

РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ СТИСНУТО - ЗІГНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Бабіч Є.Є., Бабич Є.М.

Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна

АНОТАЦІЯ: Наведена методика розрахунку несучої здатності стиснуто-зігнутих елементів, що розроблена на основі положень нових нормативних документів. Доведено, що теоретичні значення несучої здатності елементів мають задовільну збіжність з експериментальними даними.

АННОТАЦИЯ: Приведена методика расчета несущей способности сжато-изогнутых железобетонных элементов, которая соответствует положениям новых нормативных документов. Показано, что экспериментальные значения несущей способности элементов имеют удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

ABSTRACT: Methods of the calculation of compressed-bent reinforced concrete elements, which developed on the base of new normative documents regulations, are presented. It is proved that theoretical meaning of bearing capacity has satisfactory convergence with experimental data.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Бетон, арматура, зчеплення, математична модель.

СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Правила проектування залізобетонних конструкцій [1] наводять загальні умови рівноваги елементів прямокутного перерізу при позацентровому стиску та згині, розглядаючи дві форми рівноваги: весь переріз стиснутий; в перерізі є зона стиснення. Певно, ці форми рівноваги можна розглядати для стиснуто-зігнутих елементів, які одночасно сприймають поздовжнє та поперечне навантаження [2]. В роботі [3] розглядаються

алгоритми для визначення напружено-деформованого стану стиснуто-зігнутих залізобетонних елементів з використанням діаграми деформування бетону у вигляді поліному п'ятої степені [4], але після введення в дію [1] вони потребують деяких уточнень. Зокрема, використати механічні характеристики бетону і арматури, критерії руйнування та форми напружено-деформованого стану згідно з [1]. Використання діаграм механічного стану бетону і арматури, які рекомендуються в Єврокод-2, розглянуті в роботах [5, 6].

В даній роботі наводиться удосконалена методика розрахунку залізобетонних стиснуто-зігнутих елементів, яка відповідає положенням [1] та надає можливість практично її використовувати.

РІВНЯННЯ РІВНОВАГИ ЗУСИЛЬ В НОРМАЛЬНИХ ПЕРЕРІЗАХ

Правилами проектування [1] при позacentровому стиску може виникати два випадки напружено-деформованого стану (дві форми рівноваги) нормального перерізу залізобетонного елемента: весь переріз стиснутий; в перерізі є зона розтягу. Ці випадки стосуються і стиснуто-зігнутих елементів (рис. 1).

Розглянемо рівняння рівноваги внутрішніх і зовнішніх зусиль в нормальних перерізах стиснуто-зігнутих елементів за мови, що задана деформація крайньої фібри стиснутого бетону $\varepsilon_{c1(1)}$ та відповідна їй величина стиснутої зони бетону (фактична чи умовна) $x = z_{(1)}$ (рис. 1). Використовуючи гіпотезу плоских перерізів, можна визначити всі інші деформації в матеріалах залежно від значення $\varepsilon_{c1(1)}$ та $z_{(1)}$:

$$\varepsilon_{s1(1)} = \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}}(z_{(1)} - a_1); \quad \varepsilon_{s2(1)} = \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}}(z_{(1)} - h + a_2);$$

$$\varepsilon_{c2(1)} = \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}}(z_{(1)} - h); \quad \varepsilon_c = \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}}z; \quad z = \frac{z_{(1)}}{\varepsilon_{c1(1)}}\varepsilon_c; \quad dz = \frac{z_{(1)}}{\varepsilon_{c1(1)}}d\varepsilon_c. \quad (1)$$

Для першої форми рівноваги рівняння суми проекцій поздовжніх сил $\Sigma N = 0$ можна записати у такому вигляді (рис. 1а):

$$b \int_{z_{(1)}-h}^{z_{(1)}} \sigma_c dz + \sigma_{s1(1)} A_{s1} + \sigma_{s2(1)} A_{s2} - N_E = 0, \quad (2)$$

де N_E – поздовжня сила від зовнішнього навантаження, яка діє з ексцентриситетом e_0 по відношенню до осі симетрії перерізу.

Враховуючи співвідношення (1) та приймаючи діаграму деформування бетону у вигляді поліному п'ятої степені [1], рівняння (2) можна записати у вигляді:

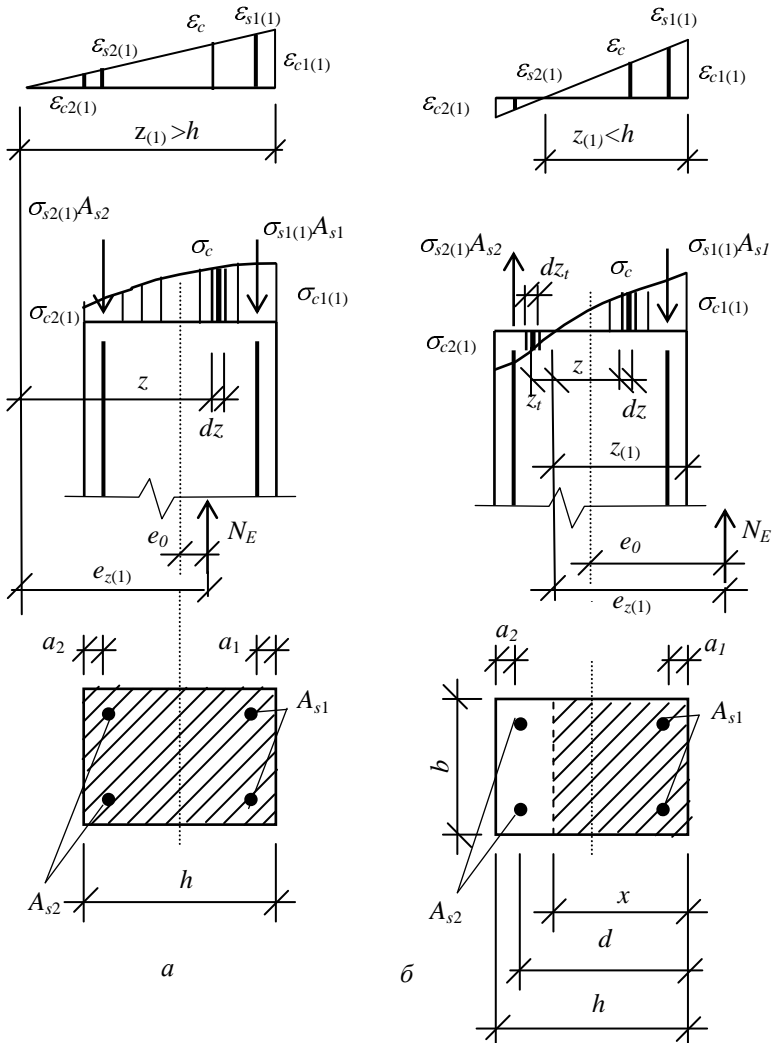


Рис. 1. Форми напружено-деформованого стану стиснуто-зигнутих елементів прямокутного перерізу: *a* – перша форма; *б* – друга форма

$$\begin{aligned}
 f_{cd} b \frac{z_{(1)}}{\varepsilon_{c1(1)}} \int_{\varepsilon_{c2(1)}}^{\varepsilon_{c1(1)}} \sum_{k=1}^5 a_k \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^k d\varepsilon_c + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - a_1) E_s A_{s1} + \\
 + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - h + a_2) E_s A_{s2} - N_E = 0,
 \end{aligned} \quad (3)$$

де f_{cd} – розрахункова міцність бетону на стиск;

a_k – коефіцієнти поліному [1];

ε_{c1} – деформація бетону при максимальних напруженнях [1].

Після інтегрування рівняння (3) може набути наступного вигляду

$$f_{cd} b z_{(1)} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_{c1(1)}}{\varepsilon_{c1}} \right)^k \left[1 - \frac{(z_{(1)} - h)^{k+1}}{z_{(1)}^{k+1}} \right] + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - a_1) E_s A_{s1} + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - h + a_2) E_s A_{s2} - N_E = 0, \quad (4)$$

або

$$f_{cd} b z_{(1)} \sum_{k=1}^5 \omega \left[1 - \frac{(z_{(1)} - h)^{k+1}}{z_{(1)}^{k+1}} \right] + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - a_1) E_s A_{s1} + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - h + a_2) E_s A_{s2} - N_E = 0, \quad (5)$$

де $\omega = \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_{c1(1)}}{\varepsilon_{c1}} \right)^k$ - коефіцієнт повноти епюри напружень в стиснутому

бетоні [7].

Рівняння рівноваги моментів внутрішніх і зовнішніх зусиль складаємо відносно умовної нейтральної лінії, яка розташована на віддалі $x = z_{(1)} > h$ від крайньої більш стиснутої фібри бетону

$$b \int_{z_{(1)}-h}^{z_{(1)}} \sigma_c z dz + \sigma_{s1(1)} A_{s1} (z_{(1)} - a_1) + \sigma_{s2(1)} A_{s2} (z_{(1)} - h + a_2) - N_E (z_{(1)} - 0,5h + e_0) = 0. \quad (6)$$

Після підстановки виразів для визначення деформацій, напружень та інтегрування отримаємо рівняння (6) у вигляді

$$f_{cd} b z_{(1)}^2 \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{c1(1)}}{\varepsilon_{c1}} \right)^k \left[1 - \frac{(z_{(1)} - h)^{k+2}}{z_{(1)}^{k+2}} \right] + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - a_1)^2 E_s A_{s1} + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - h + a_2)^2 E_s A_{s2} - N_E (z_{(1)} - 0,5h + e_0) = 0, \quad (7)$$

або

$$f_{cd} b z_{(1)}^2 \sum_{k=1}^5 \beta \left[1 - \frac{(z_{(1)} - h)^{k+2}}{z_{(1)}^{k+2}} \right] + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - a_1)^2 E_s A_{s1} + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - h + a_2)^2 E_s A_{s2} - N_E (z_{(1)} - 0,5h + e_0) = 0, \quad (8)$$

де $\beta = \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{c1(1)}}{\varepsilon_{c1}} \right)^k$ - коефіцієнт відносної несучої здатності бетонного перерізу[7].

Загальні умови рівноваги внутрішніх і зовнішніх зусиль для другої форми можна записати у вигляді

$$b \int_0^{z_{(1)}} \sigma_c dz + \sigma_{s1(1)} A_{s1} - \sigma_{s2(1)} A_{s2} - N_E = 0; \quad (9)$$

$$b \int_0^{z_{(1)}} \sigma_c z dz + \sigma_{s1(1)} A_{s1} (z_{(1)} - a_1) + \sigma_{s2(1)} A_{s2} (h - z_{(1)} - a_2) - N_E (e_0 - 0,5h + z_{(1)}) = 0. \quad (10)$$

Для другої форми рівноваги деформації в розтягнутій арматурі визначаються із співвідношення

$$\varepsilon_{s2(1)} = \frac{\varepsilon_{s1(1)}}{z_{(1)}} (h - z_{(1)} - a_2). \quad (11)$$

Виконуючи підстановки та математичні перетворення, як це робилося для першої форми рівноваги, отримуємо наступні рівняння для другої форми рівноваги:

$$f_{cd} b z_{(1)} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_{c1(1)}}{\varepsilon_{c1}} \right)^k + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - a_1) E_s A_{s1} - \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (h - z_{(1)} - a_2) E_s A_{s2} - N_E = 0, \quad (12)$$

або

$$\omega f_{cd} b z_{(1)} + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - a_1) E_s A_{s1} + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (h - z_{(1)} - a_2) E_s A_{s2} - N_E = 0; \quad (13)$$

$$f_{cd} b z_{(1)}^2 \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{c1(1)}}{\varepsilon_{c1}} \right)^k + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - a_1)^2 E_s A_{s1} + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (h - z_{(1)} - a_2)^2 E_s A_{s2} - N_E (z_{(1)} - 0,5h + e_0) = 0, \quad (14)$$

або

$$\beta f_{cd} b z_{(1)}^2 + \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - a_1)^2 E_s A_{s1} +$$

$$+ \frac{\varepsilon_{c1(1)}}{z_{(1)}} (z_{(1)} - h + a_2)^2 E_s A_{s2} - N_E (z_{(1)} - 0,5h + e_0) = 0. \quad (15)$$

Форма запису рівнянь (4), (5), (7), (8), (12) – (15) дещо відрізняється від форми запису аналогічних рівнянь, наведених в [1], а саме, наведені рівняння не містять в собі кривизни елементів, але в них введені коефіцієнти ω і β . Ці коефіцієнти залежать тільки від відношення $\varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$ і можуть бути обчислені для кожного класу бетону і зведені до таблиці, що зроблено в роботі [7]. Використання коефіцієнтів ω і β дозволяє спростити процес розрахунку несучої здатності нормальних перерізів стиснуто-зигнутих елементів, використовуючи метод поступового наближення [3].

ПОРІВНЯННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ

В комплексі досліджень роботи стиснуто-зигнутих залізобетонних елементів [2] виготовлена серія зразків третьої серії у вигляді колон довжиною 300 см з поперечним перерізом 16×10 см. Призмova міцність бетону складала $f_{cm,prism} = 27,5$ МПа, максимальні деформації, що відповідають $f_{cm,prism} - \varepsilon_{c1} = 148,7 \cdot 10^{-5}$. Колони армувалися симетрично чотирма стержнями діаметром 10 мм класу А500С.

Колона ЗК-3 була навантажена поздовжньою силою, прикладеною по геометричній осі, яка складала $N_E = 300$ кН, а потім доведена до руйнування поперечною силою V . При $N = 300$ кН фіброві деформації бетону грані, розташованої з боку прикладання сили V склали $\varepsilon_{c1(1)} = 89,3 \cdot 10^{-5}$, а на протилежній грані – $\varepsilon_{c2(1)} = 48,9 \cdot 10^{-5}$. В арматурі деформації склали відповідно $\varepsilon_{s1(1)} = 93,8 \cdot 10^{-5}$ і $\varepsilon_{s2(1)} = 103,6 \cdot 10^{-5}$ (табл. 1).

Таблиця 1

Результати випробувань колони ЗК-3 та порівняння експериментальних і теоретичних значень поздовжньої сили N

Поздовжня сила, N_E , кН	Поперечна сила V , кН	Деформації бетону, $\cdot 10^{-5}$		Деформації армат., $\cdot 10^{-5}$		Прогин, f , мм	Теоретична сила N_{th} , кН	$\frac{N_{th}}{N_E}$
		$\varepsilon_{c1(1)}$	$\varepsilon_{c2(1)}$	$\varepsilon_{s1(1)}$	$\varepsilon_{s2(1)}$			
300	0,0	89,3	48,9	93,8	103,9	-0,01	-	-
300	5,0	110,8	36,4	111,1	93,6	2,17	264,4	0,88
300	10,0	147,9	19,6	139,4	67,3	5,96	286,3	0,95
300	12,5	178,7	3,7	163,0	47,3	9,03	301,2	1,01
300	15,0	218,8	-6,5	191,2	15	13,08	316,8	1,06

За результатами розрахунків середнє значення відношення теоретичної сили N_{th} до дослідної N складо 0,97 при середньо-

квадратичному відхиленні $\sigma = 0,079$ і коефіцієнті мінливості $\nu = 0,081$. Зразок зруйнувався при $V_u = 17,5$ кН.

ВИСНОВКИ

1. Наведену методика розрахунку несучої здатності стиснуто-зігнутих елементів, що розроблена на основі положень нових нормативних документів, можна використовувати в проектній практиці.

2. Введення в розрахункові формули табличних коефіцієнтів ω і β дає можливість виконувати практичні розрахунки без використання обчислювальної техніки.

3. Доведено, що теоретичні значення несучої здатності елементів, обчислені за запропонованою методикою, мають задовільну збіжність з експериментальними даними.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6-156:2010. – К.: Мінрегіонбуд, 2010. – 166 с.
2. Бабич Є.М. Експериментальні дослідження гнучких стиснуто-зігнутих елементів при поперечних повторних навантаженнях // Є.М. Бабич, О.О. Заречанський / Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К.: НДІБК, 2006. – Вип. 65. – С. 253 – 259.
3. Бабіч Є.С. Алгоритм для визначення міцності і напружено-деформованого стану залізобетонних стиснуто-зігнутих елементів / Є.С. Бабіч, В.Є. Бабич / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2007. – Вип. 15. – С. 114 – 119.
4. Бамбура А.М. Експериментальні основи прикладної деформаційної моделі залізобетону: дис. ... доктора техн. наук: 05.23.01 / Бамбура Андрій Миколайович. – К., 2005. – 379 с.
5. Павліков А.М. Міцність навскісно стиснутих елементів у за критичній стадії // А.М. Павліков / Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К.: НДІБК, 2006. – Вип. 65. – С. 166 – 171.
6. Шкурупій О.А. Вплив процента армування на граничну деформацію стиснутої грані бетону позацентрово стиснутих залізобетонних елементів // О.А. Шкурупій, Д.М. Лазарев / Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К.: НДІБК, 2007. – Вип. 67. – С. 413 – 423.
7. Бабич Є.М. Розрахунок несучої здатності поперечних перерізів згинальних залізобетонних елементів // Є.М. Бабич, В.Є. Бабич, В.В.Савицький / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. Рівне, НУВГП, 2012. – Вип. 23. – С. 94 – 103.

Стаття надійшла до редакції 07.02.2013 р.