

ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТОДОМ РОЗРАХУНКОВИХ ОПОРІВ ЗАЛІЗОБЕТОНУ

Розглянуто питання розрахунку залізобетонних елементів методом розрахункових опорів залізобетону за різних видів деформування. Показано можливість розрахунку міцності перерізів залізобетонних елементів за нормальними та похилими перерізами за плоского, косоного згину та косоного позацентрового стиску.

Ключові слова: міцність, жорсткість, деформаційна модель, розрахунковий опір залізобетону.

Вступ. Сучасні архітектурно-планувальні вимоги, які пред'являються до будівель і споруд, потребують використання ефективних залізобетонних конструкцій та їх елементів. Це вимагає вдосконалення нормативної бази їх розрахунку. Суттєвим поступом у цьому питанні можна вважати перехід до деформаційної моделі розрахунку, покладеної в основу діючих норм проектування [12, 13]. Однак розрахунок окремих видів напружено-деформованого стану і досі лишається з використанням емпіричних формул, що призводить до певної обмеженості розрахункового апарату.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Удосконаленням розрахунку залізобетонних елементів з урахуванням деформаційних моделей займалося чимало вчених, роботи яких варто виділити [1 - 10]. Практично всі запропоновані методики розрахунку ґрунтуються на традиційних експериментально підтверджених гіпотезах та реальних діаграмах деформування матеріалів. Це підтверджує їх достовірність та надійність.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Переважна більшість сучасних методик розрахунку розглядає лише проблему міцності без питань жорсткості та тріщиностійкості. Такі підходи передбачають відповідні коригування й пояснення вже розроблених теорій. Тому необхідна узагальнена деформаційна модель розрахунку, яка комплексно враховувала б питання розрахунку міцності, жорсткості та тріщиностійкості при різних видах деформування залізобетонних елементів.

Постановка завдання. Основна мета – розроблення узагальненої методики розрахунку залізобетонних елементів за різних видів деформування.

Основний матеріал і результати. Розглянемо основи розрахунку міцності перерізів залізобетонних елементів за простих видів деформування. Так, розрахунок міцності залізобетонних елементів за плоского згину та позацентрового стиску відбувається за деформаційною моделлю з використанням екстремального критерію на основі таких гіпотез:

- 1) приймається справедливою гіпотеза плоских перерізів;
- 2) діаграма деформування бетону приймається нелінійною, у вигляді однієї із загальноприйнятих [12], із визначеними параметричними точками;
- 3) функція деформування арматури приймається у вигляді діаграми Прандля.

У результаті використання запропонованих гіпотез і рівнянь статички, отримують систему рівнянь. У випадку плоского напружено-деформованого стану за невідомі, як правило, приймають висоту стиснутої зони бетону, фіброві деформації бетону стиснутої зони та кривину. Застосувавши до отриманих рівнянь екстремальний критерій із обмеженням деформацій у бетоні й напруг в арматурі, визначають міцність перерізу за відповідного напружено-деформованого стану. У переважній більшості випадків при використанні складних реальних діаграм деформування матеріалів, отримують нелінійну систему

інтегральних рівнянь, розв'язок якої є доволі складним. Саме тому запропоновано подальший розрахунок виконувати методом розрахункових опорів залізобетону.

Суть цього методу полягає у розділенні геометричних параметрів від фізико-механічних. Коли мова йде про елементи з одного матеріалу, це не викликає ніяких суперечностей. У випадку композитних матеріалів ми маємо фізико-механічні та геометричні параметри кожного матеріалу. У багатьох випадках можна виділити геометричні параметри загалом від усіх фізико-механічних, але не окремо від кожного. У зв'язку із чим розрахунковий опір композитних матеріалів буде залежати від фізико-механічних параметрів усіх матеріалів, з яких складається переріз елемента. У цілому, це можна показати таким виразом:

$$f_i(a_1, \dots, a_n) = \frac{F_{Ed}}{f(b_1, \dots, b_n)}, \quad (1)$$

де $f_i(a_1, \dots, a_n)$ – розрахунковий опір перерізу елемента з композитного матеріалу за умови руйнування по i -му матеріалу, МПа; F_{Ed} – зовнішній силовий фактор, який відповідає руйнуванню перерізу елемента; $f(b_1, \dots, b_n)$ – відповідна геометрична характеристика; a_1, \dots, a_n – фізико-механічні параметри матеріалів поперечного перерізу композитного елемента; b_1, \dots, b_n – геометричні параметри поперечного перерізу композитного елемента.

Для одного поперечного перерізу композитного елемента може існувати велика кількість розрахункових опорів, у зв'язку з тим, що міцність перерізу визначається характеристиками міцності всіх матеріалів, з яких складається композитний елемент. Тому загальний розрахунковий опір композитного матеріалу визначається мінімальним значенням розрахункових опорів за умов руйнування по всіх матеріалах, з котрих складається переріз елемента,

$$f = \min(f_1(a_1, \dots, a_n), \dots, f_i(a_1, \dots, a_n), \dots, f_n(a_1, \dots, a_n)), \quad (2)$$

де f – розрахунковий (загальний) опір перерізу композитного матеріалу.

Уведення розрахункового опору композитних матеріалів дозволяє розглянути ще одне не менш важливе поняття – напруження у перерізі з композитного матеріалу σ_i . Це також умовне гіпотетичне поняття, за допомогою якого можна визначити параметри напружено-деформованого стану за різного рівня навантаження. Ці напруження встановлюються за формулою

$$\sigma_i(a_1, \dots, a_n) = \frac{F_i}{f(b_1, \dots, b_n)}, \quad (3)$$

де $\sigma_i(a_1, \dots, a_n)$ – напруження у перерізі елемента з композитного матеріалу, МПа; F_i – зовнішній силовий фактор, який відповідає певному рівню навантаження.

Розрахунковий опір залізобетону можна знаходити не тільки за різних діаграм деформування матеріалів, а навіть і за різних методик, гіпотез та критеріїв. Так, наприклад, для плоского згину за силової моделі розрахунку розрахунковий опір залізобетону визначається такою системою:

$$f_{zM, CH\Pi} = \min \left\{ \begin{array}{l} 6f_{yd}\rho_f - \frac{6f_{yd}^2\rho_f^2}{2f_c}; \\ 6\alpha_R f_c. \end{array} \right. \quad (4)$$

При цьому як геометрична характеристика виступає пружний момент опору робочого перерізу бетону. Аналогічні вирази можна отримати і для деформаційних методик розрахунку з різними критеріями.

Метод розрахункових опорів залізобетону дозволяє звести розрахунок залізобетонних елементів до формул класичного опору матеріалів. Запишемо умови міцності нормальних перерізів залізобетонних елементів:

– за плоского згину

$$\frac{M_{Ed}}{W_c} \leq f_{zM}, \quad (5)$$

де $f_{zM} = f$ клас бетону, ρ_f, f_{yd} – розрахунковий опір залізобетону при згині, визначається за відповідними таблицями [11]; $W_c = bd^2/6$ – пружний момент опору робочого перерізу бетону;

– за позацентрового стиску

$$\frac{N_{Ed}}{bd} \leq f_{zN}, \quad (6)$$

де $f_{zN} = f$ (клас бетону, $\rho_f, f_{yd}, e_0/d$) – розрахунковий опір залізобетону при позацентровому стиску, визначається за відповідними таблицями [11];

– за косою згину

$$\left(\frac{\sigma_{zMh}}{f_{zMh}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ZMb}}{f_{ZMb}} \right)^2 \leq 1, \quad (7)$$

де $\sigma_{zMh}, \sigma_{ZMb}$ – напруження у залізобетоні за плоского згину у відповідному напрямку; f_{zMh}, f_{ZMb} – розрахунковий опір залізобетону у відповідному напрямку;

– за косою позацентрового стиску

$$\left(\frac{\sigma_{zN}}{f_{zNh}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{zNb}}{f_{zNb}} \right)^2 \leq 1, \quad (8)$$

де σ_{zN} – напруження у залізобетоні за стиску; f_{zNb}, f_{zNh} – розрахунковий опір залізобетону на стиск у відповідному напрямку.

Для визначення міцності за відповідного виду деформування необхідно визначити властиву йому геометричну характеристику та розрахунковий опір залізобетону залежно від необхідних параметрів [11].

Розрахунок ширини розкриття тріщин та жорсткості залізобетонних елементів ґрунтується на таких гіпотезах та припущеннях:

- 1) приймаються діаграми деформування бетону й арматури, які відповідають загальноприйнятим;
- 2) після утворення тріщин порушується лінійність деформацій у перерізі;
- 3) додаткове зусилля в арматурі внаслідок утворення тріщин визначається за умовою мінімуму потенціальної енергії;
- 4) відстань між тріщинами визначається на стадії їх утворення та приймається однаковою протягом усієї роботи залізобетонного елемента;
- 5) внаслідок малості відстані між тріщинами по відношенню до прольоту згинальних елементів розглядається лише один середній переріз.

Скориставшись рівняннями рівноваги та запропонованими гіпотезами, можна встановити напружено-деформований стан перерізів залізобетонних елементів у стадіях за різного рівня навантаження. Це дає змогу використовувати розрахунки ширини розкриття тріщин та жорсткості. Оскільки кінцевими формулами виступають нелінійні інтегральні системи рівнянь вищих порядків, знову скористаємося методом розрахункових опорів залізобетону. У такому випадку основним чинником який буде характеризувати рівень навантаження, виступатимуть напруження у залізобетоні, затабульовані за основними параметрами.

Тоді розрахунок обмеження напруг в арматурі виконується таким чином

$$\sigma_{zM} = \frac{M_e}{W_c} \rightarrow \varepsilon_{si} \rightarrow \sigma_s \leq \sigma_{s,табл}, \quad (9)$$

де $\sigma_{s,мабл}$ – напруження в арматурі, за яких відпадає необхідність в обчисленні ширини розкриття тріщин, визначаються за табл. 5.2 [13].

Розрахунок ширини розкриття тріщин виконується за такою схемою,

$$\sigma_{zM} = M_e / W_c \rightarrow \varepsilon_{si} \rightarrow \sigma_{si} \rightarrow S_r \rightarrow W_k. \quad (10)$$

Визначення прогинів виконується так:

$$\sigma_{zM} = M_e / W_c \rightarrow \Sigma \varepsilon \rightarrow 1/r = \Sigma \varepsilon / d \rightarrow f. \quad (11)$$

Розрахунок ширини розкриття тріщин та жорсткості залізобетонних елементів відбувається за допомогою наведених вище виразів залежно від напруг у залізобетоні. Залежно від цих напруг визначають наведені у виразах (9 - 11) параметри за відповідними таблицями.

Розрахунок похилих перерізів методом розрахункових опорів залізобетону запропоновано за дещо спрощеною деформаційною моделлю, яка ґрунтується на таких передумовах:

- 1) нехтуємо впливом стиснутого бетону під похилою тріщиною;
- 2) напруження у бетоні стиснутої зони над похилою тріщиною приймаються рівномірно розподіленими;
- 3) напруження в робочій арматурі в нормальному перерізі визначаються за допомогою нелінійної деформаційної моделі з урахуванням лінеаризації методу розрахункових опорів залізобетону;
- 4) розрахунок похилих перерізів виконуються за однією із загальноприйнятих теорій Мора – методом найбільших дотичних напруг.

У результаті розв'язання рівнянь рівноваги, з урахуванням лінеаризації методу розрахункових опорів залізобетону, отримаємо значення напруг у стиснутій зоні бетону та її висоту:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_z \rho_f}{2(1 - \alpha / (6\rho_f))\alpha}, \quad (12)$$

$$x = 2d(1 - \alpha / (6\rho_f)), \quad (13)$$

де α – коефіцієнт лінеаризації.

Середні дотичні напруження у бетоні стиснутої зони визначимо за виразом

$$\tau_c = \frac{Q}{bd} \frac{1}{2(1 - \alpha / (6\rho_f))} - \tau_s. \quad (14)$$

Умову міцності залізобетонних елементів по похилих перерізах запишемо за теорією найбільших дотичних напруг Мора

$$(\sigma_c / \sigma_{max})^2 + (\tau_c / \tau_{max})^2 \leq 1, \quad (15)$$

де σ_c – максимально можливі нормальні напруження на стиск; τ_{max} – максимально можливі дотичні напруження на зріз.

Максимально можливі напруження на стиск та на зріз будемо визначати за виразами:

$$\sigma_c = \frac{f_{zM} \rho_f}{2(1 - \alpha / (6\rho_f))\alpha}, \quad (16)$$

$$\tau_{max} = \frac{f_{ctk}}{2(1 - \alpha / (6\rho_f))}. \quad (17)$$

де f_{zM} – розрахунковий опір залізобетону на згин [11]; f_{ctk} – розрахунковий опір бетону на розтяг.

Остаточно умову міцності залізобетонних елементів по похилих перерізах для плоского згину представимо у вигляді розрахункових опорів залізобетону

$$(\sigma_z / f_{zM})^2 + (\tau_z / f_{ctk} - \tau_s / \tau_{zQ})^2 \leq 1, \quad (18)$$

де $\sigma = 6M/(bd^2)$, $\tau = Q/(bd)$ – нормальні та дотичні напруження у перерізі залізобетонного елемента відповідно; τ_{zQ} – розрахунковий опір залізобетону на зріз, визначається за виразом

$$\tau_{zQ} = \tau_{max} = \frac{f_{ctk}}{2(1 - \alpha / (6\rho_f))}. \quad (19)$$

Запишемо умови міцності похилих перерізів залізобетонних елементів:

– за позacentрового стиску

$$(\sigma_{zN} / f_{zN})^2 + (\tau_z / f_{ctk} - \tau_s / \tau_{zQ})^2 \leq 1, \quad (20)$$

– за косоого згину

$$\left(\frac{\sigma_{ZMh}}{f_{ZMh}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ZMb}}{f_{ZMb}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{zh} - \tau_{sh}}{f_{ctk} \tau_{zQh}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{zb} - \tau_{sb}}{f_{ctk} \tau_{zQb}}\right)^2 \leq 1, \quad (21)$$

де τ_{zh} , τ_{zb} – дотичні напруження у залізобетоні за плоского згину у відповідному напрямку; τ_{zQh} , τ_{zQb} – розрахунковий опір залізобетону на зріз у відповідному напрямку;

– за косоого позacentрового стиску

$$\left(\frac{\sigma_{zN}}{f_{zNh}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{zN}}{f_{zNb}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{zh} - \tau_{sh}}{f_{ctk} \tau_{zQh}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{zb} - \tau_{sb}}{f_{ctk} \tau_{zQb}}\right)^2 \leq 1. \quad (22)$$

Запропоновані умови міцності отримані на основі єдиної методології розрахунку перерізів залізобетонних елементів методом розрахункових опорів залізобетону. Вони встановлені на основі загальноприйнятих, експериментально підтверджених гіпотез та не містять емпіричних коефіцієнтів і виразів. Для таких виразів не принципово, яку діаграму деформування або методику покладено у розрахунок. Це дає змогу в майбутньому виконувати розрахунки перерізів елементів з композитних матеріалів за різних діаграм деформування й однією методикою.

Висновки. Уведення в сучасну класичну теорію залізобетону понять «розрахунковий опір залізобетону», «напруження в залізобетоні» дозволяє зводити розрахунок залізобетонних елементів за різних видів напружено-деформованого стану до формул класичного опору матеріалів. До того ж методологія такого розрахунку лишається незмінною при застосуванні різних діаграм деформування матеріалів. Це дає змогу внести табличні значення розрахункових опорів залізобетону в національний додаток до ДБН та значно спростити діючі розрахункові методики.

Література

1. Голишев О.Б. Курс лекцій з основ розрахунку будівельних конструкцій і з опору залізобетону / О.Б. Голишев, А.М. Бамбура. – К.: Логос, 2004. – 340 с.
2. Бамбура А.М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону. Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.23.01 "Будівельні конструкції, будівлі та споруди" / Бамбура Андрій Миколайович; Харківськ. держ. техн. універ. буд-ва та арх. – Харків, 2006. – 39 с.
3. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчётные модели силового сопротивления железобетона. – М.: Издательство «АСВ», 2004. – 472 с.

4. Дорофеев В.С., Барданов В.Ю. Расчёт изгибаемых элементов с учётом полной диаграммы деформирования бетона. Монография. – Одесса: ОГАСА, 2003, - 210 с.
5. Павліков А.М. Нелінійна модель напружено-деформованого стану косошавантажених залізобетонних елементів у за критичній стадії. Монографія.- Полтава: ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, 2007. -259 с.
6. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил/ А.С.Залесов, Ю.А.Климов.. – К. : Будівельник, 1989. – 104 с.ил. – ISBN 5-7705-0187-1.
7. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования // Учебное пособие для студентов строительных специальностей. Под. ред. проф. Т.М.Пецоляда и проф. В.В.Тура. – Брест, БГТУ, 2003 – 380 с. ил. – ISBN 985-6584-59-0.
8. Митрофанов В.П., Погребной В.В. Сопротивление бетона разрушению при совместном действии срезающих и сжимающих сил // Ден. во ВНИИИС Госстроя СССР, 1989. – Вып. 1. – № 8764. – 10 с.
9. MacGregor J.G. Reinforced Concrete: Mechanics and Design, 2nd Ed. – Prentice – Hall. Englewood Cliff., NJ, 1992 – 848 p.
10. Tabassum J. Analysis of current methods of flexural design for high strength concrete beams, School of Civil, Environmental & Chemical Engineering, RMIT University 2007, 330 p.
11. Кочкар'юв, Д.В. Практичний розрахунок залізобетонних елементів на міцність за дії згинального моменту на базі ДБН В.2.6-98:2009 / Д.В. Кочкар'юв, В.І. Бабич // Комунальне господарство міст – Харків:ХНАМГ, 2012. – Вип. 103. – С. 46 – 57.
12. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – К.:Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
13. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції. Правила проектування. – Київ: Мінрегіонбуд, 2010. – 166 с.

*Д.В. Кочкар'єв, к.т.н., доцент
Национальный университет водного хозяйства и природопользования, Ровно*

ОСНОВЫ РАСЧЁТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ РАСЧЕТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Рассмотрен вопрос расчета железобетонных элементов методом расчетных сопротивлений железобетона при различных видах деформирования. Показана возможность расчета прочности сечений железобетонных элементов по нормальным и наклонным сечениям при плоском, косом изгибе и косом внецентренном сжатии.

Ключевые слова: *прочность, жесткость, деформационная модель, расчетное сопротивление железобетона.*

*D.V. Kochkarev, Ph.D., Associate Professor
National university of water management and nature resources use, Rivne*

BASIS OF CALCULATION METHOD OF CONCRETE ELEMENTS DESIGN RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE

The problem of calculation of reinforced concrete elements reinforced by the calculated resistance in various types of deformation is considered. The possibility of calculating the strength of the cross sections of reinforced concrete elements in normal and oblique sections in flat, oblique bending and eccentric compression is showed.

Keywords: *strength, stiffness, deformation model, the design resistance of concrete.*

*Надійшла до редакції 30.09.2014
© Д.В. Кочкар'юв*