

УЗАГАЛЬНЕНИЙ КРИТЕРІЙ ВИЧЕРПАННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТА СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ І КОНСТРУКЦІЙ

Уведено поняття строгого критерію вичерпання несучої здатності бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій, приведено його відповідне обґрунтування.

Ключові слова: критерій, міцність, деформації, залізобетон.

Постановка проблеми. Відомо, що нові вітчизняні норми з проектування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій [1, 2] ґрунтуються на використанні так званої «деформаційної моделі» перерізу та передбачають використання у розрахунках конструкцій повних діаграм деформування стиснутого бетону. Базовими для останніх прийняті неправильна дробово-раціональна функція та поліном п'ятого степеня. За їх використання вичерпання несучої здатності, а отже, і величина граничних деформацій стиснутого бетону, обмежуються за допомогою:

- екстремального критерію $dM / d(1/\rho) = 0$ або $dN / d\varepsilon_c = 0$;
- табличних граничних деформацій крайніх фібр стиснутого бетону ε_{cu} ;
- граничних деформацій усіх розтягнутих стержнів арматури ε_u .

Формулювання вищеназаних критеріїв загалом є зрозумілим, а от їх надто вільне трактування та використання викликає ряд серйозних зауважень. Зокрема, виникає сумнів щодо реалізації останнього критерію в елементах і конструкціях, що армовані по периметру або зазнають косоного стиску чи косоного згину. Ще більш суперечливим і навіть некоректним видається використання в додатку А норм [2] параметра $dN / d\varepsilon_c = 0$ як екстремального критерію для відцентрово стиснутих елементів.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. У деформаційних моделях перерізу бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій особлива роль відводиться критеріям вичерпання їх несучої здатності. Останню зазвичай пов'язують з величиною граничних деформацій крайніх фібр стиснутого бетону ε_{cu} . Тому залежно від способу їх визначення й обмеження розрізняють три характерні типи деформаційних моделей перерізу бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій [2, 3, 4].

Виділення питань, не вирішених у рамках загальної проблеми. Цілком очевидно, що найбільш «привабливою» є деформаційна модель з екстремальним критерієм міцності, основи якої прямо чи опосередковано були закладені в роботах [5, 6, 7], а теоретичне обґрунтування здійснене В.П. Митрофановим і С.І. Арцевим [4] за умовою максимуму функції навантаження нормального перерізу F залежно від деформацій бетону стиснутої (найбільш стиснутої) грані елемента ε_c

$$F(\varepsilon_c) \Big|_{\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}} = \max. \quad (1)$$

Водночас відсутність строгих рекомендацій щодо використання залежності (1) призвела до того, що окремі дослідники доволі часто використовують параметр $dN / d\varepsilon_c = 0$ як екстремальний критерій не тільки до центрально стиснутих елементів, але й до тих, що зазнають неоднорідного деформування. Більше того, це знайшло відображення і в прийнятих нормативних документах [2].

Мета статті. Стаття має на меті виявлення й належне обґрунтування строгих критеріїв вичерпання несучої здатності бетонних та залізобетонних елементів і конс-

трукцій та визначення за їх допомогою граничних деформацій стиснутого бетону в зазначених елементах.

Основний матеріал і результати. Спробуємо обґрунтувати, чому саме параметр $dN/d\varepsilon_c = 0$ не може виступати екстремальним критерієм міцності бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій за їх неоднорідного деформування. Відповідно до діаграми $N - \varepsilon_c$, деформації бетону стиснутої грані будуть досягати своїх граничних значень $\varepsilon_{cu,N}$ при максимальних зусиллях у стиснутому бетоні N_u . Дещо інша ситуація складається з іншою діаграмою $M - \varepsilon_c$. У міру деформування елемента внутрішні зусилля M зростають лише за рахунок рівнодійної зусиль у стиснутому бетоні N , бо відстань від цього зусилля до нейтральної лінії z_c безперервно зменшується. Цілком очевидно, що добуток двох зазначених величин $N \cdot z_c$ явно досягатиме свого максимального значення при деформаціях бетону стиснутої грані менших, ніж $\varepsilon_{cu,N}$.

Щоб перевірити це припущення, розглянемо граничний стан відцентрово стиснутого залізобетонного елемента. При цьому необхідно пам'ятати, що параметр $dM/d\varepsilon_c = 0$ приймати за екстремальний критерій міцності бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій теж не зовсім коректно. Адже, беручи до уваги узагальнену діаграму стану елемента $M - I/\rho$, це слід було б робити за допомогою **екстремального критерію несучої здатності**

$$M(I/\rho)|_{I/\rho=I/\rho_u} = \max. \quad (2)$$

Дослідження граничних значень деформацій бетону у відцентрово стиснутих армованих елементах здійснюватимемо з використанням таких робочих гіпотез:

- зв'язок між напруженнями та деформаціями стиснутого бетону представимо повними діаграмами його деформування у вигляді неправильної дробово-раціональної функції

$$\sigma_c = (a \cdot \varepsilon_c - b \cdot \varepsilon_c^2) / (1 + c \cdot \varepsilon_c) \quad (3)$$

$$\text{де} \quad a = E_{c,o}; \quad b = f_c/e_{cl}^2; \quad c = E_{c,o}/f_c - 2/e_{cl}; \quad (4)$$

- зв'язок між напруженнями та деформаціями арматури приймемо у вигляді діаграми Прандтля, а за відсутності фізичної межі текучості описуватимемо лінійно-параболічною функцією;
- при деформуванні відцентрово стиснутих елементів вважатимемо справедливою гіпотезу плоских перерізів

$$I/\rho = (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co})/h. \quad \text{або} \quad I/\rho = (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{s(u)})/d. \quad (5)$$

- несуча здатність елемента та опір його розрахункового перерізу діючим навантаженням вважається вичерпаним при порушенні відповідних умов рівноваги.

Оцінюючи загальний напружено-деформований стан відцентрово стиснутого залізобетонного елемента, запишемо рівняння його рівноваги

$$N = \frac{b_n}{I/\rho} \left[\int_{\varepsilon_{co}}^{\varepsilon_{cu}} \frac{a \cdot \varepsilon_c - b \cdot \varepsilon_c^2}{1 + c \cdot \varepsilon_c} d\varepsilon_c + E_s \cdot (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}) \cdot \sum_{i=1}^n \rho_{li} \cdot \varepsilon_{si} \right]; \quad (6)$$

$$N \cdot e = \frac{b_n}{(I/\rho)^2} \left[\int_{\varepsilon_{co}}^{\varepsilon_{cu}} \frac{a \cdot \varepsilon_c^2 - b \cdot \varepsilon_c^3}{1 + c \cdot \varepsilon_c} d\varepsilon_c + E_s \cdot (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}) \cdot \sum_{i=1}^n \rho_{li} \cdot \varepsilon_{si}^2 \right], \quad (7)$$

де b_n – ширина перерізу елемента;

$e_{cu} (e_{co})$ – граничні деформації найбільш (найменш) стиснутих фібр бетону в перерізі;

E_s – модуль пружності арматури;

ρ_{li} – коефіцієнт армування перерізу елемента поздовжніми стержнями.

Граничні деформації найбільш стиснутих волокон бетону знайдемо з рівняння (7), використовуючи поняття екстремального критерію несучої здатності $dM / d(1 / \rho) = 0$. Крім того, для відповідного співставлення граничних деформацій стиснутого бетону, аналогічну процедуру застосуємо і до рівняння (6) через використання критерію $dN / d\varepsilon_c = 0$.

Результати відповідних розрахунків вказують на значні розходження граничних деформацій найбільш стиснутих волокон бетону за двома вищезгаданими критеріями. Використання критерію $dN / d\varepsilon_c = 0$ в окремих випадках може завищувати граничні деформації слабких бетонів більше ніж на 30% (рис. 1 і 2).

Розв'язок рівняння (7) після його диференціювання є доволі складним, але його, з досить високою точністю (достовірністю $R^2=0.9989$), можна представити залежністю

$$\eta_{eu} = 1 + 5^3 \cdot \alpha_s \cdot \frac{(k-1)}{(6-k)} \cdot \sum_{i=1}^n \rho_{li} \cdot \left(\frac{x_{si}}{x}\right)^2 + \frac{(0,43 - 0,2(0,4 - m)^2)(1 - m^{3/2})(1 - m/k)(\ln k)^{\sqrt{1-m^{3/2}}}}{1 + \left(\left(\frac{1}{6} - 0,1m^2\right)(k-2)\ln\left(\frac{6}{k} - 0,2\right)\right)^2}, \quad (8)$$

де m – параметр неоднорідності деформування стиснутого бетону,

$$m = e_{co} / e_{cu2};$$

η_{eu} – рівень граничних деформацій найбільш стиснутих фібр бетону в перерізі, $\eta_{eu} = e_{cu} / e_{c1}$;

α_s – відносне значення модуля пружності використаної арматури, $\alpha_s = E_s / 200000$;

x_{si} – відстань від нейтральної лінії до центру ваги поздовжніх стержнів, напруження в яких у граничному стані не досягають межі текучості.

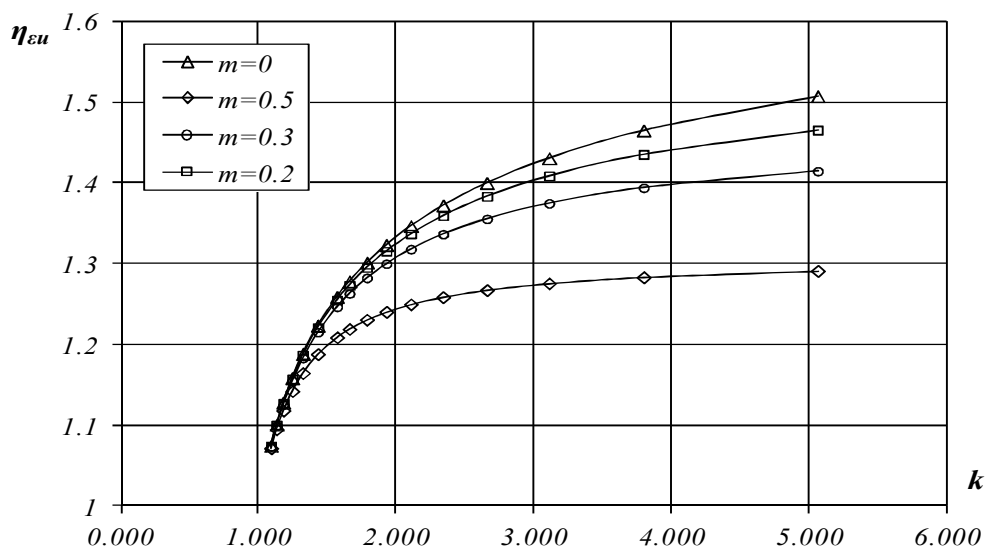


Рисунок 1 – Граничні деформації бетону відцентрово стиснутих бетонних елементах за екстремальним критерієм $dM / d(1 / \rho) = 0$ залежно від ступеню неоднорідності деформування m

Для випадку, коли нейтральна лінія буде проходити в межах перерізу ($x_{s1} = a_1$; $x = h$; $e_{co} = 0$ та $\sigma_{co} = 0$), вона суттєво спрощується і рівень граничних деформацій найбільш стиснутих волокон бетону можна обчислювати за виразом

$$\eta_{eu} = 1 + 5^3 \cdot \alpha_s \cdot \frac{(k-1)}{(6-k)} \cdot \rho_{ll} \cdot \left(\frac{a_1}{h}\right)^2 + \frac{0,398 \cdot \ln k}{1 + \left(\frac{k-2}{6} \cdot \ln\left(\frac{6}{k} - 0,2\right)\right)^2} \quad (9)$$

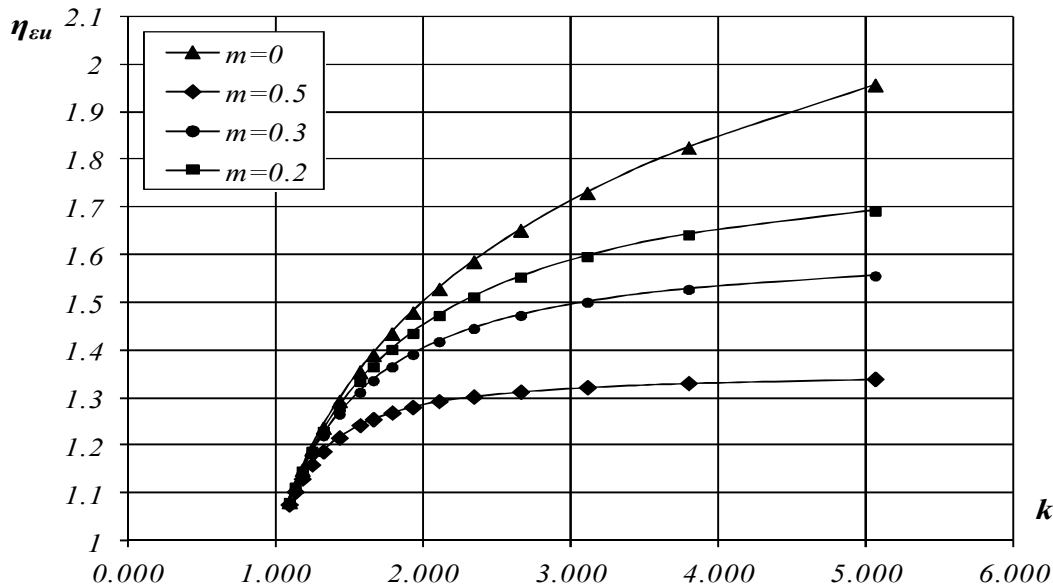


Рисунок 2 – Граничні деформації бетону у відцентрово стиснутих бетонних елементах за критерієм $dN / d\varepsilon_c = 0$ залежно від ступеню неоднорідності деформування m

Виходячи з детального аналізу проведених досліджень можна зробити наступні **ВИСНОВКИ**:

- граничні деформації матеріалів (бетону чи арматури) загалом не можуть слугувати критерієм вичерпання несучої здатності бетонних чи залізобетонних елементів і конструкцій;
- номінальні значення граничних деформацій стиснутого бетону у розрахунках слід обмежувати за екстремальним критерієм несучої здатності $dM / d(1 / \rho) = 0$, оскільки вони залежать від напружено-деформованого стану бетонних чи залізобетонних елементів і конструкцій (діаграм їх стану $M - 1 / \rho$);
- параметр $dM / d(1 / \rho) = 0$ можна розглядати як узагальнений критерій вичерпання несучої здатності бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій, оскільки він «поглинає» всі інші критерії, задекларовані в нормах [2];
- чим вищим є ступінь неоднорідності деформування бетону (чим меншим є значення параметру m), тим більшими можуть бути його граничні деформації в перерізі елемента;
- параметр $dN / d\varepsilon_c$ може виступати в якості екстремального критерію міцності лише для бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій, що зазнають осьового стиску (аналогічно і осьового розтягу);
- з параметрів армування на величину граничних деформацій стиснутого бетону найбільше впливають коефіцієнт армування, клас арматури та положення арматурних стержнів в перерізі залізобетонного елемента.

Література

1. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення / Мінрегіонбуд України: ДБН В.2.6-98:2009. - [Чинні від 01.06.11]. - К.: Мінрегіонбуд України, 2011. - 71 с.

2. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування / Мінрегіонбуд України: ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. - [Чинний від 01.06.11]. - К.: Мінрегіонбуд України, 2011. - 123 с. - (Національний стандарт України).

3. Eurocode-2: Design of Concrete Structures. – Part 1-1: General Rules and Rules for Building: EN 1992-1-1. - [Final Draft, December, 2004]. – Brussels: CEN. - 2004. - 225 p. - (Європейський стандарт).

4. Митрофанов, В.П. Предельная сжимаемость бетона нормальных сечений железобетонных элементов / В.П. Митрофанов, С.И. Арцев // Проблемы теории і практики залізобетону: Зб. наук. статей, присвячений 100-річчю з дня народження проф. М.С. Торяника. – Полтава: ПДТУ, 1997.- С. 333-337.

5. Гамаюнов, Е.И. О величине предельных деформаций бетона при сжатии / Е. И. Гамаюнов // Сб. науч. тр. ЦНИИС. – М.: Транспорт, 1968. – Вып. 24. – С. 30-36.

6. 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.

7. Беккиев, М.Ю. Расчет изгибаемых железобетонных элементов различной формы поперечного сечения с учетом нисходящей ветви деформирования / М.Ю. Беккиев, Л.Р. Маляян // Методические разработки. – Нальчик: Кабардино-Балкарский агро-мелиоративный институт, 1985. -132 с.

Надійшла до редакції 04.09.12

© В.М. Ромашко

В.Н. Ромашко, к.т.н., доц.

Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно

ОБОБЩЕННЫЙ КРИТЕРИЙ ИСЧЕРПАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ И СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Введено понятие строгого критерия исчерпания несущей способности бетонных и железобетонных элементов и конструкций, приведено его соответствующее обоснование

Ключевые слова: критерий, прочность, деформации, железобетон

V. Romashko, Ph.D., Associate Professor

National University of Water Management and Nature Recourses Use, Rivne

THE GENERALIZED CRITERION OF BEARING STRENGTH EXHAUSTING OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS AND CONSTRUCTIONS

The concept of rigorous criterion of bearing strength exhausting of concrete and reinforced concrete elements and constructions is entered. Its appropriate ground is resulted

Keywords: criterion, strength, deformations, reinforced concrete