

УДК 624. 012

ДЕФОРМАЦІЙНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПРОГИНІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ЗА ТРИВАЛОЇ ДІЇ НАВАНТАЖЕННЯ

В. Білозір, к. т. н.

Львівський національний аграрний університет

Постановка проблеми. Міжнародне співробітництво у багатьох галузях науки і техніки потребує зближення норм проектування продукції різноманітного призначення. Це в низці випадків усуває перешкоди між національними кордонами для вільного переміщення товарів, послуг та капіталів. Тому Мінрегіонбуд України проводить значну роботу щодо гармонізації вітчизняних будівельних норм проектування з європейськими. У 2011 році були прийняті вітчизняні норми [1; 2] з одночасною відміною СНиП 2.03.01-84*. Наступним кроком у цьому напрямі є надання чинності Єврокоду 2 з 2013 року [3]. Одночасне функціонування цих трьох документів триватиме до 2016 року, після чого залізобетонні конструкції проектуватимуть у нашій країні виключно за Єврокодом 2. Тому практичні методи розрахунку, загальні алгоритми яких описані в цьому документі схематично і поверхнево, потребують детальної розробки, що сприятиме швидшому опануванню проектувальниками відповідного розрахункового апарату.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У нормах [1] зазначено, що під час розрахунку прогинів потрібно враховувати постійні, змінні, тривалі та короткочасні навантаження. Стандарт [2] передбачає розрахунок прогинів за дії тривалих навантажень проводити з використанням відомих формул, в яких кривизну пропонується помножувати на коефіцієнт повзучості. У праці [4] розроблений практичний метод розрахунку прогинів за дії короткочасного навантаження з використанням середнього значення кривизни елемента, як це пропонують у європейських нормах [3].

Єврокод 2 передбачає визначення прогинів за дії лише квазіпостійних навантажень [3; 5]. Пояснюється це тим, що реальні навантаження на конструкції практично не перевищують квазіпостійних характеристичних значень. Тому немає потреби у збільшенні поперечних перерізів згинальних елементів, коли перевірка прогинів розрахунком з урахуванням усіх навантажень забезпечує негативний результат.

Отже, між вітчизняними нормами [1; 2] і Єврокодом 2 [3] існують певні протиріччя в частині розрахунку прогинів, що ускладнює роботу проектувальників.

Постановка завдання. Завдання нашого дослідження – розробка аналітичного апарату для розрахунку прогинів з урахуванням лінійної та нелінійної повзучості бетону стиснутої зони згинальних елементів.

Виклад основного матеріалу. Розрахунок за деформаційним методом дасть змогу отримати деформації арматури, кривизни, напруження в арматурі за дії квазіпостійних навантажень. Роботу розтягнутої зони бетону на ділянках без тріщин, знижені середні значення деформацій бетону й арматури на ділянках із тріщинами не враховуватимемо.

Якщо обчислені значення прогинів і ширини розкриття тріщин будуть меншими за гранично допустимі, то розрахунок можна буде вважати завершеним. За інших обставин потрібно враховувати зазначені чинники.

Для отримання трансформованої діаграми деформування бетону необхідно до пружних деформацій бетону ($\varepsilon_{ce} = \sigma_c / E_c$) додати деформації повзучості $\varepsilon_{cc(\infty, t_o)}$ лінійної (ф.(3.6) [3]) до рівня напружень $0,45 f_{ck}$, а за вищих напружень – нелінійної (ф.(3.7) [3]). Модуль $E_c = 1,05 E_{cm}$.

Отже:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{ce} + \varepsilon_{cc(\infty, t_o)}. \quad (1)$$

Наприклад, за відносної вологості вище, ніж 75^0 для бетону класу С20/25 коефіцієнт повзучості $\varphi(\infty, t_o)$ (п. 3.1 [3]) дорівнює 2.

Усі необхідні обчислення виконаємо з використанням електронних таблиць Excel, створивши діаграму деформування бетону з урахуванням повзучості (рис. 1).

Для розглядуваного класу бетону за $\varphi(\infty, t_o) = 2$ отримано:

$$\frac{\sigma_c}{f_{ck}} = -73412\varepsilon_c^2 + 527,3\varepsilon_c + 0,0169 \quad (2)$$

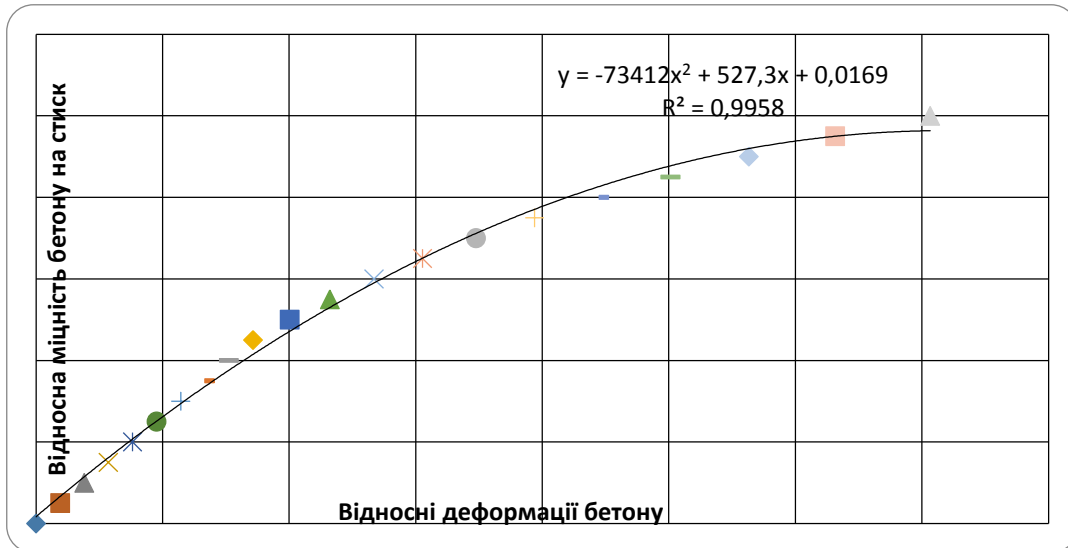


Рис. 1. Трансформована діаграма деформування бетону з урахуванням повзучості.

Нехтуючи вільним членом 0,0169 і спроектувавши множник 527,3, отримуємо рівняння, яке також добре описує діаграму " $\sigma_c - \varepsilon_c$ ":

$$\sigma_c = f_{ck} (-73412\varepsilon_c^2 + 550\varepsilon_c). \quad (3)$$

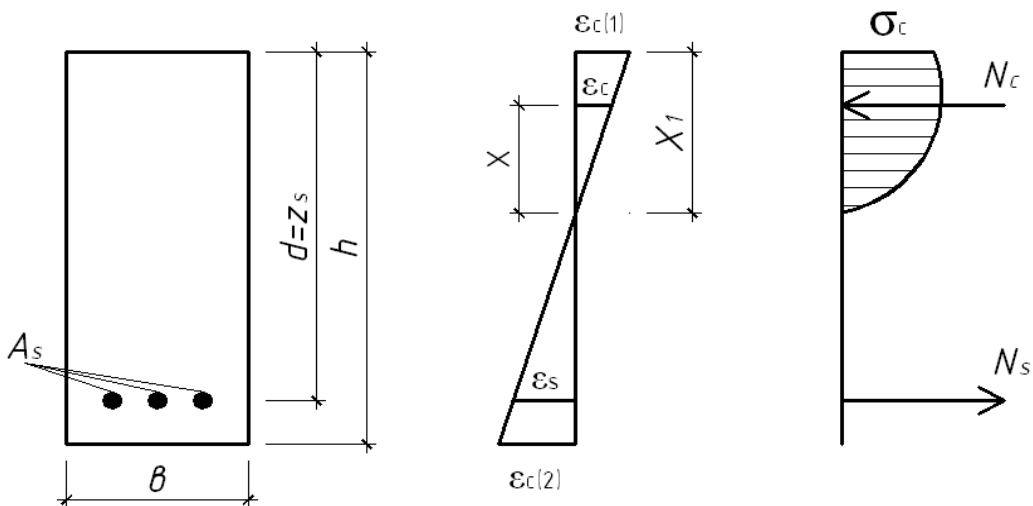


Рис. 2. Поперечний переріз, епюри деформацій та внутрішніх зусиль балки.

Із подібності трикутників епюри деформацій (рис. 2) можна отримати:

$$x_1 = \varepsilon_{c(1)} / \aleph, \quad (4)$$

де $\aleph = \frac{\varepsilon_{c(1)} - \varepsilon_{c(2)}}{h}$ – кривизна;

$$\varepsilon_c = \aleph \cdot x; \quad (5)$$

$$\varepsilon_s = \aleph(x_1 - z_s) \quad (6)$$

Внутрішні зусилля в арматурі та стиснутій зоні бетону рівні і протилежні за знаком:

$$N_s + N_c = 0, \quad (7)$$

де $N_s = \varepsilon_s E_s A_s$ за $\varepsilon_s \leq \frac{f_{yk}}{E_s}$;

$$N_s = f_{yd} A_s \text{ за } \varepsilon_s \geq \frac{f_{yk}}{E_s}.$$

Рівнодійна внутрішніх зусиль у стиснутій зоні бетону N_c :

$$\begin{aligned} N_c &= \int_F \sigma_c dF = \int_0^{x_1 = \varepsilon_{c(1)} / N} f_{ck} (-73412N^2 x^2 + 550Nx) b dx = \\ &= \frac{1}{N} (-24470,67 \varepsilon_{c(1)}^3 + 275 \varepsilon_{c(1)}^2) f_{ck} b \end{aligned} \quad (8)$$

Згинальний момент у перерізі:

$$M = M_s + M_c, \quad (9)$$

де $M_s = \sigma_s A_s (x_1 - z_s)$;

$$\begin{aligned} M_c &= \int_F \sigma_c x dF = \int_0^{x_1 = \varepsilon_{c(1)} / N} f_{ck} (-73412N^2 x^2 + 550Nx) b dx = \\ &= \frac{1}{N^2} (-18353 \varepsilon_{c(1)}^4 + 183,33 \varepsilon_{c(1)}^3) f_{ck} b. \end{aligned}$$

Поданий аналітичний апарат реалізуємо для опису напружено-деформованого стану балки на всіх етапах деформування. Розглядали балку з такими параметрами: $l_0 = 600$ см, $b = 20$ см, $h = 45$ см, $d = 40$ см, арматура –

3 Ø20 A 400С, бетон – С20/25. Результати, отримані з використанням Excel, подані у таблиці.

Таблиця

Результати розрахунку балки за деформаційною методикою з урахуванням повзучості бетону стиснутої зони

$\varepsilon_{c(1)}$	$\varepsilon_{c(2)}$	$1/\text{см} = \frac{1}{\rho}$	σ_s	$M, \text{кН} \cdot \text{см}_2$ $\text{кН}/\text{см}^2$	$x_1 = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{N}$
0,00035	-0,00046	1,79445E-05	19,50461	-7,72336	2433,329
0,0007	-0,0009	3,54952E-05	19,72096	-15,116	4744,087
0,001	-0,00126	5,02187E-05	19,91291	-21,1837	6625,078
0,0012	-0,00149	5,98667E-05	20,04454	-25,088	7826,946
0,0014	-0,00172	6,93798E-05	20,17879	-28,879	8986,624
0,001651	-0,002	8,11429E-05	20,35212	-33,48	10383,47
0,001934	-0,0023	9,40799E-05	20,5527	-38,4216	11868,77
0,002	-0,00237	9,70836E-05	20,60081	-39,5502	12205,52
0,0025	-0,00388	0,000141868	17,62196	-40	12700,25
0,003	-0,00567	0,000192599	15,57639	-40	12937,41
0,0035	-0,00758	0,000246236	14,21403	-40	13084,79

Наприклад, за моменту 78, 27 кН·м кривизна $1/r = 5,99 \cdot 10^{-5}$ 1/см.

Прогин можна обчислити за наближеною формулою:

$$f = k_m \frac{1}{r} l^2, \quad (10)$$

де $k_m = \frac{5}{48}$ для рівномірно розподіленого навантаження.

$$\text{Отже, } f = \frac{5}{48} \cdot 5,99 \cdot 10^{-5} \cdot 600^2 = 2,24 \text{ см.}$$

Якщо би розрахункові значення прогинів перевищили граничні, то доцільно врахувати нерівномірність деформацій арматури і бетону між тріщинами. Тоді кривизну можна визначити за формулою:

$$\frac{1}{r} = \frac{\Psi_c \varepsilon_{c(1)} + \Psi_s \varepsilon_s}{d}, \quad (11)$$

де Ψ_C, Ψ_S – коефіцієнти нерівномірності деформацій бетону та арматури між тріщинами [6].

Тут $\Psi_C = 0,9$.

$$\Psi_S = 1 - 0,8 \frac{M_{cr}}{M}, \quad (12)$$

де M_{cr}, M – момент утворення тріщин та момент, за якого визначають прогин.

Прогин, визначений за цією методикою з використанням формули (10), дорівнює 1,84 см, а за визначення прогину з використанням інтеграла Мора – 1,58 см.

Для такої балки визначали також прогин із використанням середнього значення кривизни, як це прийнято в Єврокод 2 [3–5]. За тривалої дії навантаження він дорівнює 1,66 мм.

Розрахунок за методикою [2] засвідчив, що за моменту 78,27 кН·м кривизна $1/r = 4,45 \cdot 10^{-5}$ 1/см. З урахуванням повзучості, як це запропоновано у стандарті [2], отримуємо:

$$f = k_m \frac{1}{r} \varphi_{(\infty, e_0)} l^2 = \frac{5}{48} \cdot 4,45 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 600^2 = 3,34 \text{ см.}$$

Висновки

1. Запропонована методика визначення прогинів із використанням деформаційної моделі й трансформованих діаграм деформування бетону за тривалої дії навантаження, в яких врахована лінійна та нелінійна повзучість.

2. Порогини, визначені за пропозиціями ДБН і ДСТУ [1; 2], більше, ніж удвічі перевищують прогини, розраховані за Єврокодом 2 [3] і за запропонованою методикою.

3. Запропонована методика дає змогу отримати значення прогинів, близькі до розрахованих за Єврокодом 2 [3].

Бібліографічний список

1. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення : ДБН В.2.6-98: 2009. – Введ. в дію 01.07.2011. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування : ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. – Введ. в дію 01.06.2011. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.
Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні

правила і правила для споруд (EN 1992-1-1: 2004, IDT): ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1: 2010. – Введ. в дію 01.07.2013. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.

Бабич В. Є. Практичний метод розрахунку прогинів залізобетонних балок за ДСТУ Б В.2.6-156: 2010 / Бабич В. Є. // Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб. – 2012. – № 101. – Харків : ХНУМГ, 2012. – С. 532-540.

Биби Э. В. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 2: Проектирование железобетонных конструкций / Биби Э. В., Нараянан Р. С. – М. : МГСУ, 2012. – 292 с.

СП 63.13330.2012. Свод правил. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – Введ. в действ. 01.01.2013. – М. : Минрегион России, 2011. – 147 с.

Білозір В. Деформаційний метод розрахунку прогинів залізобетонних балок за тривалої дії навантаження

Розроблений деформаційний метод розрахунку прогинів залізобетонних балок за тривалої дії навантаження. Показана можливість визначення прогинів з врахуванням лінійної та нелінійної повзучості бетону стиснутої зони балок.

Ключові слова: балки, залізобетон, прогини, розрахунок.

Bilozir V. Deforming method of calculating deflections of reinforced concrete beams under long-term loading

Deforming method of calculating deflections of reinforced concrete beams under long-term loading is developed. The possibility of determining deflections considering linear and nonlinear creepage of the concrete of beams' compressed zones is suggested.

Key words: beams, reinforced concrete, deflections, calculation.

Билозир В. Деформационный метод расчета прогибов железобетонных балок при длительном действии нагрузки

Разработан деформационный метод расчета прогибов железобетонных балок при длительном действии нагрузки. Показана возможность определения прогибов с учетом линейной и нелинейной ползучести бетона сжатой зоны балок.

Ключевые слова: балки, железобетон, прогибы, расчет.