

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕМІЩЕНЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН РІЗНОЇ ГНУЧКОСТІ МЕТОДОМ ПОЧАТКОВИХ ПАРАМЕТРІВ

Виконано теоретичні дослідження визначення переміщень стиснутих залізобетонних колон методом початкових параметрів та методом ітерацій. Результати теоретичних розрахунків таких конструкцій зіставлено з експериментальними даними, одержаними автором та наведеними в роботах інших дослідників.

Ключові слова: бетон, арматура, колона, переміщення, деформація, напруження, модуль пружності, клас бетону, ітерація.

Вступ. Специфічні особливості залізобетону висувають додаткові вимоги до методів розрахунку жорсткості залізобетонних конструкцій (ЗБК) і їх залізобетонних елементів (ЗБЕ), у яких необхідно враховувати особливості деформування матеріалу з урахуванням зміни жорсткості нормальних перерізів на різних стадіях навантаження. Особливо це актуально після утворення нормальних тріщин, котрі з рівнем навантаження збільшуються за висотою перерізу, що суттєво змінює величини жорсткостей.

На сьогодні одним із головних завдань при проектуванні ЗБК є уточнення існуючих та розроблення нових методик розрахунку, в тому числі й тих, які було запропоновано і в нових нормативних документах [1, 2].

Залізобетонні колони досить широко застосовуються в різних будівлях та спорудах як несучі конструкції. Тому дослідження їх деформативності й удосконалення методики розрахунку таких конструкцій є важливим питанням.

Розрахунок за другою групою граничних станів обумовлює необхідність ретельного контролю значень усіх параметрів НДС елементів ЗБК на різних стадіях навантаження, особливо напруження в розтягнутій і стиснутій арматурі, оскільки їх розрахункові залежності суттєво різняться в діапазонах пружної та непружної роботи перш за все в переармованих конструкціях, а обмежений контроль параметрів НДС може призвести до результатів, які не відповідають дійсності. Тому проведення теоретичних і експериментальних досліджень для вивчення деформативності залізобетонних колон на різних рівнях навантаження з урахуванням узагальненого їх виду деформування – косоного стискання та різної гнучкості є актуальним завданням.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Розрахункам стиснутих залізобетонних елементів присвячено низку літературних джерел [1-15 та ін.]. Зокрема, більш детально розрахунку несучої здатності ЗБЕ на основі методики з екстремальним критерієм міцності приділено увагу в роботах [6, 9, 10, 14, 15].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Нові норми України для проектування ЗБК та їх елементів [1] містять низку принципово нових підходів до їх розрахунку за другою групою граничних станів. За основу розрахунків бетонних і залізобетонних елементів на дію поздовжніх сил прийнята деформаційна методика з емпіричним критерієм міцності, яка, крім рівнянь рівноваги, використовує умову деформування у вигляді гіпотези плоских перерізів і повні діаграми стану бетону. Але вона не враховує узагальненого їх виду деформування – косоного стискання. Залізобетонні колони великої гнучкості мають іншу специфіку деформування, на відміну від колон малої та середньої гнучкості, яка може бути врахована в обчисленнях переміщень по їх довжині лише при застосуванні чисельних методів і засобів обчислювальної техніки. Це дає можливість аналітично одержати величину прогину в результаті розрахунку за методикою, наведеною в роботах [14, 16]. Уточнення існуючих методик розрахунку ЗБК дозволяє виявити резерви економії матеріалів і є актуальним завданням.

Метою роботи є розрахунок переміщень стиснутих залізобетонних колон, які працюють на плоске та косе стискання, і порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними, одержаними автором та наведеними в роботах інших дослідників.

Основний матеріал і результати. Теоретичні дослідження обмежувались задачею визначення прогинів стиснутих залізобетонних колон із застосуванням методу початкових параметрів і методу ітерацій.

Задача визначення напружено-деформованого стану перерізу зводиться до обчислення основних параметрів: деформації найбільш стиснутої фібри бетону стиснутої зони перерізу, її висоти та кута нахилу нейтральної лінії, які отримуємо шляхом розв'язання системи рівнянь рівноваги [12]. Необхідно відмітити значну трудомісткість розв'язку цієї системи рівнянь, що потребує залучення засобів обчислювальної техніки. Складові цих рівнянь рівноваги являють собою зусилля та моменти зовнішніх і внутрішніх сил у нормальному перерізі залізобетонного елемента. Зусилля, які сприймаються бетоном стиснутої й розтягнутої зон, а також координати точок їх прикладання визначаються шляхом інтегрування залежностей (5), (6) [16] за площею стиснутої та не тріснутої частини розтягнутої зони бетону.

У разі косоного стиснення аналогічні величини визначаються більш складними трансцендентними виразами. Підстановка їх у систему рівнянь рівноваги призводить до необхідності вирішення нелінійної системи трансцендентних рівнянь зі змінними коефіцієнтами. Така система може бути вирішена тільки чисельним методом шляхом підбору значень деформації найбільш стиснутої фібри бетону стиснутої зони перерізу, її висоти та кута нахилу нейтральної лінії, що задовольняють записані умови.

Кривизна нейтрального шару елемента і переміщення його перетинів можуть бути визначені, виходячи із загального диференціального рівняння зігнутої осі,

$$f'' = \frac{1}{\rho} = \pm M / EI. \quad (1)$$

Оскільки жорсткість елемента мінлива за його довжиною і є функцією рівня навантажування, то безпосереднє інтегрування рівняння (1) неможливе. З іншого боку, кривизна елементарної ділянки елемента може бути визначена за такою залежністю:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_c}{x_c}, \quad (2)$$

де ε_c – деформація найбільш стиснутої фібри бетону стиснутої зони перерізу, а x_c' – її висота. Тоді залежність (1) з достатньою точністю можна прийняти такою, що дорівнює

$$f'' = \frac{\varepsilon_c}{x_c}. \quad (3)$$

Беручи кривизну в межах елементарної ділянки постійною, проінтегруємо двічі рівняння (3) по довжині ділянки й одержимо

$$f' = \frac{\varepsilon_c}{x_c} \cdot x + C_1; \quad (4)$$

$$f'' = \frac{\varepsilon_c}{2x_c} \cdot x^2 + C_1 \cdot x + C_2. \quad (5)$$

Виходячи з початкових умов $x = x_0$, одержимо

$$f = C_2 = f_0; \quad (6)$$

$$f' = C_1 = \varphi_0. \quad (7)$$

Отже

$$f' = \frac{\varepsilon_c}{x_c} \cdot x + \varphi_0; \quad (8)$$

$$f'' = \frac{\varepsilon_c}{2x_c'} \cdot x^2 + \varphi_0 \cdot x + f_0 . \quad (9)$$

Розділивши довжину елемента на n рівних ділянок довжиною $\Delta\ell$ і визначивши в точках ділення значення ε_c , x_c' і γ , переміщення і кути повороту визначаємо, використовуючи формули методу початкових параметрів:

$$f_i = f_{i-1} + \varphi_{i-1} \cdot \Delta\ell + \frac{\varepsilon_{c,i-1} \cdot (\Delta\ell)^2}{2x_{c,i-1}'} ; \quad (10)$$

$$\varphi_i = \varphi_{i-1} + \frac{\varepsilon_{c,i-1} \cdot \Delta\ell}{x_{c,i-1}'} . \quad (11)$$

Індексом i позначається черговий переріз колони.

Застосування цих формул вимагає знання початкових значень переміщення і кута повороту. Оскільки початковий кут повороту φ_0 невідомий, то задача вирішується методом прогонки. Задаючись різними значеннями φ_0 , добиваємося задоволення граничної умови на протилежному кінці елемента (при $x = \ell$, $f = 0$). Викладена методика розрахунку за деформаціями була реалізована в програмі для ЕОМ.

У результаті розрахунку отримано основні параметри напружено-деформованого стану і переміщення в 14 – 20 перерізах кожного плоско і косо позацентровано стиснутого залізобетонного елемента при різних рівнях навантаження, в тому числі й тих, де знаходилися прогини. У таблиці 1 наводяться результати порівняння теоретичних і дослідних значень переміщень (f). Методика проведення експерименту, конструктивні геометричні параметри зразків та фізико-механічні характеристики матеріалів наведені в роботі [16].

Таблиця 1 – Порівняння теоретичних і дослідних значень прогинів

Шифр зразка	Рівень навантаження N / N_u	Переріз 3 ($x=0,25l$)		Переріз 2 ($x=0,5l$)		Переріз 1 ($x=0,75l$)	
		$f_{\text{exp}}, \text{мм}$	$f_{\text{exp}} / f_{\text{teor}}$	$f_{\text{exp}}, \text{мм}$	$f_{\text{exp}} / f_{\text{teor}}$	$f_{\text{exp}}, \text{мм}$	$f_{\text{exp}} / f_{\text{teor}}$
К-1-2	0,635	4,470	0,927	4,840	1,103	4,170	0,890
К-1-3	0,560	4,460	1,012	4,800	0,964	3,870	1,120
К-2-1	0,615	7,800	1,076	8,900	1,067	6,700	1,000
К2-2	0,602	9,300	0,935	11,80	9,941	8,800	0,940
К-2-3	0,615	7,930	1,155	8,950	1,171	6,670	1,087
К-3-2	0,570	9,000	0,890	9,700	0,960	6,300	1,030
К-3-3	0,650	9,1000	0,880	10,90	0,944	6,500	1,000
К-3-9	0,545	4,000	0,805	4,600	0,851	2,900	1,067
К-4-3	0,553	11,40	0,826	10,60	0,940	6,400	0,900
К-4-6	0,620	7,100	0,918	7,800	0,824	6,100	0,840
К-4-9	0,625	6,300	0,794	7,400	0,803	5,400	0,870
К-1-1	0,625	4,470	0,872	4,720	0,960	3,800	0,950
К-2-4	0,648	8,600	1,245	10,70	1,257	8,200	1,108
К-3-4	0,571	8,560	1,230	11,26	1,180	8,150	1,125
К-3-8	0,568	4,900	0,820	5,400	0,872	4,500	0,910
К-4-7	0,667	7,600	0,980	8,300	0,964	7,400	0,921
Статистичні характеристики: $\bar{X} = 0,93$; $\sigma = 0,19$; $\nu = 0,2$; $A = 0,64$; $E = -0,18$.							
Забезпеченість точності розрахунку: $\pm 10\% - 58,04$; $\pm 20\% - 78,00$; $\pm 30\% - 96,42$.							

Висновки. Аналіз зіставлення дослідних і теоретичних значень, перелічених вище параметрів, обчислених за запропонованою методикою, показує хорошу збіжність (таблиця 1). Це свідчить, що така методика з достатнім ступенем точності може використовуватися при розрахунку плоско і косо позацентрово стиснутих залізобетонних елементів змінного перерізу за деформаціями.

Література

1. *Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6. 98:2009. - [Чинний від 01.06.2011]. - К.: Мінрегіонбуд України, 2011. - 72 с.*
2. *ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. - К.: Мінрегіонбуд України, 2010. - 168 с.*
3. *Залесов, А.С. Деформационная расчётная модель железобетонных элементов при действии изгибающих моментов и продольных сил / А.С. Залесов, Е.А. Чистяков, И.Ю. Ларичева // Бетон и железобетон. - 1996. - № 5. - С. 16 - 18.*
4. *Байков, В.Н. Определение предельного состояния внецентренно сжатых элементов по неупругим зависимостям напряжения - деформации бетона и арматуры / В.Н. Байков, С.В. Горбатов // Бетон и железобетон. - 1985. - № 6. - С. 13 - 14.*
5. *Бамбура, А.М. Критерії руйнування елементів позацентрово-стиснених та згинних елементів з пружно-пластичного матеріалу з обмеженою деформативністю / А.М. Бамбура // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. - К.: НДІБК, 2000. - Вип. 52. - С. 37 - 44.*
6. *Митрофанов, В.П. Практическое применение деформационной модели с экстремальным критерием прочности железобетонных элементов / В.П. Митрофанов // Коммунальное хозяйство городов. Серия: Архитектура и технические науки. Вып. 60. - К.: Техника, 2004. - С. 29 - 48.*
7. *Павліков, А.М. Напружено-деформований стан навскісно завантажених залізобетонних елементів у закритичній стадії. автореф. дис. ... докт. техн. наук / Павліков Андрій Миколайович. - Полтава, 2008. - 40 с.*
8. *Роговий, С.І. Про критерії розмежування випадків позацентрового стиснення залізобетонних елементів / С.І. Роговий // Збірник наук. праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво. - Полтава: ПолтНТУ, 1999. - Вип. 4. - С. 50 - 55.*
9. *Шкурупій, О.А. Граничний напружено-деформований стан і міцність стиснутих залізобетонних елементів / О.А. Шкурупій, П.Б. Митрофанов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. - Рівне: НУВГП, 2013. - Вип. 25. - С. 480 - 487.*
10. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures. EN 1992 - 1.1: General Rules and Rules for buildings. - Brussels: CEN, 2004. - 226 p.*
11. *Vanderlei, R.D. Theoretical - Experimental Analysis of Reinforced High Strength Concrete Columns Under Eccentric Compression / R.D. Vanderlei, J.S. Giongo, T. Takeya // 5-th Int. Symp. on Utilization of HS/HP Concrete. 20-24 June 1999, Sandefjord, Norway. - Proceedings, Vol. 2. - P. 673-682.*
12. *Takeuti, A.R. Strength and Ductility of Reinforced Concrete Columns Strengthened with High-Performance Concrete Jackets / A.R. Takeuti, J.B. Hanai // 5-th Int. Symp. on Utilization of HS/HP Concrete. 20-24 June 1999, Sandefjord, Norway. - Proceedings, Vol. 1. - P. 646 - 655.*
13. *СП 63.1330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. - М.: Минрегион России, 2012. - 161 С.*

14. Шкурупій, О.А. Розрахунок несучої здатності позацентрово стиснутих залізобетонних колон / О.А. Шкурупій, О.В. Семко // Коммунальное хозяйство городов : сб. научн. трудов. – К.: Техника, 2008. – Вып. 81. – С. 27 – 33.
15. Шкурупій, О.А. Розрахунок міцності стиснутих залізобетонних елементів із високоміцних бетонів на основі деформаційної моделі / О.А. Шкурупій, П.Б. Митрофанов // Збірник наук. праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – Вып. 2(24). – С. 43 – 49.
16. Вахненко, П.Ф. Методика расчета железобетонных элементов с переменной по длине высотой сечения для случая плоского и косоугольного внецентренного сжатия по деформациям / П.Ф. Вахненко, А.А. Шкурупій // Полт. ИСИ. – Полтава, 1988. – 18 с.: ил. – Библиогр.: 3 назв. Деп. в ВНИИИС 27.04.88, №8887.

А.А. Шкурупій, к.т.н., доцент
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН РАЗЛИЧНОЙ ГИБКОСТИ МЕТОДОМ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Выполнены теоретические исследования определения перемещений сжатых железобетонных колонн методом начальных параметров и методом итераций. Результаты теоретических расчетов таких конструкций сопоставлены с экспериментальными данными, полученными автором и приведенными в работах других исследователей.

Ключевые слова: бетон, арматура, колонна, перемещение, деформация, напряжение, модуль упругости, класс бетона, итерация.

O.A. Shkurupiy, Ph.D., Associate Professor
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

CALCULATING OF DISPLACEMENTS OF CONCRETE COLUMNS OF DIFFERENT FLEXIBILITY BY INITIAL PARAMETERS METHOD

Theoretical research for determining displacements of compressed reinforced concrete columns by the initial parameters and iteration method is done. The results of theoretical calculations are compared with experimental data obtained by the author and presented in the works of other researchers.

Keywords: concrete, reinforcement, column, displacement, deformation, tension, module of elasticity, concrete class, iteration.

Надійшла до редакції 28.09.2014
© О.А. Шкурупій