



МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 624.012

Кухнюк О. М., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **Мишко С. В., Кухнюк Н. О.** (Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ)

ПРОГНОЗУВАННЯ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ РОБОТІ КРУПНОЗЕРНИСТОГО БЕТОНУ В УМОВАХ МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Наведені результати є продовженням досліджень, що присвячені роботі бетонних конструкцій при малоциклових навантаженнях. В результаті реалізації планованого експерименту, отримана математична модель, що дає змогу прогнозувати розвиток пластичних деформацій (в межах факторів варіювання) в бетонах із дрібнозернистим заповнювачем. *Ключові слова:* бетонні конструкції, математична модель, бетон, дрібнозернистий заповнювач.

Вивчення деформаційних характеристик крупнозернистого бетону, в тому числі і розвиток пластичних деформацій, проводилось за допомогою планованого експерименту, що був докладно описаний в роботах [2; 3]. Наведемо основні параметри цього експерименту, де під крупнозернистим бетоном розуміється бетон із щелевеною складовою.

Фактори, які досліджувались як найвпливовіші:

- ✓ верхній рівень напружень циклічних навантажень $\eta_t = \sigma_{bt} / R_b$;
- ✓ характеристика циклу (асиметрія) $\rho = \eta_1 / \eta_t$, де $\eta_t = \sigma_{bt} / R_b$ – нижній рівень напружень;
- ✓ кількість циклів n .

Для отримання більш повної та цілісної картини зміни пружно-пластичних характеристик дослідних серій бетонів під впливом малоциклових навантажень проаналізовано зміну коефіцієнта пластичності бетону λ_b . Слід зауважити, що в нормативній літературі та в роботах переважної більшості дослідників, присвячених зміні коефіцієнтів пружності та пластичності при навантаженні, приводяться лише для одного фіксованого значення верхнього рівня навантажень $\eta_t = \sigma_b / R_b = 0,5$. На відміну від цього в даній роботі за допомо-

гою планованого експерименту описана зміна коефіцієнта пластичності в діапазоні $\eta_t = \sigma_b / R_b = 0,5 \sim 0,8$.

Таблиця 1

Умови планування експерименту для зразків

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вигляд	Кодований вигляд	-1	0	+1	
Верхній рівень напружень, η_t	X_1	0,5	0,65	0,8	0,15
Характеристика циклу, ρ	X_2	0	0,3	0,6	0,30
Кількість циклів, n	X_3	1	6	11	5

Дослідження зміни обраного параметра спирались на методику Л.П. Макаренка і Г.О. Фенка, які віднайшли лінійну залежність між E'_b і η_t при нелінійній залежності $\sigma_b \sim \varepsilon_b$ [1], які довели, що залежність між січним модулем пружно-пластичності бетону (тангенс кута нахилу січної кривої \sim до осі (рис. 1)) та відносним рівнем напружень при центральному стиску зразків призм, що навантажуються з постійною швидкістю, є лінійною (рис. 1) аж до їхнього руйнування при нелінійній залежності $\sigma_b \sim \varepsilon_b$ (рис. 2).

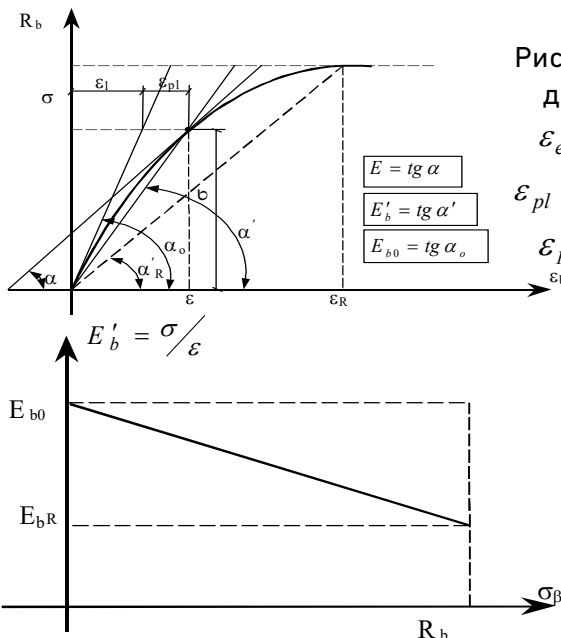


Рис. 1. Загальний вигляд діаграми деформування бетону $(\sigma_b - \varepsilon_b)^{\wedge}$
 ε_{el} – пружні відносні деформації;
 ε_{pl} – пластичні відносні деформації;
 ε_R – граничні деформації бетону

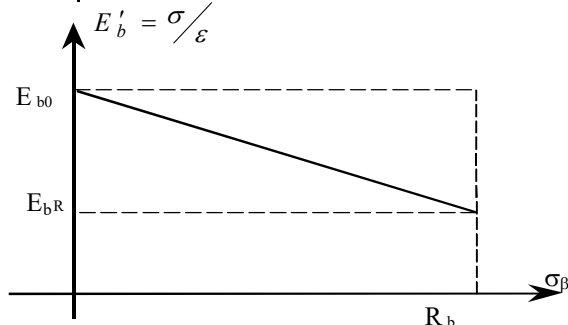


Рис. 2. Графічна інтерпретація лінійного рівняння регресії $(E'_b \sim \sigma_b)$

Відштовхуючись від виразу $E'_b = E_{b0}(1 - \lambda_{bR}\eta_b)$, приходимо до висновку, що для кожного циклу навантажень можна знайти граничне значення коефіцієнта пластичних деформацій λ_{bR} при



$$\sigma_b = R_b.$$

Режими навантаження дослідних зразків і середні значення отриманих вихідних параметрів наведено в табл. 2

При обробці даних були використані результати планованого експерименту, методика якого докладно описана в [1; 2].

Таблиця 2

Режими навантаження дослідних зразків з ДЗБ
та значення вихідного коефіцієнта k_λ

Точки плану	Шифр призм	Режими навантаження			$k_\lambda = \frac{\lambda_{bR,n+1}}{\lambda_{bR,1}}$	k_λ
		$\eta_l (\rho)$	η_t	n		
1	П-63, П-67	0,48(0,6)	0,8	6	0,786; 0,912	0,849
2	П-64, П-65	0 (0)	0,8	6	0,482; 0,078	0,280
3	П-68	0,3(0,6)	0,5	6	0,750	0,750
4	П-70	0 (0)	0,5	6	0,250	0,250
5	П-66, П-62	0,24(0,3)	0,8	11	0,449; 0,345	0,397
6	П-72	0,24(0,3)	0,8	1	0,437	0,437
7	П-76	0,15(0,3)	0,5	11	0,560	0,560
8	П-77, П-78	0,15(0,3)	0,5	1	0,456; 0,244	0,350
9	П-79, П-80	0,39(0,6)	0,65	11	0,438; 0,46	0,449
10	П-82	0,39(0,6)	0,65	1	0,650	0,650
11	П-74	0 (0)	0,65	11	0,289	0,289
12	П-85	0 (0)	0,65	1	0,530	0,530
13	П-86	0,195(0,3)	0,65	6	0,498	0,498
14	П-87	0,195(0,3)	0,65	6	0,560	0,560
15	П-88	0,195(0,3)	0,65	6	0,873	0,873

За вихідні параметри в даному випадку були прийняті відношення граничних значень коефіцієнта пластичних деформацій на останньому руйнуючому циклі згідно з матрицею планування до тієї ж величини на першому циклі. Режими навантаження дослідних зразків і середні значення отриманих вихідних параметрів приведені в табл. 2.

З табл. 2 видно, що зменшення коефіцієнта, яке спостерігалось у дрібнозернистих бетонів, в різній мірі залежить від різних факторів. В найбільшій мірі зменшення коефіцієнта пластичності залежить від величини асиметрії циклу, що характеризується фактором ρ .

Тут встановлено тенденцію зменшення k_λ зі зменшенням характеристики циклу ρ при фіксованих η_t і n . Наприклад, в призмах за

постійних $\eta_t=0,8$ і $n=6$ середні значення $\lambda_{bR,n+1}$ для $\rho =0,6$ і 0 менше за $\lambda_{bR,1}$ і складають відповідно $0,849$ та $0,280$ від останнього, а в призмах, де $\eta_t=0,5$ за інших незмінних факторів спостерігається тенденція зменшення коефіцієнта k_λ від $0,750$ до $0,250$.

З меншою інтенсивністю впливає на коефіцієнт k_λ верхній рівень навантажень η_t . Цей вплив тим відчутніший, чим вище рівень напружень η_t за фіксованих значень ρ та n . Так, за постійних значень $\rho=0,3$ та $n=11$ для призм, де $\eta_t=0,5$ і $0,8$, граничний коефіцієнт $\lambda_{bR,n+1}$ зменшуються по відношенню до аналогічних деформацій при одnorазовому стиску відповідно в $0,56$ і $0,397$ рази (див. табл. 2).

При збільшенні кількості циклів навантаження n за фіксованих η_t і ρ також було встановлено поступове зменшення k_λ . Так, в призмах за постійних $\eta_t=0,8$ та $\rho=0,3$, де $n=1$ і 11 циклів, відношення $k_\lambda = \lambda_{bR,n+1}/\lambda_{bR,1}$ відповідно зменшується від $0,437$ до $0,397$, а за постійним $\eta_t=0,65$ та $\rho=0$, $k_\lambda = \lambda_{bR,n+1}/\lambda_{bR,1}$ зменшується відповідно від $0,530$ до $0,289$.

Аналітичні залежності зміни деформаційних характеристик бетонів. На підставі вищеописаних планованих експериментів віднайдені математичні моделі залежності для бетонів ДЗБ, як функції η , ρ і n у вигляді полінома другого порядку.

Для знаходження коефіцієнтів поліноміальних рівнянь були складені матриці планування, а також схеми взаємодії факторів.

З урахуванням кодованих значень факторів та відповідності граничним умовам при довірчій імовірності $0,95$ отримані наступні рівняння регресії для зміни коефіцієнта пластичності бетонів при малоцикловому осьовому стиску:

для дрібнозернистого бетону (ДЗБ):

$$k_\lambda = \lambda_{bR,n+1}/\lambda_{bR,1} = 0,6437 + 0,0066X_1 + 0,1686X_2 - 0,034X_3 - 0,0775X_1^2 - 0,0341X_2^2 - 0,1304X_3^2 + 0,0172X_1X_2 - 0,0625X_1X_3 + 0,0099X_2X_3. \quad (1)$$

Співставлення параметрів k_λ , отриманих дослідним шляхом з теоретичними для ДЗБ, які були знайдені за залежністю (1) показали їх близьке збігання (табл. 2). При цьому розрахункові значення критерію Фішера були значно менші за теоретичні (табл. 3). Надійність розробленої моделі підтверджують і статистика варіаційного ряду.



Таблиця 3

Порівняльна таблиця збігання дослідних і теоретичних даних для зміни коефіцієнта пластичності при малоциклових навантаженнях зразків з дрібнозернистого бетону (ДЗБ)

Шифр призм	$k_\lambda = \lambda_{bR,n+1} / \lambda_{bR,1}$		Відхилення	
	Дослідні \bar{k}_λ	Теоретичні k_λ	$\Delta = \bar{k}_\lambda - k_\lambda$	$\Delta^2 = (\bar{k}_\lambda - k_\lambda)^2$
П-63, П-67	0,8489	0,7245	0,1244	1,5E-02
П-64, П-65	0,2800	0,3530	-0,0730	5,3E-03
П-68	0,7502	0,6770	0,0732	5,4E-03
П-70, П-71	0,2500	0,3741	-0,1241	0,0154
П-66, П-62	0,3969	0,3459	0,0511	0,0026
П-72, П-73	0,4370	0,5390	-0,1020	0,0104
П-75, П-76	0,5600	0,4577	0,1023	0,0105
П-77, П-78	0,3500	0,4008	-0,0508	0,0026
П-79, П-80	0,4487	0,6238	-0,1751	0,0307
П-82	0,6500	0,6720	-0,0220	0,0005
П-74	0,2890	0,2668	0,0223	0,0005
П-85	0,5300	0,3547	0,1753	0,0307
П-86	0,4980	0,6437	-0,1458	0,0212
П-87	0,5600	0,6437	-0,0838	0,0070
П-88	0,8732	0,6437	0,2295	0,0527

Статистики за варіаційним рядом $\bar{k}_\lambda / k_\lambda$:
n=15; M=1,004046; G=0,2454486; V=24,54%; P=6,34%.

Проаналізуємо графічні інтерпретації (рис. 3) отриманої математичної моделі. Так, порівнюючи діаграми впливу верхнього рівня навантаження η_t на коефіцієнт пластичності можна відмітити, що для ДЗБ графіки мають криволінійний характер і однакову динаміку реагування на зміну цього фактора при фіксованих значеннях n . Відмітимо, що збільшення η_t на перших циклах призводить до збільшення k_λ (від 0,508 до 0,681 для $\rho=0,6$ і $n=1$), а на останніх циклах прослідковується зворотня тенденція (для $\rho=0,6$ і $n=1$ зменшення від 0,585 до 0,507). Слід відмітити, що в діапазоні $\eta_t=0,55 - 0,7$ пластичні зміни матеріалу уповільнюються, можна говорити про відносну їх стабілізацію і лише при перевищенні η_t цих значень продовжується зміна k_λ в бік зменшення (рис. 3, а).

З графіку випливає, що на відміну від попереднього фактору,

рівень асиметрії циклів ρ має однозначну тенденцію: при збільшенні ρ від 0 до 0,6 збільшується і дослідний параметр k_{λ} , причому для

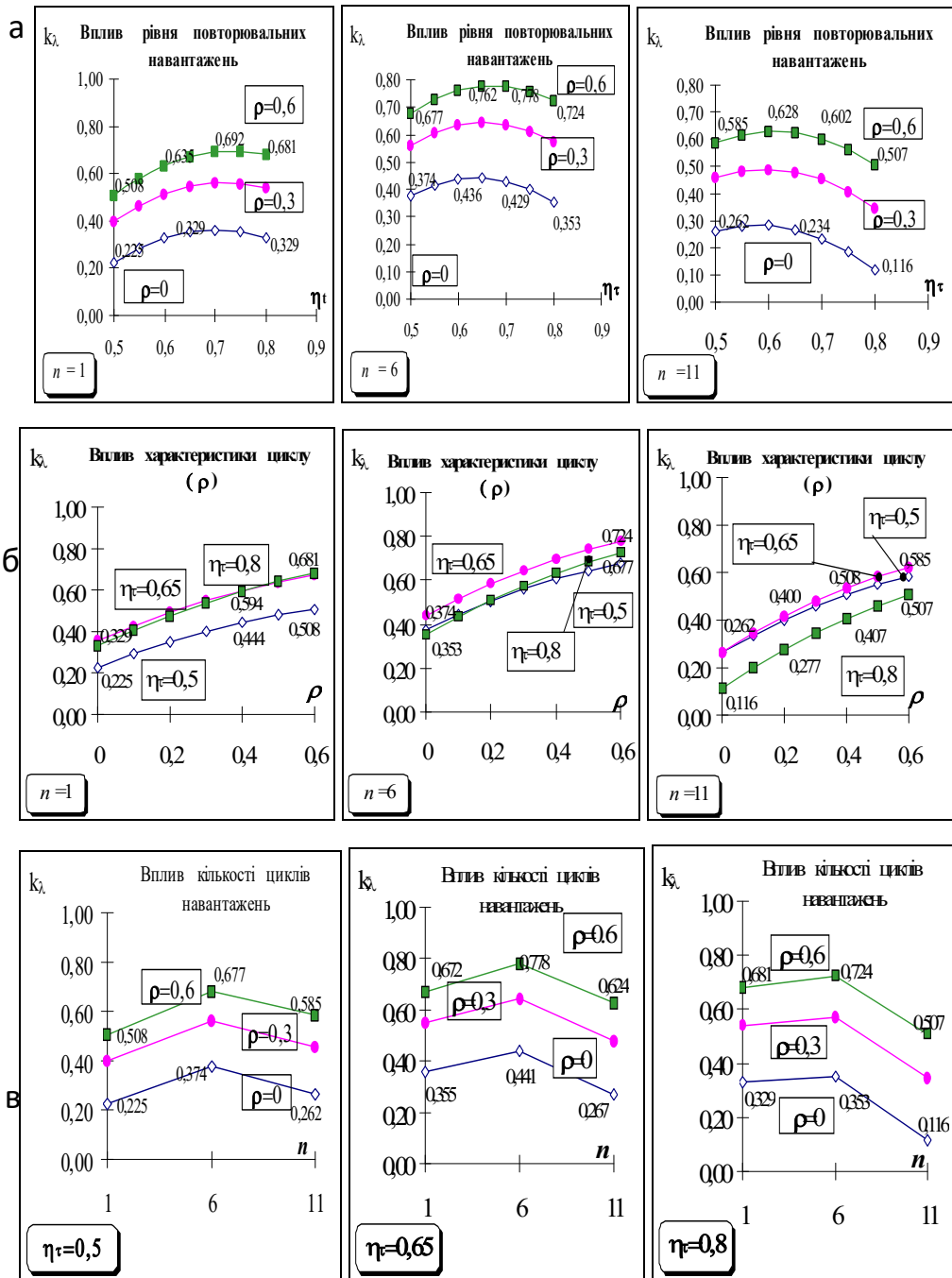


Рис. 3. Вплив рівня повторювальних навантажень (а), характеристики циклу (б), кількості циклів (в) на зміну коефіцієнта пластичності ДЗВ



зразків із ДЗБ характерна інтенсивна зміна коефіцієнта пластичності, особливо з ростом кількості циклів. Наприклад, для $\eta_t=0,8$ і $n=1$ досліджуваний коефіцієнт збільшується від 0,329 для $\rho=0$ до 0,681 для $\rho=0,6$, а при тих самих фіксованих значеннях, але $n=11$ коефіцієнт k_λ змінює значення від 0,116 до 0,507 відповідно.

Таблиця 4

Порівняльна таблиця оціночного критерію Фішера при визначенні коефіцієнтів рівнянь регресій (1)

Дослідний параметр	k_λ
Розрахунковий критерій Фішера	1,7375
Теоретичний критерій Фішера	19,25

Неоднозначний вплив на дослідний параметр чинить кількість циклів навантажень n . Наприклад, для дослідних призм збільшення кількості циклів призводить до загального збільшення коефіцієнта пластичності на проміжку 1–6 циклу і навпаки – призводить до суттєвого зменшення при подальшому збільшенні n від 6 до 11 (рис. 3, в).

1. Макаренко Л. П. Практический способ определения модуля упругости и упруго-пластических характеристик бетона при сжатии / Макаренко Л. П., Фенко Г. А. // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. – 1970. – № 10. – С. 141–147. 2. Бабич Є. М., Кухнюк О. М. Деформаційні характеристики бетону при осьовому малоцикловому стиску // Вісник Рівненського державного технічного університету. Збірник наукових праць. – Рівне, 1999. – Випуск 2. – Частина 3. – С. 21–25 3. Кухнюк О. М. Вплив малоциклових навантажень на механічні характеристики бетону та роботу згинальних залізобетонних елементів. Дис. канд. техн. наук / Кухнюк О. М. – Львів, 2001. – 219 с. 4. Бабич Є. М. Прогнозування поперечних деформацій при роботі дрібнозернистого бетону в умовах малоциклових навантажень / Бабич Є. М., Кухнюк О. М. // Вісник Національного університету волинського господарства та природокористування. Збірник наукових праць. – Рівне, 2006. – Випуск 2(34). Серія «Технічні науки» – Частина 1. – С. 110–116.

Рецензент: д.т.н., професор Бабич Є. М. (НУВГП)

Kukhniuk O. M., Candidate of Engineering, Associate Professor
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne),
Myshko S. V., Kukhniuk N. O. (Kyiv National University of Construction
and Architecture, Kyiv)

PREDICTION PLASTIC DEFORMATION UNDER WORK OF SHALLOW-SIZED-GRANULAR CONCRETE IN SMALL CYCLIC LOADING

The resulted results are continuation of researches of the author, devoted to work of concrete designs at small cycle of loadings. As a result of realization planned experiment, the mathematical model is received, which gives the chance to predict development of plastic deformations (within variation factors) in concrete with a shallow-sized-granular of a structure.

Keywords: concrete structures, mathematical model, concrete, shallow-sized-granular.

Кухнюк О. Н., к.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно), **Мышко С. В., Кухнюк Н. О.** (Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ РАБОТЕ КРУПНОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЗОК

Приведенные результаты являются продолжением исследований, посвященных работе бетонных конструкций при малоцикловых нагрузках. В результате реализации планируемого эксперимента, получена математическая модель, позволяющая прогнозировать развитие пластических деформаций (в пределах факторов варьирования) в бетонах с мелкозернистой заполнителем.

Ключевые слова: бетонные конструкции, математическая модель, бетон, мелкозернистый заполнитель.
