УДК 624.015.5 **DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.162.2016.78464**

РОЗРАХУНОК ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН З УРАХУВАННЯМ ПОВНОЇ ДІАГРАМИ ДЕФОРМУВАННЯ БЕТОНУ

Кандидати техн. наук В. А. Кириченко, О. А. Крупченко, старш. викл. І. А. Юрко

РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН С УЧЕТОМ ПОЛНОЙ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА

Кандидаты техн. наук. В. А. Кириченко, А. А. Крупченко, старш. преп. И. А. Юрко

CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS USING THE FULL DEFORMATION DIAGRAM CONCRETE

Assistants professor V. Kyrychenko, O. Krupchenko, senior lecturer I. Yurko

У статті наведено методику розв'язання задачі міцності нормального перерізу стиснутої залізобетонної колони з використанням деформаційної моделі розрахунку, побудованої на повних діаграмах стану матеріалів. Як повні діаграми для бетону та арматури використані дробово-раціональна та дволінійна функції відповідно.

Наведена методика розрахунку міцності нормального перерізу позацентрово стиснутої залізобетонної колони може використовуватися в інженерних розрахунках.

Ключові слова: *залізобетонні конструкції, напружено-деформований стан, деформаційна модель, міцність.*

В статье приведена методика решения задачи прочности нормального сечения сжатой железобетонной колонны с использованием деформационной модели расчета, основанной на полных диаграммах состояния материалов. В качестве полных диаграмм для бетона и арматуры использованы дробно-рациональная и двухлинейная функции.

Приведенная методика расчета прочности нормального сечения внецентренно сжатой железобетонной колонны может использоваться в инженерных расчетах.

***Ключевые слова**: железобетонные конструкции, напряженно-деформированное состояние, деформационная модель, прочность.*

A method for solving the problem of the normal section of the compressed concrete strength column is shown. The authors used the deformation calculation model based on the complete diagrams of the materials. The rational and the two-line function used as complete diagrams for concrete and reinforcement. The case where a concentrated force applied to the eccentricity, which coincides with one of the axes of symmetry of the rectangular section tower, was considered.

The results of calculation of normal section strength were compared with the results obtained by the regulatory procedure DBN V.2.6-98: 2010. The discrepancy between the author's calculation methods and other data were 5% and 10%.

At each stage were obtained strength values, which are reflected graphically as dependency "section of effort - curvature" and "normal force - deformation of compressed concrete zone." The values of strength correspond to the maximum in the curve of compressed state of the element.

Given method of calculation strength of the normal section of reinforced concrete eccentric compression column can be used in engineering calculations.

***Key words:** concrete structures, stress-strain state, deformation model strength.*

Вступ. При розрахунках залізобетонних конструкцій часто використовуються емпіричні залежності та різні коефіцієнти, що призводить до викривлення дійсної картини роботи цих конструкцій у реальних умовах. Більшість бетонних і залізобетонних елементів працюють в умовах позацентрового стискання. Причиною його виникнення є конструктивні, технологічні чи експлуатаційні фактори. При проектуванні нових чи реконструкції існуючих будівель часто виникає потреба в наявності інженерної методики для виконання розрахунків цих елементів.

Останнім часом поряд з існуючими методиками розрахунку залізобетонних конструкцій широкого розповсюдження набувають методики, що ґрунтуються на реальних діаграмах деформування матеріалів з урахуванням характеру і тривалості дії навантаження [1 – 8, 10, 11]. Такий підхід дає змогу більш точно описувати не тільки граничний стан елемента, а й отримувати залежність розвитку деформацій зі збільшенням навантаження. Використання цих методик дає можливість об’єктивніше враховувати фізичні особливості роботи матеріалів, а також точніше оцінювати напружено-деформований стан та міцність залізобетонних елементів. Основи такої моделі широко застосовуються в закордонній практиці, включені в міжнародні нормативні документи, впроваджуються в державні норми проектування залізобетонних і бетонних конструкцій [9].

Огляд останніх досліджень і публікацій показує, що у методиках, в основу яких покладено деформаційну модель, дослідниками вводяться різні гіпотези і обмеження, також для опису стану бетону використовуються різні функції (дробово-раціональна чи поліном п’ятого ступеня) [1, 2], все це впливає на кінцеві результати розрахунків.

Формулювання мети статті. Метою даної статті є адаптування методики розрахунків за деформаційною моделлю, розробленої в [3 – 4, 8, 10] для сталезалізобетонних конструкцій, до розрахунку залізобетонних колон (рис. 1).

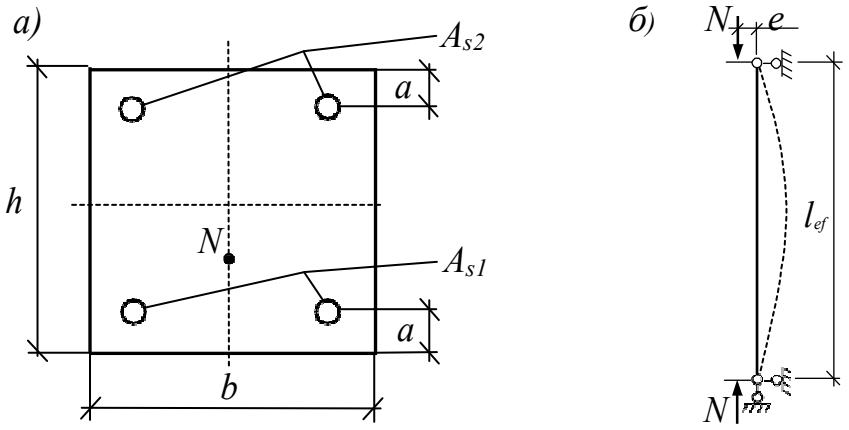

Рис. 1. Схема для розрахунку несучої здатності позацентрово стиснутих елементів: а – схема перерізу; б – розрахункова схема стержня

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети необхідно отримати повну залежність між параметрами деформування (це може бути прогин, радіус кривизни, деформації крайніх точок перерізу) та параметрами навантаження (величина зовнішнього навантаження на елемент чи внутрішнього зусилля в перерізі). Розв'язання прямої задачі (через задані зусилля знаходимо параметри деформування) не є ефективним через необхідність реалізації методу послідовних наближень для кожного ступеня навантаження. Тобто для кожного значення зусилля методом послідовних наближень доводиться шукати кривизну, причому у кожному послідовному наближенні необхідно визначити положення нульової лінії. Таким чином, маємо три вкладених цикли розрахунків для отримання повної залежності деформацій від зусиль. Вказана схема обчислень має ще один суттєвий недолік – таким чином неможливо отримати деформований стан на низхідній гілці діаграми. Навіть якщо таку можливість передбачити алгоритмом, то виникає неоднозначність розв'язку – одному значенню зусилля відповідає два можливих деформованих стани.

Більш ефективним є розв'язання зворотної задачі, де будь-які задані параметри деформування однозначно визначають внутрішні зусилля в перерізі. У цьому випадку необхідно задати кривизну, визначити методом послідовних наближень положення нульової лінії та провести прямий розрахунок внутрішніх сил без застосування алгоритму пошуку. Тут маємо вже не три, а тільки два вкладених цикли розрахунків для отримання повної залежності деформацій від зусиль.

У запропонованій методиці розрахунку використано діаграму стану бетону на стиск $\sigma_c - \varepsilon_c$ (рис. 2) в такому вигляді:

$$\frac{\sigma_c}{f_{cd}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta}, \qquad (1)$$

де η – рівень деформації крайньої фібри, $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1,cd}$, ;

k – коефіцієнт пружно-пластичних властивостей бетону, $k = E_c \varepsilon_{c1,cd} / f_{cd}$;

$\varepsilon_{c1,cd}$ – деформації у вершині діаграми, $\varepsilon_{c1,cd} = 0{,}0007 f_{cd}^{0,31}$.

Для колон прямокутного перерізу (рис. 1) розмірами b = 300 мм, h = 300 мм; клас бетону С20/25 (f_{cd} = 14,5 МПа, E_{cd} = 23,0 ГПа) k становить 2,714.

Робота бетону описується тільки у зоні стиску, у зоні позитивних деформацій (у зоні розтягу) напруження відсутні.

При визначенні напружень в арматурі використовується діаграма Прандтля (рис. 3), тобто до настання деформацій, що відповідають границі текучості f_{yd}, напруження дорівнюють $\sigma_r = E_r\varepsilon_r$, у разі переходу через межу текучості $\sigma_r = f_{yd}$ як для додатних, так і для від'ємних деформацій.

Деформований стан перерізу при справедливості гіпотези плоских перерізів найкраще описувати положенням нульової лінії x_n та кривизною $k_1 = 1/r$. Тоді процес деформування (наростання деформацій) можна моделювати збільшенням кривизни k_1.

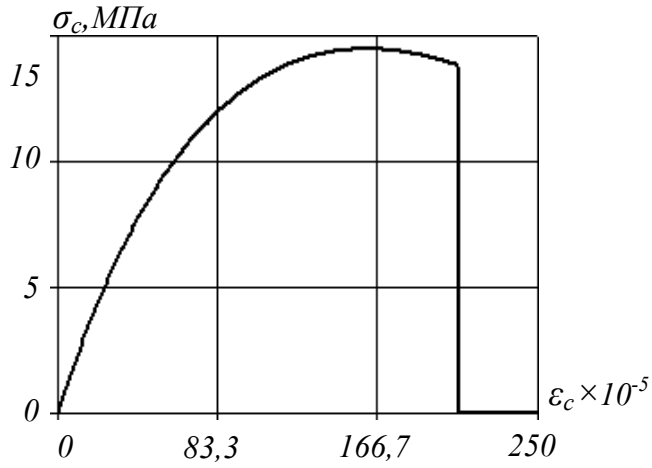

Рис. 2. Повна діаграма залежності σ_c-ε_c стиснутого бетону

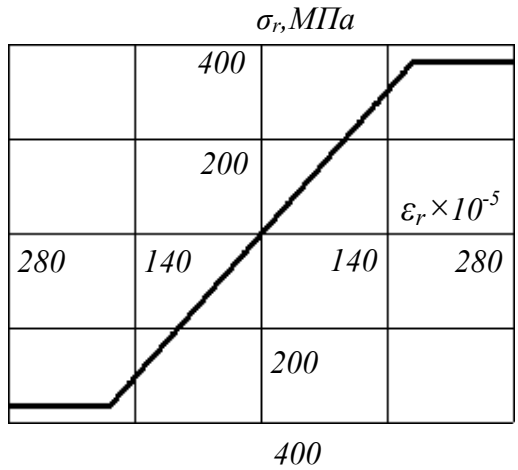

Рис. 3. Діаграма залежності σ_r-ε_r сталевого елемента

Для визначення напружено-деформованого стану в нормальному перерізі використовується два рівняння рівноваги: сума проекцій усіх сил на поздовжню вісь конструкції та сума моментів відносно вибраної осі у перерізі конструкції, що перпендикулярна площині дії згинального моменту. Для складання цих рівнянь необхідно визначити внутрішні зусилля, які виникають в перерізі, для цього він розбивається на складові: бетонна складова, розтягнута арматура, стиснута арматура.

Внутрішнє зусилля – це інтеграл по площі від функції напружень, тоді:

$$N_c(\rho) = b\int_0^h \sigma_c\left(x \cdot \frac{1}{\rho}\right)dx; \qquad (2)$$

$$N_{s1}(\rho) = 2s\int_{a-s/2}^{a+s/2} \sigma_{r1}\left(x \cdot \frac{1}{\rho}\right)dx; \qquad (3)$$

$$N_{s2}(\rho) = 2s\int_{h-a-s/2}^{h-a+s/2} \sigma_{r2}\left(x \cdot \frac{1}{\rho}\right)dx, \qquad (4)$$

де N_c, N_{s1}, N_{s2} – рівнодіючі, що виникають у бетоні, стиснутій та розтягнутій арматурі;

$\sigma_c, \sigma_{r1}, \sigma_{r2}$ – напруження, що виникають у бетоні, стиснутій та розтягнутій арматурі;

$x \cdot \frac{1}{\rho} = \varepsilon$ – поздовжня відносна деформація на рівні координати x згідно з гіпотезою плоских перерізів;

s – сторона квадрата, площа якого дорівнює площі арматури діаметром d.

Перше рівняння рівноваги $\sum N_i = 0$ запишеться так:

$$N_c(\rho) + N_{s1}(\rho) + N_{s2}(\rho) - N = 0, \quad (5)$$

де N зовнішнє навантаження. Моменти, які здатна сприймати кожна із складових поперечного перерізу відносно вибраної осі, будуть мати вигляд:

$$M_c(\rho) = b\int_0^h \sigma_c(x \cdot \frac{1}{\rho})xdx; \quad (6)$$

$$M_{s1}(\rho) = 2s\int_{a-s/2}^{a+s/2} \sigma_{r1}(x \cdot \frac{1}{\rho})xdx; \quad (7)$$

$$M_{s2}(\rho) = 2s\int_{h-a-s/2}^{h-a+s/2} \sigma_{r2}(x \cdot \frac{1}{\rho})xdx. \quad (8)$$

Друге рівняння рівноваги $\sum M_i = 0$ запишеться так:

$$M_c(\rho) + M_{s1}(\rho) + M_{s2}(\rho) - M = 0, \quad (9)$$

де M – згинальний момент, що виникає від зовнішнього навантаження.

Далі, використовуючи додаткову умову $M / N = e$, виконується ітераційний пошук значення поздовжньої сили N при фіксованому значенні ρ (радіус кривизни стержня), в даному випадку необхідно, щоб положення рівнодіючої внутрішніх зусиль збігалося з положенням зовнішнього навантаження. Графік зміни поздовжньої сили від кривизни наведено на рис. 4.

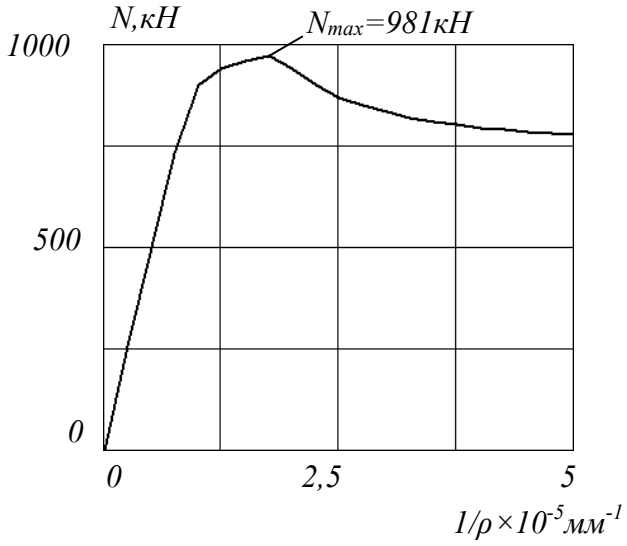

Рис. 4. Залежність поздовжньої сили від кривизни стержня

Для реалізації даної методики розроблена програма розрахунку на ПЕОМ з використанням програми „MathCAD Professional”.

За запропонованою методикою була розрахована колона із поперечним перерізом, зображеним на рис. 1 (b = 300 мм, h = 300 мм; клас бетону С20/25, f_{cd} = 14,5 МПа, E_{cd} = 23,0 ГПа; арматура А400С, d = 16 мм, f_{yd} = 364 МПа, товщина захисного шару бетону а = 30 мм, e = 60 мм). Несуча здатність N_{max} склала 981 кН. Раніше дана колона розраховувалася за ДБН В.2.6-98: 2009 з використанням дробово-раціональної функції – N_{max} = 988 кН і з використанням поліноміальної діаграми стану бетону з уточненими значеннями коефіцієнтів – N_{max} = 967 кН [9]

Висновки. Результати розрахунків дають змогу вважати, що запропонована методика за деформаційною моделлю з достатньою точністю відображає реальні дані щодо несучої здатності і може бути рекомендованою для розрахунку стиснутих залізобетонних елементів.

Список використаних джерел

1. Павліков, А. М. Нелінійна модель напружено-деформованого стану косозавантажених залізобетонних елементів у закритичній стадії [Текст]: [монографія] / А. М. Павліков. – Полтава: ПолтНТУ, 2007. – 259 с.
2. Роговой, С. И. Нелинейное деформирование в теории железобетона и расчет прочности нормальных сечений [Текст] / С. И. Роговой. – Полтава, 2002. – 183 с.
3. Стороженко, Л. І. Розрахунок згинальних сталезалізобетонних двотаврових елементів із залізобетонним верхнім поясом [Текст] / Л. І. Стороженко, В. А. Кириченко, О. А. Крупченко // Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація: зб. наук. пр. – К.: НДІБК, 2008. – Вип. 70. – С. 43 – 51.
4. Крупченко, О. А. Напружено-деформований стан та міцність сталезалізобетонних двотаврових балок із залізобетонним верхнім поясом [Текст]: дис канд. техн. наук: 05.23.01 / О. А. Крупченко. – Полтава: ПолтНТУ, 2008. – 197 с.
5. Takeuti, A. R. Strength and Ductility of Reinforced Strength Concrete Columns Strengthened with High-Performance Concrete Jackets [Text] /A. R. Takeuti, J. B. de Hanai // 5-th Int. Symp. On Utilization of HS/HP Concrete. 20 – 24 June 1999, Sandefjord, Norway. Proceedings, Vol. 2. – pp. 646 – 655.
6. Сколибог, О. В. Сталезалізобетонні балки із зовнішнім листовим армуванням [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / О. В. Сколибог. – Полтава: ПолтНТУ, 2006. – 193 с.
7. Павліков, А. М. Розв’язання задач міцності позацентрово стиснутих залізобетонних елементів у нормальному перерізі на основі нелінійної діаграми стану бетону [Текст] /А. М. Павліков, П. А. Юрко // Зб. наук. праць (галузеве машинобудування, будівництво) / Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – Вип.1(29). – С. 61-65.
8. Розрахунок стиснутих елементів зі сталевих двотаврів із боковими порожнинами, заповненими бетоном з використанням повної діаграми деформування бетону [Текст] / Л. І. Стороженко, В. А. Кириченко, О. А. Крупченко, О. І. Лапенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГтаП, 2011. – Вип. 21. – С. 353-359.
9. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]: ДБН В.2.6-98:2009; [чинні від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, Державне підприємство «Украрчбудінформ», 2011. – 71 с. – (Державні будівельні норми).
10. Yurko, P.A. Strength calculation of normal section eccentrically compressed reinforced concrete column using deformation model [Text] / Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во) / Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – Вип.3 (34). – С. 90-95.

11. De Luca, A. Behavior of Full-Scale Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Columns under Axial Load [Text] / A. De Luca, F. Matta, A. Nanni // ACI Journal. – 2010. – P. 589-596.

Рецензент д-р техн. наук, професор О. В. Нижник

Кириченко Володимир Анатолійович, канд. техн. наук, доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондатюка.
E-mail: buddekanat@yandex.ru.
Крупченко Олександр Анатолійович, канд. техн. наук, доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондатюка.
Тел. 0958138467. E- mail: Gasent@mail.ru.
Юрко Ілона Анатоліївна, старший викладач кафедри технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. E- mail: Ilona.yurko@yandex.ua.

Kyrychenko Volodymyr, associate professor of department of reinforced-concrete and stone constructions and resistance of materials of the Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. E-mail: buddekanat@yandex.ru.
Krupchenko Oleksandr, associate professor of department of reinforced-concrete and stone constructions and resistance of materials of the Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. E-mail: Gasent@mail.ru.
Ilona Yurko, senior lecturer of department of technology of building structures, products and materials of the Poltava National Technical University. E-mail: Ilona.yurko@yandex.ua.

Стаття прийнята 24.06.2016 р.