

УДК 624.012.35:620.173/174

ВИЗНАЧАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ БЕТОНУ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ ТА КОНСТРУКЦІЯХ

ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ И КОНСТРУКЦИЯХ

THE QUALIFICATORY FEATURES OF CONCRETE DEFORMATION IN REINFORCE-CONCRETE ELEMENTS AND CONSTRUCTIONS

Ромашко В.М., к.т.н., доц. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Ромашко В.Н., к.т.н., доц. (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ривне)

Romashko V., Ph. D. in Engineering, Associate Professor (National University of Water Management and Nature Recourses Use, Rivne)

Сформульовано ряд основних постулатів узагальненої моделі деформування бетону в бетонних та залізобетонних елементах і конструкціях. Головну увагу приділено січному модулю деформацій бетону, визначенню його початкових та можливих кінцевих значень

Сформулирован ряд основных постулатов обобщенной модели деформирования бетона в бетонных и железобетонных элементах и конструкциях. Главное внимание уделено секущему модулю деформаций бетона, определению его начальных и возможных конечных значений

The row of basic postulates of the generalized model of concrete deformation in concrete and reinforce-concrete elements and structures is formulated. The main attention is paid to the secant module of concrete deformations, the determination of its initial and possible eventual values

Ключові слова:

Деформації, модуль, бетон, залізобетон, елементи, конструкції

Деформации, модуль, бетон, железобетон, элементы, конструкции

Deformations, module, concrete, reinforced concrete, elements, constructions

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку теорії бетону та залізобетону сьогодні пов'язують в основному із запровадженням у практику проектування так званих деформаційних моделей перерізу бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій. У зв'язку з цим при нелінійних розрахунках

останніх переважною більшістю нормативних документів [1, 2] рекомендується використовувати повні діаграми деформування бетону, що можуть описуватися різноманітними залежностями. Однак їх основним спільним недоліком є те, що всі вони є емпіричними, оскільки запропоновані на підставі результатів експериментальних досліджень і не мають належного теоретичного обґрунтування. І тут основна проблема криється в тому, що більшість дослідників концентрують свою увагу лише на функції діаграми деформування бетону, а не на особливостях моделювання самого процесу деформування бетону.

Якщо ж говорити про відтворення процесу деформування бетонних чи залізобетонних елементів і конструкцій, то, безперечно, слід зосередитись на питаннях зміни їх жорсткості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що жорсткість бетонного перерізу як в неармованих, так і в армованих елементах прямо пов'язана з модулем деформацій бетону. Причому, при вирішенні практичних задач зазвичай використовується січний модуль деформацій бетону E_{cc} . Всі відомі на сьогодні вирази з його визначення можна умовно розділити на дві групи, залежно від характеру впливу основних функціональних параметрів.

До першої з них віднесемо ті аналітичні залежності, в яких січний модуль деформацій E_{cc} лінійно пов'язаний з рівнем напружень в бетоні $\eta_c = \sigma_c / f_{cd}$ [3, 4, 5]. Крім певних недоліків, характерних кожному із конкретних виразів, всім їм властивий один спільний і доволі серйозний недолік: за їх допомогою можна описати лише висхідну вітку діаграми деформування стиснутого бетону, та й то лише в певних межах.

Функції другої групи, що відображають нелінійну залежність січного модуля деформацій бетону від різних параметрів, можна умовно розділити на три підгрупи. Якщо залежності першої з них функціонально зв'язані лише з рівнем завантаження бетону η_c [6, 7, 8, 9], то другої - лише з рівнем його деформування $\eta_\epsilon = \epsilon_c / \epsilon_{cl}$ [10]. Водночас результати чисельних експериментальних досліджень показують, що дійсна діаграма $\sigma_c - \epsilon_c$, а отже і січний модуль деформацій бетону E_{cc} , загалом є залежними від обох вищезгаданих параметрів.

У функціях третьої підгрупи модуль деформацій E_{cc} пов'язується навіть з окремими геометричними параметрами [11, 12]. Однак ці залежності ще більш малопридатні для використання в узагальненій моделі деформування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій із-за їх відносної складності та відсутності належного фізичного обґрунтування.

Виділення питань, не вирішених в рамках загальної проблеми. В більшості вищезгаданих функцій E_{cc} використовується початковий модуль

пружності бетону E_{co} з його часто невідомим або сумнівним значенням. Важливість же якнайточнішого знання величини початкового модуля пружності бетону обумовлена запровадженням у розрахунках бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій так званих «деформаційних моделей». В окремих нормативних документах [1,2] початковий модуль пружності бетону E_{co} рекомендується визначати шляхом 5-ти відсоткового підвищення нормативного модуля пружності бетону E_{cm} . Однак, зважаючи, що бетони різних класів мають різні пружно-пластичні властивості, такий прийом не можна визнати коректним.

Відсутнім на сьогодні залишається і фізичне обґрунтування граничних значень модуля деформацій бетону E_{cu} .

Мета статті. Загалом дана стаття направлена на побудову узагальненої моделі деформування бетону в бетонних та залізобетонних елементах і конструкціях, виходячи з самого процесу його деформування та умов граничної рівноваги останніх. Вона також покликана забезпечити належне теоретичне обґрунтування залежності $\sigma_c - \varepsilon_c$ від початку завантаження бетону аж до повного його руйнування через січний модуль деформацій бетону E_{cc} .

Виклад основного матеріалу. Раніше [13] вже було показано, що залежність модуля деформацій бетону у вигляді нелінійної функції (рис.1)

$$E_{cc} = a - b \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - c \cdot \frac{\sigma_c}{f_{ck}}, \quad (1)$$

дозволяє моделювати процес деформування бетону неправильною дробово-раціональною функцією (рис. 2)

$$\sigma_c = \frac{a \cdot \varepsilon_c - b \cdot \varepsilon_c^2 / \varepsilon_{c1}}{1 + c \cdot \varepsilon_c / f_{ck}}, \quad (2)$$

де $a = E_{co}$; $b = E_{cf} = f_{ck} / \varepsilon_{c1}$; $c = E_{co} - 2 \cdot E_{cf} = E_{co} - 2 \cdot f_{ck} / \varepsilon_{c1}$.

За допомогою залежності (1) можна контролювати величину модуля деформацій бетону на будь-якому рівні його завантаження. Зокрема, величину початкового модуля пружності бетону можна обчислювати за формулою

$$E_{co} = \frac{(E_{cc})^2 - E_{cf} \cdot \eta_c \cdot (2 \cdot E_{cc} - E_{cf})}{E_{cc} \cdot (1 - \eta_c)}, \quad (3)$$

а величину критичного значення модуля деформацій бетону можна прогнозувати за наступним виразом

$$E_{cf} = E_{cc} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \left(\frac{E_{co}}{E_{cc}} \cdot (1 - \eta_c) - 1\right) / \eta_c}\right). \quad (4)$$

Якщо прийняти до уваги нормативні вимоги [2] щодо визначення модуля

пружності бетону E_{cm} за рівня напружень $\eta_c = 0,3$, то залежності (3) і (4) спростяться до вигляду, відповідно,

$$E_{co} = 1,43 \cdot E_{cm} - 0,86 \cdot E_{cf} + 0,43 \cdot E_{cf}^2 / E_{cm}, \quad (5)$$

$$E_{cf} = E_{cm} \cdot (1 - 1,53 \cdot \sqrt{E_{co} / E_{cm} - 1}). \quad (6)$$

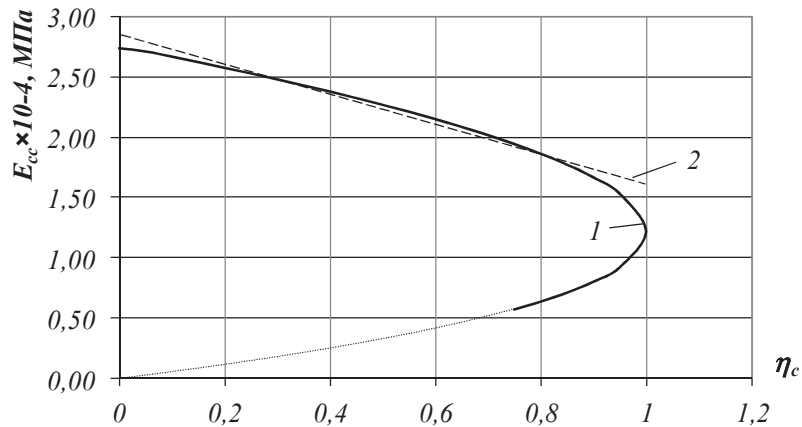


Рис. 1. Січний модуль деформацій бетону: 1 - за нелінійною функцією автора (1); 2 - за лінійною функцією Макаренка-Фенка [4]

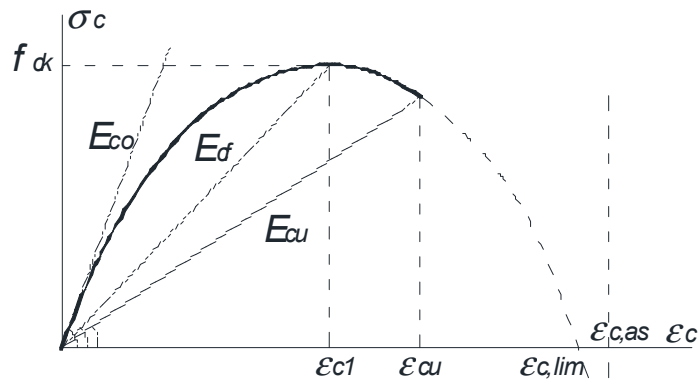


Рис. 2. Характер деформування бетону за неправильно дробово-раціональною функцією (2)

Проведені дослідження та відповідні розрахунки показують (табл. 1), що співвідношення між початковим та нормативним модулями пружності бетону не є сталими та суттєво залежать від класу бетону і коливаються в межах $k_o = 1,034 \dots 1,246$ (за середнього значення $k_o = 1,074$). Крім того було встановлено, що лінійна залежність січного модуля деформацій бетону E_{co}^m [4] порівняно з пропонованою нелінійною (1) завищує величину початкового

модуля пружності бетону в середньому на 4,6% ($E_{co}^m / E_{co} = 1,046$).

Таблиця 1

Залежність між нормативними E_{cm} та початковими E_{co} модулями пружності бетону

Клас бетону	$f_{ck,prism}$ МПа	E_{cm} , МПа	E_{co} , МПа	$k_o = \frac{E_{co}}{E_{cm}}$	E_{co}^m , МПа	$k_m = \frac{E_{co}^m}{E_{cm}}$	$\frac{E_{co}^m}{E_{co}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
C8/10	7,5	18140	22602	1,246	23216	1,280	1,027
C12/15	11	22880	28051	1,226	28908	1,263	1,031
C16/20	15	26897	32383	1,204	33518	1,246	1,035
C20/25	18,5	29600	35135	1,187	36473	1,232	1,038
C25/30	22	31778	37244	1,172	38741	1,219	1,040
C30/35	25,5	33570	38874	1,158	40514	1,207	1,042
C32/40	29	35070	40155	1,145	41920	1,195	1,044
C35/45	32	36174	41021	1,134	42903	1,186	1,045
C40/50	36	37440	42008	1,122	43966	1,174	1,047
C45/55	39,5	38393	42692	1,112	44714	1,165	1,048
C50/60	43	39228	43229	1,102	45330	1,156	1,048
C53/65	46,5	39967	43724	1,094	45838	1,147	1,048
C56/70	50	40625	44119	1,086	46260	1,139	1,048
C60/75	54	41294	44515	1,078	46657	1,130	1,048
C65/80	57,5	41818	44787	1,071	46942	1,123	1,048
C70/85	61	42293	45042	1,065	47180	1,116	1,047
C75/90	65	42785	45309	1,059	47405	1,108	1,046
C80/95	68	43122	45451	1,054	47546	1,103	1,046
C85/100	72	43535	45668	1,049	47702	1,096	1,044
C90/105	75,5	43866	45840	1,045	47814	1,090	1,043
C95/110	79	44172	45983	1,041	47906	1,085	1,042
C100/115	83	44495	46141	1,037	47993	1,079	1,041
C105/120	86	44720	46240	1,034	48045	1,074	1,039
Середні значення коефіцієнтів				1,074		1,123	1,046

Що ж до величини критичного значення модуля деформацій бетону $E_{cf} = f_{ck} / \epsilon_{cl}$, то подібне завищення є більш суттєвим і коливається в межах 15,2...43,8% (табл. 2).

Таблиця 2

Основні параметри позакритичного деформування бетону

Клас бетону	E_{cm} , МПа	E_{cf} , МПа	E_{cf}^m , МПа	$\frac{E_{cf}^m}{E_{cf}}$	$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cl}}$	$\frac{\varepsilon_{c,lim}}{\varepsilon_{cl}}$ ($\sigma_c = 0$)	$\frac{\varepsilon_{c,as}}{\varepsilon_{cl}}$ ($\sigma_c = \infty$)
1	2	3	4	5	6	7	8
C8/10	18140	4374	6288	1,438	1,507	9,516	-
C16/20	26897	8310	11457	1,379	1,465	6,879	-
C25/30	31778	11614	15538	1,338	1,431	5,425	-
C32/40	35070	14638	19111	1,306	1,4	4,452	-
C40/50	37440	17432	22237	1,276	1,372	3,756	-
C50/60	39228	20060	24947	1,244	1,347	3,235	-
C56/70	40625	22397	27446	1,225	1,323	2,834	13,607
C65/80	41818	24770	29813	1,204	1,301	2,515	4,67
C75/90	42785	26885	32000	1,19	1,278	2,223	2,93
C85/100	43535	28791	33780	1,173	1,259	2,016	2,316
C105/120	44720	32103	36995	1,152	1,223	1,7	1,751
Середні значення коефіцієнтів				1,266			

Граничні значення січного модуля деформацій бетону E_{cu} (рис. 2) загалом є змінними, оскільки залежать від багатьох вихідних факторів, обумовлених особливостями деформування бетону в бетонних та залізобетонних елементах і конструкціях. Вони можуть бути визначені за допомогою екстремального критерію несучої здатності елемента $dM / d(1/\rho) = 0$. З табл. 2 видно, що граничні деформації стиснутого бетону ε_{cu} за функцією (2) завжди залишаються значно меншими максимально можливих величин $\varepsilon_{c,lim}$, які відповідають повній втраті пружних властивостей бетону (рис. 2).

Крім того, результати проведених досліджень показують, що розривність неправильної дробово-раціональної функції деформування бетону, про яку застерігають окремі дослідники, проявляється у вигляді вертикальної асимптоти $\varepsilon_{c,as}$ (рис. 2) лише для високих класів бетону та й то далеко за межами його можливого деформування (табл. 2).

Виходячи з вищесказаного, можна зробити ряд наступних **висновків**:

- січний модуль деформацій бетону E_{cc} є залежними як від рівня завантаження бетону η_c , так і від рівня його деформування η_ε ;
- співвідношення між початковим та нормативним модулями пружності бетону E_{co} / E_{cm} не є сталим та суттєво залежить від класу бетону;
- лінійна залежність січного модуля деформацій бетону суттєво завищує

величину критичного модуля деформацій бетону E_{cf} , а тому є малоприматною для узагальненої моделі деформування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій;

- максимально можливі деформації бетону $\varepsilon_{c,lim}$ відповідають повній втраті його пружних властивостей ($E_{c,lim} = 0$);
- діаграма деформування бетону у вигляді неправильної дробово-раціональної функції (2), зважаючи на належне фізичне обґрунтування, є однією з найбільш пріоритетних для побудови узагальненої моделі деформування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій.

1. 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). **2.** 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. - (Національний стандарт України). **3.** Евграфов Г.К. О расчете железобетонных мостов по теории предельных состояний / Г. К. Евграфов // Техника железных дорог. -1948. - № 12. - С. 12-15. **4.** Макаренко Л.П. Практический способ определения модуля упругости и упругопластических характеристик бетона при сжатии / Л.П. Макаренко, Г.А. Фенко// Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. - 1970. - №10. - С. 141-147. **5.** Осипов В.К. Определение коэффициента упругопластичности бетона сжатой зоны / В.К. Осипов, В.Г. Акопов // Бетон и железобетон. -1988. - №4. - С.36-37. **6.** Столяров Я.В. Введение в теорию железобетона / Я.В. Столяров. - М.-Л.: Стройиздат, 1941. - 447 с. **7.** Коковин О.А. Деформация изгибаемых и внецентренно сжатых элементов при кратковременно действующей нагрузке в стадиях, близких разрушению / О.А. Коковин // Прочность и жесткость железобетонных конструкций [Под. ред. А.А.Гвоздева]. - М.: НИЖБ, 1968. - С. 104-125. **8.** Соломенцев Г.Г. О закономерностях продольного деформирования бетона при осевом сжатии / Г.Г. Соломенцев // Бетон и железобетон. - 1971. - №4. - С. 2-4. **9.** Ящук В.Е. К описанию диаграмм сжатия и разгрузки бетона / В.Е. Ящук // Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. - 1982. - №3. - С.5-11. **10.** Байков В.Н. Расчет изгибаемых элементов с учетом экспериментальных зависимостей между напряжениями и деформациями для бетона и высокопрочной арматуры / В.Н. Байков // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. - 1981. - № 5. - С. 26-31. **11.** Карпенко Н.И. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры / Н.И. Карпенко, Т.А. Мухамедиев, А.Н. Петров // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций. - М.: НИИЖБ, 1986. - С. 7-25. **12.** Шкурупий А.А. Расчет железобетонных элементов с переменной жесткостью при косом сжатии методом начальных параметров / А.А. Шкурупий // Бетон и железобетон в Украине. - 2000. - № 1. - С. 17-21. **13.** Ромашко В.М. Жорсткість та модуль деформацій бетону в деформаційній моделі / В.М. Ромашко // Бетон и железобетон в Украине. - 2007. - № 6. -С.2-6.