

УДК 624.072.2.012.35:539.374

DOI <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2023.43.4>**Павліков А.М.**д.т.н., професор, завідувач кафедри будівельних конструкцій,
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава**Гарькава О.В.**к.т.н., доцент, доцент кафедри будівельних конструкцій,
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава

НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН НА ОСНОВІ КРИТЕРІЮ ПОВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ОПОРУ СТИСНУТОЇ ЗОНИ БЕТОНУ

Анотація. У статті висвітлено сучасний стан методів розрахунку несучої здатності залізобетонних колон та запропоновані напрями їх удосконалення. Розроблення методу розрахунку несучої здатності залізобетонних колон здійснюється за деформаційною моделлю на основі рекомендацій чинних нормативних документів. При цьому розв'язується проблема визначення розрахункових граничних значень фібрових деформацій бетону у складі залізобетонних елементів, котрі мають ключове значення при розрахунку несучої здатності колон. Відмічено, що для обчислення названих значень деформацій для колон, котрі втрачають несучу здатність при досягненні межі текучості в розтягнутій арматурі, тобто працюють за умов великих ексцентриситетів прикладання зовнішнього навантаження, доцільним є застосування екстремального критерію міцності при умові $\sigma_s = f_{yd}$. Визначені аналітично на цій основі розрахункові граничні значення фібрових деформацій бетону використовуються при розрахунку несучої здатності колон. Для випадку завантаження колон зовнішнім навантаженням з малими ексцентриситетами його прикладання застосування екстремального критерію при $\sigma_s < f_{yd}$ реалізується ітераційним шляхом. Для отримання аналітичних значень граничних розрахункових значень фібрових деформацій бетону в складі залізобетонних колон при роботі розтягнутої арматури в пружній стадії запропоновано критерій повного використання опору стиснутої зони бетону. На його основі аналітично визначенні розрахункові граничні значення фібрових деформацій бетону, котрі можуть бути використані при визначенні несучої здатності колон, що працюють з малими ексцентриситетами прикладання зовнішнього навантаження. В результаті побудована діаграма розрахункових граничних значень рівнів фібрових деформацій бетону в стиснутій зоні поперечного перерізу позацентрово стиснутого елемента прямокутного профілю при $\sigma_s < f_{yd}$. Для практичного використання розроблена методика визначення несучої здатності залізобетонних колон з використанням отриманих значень деформацій. Реалізація розробленої методики проілюстрована на прикладі.

Ключові слова: залізобетон, колона, стиск, несуча здатність, розрахунок.

Постановка проблеми. Серед вертикальних несучих конструкцій домінуючі позиції не втрачають залізобетонні колони, котрі як складові елементи каркасів, естакад, бункерів, силосів, водонапірних веж, градирень та інших будівель і споруд зазнають складного деформування. Залежно від схем їх завантаження в складі тих чи інших будівельних об'єктів у залізобетонних колонах можуть спостерігатись часткові випадки їх косоного деформування, а саме: плоского позацентрового стиску. При цьому для проектування колон, котрі працюють в умовах такого деформування, аналітичне розв'язання задачі

визначення їх несучої здатності повною мірою не реалізоване.

Аналіз останніх досліджень. При розробленні методики розрахунку несучої здатності залізобетонних колон на основі деформаційної моделі одним із ключових завдань є розв'язання задачі встановлення розрахункових граничних (конструкційних) значень деформацій бетону на рівні найбільш стиснутої фібри перерізу у момент утрати несучої здатності. На даний час при розв'язанні цієї задачі застосовуються різні підходи, найбільш широкого застосування з яких набули: визначення шуканих значень деформацій бетону в експериментів [1–3],

розрахунок цих значень на основі екстремального критерію міцності $N_{Rd}(\epsilon_{c(1)}) = \max N_{Rd}(\epsilon_{cu})$ (де ϵ_{cu} – деформації бетону в найбільш стиснутій фібрі перерізу залізобетонного елемента в момент досягнення максимального опору N_{Rd} дії зовнішнього поздовжнього зусилля) [4 – 7] та інші [8–11].

Застосування екстремального критерію розглянуто в роботах [6–7] для позацентрово стиснутих залізобетонних елементів з великими ексцентриситетами прикладання зовнішнього навантаження, тобто таких, у котрих в момент їх руйнування напруження в арматурі розтягнутої зони досягають межі текучості $\sigma_s = f_{yd}$. На цій основі аналітично визначені розрахункові граничні значення деформацій стиску бетону в залізобетонних елементах як при косому їх деформуванні, так і при позацентровому стисканні. Таким чином, розв'язані задачі визначення несучої здатності та розрахунку кількості арматури для залізобетонних елементів за наведених умов [6].

Для стиснутих неоднорідно деформованих залізобетонних елементів, у котрих при їх руйнуванні деформації розтягнутої арматури не досягають межі текучості, граничні значення фібрових деформацій бетону будуть перевищувати значення, обчислені на основі екстремального критерію при $\sigma_s = f_{yd}$. В цьому випадку, при досягненні бетоном граничного опору стиску $\sigma_c = f_{cd}$ в найбільш стиснутій фібрі, значення несучої здатності елемента може зростати до певного моменту. Таке зростання може бути обумовлено збільшенням значення рівнодійної зусиль в розтягнутій арматурі (відповідно і в стиснутому бетоні), котра в цей момент працює в пружній стадії, а також зростанням плеча внутрішньої пари сил при зміщенні рівнодійної зусиль стиску в бетоні в бік найбільш стиснутого ребра як результату збільшення повноти епюри напружень.

Описане явище може бути притаманним як позацентрово стиснутим елементам з малими ексцентриситетами прикладання зовнішнього навантаження, так і переармованим згинальним елементам та елементам, армованим високоміцною арматурою.

У розрахунках несучої здатності названих елементів пошук розрахункових граничних значень фібрових деформацій бетону здійснюється ітераційним шляхом за допомогою екстремального критерію $\partial N_{Rd} / \partial \epsilon_{c(1)} = 0$ за умови, що $\sigma_s < f_{yd}$ [12], оскільки на сьогодні немає пропозицій щодо аналітичного їх визначення.

Викладене вище говорить про те, що для використання на практиці деформаційної моделі напружено-деформованого стану залізобетонних колон з упровадженням в неї повної діаграми стану бетону існує проблема аналітичного визначення граничних значень фібрових деформацій бетону в складі залізобетонних колон при $\sigma_s < f_{yd}$.

Мета роботи. Розробити методику розрахунку несучої здатності залізобетонних колон на основі нелінійної деформаційної моделі з використанням критерію повного використання опору стиснутої зони бетону.

Викладення основного матеріалу дослідження. Розроблення методики розрахунку несучої здатності залізобетонних позацентрово стиснутих колон виконується на основі деформаційного методу з використанням передумов, запроваджених чинними нормами [1]. При цьому для описання процесу деформування стиснутого бетону прийнято дробово-раціональну функцію $\sigma_c - \epsilon_c$ за [1, (3.4)]. Зв'язок між напруженнями і деформаціями в арматурі описується дволінійною діаграмою з горизонтальною верхньою гілкою за [1, рис. 3.6].

Розрахункова схема зусиль, напружень і деформацій в перерізі залізобетонної колони, розроблена на основі прийнятих передумов, наведена на рисунку 1.

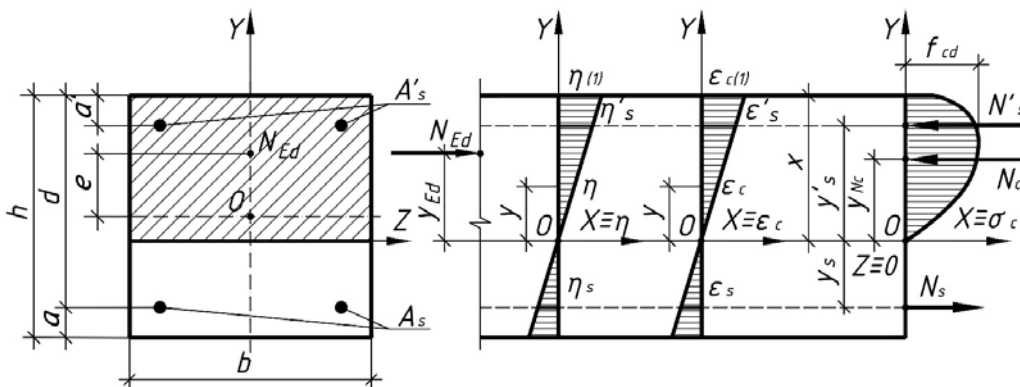


Рис. 1. Розрахункова схема до визначення несучої здатності позацентрово стиснутої залізобетонної колони

Розрахункові рівняння рівноваги у площині координатної осі Y , перпендикулярної до нейтральної лінії (рис. 1), записані у такому вигляді:

$$\sum Z = 0: N_{Ed} - N_c - N'_s + N_s = 0; \quad (1)$$

$$\sum M_B = 0: N_c(y_{Ed} - y_{Nc}) + N'_s(y_{Ed} - y'_s) + N_s(y_{Ed} - y_s) = 0, \quad (2)$$

де N_{Ed} – поздовжня сила від зовнішнього навантаження;

N_c – рівнодійна напружень в бетоні стиснутої зони;

N'_s, N_s – рівнодійні зусиль в стиснутій та розтягнутій арматурі відповідно;

y_{Nc} – координата точки прикладання зусилля N_c ;

y'_s, y_s – координата точки прикладання зусилля N'_s, N_s ;

y_{Ed} – координата точки прикладання сили N_{Ed} ;

x – висота стиснутої зони бетону;

e – ексцентриситет прикладання зовнішньої сили N_{Ed} відносно центра інерції перерізу колони.

Закон розподілення напружень в системі координат XOY отримано з використанням функції $\sigma_c - \varepsilon_c$ за [1, (3.4)] в [6, с. 59] у вигляді залежності

$$\sigma_n = \frac{f_{cd} \eta_{(1)} y (kx - \eta_{(1)} y)}{x (x + (k-2) \eta_{(1)} y)}, \quad (3)$$

в якій $\eta_{(1)} = \varepsilon_{c(1)} / \varepsilon_{c1}$ – рівень деформацій стиску бетону в точці перерізу з відносною деформацією $\varepsilon_{c(1)}$, найвіддаленіший від нейтральної лінії (рис. 1);

y – поточне значення координати в системі координат XOY ;

x – висота стиснутої зони бетону.

Рівнодійна зусиль в бетоні стиснутої зони з урахуванням (3) визначається за залежністю [6, с. 158]:

$$N_c = b \int_0^x \frac{f_{cd} \eta_{(1)} y (kx - \eta_{(1)} y)}{x (x + (k-2) \eta_{(1)} y)} dy = f_{cd} b x \omega, \quad (4)$$

в якій

$$\omega = \left. \begin{aligned} & \frac{(k-1)^2 (c - \ln c - 1)}{(k-2)^3 \eta_{(1)}} - \frac{\eta_{(1)}}{2(k-2)} \text{ при } k \neq 2, \\ & \omega = \eta_{(1)} \left(1 - \frac{\eta_{(1)}}{3} \right) \text{ при } k = 2, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де ω – коефіцієнт повноти епюри напружень у бетоні стиснутої зони;

$$c = 1 + (k-2) \eta_{(1)},$$

Координата прикладання зусилля N_c визначається за залежністю, отриманою в [6, с. 158]

$$y_{Nc} = \frac{S_c}{N_c} = x \frac{\varphi}{\omega}; \quad (6)$$

$$S_c = b \int_0^x \frac{f_{cd} \eta_{(1)} y (kx - \eta_{(1)} y)}{x (x + (k-2) \eta_{(1)} y)} y dy = f_{cd} b x \varphi, \quad (7)$$

де

$$\varphi = \left. \begin{aligned} & \frac{(k-1)^2}{(k-2)^3} \left(\frac{k-2}{2} - \frac{1}{\eta_{(1)}} \left(1 - \frac{\ln c}{(k-2) \eta_{(1)}} \right) \right) - \frac{\eta_m}{3(k-2)} \text{ при } k \neq 2 \\ & \varphi = \eta_{(1)} \left(\frac{2}{3} - \frac{\eta_{(1)}}{4} \right) \text{ при } k = 2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Рівнодійні зусиль в стиснутій та розтягнутій арматурі обчислюються залежно від напружень

$$N'_s = \sigma'_s A'_s, \quad (9)$$

$$N_s = \sigma_s A_s. \quad (10)$$

Напруження в арматурі визначається за дволінійним законом її деформування [1, рис. 3.6] залежно від її деформацій у перерізі колони (рис. 1):

$$\sigma'_s = E'_s \varepsilon'_s \leq f'_{yd}, \quad (11)$$

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \leq f_{yd}, \quad (12)$$

де деформації арматури:

$$\varepsilon'_s = \frac{\varepsilon_{c(1)} y'_s}{x}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{c(1)} y_s}{x}. \quad (14)$$

За критерій вичерпання несучої здатності у розрахунках може слугувати критерій повного використання опору стиснутої зони бетону залізобетонного елемента. Він за своєю фізичною сутністю є критерієм руйнування бетону стиснутої зони при максимальному значенні зусилля N_c , тобто при максимальному наповненні епюри напружень стиску. Визначення критерію реалізується шляхом дослідження функції $N_c = f(\varepsilon_{c(1)})$, на екстремум, що також може бути еквівалентно дослідженню функції коефіцієнта повноти епюри напружень стиску в бетоні стиснутої зони у вигляді умов:

$$\omega(\varepsilon_{co}) = \max \omega(\varepsilon_{c(1)}) \text{ або } \omega(\eta_o) = \max \omega(\eta_{(1)}), \quad (15)$$

де розрахункове граничне значення деформації бетону на стиск (або її рівень) ε_{co} ($\eta_o = \varepsilon_{co} / \varepsilon_{c1,cd}$) перевищує значення деформацій ε_{cu} ($\eta_u = \varepsilon_{cu} / \varepsilon_{c1,cd}$), що відповідають екстремальному критерію міцності даного перерізу при сталому значенні напружень текучості в арматурі [6].

Застосування критерію (15) є прийнятним за умови, що відповідні деформації ε_s розтягнутої арматури в перерізі залізобетонного елемента знаходяться на визначеному проміжку

її деформацій $0 < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$, що відповідає пружній роботі арматури.

Із викладеного випливає, що, використовуючи критерій (15), залежність для визначення невідомої величини ε_{co} (η_o) можна отримати шляхом диференціювання функції $\omega = f(\eta_{c(1)}, \dots)$, поклавши в основу шуканої залежності – критерій повного використання опору стиснутої зони бетону при умові, що напруження в розташованій у перерізі розтягнутій арматурі зростають, а також урахувавши той факт, що висота x стиснутої зони бетону прийматиме цілком обумовлені значення.

Опираючись на запропонований критерій, для визначення значень ε_{co} (η_o) залежність (5) досліджена на екстремум за умовою:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \eta_{(1)}} = 0. \quad (16)$$

Розв'язком рівняння (16) є залежність, котра дозволяє визначати граничні деформації бетону залежно від коефіцієнта k фізико-механічних властивостей бетону

$$\eta_o = \frac{e^\lambda - 1}{k - 2}, \quad k \neq 2, \quad (17)$$

де λ – корінь характеристичного рівняння

$$e^\lambda (2k(k-2)(\lambda-1) + 2\lambda - 3) - e^{3\lambda} + 2e^{2\lambda} + 2k(k-2) + 2 = 0. \quad (18)$$

Для значення $k = 2$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \eta_{(1)}} = 1 - \frac{2\eta_{c(1)}}{3}. \quad (19)$$

Представивши (19) у вигляді рівняння за (16), отримуємо $\eta_o = 1,5$.

Графічно результати дослідження виразу (5) у вигляді функції $\omega = f(\eta_{c(1)}, \dots)$ на екстремум являють собою діаграму граничних значень рівнів фібрових деформацій бетону залізобетонних елементів в момент досягнення епюрою напружень в бетоні стиснутої зони максимального наповнення (рис. 2). Отриману діаграму можна використовувати у розрахунках.

На рисунку 2 наведена також діаграма граничних значень бетону залізобетонних елементів, отриманих в [6, с. 67] на основі екстремального критерію міцності. Різниця між наведеними значеннями при однакових значеннях k демонструє резерви міцності бетону в складі залізобетонного елемента, арматура в якому працює в пружній стадії. Цей резерв може також бути ефективно реалізований при застосуванні високоміцної арматури.

Для практичного застосування параметрів ω та φ , котрі залежать від $\eta_{(1)}$, в розрахунках міцності позациентрово стиснутих залізобетонних

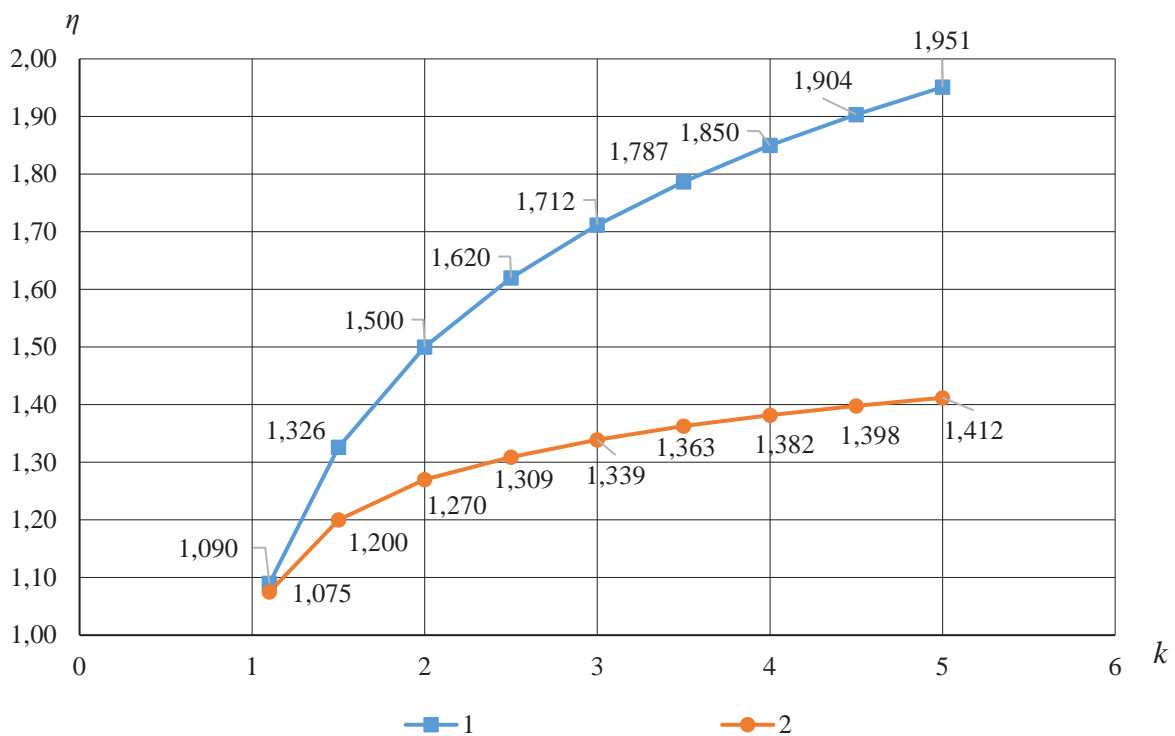


Рис. 2. Діаграми граничних значень рівнів фібрових деформацій бетону в стиснутій зоні поперечного перерізу позациентрово стиснутого елемента прямокутного профілю: 1 – η_o за (15) при $\sigma_s < f_{yd}$ та 2 – η_u за екстремальним критерієм [6, с. 67] при $\sigma_s = f_{yd}$ залежно від параметра k

Таблиця 1. Значення параметрів η_o , ω та φ для позacentрово стиснутих колон залежно від класу бетону С

Клас бетону	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/35	C32/40	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
η_o	1,741	1,705	1,669	1,642	1,620	1,598	1,578	1,564	1,543	1,518
ω	0,820	0,811	0,801	0,794	0,788	0,781	0,775	0,771	0,764	0,756
φ	0,456	0,454	0,416	0,449	0,448	0,446	0,444	0,443	0,441	0,439
φ/ω	0,557	0,560	0,519	0,565	0,569	0,571	0,573	0,575	0,577	0,581

колон їх значення, обчислені за умовою (16) з урахуванням даних графіка 1 на рисунку 3, зведені у таблицю 1 залежно від класу бетону С.

Розглянемо застосування розробленої методики на прикладі.

Приклад. Дано: колона з поперечним перерізом квадратного профілю розмірами $b = 400$ мм, $h = 400$ мм (рис. 1); бетон колони класу C30/35 ($f_{cd} = 19,5$ МПа, $E_{cd} = 27$ ГПа, $\varepsilon_{e1,cd} = 1,72\%$); арматура класу A400C ($f_{yd} = 364$ МПа, $E_s = 210$ ГПа, $\varepsilon_{s0} = 0,0017$) розташована на відстані від граней перерізу на відстані $a' = a = 50$ мм, площа арматури $A'_s = A_s = 628$ мм²; ексцентриситет прикладання зовнішньої сили N_{Ed} складає $e = 60$ мм. Визначити несучу здатність колони.

Робоча висота перерізу $d = h - a = 400 - 50 = 350$ мм.

Для розглядуваної колони за методикою [6] встановлено, що в момент руйнування розтягнута арматура не досягає межі текучості.

Визначаємо висоту x стиснутої зони бетону з рівняння (2), виразивши його складові через x , при таких значеннях величин: $\omega = 0,787$, $\varphi = 0,449$,

$\varphi/\omega = 0,569$ (табл. 1). Для спрощення приймаємо, що напруження в стиснутій арматурі досягають межі текучості, тобто $\sigma'_s = f_{yd} = 364$ МПа.

Після розв'язання рівняння з одним невідомим, отримано $x = 346,65$ мм. При цьому отримано такі значення складових рівняння (2): $N = 2127,92$ кН; $y_{Nc} = 197,33$ мм; $y_{Ed} = 206,65$ мм; $y'_s = 296,65$ мм; $\varepsilon'_s = 0,0024 > \varepsilon_{s0} = 0,0017$; $\sigma'_s = 364$ МПа; $N' = 228,59$ кН; $y_s = -3,35$ мм; $\varepsilon_s = 0,00003 < \varepsilon_{s0} = 0,0017$; $\sigma_s = 5,66$ МПа; $N_s = 3,56$ кН.

Поздовжню силу визначаємо з рівняння (1) $N_{Rd} = N_{Ed} = 2352,95$ кН.

Значення поздовжньої сили, обчислене ітераційним методом за [12] з використанням апроксимації діаграми стану бетону поліномом 5-го ступеня, складає $N_{Rd} = 2418,00$ кНм.

Висновок. Сумісне застосування екстремального критерію та критерію повного використання опору стиснутої зони бетону залізобетонного елемента (15) дозволяє визначити несучу здатність позacentрово стиснутих залізобетонних колон при різних випадках прикладання зовнішнього навантаження.

Література

- ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. К.: Мінрегіонбуд України, 2022.71 с.
- Grammatikou S., Biskinis D., Fardis M.N. Ultimate Strain Criteria for RC Members in Monotonic or Cyclic Flexure. Journal of Structural Engineering, 2016. Vol. 142, No. 9. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001501](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001501)
- Baduge Sh.K., Mendis P., Ngo T. Stress-strain relationship for very-high strength concrete (>100 MPa) confined by lateral reinforcement. Engineering Structures, 2018. Vol. 177, P. 795-808. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.008>
- Rüsch H. Researches toward a general flexural theory for structural concrete. Journal of the American Concrete Institute, 1960. Vol.32, No.1, P. 1-28, 1960.
- Митрофанов В.П., Павліков А.М. Екстремальний критерій міцності залізобетонних елементів у деформаційній моделі. Будівельні конструкції. Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону: Зб. наук. пр., 2005. Вип. 62. Кн. 1. С.205-212.
- Павліков А.М. Нелінійна модель напружено-деформованого стану косозавантажених залізобетонних елементів у закритичній стадії: монографія, 2007. Полтава: ПНТУ ім. Юрія Кондратюка.
- Pavlikov A.M., Harkava O.V., Prykhodko Yu.O., Baryliak B.A. Experimental and Theoretical Testing Results of Reinforced Concrete Columns under Biaxial Bending. International Journal of Engineering & Technology, 2018. Vol. 7 (4.8), P. 145-151. URL: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27230>
- Wu Y.-F., Cao Yu. Energy Balance Method for Modeling Ultimate Strain of Confined Concrete. ACI Structural Journal, 2017. Vol. 114, No. 2, P. 373-381. URL: <https://doi.org/10.14359/51689429>
- Tijani I.A., Wu Y.-F., Lim C.W. Energy balance method for modelling ultimate strain of fiber-reinforced polymer-repaired concrete. Structural Concrete, 2020. Vol. 21, P. 804-820. URL: <https://doi.org/10.1002/suco.201900260>
- Samani A.K., Attard M.M. A stress-strain model for uniaxial and confined concrete under compression. Engineering Structures, 2012. Vol. 41, P. 335-349. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.027>

11. Pour A.F., Faradonbeh R. Sh., Gholampour A., Ngo Tuan D. Predicting ultimate condition and transition point on axial stress-strain curve of FRP-confined concrete using a meta-heuristic algorithm. *Composite Structures*, 2023. Vol. 304, part 2. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116387>
12. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. К.: Мінрегіонбуд України, 2011. 118.

References

1. DBN V.2.6-98:2009. Konstruktii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktii. Osnovni polozhennia. [Structures of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete structures. Substantive provisions]. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2022. 71 s.
2. Grammatikou S., Biskinis D., Fardis M.N. (2016). Ultimate Strain Criteria for RC Members in Monotonic or Cyclic Flexure. *Journal of Structural Engineering*, 142, 9. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001501](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001501)
3. Baduge Sh.K., Mendis P., Ngo T. (2018). Stress-strain relationship for very-high strength concrete (>100 MPa) confined by lateral reinforcement. *Engineering Structures*, 177, 795-808. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.008>
4. Rüsç H. (1960). Researches toward a general flexural theory for structural concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, 32, 1, 1-28.
5. Mytrofanov V.P., Pavlikov A.M. (2005). Ekstremalniy kryterii mitsnosti zalizobetonnykh elementiv u deformatsiiniy modeli. [Extreme strength criterion of reinforced concrete elements in the deformation model]. *Budivelni konstruktii. Naukovo-tekhnichni problemy suchasnoho zalizobetonu*, 62, 1, 205-212.
6. Pavlikov A.M. (2007). Nelineina model napruzhenno-deformovanoho stanu kosozavantazhenykh zalizobetonnykh elementiv u zakrytychniy stadii. [A nonlinear model of the stress-strain state of biaxially loaded reinforced concrete elements in the supercritical stage]. Poltava: PNTU im. Yurii Kondratiuka.
7. Pavlikov A.M., Harkava O.V., Prykhodko Yu.O., Baryliak B.A. (2018). Experimental and Theoretical Testing Results of Reinforced Concrete Columns under Biaxial Bending. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.8), 145-151. URL: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27230>
8. Wu Y.-F., Cao Yu. (2017). Energy Balance Method for Modeling Ultimate Strain of Confined Concrete. *ACI Structural Journal*, 114, 2, 373-381. URL: <https://doi.org/10.14359/51689429>
9. Tijani I.A., Wu Y.-F., Lim C.W. (2020). Energy balance method for modelling ultimate strain of fiber-reinforced polymer-repaired concrete. *Structural Concrete*, 21, 804-820. URL: <https://doi.org/10.1002/suco.201900260>
10. Samani A.K., Attard M.M. (2012). A stress-strain model for uniaxial and confined concrete under compression. *Engineering Structures*, 41, 335-349. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.027>
11. Pour A.F., Faradonbeh R. Sh., Gholampour A., Ngo Tuan D. (2023). Predicting ultimate condition and transition point on axial stress-strain curve of FRP-confined concrete using a meta-heuristic algorithm. *Composite Structures*, 304, 2. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116387>
12. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Structures of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete. Design rules]. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2011. 118.

BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS BASED ON THE CRITERIA OF FULL USE OF THE RESISTANCE OF THE COMPRESSED CONCRETE AREA

Abstract. *The article highlights the current state of methods for calculating the bearing capacity of reinforced concrete columns and suggested directions for their improvement. The development of the method of calculating the bearing capacity of reinforced concrete columns is carried out according to the deformation model based on the recommendations of current regulatory documents. At the same time, the problem of determining the design ultimate values of fiber strains of concrete in the composition of reinforced concrete members, which are of key importance in calculating the bearing capacity of columns, is solved. It is noted that in order to calculate the named strain values for columns that lose their bearing capacity upon reaching the yield point in tensile reinforcement, that is, they work under conditions of large eccentricities of external load application, it is expedient to use the extreme strength criterion under the condition $\sigma_s = f_{yd}$. Analytically determined the design ultimate values of fiber strains of concrete are used when calculating the bearing capacity of the columns. For the case of loading the columns with an external load with small eccentricities, the application of the extreme criterion at $\sigma_s < f_{yd}$ is implemented iteratively. In order to obtain analytical values of the design ultimate values of fiber strains of concrete in the composition of reinforced concrete columns during the operation of tensile reinforcement in the elastic stage, a criterion of full use of the resistance of the compressed concrete area is proposed. Based on it, of the design ultimate values of fiber strains of concrete are analytically determined, which can be used in determining the bearing capacity of columns working with small eccentricities of external load application. As a result, a diagram of the design ultimate values of the levels of fiber strains of concrete in the compressed area of the cross-*

section of an eccentrically compressed element of a rectangular profile at $\sigma_s < f_{yd}$ was constructed. For practical use, a method for determining the bearing capacity of reinforced concrete columns using the obtained values of strains has been developed. The implementation of the developed methodology is illustrated by an example.

Key words: reinforced concrete, column, axial loading and bending, section analysis.

Pavlikov A.M.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Structures,
National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava

Harkava O.V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Building Structures,
National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava