

ЖОРСТКІСТЬ ТА ГРАНИЧНА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ БЕТОНУ В ПОЗАЦЕНТРОВО СТИСНУТИХ БЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ

Ромашко В.М.

Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна

АНОТАЦІЯ: Запропонована аналітична залежність $N_b - \varepsilon_b$, що описує процес деформування бетону не тільки в центральній, але і позацинтрально стиснутих бетонних елементах. Отримана функція граничних деформацій бетону залежно від ступеню неоднорідності напружено-деформованого стану елемента. Сформульовано ряд основних гіпотез узагальненої деформаційної моделі бетону та залізобетону.

АННОТАЦИЯ: Предложена аналитическая зависимость $N_b - \varepsilon_b$, описывающая процесс деформирования бетона в центральной и во внецентренно сжатых бетонных элементах. Получена функция предельных деформаций бетона в зависимости от степени неоднородности напряженно-деформированного состояния элемента. Сформулирован ряд основных гипотез обобщенной деформационной модели бетона и железобетона.

ABSTRACT: Analytical dependence of $N_b - \varepsilon_b$ describes the process of deformation of concrete in centrally and in eccentric compressed concrete elements is offered. The function of maximum deformations of concrete is got depending on the degree of heterogeneity of the tensely-deformed state of element. The row of basic hypotheses of the generalized deformation model of concrete and reinforced concrete is formulated.

Жорсткість перерізу бетонного елемента, що зазнає будь-якого виду деформування, характеризується відповідними геометричними та деформативними характеристиками. За осьового стиску перші залишаються незмінними, оскільки незмінними є форма стиснутої зони та

її площа. Отже, жорсткість перерізу центрально стиснутого бетонного елемента може змінюватися лише за рахунок зміни деформативних характеристик. В роботах [2,3] показано, що саме завдяки цим характеристикам, **жорсткість перерізу бетонного елемента за осьового стиску змінюється нелінійно**. Якщо цю зміну описати залежністю (1)

$$\frac{N}{\varepsilon_b} = a - b \cdot \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bR}} - c \cdot \frac{N}{N_u}, \quad (1)$$

то діаграма деформування бетону матиме вигляд неправильної дробово-раціональної функції (2), закладеної в основу Євронорм [1]

$$\sigma_b = \frac{E_b \cdot \varepsilon_b - R_b \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bR}}\right)^2}{1 + \left(\frac{E_b}{R_b} - \frac{2}{\varepsilon_{bR}}\right) \cdot \varepsilon_b}, \quad (2)$$

Оскільки всі волокна в поперечному перерізі працюють рівномірно, то низхідна вітка для бетонного елемента, що зазнає осьового стиску, буде відсутня або існувати просто-напросто не може (рис. 1, а). Інакше кажучи, діаграма деформування бетону $\sigma_b - \varepsilon_b$ буде закінчуватися критичною точкою, для якої $\varepsilon_{bu} = \varepsilon_{bR}$, а $\sigma_{bu} = R_b$ за умови $dN/d\varepsilon_b = 0$.

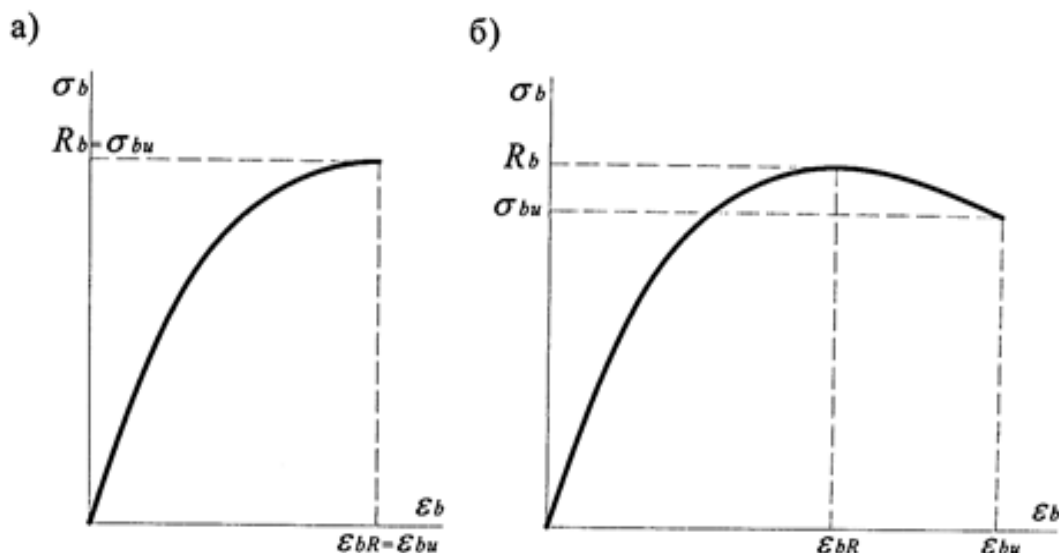


Рис. 1. Діаграми деформування бетону центрально (а) та позацинтрово (б) стиснутого бетонного елемента

Зупинимось тепер на жорсткості перерізу бетонного елемента, що зазнає позacentрового стиску з випадковими чи відносно малими ексцентриситетами. Поперечний переріз такого елемента можна представити нескінченно великою кількістю елементарних ділянок, кожна з яких практично зазнає осевого стиску певної інтенсивності (рис.2).

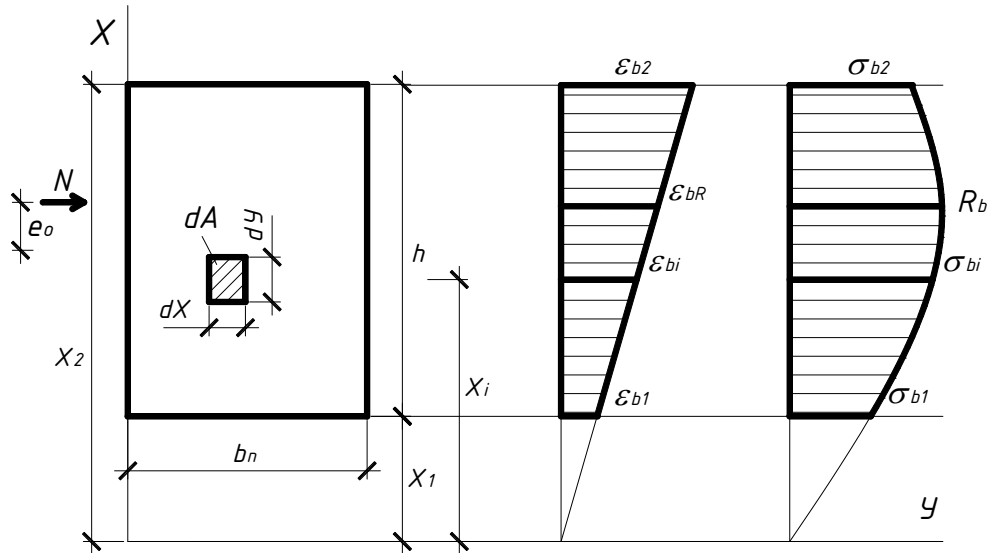


Рис.2. Параметри напружено-деформованого стану позacentрово стиснутого бетонного елемента за малих ексцентриситетів

Нескладно помітити, що, при зміні жорсткості кожної з них лише за рахунок зміни деформативних характеристик

$$\frac{dN}{\epsilon_b} = \frac{\sigma_b dA}{\epsilon_b} = a - b \cdot \frac{\epsilon_b}{\epsilon_{bR}} - c \cdot \frac{dN}{dN_u}, \quad (3)$$

напруги в бетоні кожної із зазначених ділянок будуть описуватися неправильною дробово-раціональною функцією (2). Несучу здатність позacentрово стиснутого бетонного елемента прямокутного перерізу можна знайти за виразом

$$N = \iint_{dA} \sigma_b dA = \frac{b_n}{1/\rho} \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \sigma_b d\epsilon_b. \quad (4)$$

Цілком очевидно, що, на момент втрати несучої здатності вищезазначеного елемента, деформації крайових волокон будуть досягати своїх граничних значень $\epsilon_b = \epsilon_{bu} \geq \epsilon_{bR}$. Тому використання екстремального критерію міцності $dN/d\epsilon_b = 0$ та прийняття діаграми

деформування бетону $\sigma_b - \varepsilon_b$ у вигляді функції (2) дозволяє визначити величину граничних деформацій бетону за формулою

$$\varepsilon_{bu} = \frac{h}{2 \cdot \rho} - \frac{R_b \cdot \varepsilon_{bR}}{E_b \varepsilon_{bR} - 2R_b} + \left(\sqrt{\left(\frac{h}{2 \cdot \rho} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{bR} (E_b \varepsilon_{bR} - R_b)}{E_b \varepsilon_{bR} - 2R_b} \right)^2} \right) \quad (5)$$

Жорсткісний параметр перерізу елемента h/ρ , що входить до виразу (5), визначається залежністю

$$\frac{h}{\rho} = n \cdot \varepsilon_{bu} \quad (6)$$

де n - коефіцієнт неоднорідності напружено-деформованого стану бетону, що змінюється в межах $0 < n < 1$.

З урахуванням (6) функція (5) прийме остаточний вигляд

$$\varepsilon_{bu} = \varepsilon_{bR} \frac{(2-n)}{2 \cdot (1-n)(k-2)} \left(\sqrt{\frac{4 \cdot (1-n) \cdot k \cdot (k-2)}{(2-n)^2}} - 1 \right); \quad (7)$$

де $k = E_b \varepsilon_{bR} / R_b$.

Залежність (7) можна назвати **функцією граничних деформацій бетону** бетонного елемента. З неї випливає, що за осьового стиску ($1/\rho = 0$) гранична деформація бетону завжди рівна її критичному значенню $\varepsilon_{bu} = \varepsilon_{bR}$. Для випадку малих ексцентриситетів, наприклад при $\varepsilon_{b1} = 0,5 \cdot \varepsilon_{b2}$ або $h/\rho = 0,5 \varepsilon_{bu}$, гранична деформація бетону складатиме

$$\varepsilon_{bu} = \varepsilon_{bR} \frac{3}{2 \cdot (k-2)} \left(\sqrt{1 + \frac{8}{9} \cdot k \cdot (k-2)} - 1 \right); \quad (8)$$

Для випадку великих ексцентриситетів (рис.3), коли епюри напруг і деформацій бетону стають двозначними, тобто $\varepsilon_{b1} \leq 0$ і $\sigma_{b1} \leq 0$ при $h/\rho = \varepsilon_{bu}$ або $x/\rho = \varepsilon_{bu}$, гранична деформація сягатиме

$$\varepsilon_{bu} = \frac{E_b}{R_b} \varepsilon_{bR}^2 = k \cdot \varepsilon_{bR} = \frac{\varepsilon_{bR}}{\nu_{bR}}, \quad (9)$$

де ν_{bR} - граничне значення коефіцієнта пружності бетону.

Відповідні розрахунки та детальний аналіз формули (7) показують, що гранична деформативність бетону залежить від ступеня неоднорідності напружено-деформованого стану самого бетонного елемента (рис. 4). Для

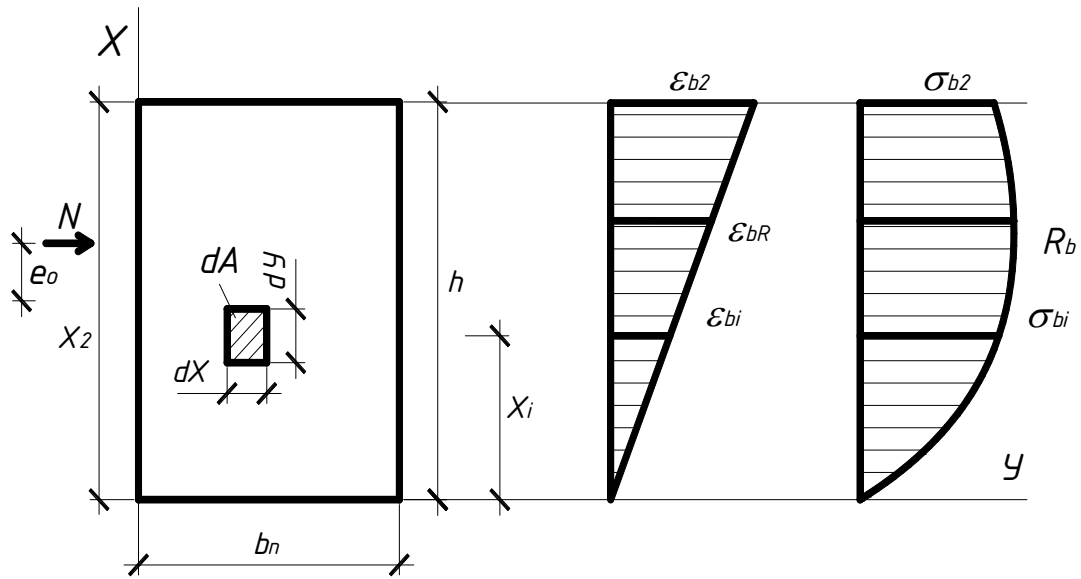


Рис. 3. Параметри напружено-деформованого стану позациентрово стиснутого бетонного елемента за великих ексцентриситетів

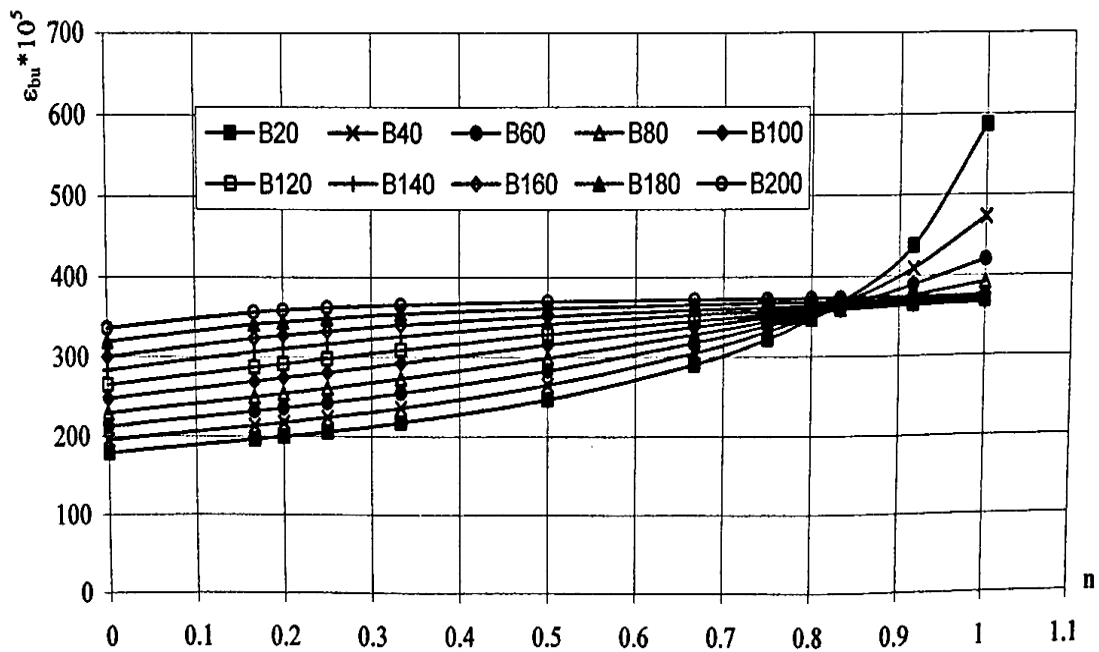


Рис. 4. Вплив неоднорідності напружено-деформованого стану бетону на його граничну деформативність в бетонних елементах

кожного класу бетону максимально можливі значення граничних деформацій досягаються при найбільшій неоднорідності напружено-деформованого стану елемента ($n = 1$), тобто при повному «розвантаженні» найбільш деформованих волокон перерізу, коли $\sigma_{bu} = 0$ (див. табл.). В реальних умовах із-за впливу різних факторів (величини ексцентриситету, форми стиснутої зони бетону, насиченості та властивостей арматури

тощо), граничні деформації бетону рідко досягають своїх максимально можливих значень.

Таблиця 1

Граничні деформації бетону ε_{bu} в бетонних елементах за
позацентрового стиску

№	R_b , МПа	E_b , МПа	$\varepsilon_{bR} \times 10^5$	$h/(\varepsilon_{bu} \times \rho)$	$\varepsilon_{bu} / \varepsilon_{bR}$	σ_{bu} / R_b
1	2	3	4	5	6	7
1	7,5	18571	170,13	0	1,000	1.000
2				1/6	1,094	0.997
3				1/3	1,217	0.987
4				1/2	1,388	0.963
5				2/3	1,651	0.909
6				4/5	2,014	0.811
7				11/12	2,673	0.595
8				1	4,213	0.000
9	15	27368	179,31	0	1,000	1.000
10				1/6	1,093	0.996
11				1/3	1,214	0.982
12				1/2	1,377	0.948
13				2/3	1,620	0.874
14				4/5	1,934	0.748
15				11/12	2,438	0.495
16				1	3,272	0.000
17	22	32500	187,29	0	1,000	1.000
18				1/6	1,093	0.995
19				1/3	1,211	0.977
20				1/2	1,367	0.934
21				2/3	1,590	0.843
22				4/5	1,862	0.694
23				11/12	2,254	0.423
24				1	2,767	0.000
25	29	35862	195,57	0	1,000	1.000
26				1/6	1,092	0.994
27				1/3	1,207	0.971
28				1/2	1,356	0.919
29				2/3	1,559	0.811
30				4/5	1,792	0.642
31				11/12	2,092	0.365
32				1	2,418	0.000

33	43	40000	212,40	0	1,000	1.000
34				1/6	1,091	0.992
35				1/3	1,199	0.959
36				1/2	1,332	0.886
37				2/3	1,495	0.745
38				4/5	1,658	0.550
39				11/12	1,830	0.279
40				1	1,976	0.000
41	57	42449	229,38	0	1,000	1.000
42				1/6	1,089	0.988
43				1/3	1,190	0.1945
44				1/2	1,304	0.851
45				2/3	1,430	0.682
46				4/5	1,539	0.473
47				11/12	1,637	0.223
48				1	1,708	0.000
49	72	44068	247,98	0	1,000	1.000
50				1/6	1,087	0.984
51				1/3	1,179	0.926
52				1/2	1,272	0.809
53				2/3	1,362	0.618
54				4/5	1,429	0.408
55				11/12	1,483	0.183
56				1	1,518	0.000
57	86	45217	264,99	0	1,000	1.000
58				1/6	1,084	0.979
59				1/3	1,166	0.906
60				1/2	1,240	0.768
61				2/3	1,302	0.565
62				4/5	1,344	0.361
63				11/12	1,374	0.157
64				1	1,393	0.000
65	101	46076	283,50	0	1,000	1.000
66				1/6	1,080	0.973
67				1/3	1,150	0.881
68				1/2	1,203	0.724
69				2/3	1,243	0.515
70				4/5	1,267	0.321
71				11/12	1,283	0.137
72				1	1,293	0.000

Таким чином, все вищесказане дає змогу сформулювати **ВИСНОВКИ**:

- жорсткість перерізу центрально та позацентрово стиснутих бетонних елементів під навантаженням змінюється нелінійно;
- низхідна вітка на діаграмі деформування бетону $\sigma_b - \varepsilon_b$ характеризує процес перерозподілу зусиль та «розвантаження» найбільш напружених волокон;
- низхідні вітки експериментальних діаграм деформування бетону $\sigma_b - \varepsilon_b$, отримувані за так званих «жорстких» режимів завантаження, характеризують роботу бетону скоріше не в бетонних, а залізобетонних елементах і то надто наближено;
- діаграма деформування бетону $\sigma_b - \varepsilon_b$ центрально навантаженого неармованого елемента не може містити низхідної вітки навіть за «жорсткого» режиму завантаження;
- граничні деформації бетону досягають максимально можливих значень при максимальній неоднорідності напружено-деформованого стану елемента, тобто при повному «розвантаженні» ($\sigma_{bu} = 0$) найбільш деформованих волокон перерізу;
- величина ексцентриситету поздовжньої сили, форма стиснутої зони бетонного перерізу, наявність арматури та її властивості визначають ступінь неоднорідності напружено-деформованого стану елемента, а тому найбільше впливають на величину граничних деформацій бетону ε_{bu} .

ЛІТЕРАТУРА

1. EN 1992-1: 2001 (Final Draft, April, 2002) Eurocode-2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Building. – Brussels. -2002, October - 230 p.
2. Ромашко В.М. Повна діаграма деформування бетону в бетонних та залізобетонних елементах // Будівельні конструкції: Зб. наук. праць. - Вип.67. - К.: НДІБК, 2007. -С. 299-309.
3. Ромашко В.М. Жорсткість та модуль деформацій бетону в деформаційній моделі // Бетон и железобетон в Украине. - 2007. - № 6. - С. 2-6.