УДК 624.012.35.04

ПРОЕКТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ НЕЛІНІЙНОЇ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

Микитенко С.М.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
м. Полтава, Україна

АНОТАЦІЯ: Розроблено метод оптимального проектування залізобетонних балок прямокутного перерізу на основі критерію вартості та формули для визначення оптимальних параметрів перерізу.

АННОТАЦИЯ: Разработан метод оптимального проектирования железобетонных балок прямоугольного сечения на основе критерия стоимости и формулы для определения оптимальных параметров сечения.

ABSTRACT: The method of the optimal designing of reinforce-concrete beams of rectangular section is offered on the basis of measure of value and formulas offer for determination of optimal parameters of section.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Залізобетон, оптимальне проектування, балки прямокутного перерізу.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Зростання вартості будівельних матеріалів потребує вирішення проблеми зниження матеріаломісткості будівельних конструкцій. Одним із шляхів вирішення цієї задачі є застосування методів оптимізації до процесу проектування конструкцій. Оптимальне проектування є цілеспрямованим вибором параметрів конструкції, яке дозволяє отримати найкращий результат за певним критерієм. Для вирішення таких задач

доцільно застосовувати методи оптимізації, котрі дають можливість одночасно враховувати вплив різних факторів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Значна кількість робіт з оптимізації присвячена дослідженням у будівельній механіці та конструкцій із металу. Серед наукових праць, які стосуються досліджень в галузі залізобетону, як найбільш фундаментальну можна виділити роботу [1]. За кордоном питанням оптимізації будівельних конструкцій взагалі та залізобетонних конструкцій, зокрема, дослідниками приділяється постійна увага [2]. Залізобетонні конструкції є найбільш розповсюдженими, тому задача їх оптимального проектування є актуальною, особливо в теперішній час, коли гостро стоять питання енерговитрат та вартості будівництва.

Застосування певного критерію оптимальності залежить від кінцевої мети, яка ставиться на початку проектування. За результатами досліджень в області оптимізації можна виділити два основних критерії оптимальності: перший – конструкції мінімальної маси, другий – конструкції мінімальної вартості. На перший погляд, ці два критерії можуть дублювати один одного, наприклад менша маса – менша вартість і навпаки, але, як буде показано далі така залежність не завжди підтверджується. Повне врахування вартості, технологічних та інших факторів потребує значної кількості показників, що ускладнює задачу оптимізації. Особливо це стосується конструкцій із залізобетону, наприклад на собівартість виробу $C_{зб}$ відповідно до рекомендацій [3] впливає до восьми чинників. Така значна кількість факторів, які впливають на собівартість конструкції ускладнює алгоритм оптимізації, тому їх можна об’єднати у два узагальнені критерії: $C_б$ – вартість одиниці об’єму бетону та C_a – вартість сталі у виробі. Тоді критерій вартості для залізобетону в загальному випадку буде являти собою вартість бетону та сталі у виробі

$$C_{зб} = \int_V C_б V_б + C_a V_a \gamma_s \; dV, \tag{1}$$

де $V_б$ – об’єм бетону в конструкції;

V_a – об’єм сталі в конструкції;

γ_s – маса 1 м^3 арматурної сталі.

У роботі [4] розглядається оптимальне проектування збірного залізобетонного перекриття за критерієм мінімальної маси. Окрім застосування різних критеріїв оптимізації дослідниками використовуються різноманітні методи оптимізації. Разом із методами математичного

програмування [5], які дають можливість отримувати рішення у вигляді детермінованих залежностей, в останні десятиліття широкого розповсюдження набувають еволюційні алгоритми, зокрема генетичний алгоритм. Результати застосування генетичного алгоритму для оптимізації залізобетонного ребристого перекриття наведено в роботі [6] де в якості цільової функції використовується критерій вартості.

Метою статті є розроблення аналітичного оптимізаційного розрахунку балок мінімальної вартості з урахуванням нелінійних властивостей бетону.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Задача проектування балок мінімальної вартості розв'язується як оптимізаційна за розрахунковою схемою, зображеною на рис 1.

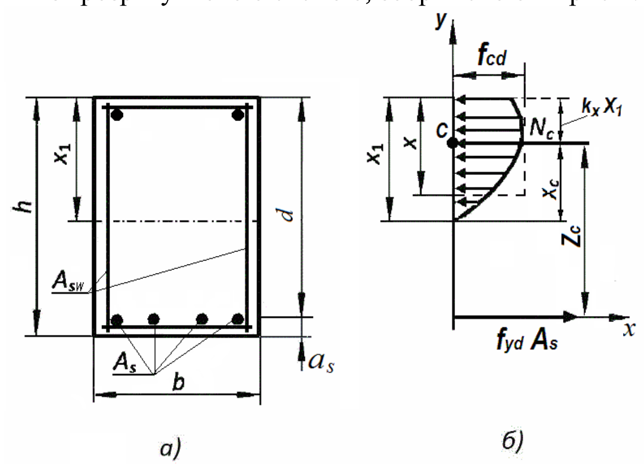

Рис. 1. Розрахункова схема: *а* – поперечний переріз елемента; *б* – епюра напружень у стиснутому бетоні та зусилля в арматурі

Для розв'язування використовувалися наступні залежності та передумови:

– рівняння рівноваги зігнутого елемента прямокутного перерізу

$$\sum X = 0; \quad f_{yd} A_S - N_c = 0, \tag{2}$$

$$\sum M_C = 0; \quad M - f_{yd} A_S Z_C = 0, \tag{3}$$

де N_c – рівнодійна зусиль у бетоні;

M – згинальний момент, на який необхідно розрахувати кількість арматури для прямокутної балки;

f_{cd} , f_{yd} – розрахункові значення опору бетону та арматури;

h – висота балки;

b – ширина балки;

d – відстань від центру маси розтягнутої арматури до верхньої грані балки;

a_s – відстань від центру маси розтягнутої арматури до нижньої грані балки;

– напруження по висоті стиснутої зони бетону X_1 розподіляються відповідно до діаграми повного стискання бетону згідно з ДБН В.2.6-98:2009

$$\sigma_c(\varepsilon_c, y) = f_{cd}(k\eta_y - \eta_y^2) / \left[1 + (k-2)\eta_y\right], \tag{4}$$

де з урахуванням гіпотези плоских перерізів використовується заміна змінних [9] $\eta_y = (y / X_1)(\varepsilon_c / \varepsilon_{c1,cd})$,

$k = 1{,}05 E_{cd} \times \varepsilon_{c1,cd}$,

ε_c – деформація найбільш стиснутого волокна бетону ($y=X_1$);

$\varepsilon_{c1,cd}$ – деформація при максимальних напруженнях;

E_{cd} – початковий модуль пружності бетону;

– умова сумісності деформування бетону та арматури

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s; \tag{5}$$

– критерій оптимальності для визначення площі арматури A_s та розмірів поперечного перерізу балки b x h, при яких вартість балки $C_б$ прольотом l буде мінімальна

$$K_{opt}(x_1, x_2, \ldots, x_n) = C_б(A_S, A_{SW}, b, h) = min. \tag{6}$$

Для визначення рівнодіючої в стиснутій зоні бетону N_c висоту стиснутої зони X виразимо через параметр **w** [7]

$$N_c = f_{cd} b \int_0^{X_1} \frac{k\eta_y - \eta_y^2}{1 + (k-2)\eta_y} d\eta_y = f_{cd} b X_1 \omega. \tag{7}$$

Висота перерізу з урахуванням рівнянь (2) та (3) дорівнює

$$h = Z_c + k_x X_1 + a_s = \frac{M}{f_{yd} A_s} + \frac{f_{yd} A_s k_x}{f_{cd} b \omega} + a_s, \tag{8}$$

де $k_x X_1$ – відстань від точки прикладання N_c до верхньої грані балки.

Необхідну площу поперечної арматури A_{sw} згідно ДСТУ Б В.2.6-156:2010 можна попередньо визначити за формулою

$$A_{sw} = \frac{V_{Rd,s} S}{Z f_{ywd} \cot\theta}. \tag{9}$$

У випадку для однопролітної вільнообпертої балки завантаженої рівномірним навантаженням при $S=d/2$, $Z=0,9d$ та $\cot\theta = 1$ вираз (9) можна записати у вигляді

$$A_{sw} = \frac{2,22M}{l \cdot f_{ywd}}. \tag{10}$$

Значення цільової функції для прямокутних балок відповідно до (1) можна описати виразом

$$C_{зб}\ A_s, A_{sw}, b, h\ =\ h\, b\, l\, C_б + (A_s + 2A_{sw}(d+b)k_w / d)\, l\, \gamma_s C_a, \tag{11}$$

де l – довжина балки;

S – крок поперечної арматури;

k_w – коефіцієнт інтенсивності поперечної арматури;

$\gamma_s = 7,85$ – маса 1 м^3 арматурної сталі, т/м^3.

Аналіз функціоналу (11) показав, якщо ширина балки b зменшується, то зменшується вартість конструкції $C_{зб}$, але ширина може бути обмежена конструктивними вимогами. Якщо прийняти $b=const$, то розрахувати балку мінімальної вартості можна із умови $min(C_{зб1}(A_s))$

$$\frac{dC_{зб}(A_s)}{dA_s} = 0. \tag{12}$$

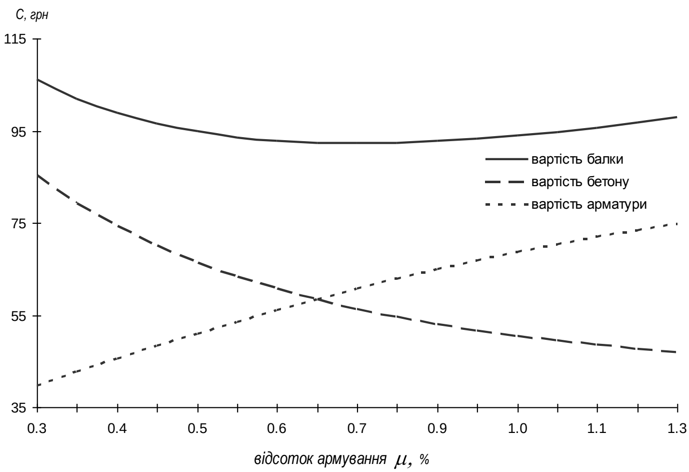

Рис. 2. Вартість залізобетонної балки в залежності від відсотка армування

Отримано залежність для визначення оптимальної площі арматури

$$A_{s,opt} = \sqrt{\frac{M\, f_{cd} C_б\, b}{f_{yd}\left(f_{yd} C_б\, \frac{k_x}{\omega} + f_{cd}\, \gamma_s\, C_a \right)}}\ . \qquad (13)$$

Залежність (13) дає можливість розрахувати необхідну площу арматури із умови мінімальної вартості при заданих характеристиках вартості бетону $C_б$ та арматури C_a у собівартості конструкції.

На рис. 2 наведено результати з дослідження балки з наступними параметрами: b=150 мм, М=90 кН•м, арматура А400, C_a = 8000 грн/т, бетон В15 $C_б$ = 700 грн/м^3. Відношення b/d варіювалося, від 0,15 до 0,4, мінімальне значення вартості $C_{зб}$ отримано при b/d=0,29 (μ_{opt} = 0,79%). З графіка (рис. 2) можна побачити, що при зменшенні вартості бетону, а відповідно і маси балки вартість $C_{зб}$ спочатку зменшується, а потім починає зростати.

ВИСНОВКИ

1. Застосування критерію мінімальної вартості дає можливість проектувати більш економічні конструкції в порівнянні з критерієм мінімальної маси.
2. Розроблено аналітичний оптимізаційний розрахунок балок мінімальної вартості з урахуванням нелінійних властивостей бетону.
3. Отримано аналітичні залежності для проектування оптимальних балок на основі критерію мінімальної вартості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Рейтман М.И. Оптимизация параметров железобетонных конструкций на ЭЦВМ / М.И. Рейтман, Л.И. Ярин. – М.: Стройиздат, 1974. – 96 с.
2. Adeli, H. Cost Optimization of Structures. Fuzzy Logic, Genetic Algorithms, and Parallel Computing / H. Adeli, K.C. Sarma. – John Wiley & Sons, Ltd, 2006. – 203 p.
3. Рекомендации по определению расчетной стоимости и трудоемкости изготовления сборных железобетонных конструкций на стадии проектирования / Госстрой СССР. – М.: НИИЭС Госстроя СССР, 1987. – 146 с.
4. Ершова Н.М. Оптимальное проектирование сборного железобетонного перекрытия / Н.М. Ершова // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д.: ПГАСА, 2011. - № 11 - 12. – С. 32 – 37.

5. Ahmadi-Nedushan, B. Minimum Cost Design of Concrete Slabs using Particle Swarm Optimization with time Varying Acceleration Coefficients /B. Ahmadi-Nedushan, H. Varaee // World Applied Sciences Journal - IDOSI Publications, 2011, №13 (12). – P. 2484-2494.
6. Galeb A.C. Optimum design of reinforced concrete waffle slabs [Текст] / A.C. Galeb, Z.F. Atiyah // International Journal Of Civil And Structural Engineering, 2011. - Vol. 1. - №4. – P. 862-880.
7. Павліков А.М. Розрахунок міцності залізобетонних елементів нормальних перерізах, синтезований на основі СНИП 2.03.01 84 та нелінійної деформаційної моделі / А.М. Павліков // Вісник Національного університету ”Львівська політехніка”. – Львів, 2010. – №664. – С. 128 – 132.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2013 р.