilon_{sh}(t) E_{sp}}{1 + 2\alpha_s \mu_s \gamma}. \quad (7)$$

Для елемента з подвійною звичайною арматурою S_{np} і S_{np}' та поодиноким армуванням попередньо напруженою арматурою S_p , розташованою на віддалі $y_{sp,b}$ від центра ваги бетонного перерізу, втрати попереднього напруження від усадження бетону можуть бути обчислені за формулою

$$\sigma_{sp,sh} = \frac{E_{sp}}{E_s h_s} \left[\sigma_{s,sh}(y'_{sb} + y_{sp,b}) + \sigma'_{s,sh}(y_{sb} - y_{sp,b}) \right]. \quad (8)$$

Отже, враховуючи реальний механізм впливу звичайної арматури на втрати від усадження і повзучості бетону в елементах зі змішаним армуванням, можна, обчислюючи величину рівнодійного зусилля обтиску бетону, розраховувати параметри тріщиностійкості для різноманітних схем армування.

Мета досліджень – виявлення експериментально та теоретично особливостей розрахунку тріщиностійкості позацентрово стиснених елементів і розроблення відповідної методики на підставі вдосконалення розрахункової моделі через точніше врахування впливу звичайної арматури на втрати попереднього напруження в елементах зі змішаним армуванням в діапазоні коефіцієнтів часткового попереднього напруження $0 \leq k_{pp} \leq 1$.

Теоретичний аналіз тріщиностійкості зразків позацентрово стиснених колон. Для дослідження впливу звичайної арматури S_{np} на величину втрат попереднього напруження арматури S_p в колонах з несиметричним змішаним армуванням розроблено відповідну програму комп'ютерного розрахунку. В основу програми покладено фізичну модель, показану на рис. 1, і використано методику [3, 4, 6, 8] з урахуванням вищевикладеного. Для аналізу вибрано конструкції зразків перерізом 185×240 мм, які подібні до досліджених експериментально. За попередньо напружену арматуру S_p прийнято канати класу К-7, ненапружену арматуру S_{np} – звичайну арматуру класу А-III. Початкову величину попереднього напруження арматури S_p з урахуванням перших втрат

прийнято такою, що дорівнює $\sigma_{sp,1} = 1010$ МПа. Для порівняння розглянуто повністю попередньо напружені колони типу ПН, які армовані тільки канатами ($a_{sp} = a'_{sp} = 5,5$ см), колони зі змішаним армуванням, тобто частково попередньо напружені типу ЧПН, і ненапружені колони типу НП, армовані звичайною арматурою ($a_s = a'_s = 2,5$ см). Для колон ЧПН коефіцієнт k_{pp} змінюється в діапазоні від нуля до одиниці і визначається за формулою (1). Коефіцієнт армування прийнятий близьким до граничного. Бетон важкий класу В40 природного тужавіння складу Ц:П:Щ = 1:0,78:1,94 з витратою води $W = 208$ л/м³ бетону. Передавальна міцність бетону $R_{b,p} = 28$ МПа у віці $\tau_1 = 14$ діб. Модуль пружності бетону з моменту обтиснення і висихання дорівнює $E_b = 0,32 \times 10^5$ МПа. У разі наявності даних про дозування складових бетонної суміші без пластифікаторів нормативні значення міри повзучості $C_n(t)$ і усадження бетону $\varepsilon_{sh,n}$ визначено за [3], а також граничні значення параметрів повзучості і усадження в момент часу t визначено за формулами [3]:

$$\varphi_{cr}(t) = C_n(t)E_b\xi_1\xi_2\xi_3\xi_t; \quad (9)$$

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh,n}\zeta_1\zeta_2\zeta_3\zeta_t, \quad (10)$$

де ξ_i, ζ_i – коефіцієнти, які враховують відхилення фактичних умов роботи елемента від прийнятих середніх; ξ_b, ζ_t – коефіцієнти, які враховують проміжкові значення $\varphi_{cr}(t), \varepsilon_{sh}(t)$ в частках від граничних, визначених за $t = \infty$.

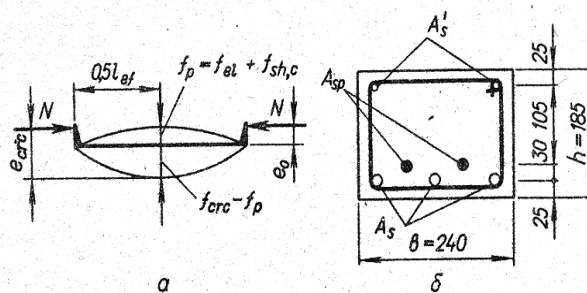


Рис. 1. Схема деформованого стану осі позакентровано стисненого зразка колони (а) та схема його несиметричного змішаного армування (б)

Втрати попереднього напруження в арматурі S_p, S'_p та напруження стискання в арматурі S_{np} від усадження і повзучості бетону визначено за формулами (6), (8). Рівнодійне зусилля ΔP усіх втрат для колони повністю попередньо напруженої типу ПН і відповідно для колон зі змішаним армуванням типу ЧПН обчислено за формулами:

$$\Delta P_p = \sigma_{sp,sh} A_{sp}; \quad (11)$$

$$\Delta P_{pp} = \Delta P_p + \sigma_{s,sh} A_s + \sigma'_{s,sh} A'_s. \quad (12)$$

Результати обчислень наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики досліджених параметрів

Тип колон	k_{pp}	$A_s, \text{см}^2$	$A_{sp}, \text{см}^2$	$\sigma_{b,sh}, \text{МПа}$	$\sigma_{s,sh}, \text{МПа}$	$\sigma_{sp,sh}, \text{МПа}$ a	$\Delta P_i, \text{кН}$	$\frac{\sigma_{sp,sh,i}}{\sigma_{sp,sh,ПН}}$	$\frac{\Delta P_i}{\Delta P_p}$
ПН	1	0,001	2,838	0	79,99	72,0	20,46	1	1
ЧПН	0,82	1,425	2,365	-1,16	67,60	63,1	24,58	0,88	1,20
ЧПН	0,70	2,850	1,892	-2,03	58,35	56,5	27,33	0,78	1,33
ЧПН	0,50	4,273	1,419	-2,7	51,18	51,4	29,18	0,71	1,42
ЧПН	0,34	5,697	0,946	-3,24	45,46	47,3	30,39	0,66	1,48
ЧПН	0,17	7,121	0,473	-3,68	40,79	44,0	31,14	0,61	1,52
НП	0	8,545	0,001	-4,04	36,90	41,2	31,55	0,57	1,54

Рівнодійне зусилля обтиску бетону з урахуванням втрат від усадження і повзучості для колон типу ПН, НП та відповідно ЧПН становить:

$$P_p = P_1 - \Delta P_p, \quad P_{pp} = P_1 - \Delta P_{pp}. \quad (13)$$

Ексцентриситет поздовжньої сили з урахуванням вигину f_p від зусилля обтиску, усадження і повзучості бетону (рис. 1) визначали за деформованою моделлю осі колони за формулою

$$e_{crc} = e_0 - f_{crc} - f_p. \quad (14)$$

Момент тріщиноутворення з урахуванням (13) та (14) обчислювали за формулою (125) СНиП 2.03.01-84.

З аналізу даних табл. 1 випливає, що усадження і повзучість бетону колон ЧПН зі змішаним армуванням зменшується більше ніж у два рази в міру зменшення коефіцієнта часткового попереднього напруження k_{pp} . Одночасно під впливом усадження зменшуються напруження в звичайній арматурі S_{np} та втрати попереднього напруження в арматурі S_p . Зменшення усадження і повзучості приводить до зменшення втрат попереднього напруження ЧПН-колон.

Експериментальне дослідження колон. З метою перевірки теоретичних передумов, викладених вище, були проведені випробування аналогічних зразків колон на пресі в горизонтальному положенні, при цьому ексцентриситет поздовжньої сили становив $e_0 = 0,5h$, а віддаль між центрами шарнірних ножових опор становила $l_0 = 2,4$ м. Досліджувалися параметри як появи тріщин, так і їх розкриття аж до руйнування (рис. 2).

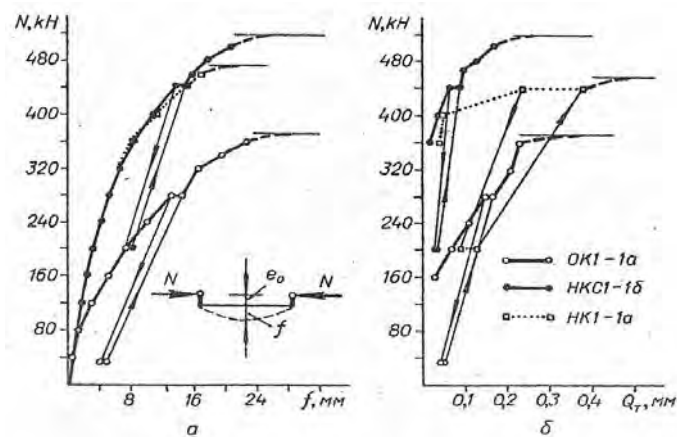


Рис. 2. Залежність прогинів (а) та ширини розкриття тріщин (б) від поздовжньої сили досліджених зразків колон за одноразового та повторного навантажень

Руйнування колон типу ПН і ЧПН відбулося по стисненому бетону, попереднє напруження в канатній арматурі погашене не було, що позитивно позначилося на збільшенні їх міцності порівняно із звичайними колонами.

Таблиця 2

Результати експериментальних досліджень зразків колон

Тип колон	k_{pp}	$\sigma_{sp,1}$, МПа	N_{crc} , кН	$\frac{N_{crc,p}}{N_{crc,np,m}}$	f_p , мм	f_{crc} , мм	f_u^* , мм	N_u , кН	$\frac{N_{crc}}{N_u}$
ПН	1	1010	360	2,40	1,45	9,4	18,0	458	0,78
ПН	1	1010	340	2,27	1,43	7,2	16,9	480	0,72
ЧПН	0,73	1003	340	2,27	1,12	8,0	22,5	470	0,72
ЧПН	0,73	1003	340	2,27	1,15	8,8	20,5	520	0,65
НП	0	0	160	1	0	4,9	22,7	375	0,42
НП	0	0	140	1	0	4,0	19,9	357	0,39

Аналіз табл. 2 показує, що нерівномірний обтиск зразків колон істотно вплинув на їх тріщиностійкість. Так, зусилля тріщиноутворення N_{crc} зразків типу ПН і ЧПН було близьке до руйнівного зусилля звичайних. Рівень тріщиноутворення для зразків типу ПН і ЧПН становив 0,76–0,69 тоді як для ненапружених зразків – 0,4. За $N_{crc}=360$ кН прогин попередньо напружених зразків становив 8,4 мм, а прогин звичайних зразків – 21,0 мм, тобто виявився у 2,6 раза більшим і був близьким до руйнівного.

Висновок. В елементах зі змішаним армуванням звичайна арматура стримує деформації вільного усадження бетону, що веде до зменшення втрат попереднього напруження. Усадження армованого бетону порівняно з неармованим може бути меншим, більше ніж у два рази. Гальмівна роль звичайної арматури S_{np} щодо втрат попереднього напруження арматури S_p від повзучості бетону полягає в сприйнятті на себе напружень стиску і, значить, в перерозподілі зусиль між напруженою арматурою і обтисненим бетоном. Деформації усадження та повзучості і пов'язані з ними напруження в арматурі S_{np} і S_p призводять до втрат рівнодійного зусилля обтиснення бетону, яке знижує момент (силу) утворення тріщин.

Як і в нормах СНиП 2.03.01-84, під час обчислення рівнодійного зусилля обтиснення бетону напруження в звичайній арматурі слід приймати таким, що дорівнює втратам попереднього напруження від усадження і повзучості, але величина цих втрат залежить від кількості звичайної арматури. Наведена методика розрахунку тріщиностійкості позациентрово стиснених елементів дає змогу оцінити напружений стан змішано армованих елементів точніше, ніж, наприклад, за чинними нормами.

1. Шпак М.М., Стасюк М.І. Ефективність залізобетонних конструкцій зі змішаним армуванням: Збірник тез I Всеукраїнської НТК "Науково-практичні проблеми теорії і практики сучасного залізобетону". – К., 1996. – С. 200–202. 2. Кваша В.Г., Шпак М.Н. Бесстыковые колонны со смешанным армированием для многоэтажных зданий // Автоматизация проектирования и исследований железобетонных конструкций многоэтажных зданий: Тезисы докладов XV научно-производственного регионального совещания-семинара (Львов, 21–23 сентября 1989 г.). – Львов, 1989. – С. 33–34. 3. Шпак М.М. Попередньо напружені колони зі змішаним армуванням для одноповерхових будинків // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Львів, 2005. – №545. – С. 186–193. 4. Гольшев А.Б., Полищук В.П., Руденко И.В. Расчет железобетонных стержневых систем с учетом фактора времени. – К.: Будівельник, 1984. – 128 с. 5. Гольшев А.Б. и др. Проектирование железобетонных конструкций: Справочное пособие / А.Б. Гольшев, В.Я. Бачинский и др.; Под ред. А.Б. Гольшева. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Будівельник, 1984. – 128 с. 6. Шпак М.М., Стасюк М.І. Аналіз тріщиностійкості залізобетонних балок зі змішаним армуванням під впливом повзучості обтиснутого бетону // Будівельні конструкції: Міжвідом. наук.-техн. збірник. – К., 1999. – Вип. 50. – С. 292–298. 7. Байрамуков С.Х. Железобетонные конструкции со смешанным армированием при постоянных и переменных нагрузках // Автореферат ... д-ра техн. наук. – Ростов-на-Дону, 1999. – 46 с. 8. Шпак М.М. Вплив усадки бетону на втрати попереднього напруження в залізобетонних елементах зі змішаним армуванням // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Львів, 2005. – №441. – С. 190–197.