

УДК 624.04

ВПЛИВ ВИПАДКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА МІЦНІСТЬ БЕТОННИХ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Т.Л. Чирва¹,

канд. техн. наук, доцент

В.М. Колякова¹,

канд. техн. наук, доцент

В.Л. Мартинов¹,

д-р техн. наук, професор

В.М. Чирва^{1,2},

канд. техн. наук, доцент

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ²ТОВ «Придніпров'є», м. Кривий Ріг

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.139-148

Відомо, що практично всі конструкції в процесі експлуатації піддаються неодноразово повторюваним навантаженням, величина яких у ряді випадків може перевищувати експлуатаційні рівні та мати випадковий характер.

До таких впливів відносять пульсацію вітру, аварійні, сейсмічні, технологічні, температурно-вологісні навантаження. Чинні нормативні документи при розрахунку конструкцій не враховують особливостей роботи залізобетону в реальних умовах, схильних до випадкових навантажень. Тим часом, таке навантаження під дією зростання і накопичення залишкових деформацій, збільшення кількості тріщин, порушення зчеплення бетону та арматури може призводити до вичерпання несучої здатності, передчасного виходу з ладу. Тому важливим є проведення випробувань конструкцій за випадкових навантажень і розроблення методу визначення міцнісних і деформативних характеристик.

Ключові слова: навантаження, випадкові навантаження, залишкові деформації, тріщини, залізобетон.

1. Вступ

Однією з головних завдань будівництва є створення споруд, здатних забезпечити надійну та довговічну роботу під час експлуатації протягом усього терміну служби. Для цього необхідно вдосконалювати розрахунок конструкцій з урахуванням особливостей роботи залізобетону в реальних умовах.

Сучасна тенденція у побудові практичних методів розрахунку будівельних конструкцій полягає у бажанні надати, наскільки це можливо, загальну, цілісну та зрозумілу теорію розрахунку, яку на практиці можна застосувати до будь-якого випадку.

Крім того, здатність більшості залізобетонних конструкцій нести експлуатаційні навантаження в умовах прогресуючого руйнування, тріщиноутворення, а отже, зниження жорсткості та збільшення деформативності конструкцій, потребує ще більш ретельного дослідження та урахування реальних умов експлуатації конструкцій.

Відомо, що практично всі конструкції під час експлуатації піддаються невеликому, але повторному навантаженню, величина якого в деяких випадках може перевищувати експлуатаційні рівні та мати випадковий характер. До таких впливів відносяться пульсації вітру, аварійні, сейсмічні, технологічні, температурно-вологісні навантаження. Існуючі методи розрахунку конструкцій не враховують особливостей роботи залізобетону в реальних умовах, що піддаються випадковим навантаженням. Проте, таке навантаження, приводить до зростання і накопичення залишкових деформацій, збільшення кількості тріщин, порушенням зчеплення бетону та арматури, може призвести до вичерпання несучої здатності та передчасного виходу з ладу.

На основі досліджень надійності та міцності будівельних конструкцій покладено ймовірнісний підхід до вивчення зовнішніх впливів та властивостей використовуваних матеріалів. Тому важливим є проведення випробувань конструкцій при випадкових навантаженнях.

2. Огляд літературних джерел

Достатньо багато вітчизняних та закордонних вчених [1-9, 14-17] проводили дослідження щодо дії і впливу малоциклового навантаження на механічні і деформативні параметри залізобетонних конструкцій.

В наукових роботах [1, 6, 14-17] детально досліджено міцність, деформативність, тріщиностійкість бетону та залізобетону для згинальних і позацентрово навантажених зразків при малоцикловому навантаженні певного рівня. Запропонований критерій для призначення граничного числа циклу повторних навантажень [3, 4]. Таким критерієм є стабілізація деформації бетону, що залежить від механічних властивостей бетону, рівня навантаження. Встановлено [6], що при малоцикловому навантаженні основні процеси деформування відбувалися в перші 10 циклів, при яких спостерігається зміна міцнісних та деформативних характеристик бетону, що призводять до структурної зміни бетону. Це зумовлено нелінійними властивостями бетону, що виявляються на перших циклах навантаження, виникненням і накопиченням залишкових деформацій.

Руйнування зразків під дією повторних навантажень відбувалося при високих рівнях $\eta \geq 0,90$ навантаження, причиною падіння міцності бетону є інтенсивне тріщиноутворення. Таким чином, процеси, які проходять в бетоні і залізобетоні за дії вказаного виду навантаження зумовлені нелінійністю деформування, мікротріщиноутворенням, накопиченням залишкових деформацій, малоцикловою втомленистю, розуцільненням бетону та інш. [3, 7]. Слід зауважити, що навантаження для рівня напружень приймали в межах $0,3f_{cd} \leq \sigma \leq 0,9f_{cd}$, з послідовним збільшенням навантаження від циклу до циклу, або з заданим постійним рівнем [3, 6]. Були запропоновані методи розрахунку залізобетонних конструкцій в умовах малоциклових навантажень. Відсутність єдиного підходу до оцінки критерію міцності та деформативності бетону та залізобетону обмежує можливість запропонованих раніше способів розрахунку.

Однак, в реальних умовах в процесі експлуатації будівель і споруд повторні навантаження мають характер випадкових величин, тому не можуть бути представлені для розрахунку залізобетонних конструкцій детермінованими функціями [3, 4]. Тому існує необхідність вдосконалення існуючих методів розрахунків бетонних і залізобетонних конструкцій на зазначені навантаження з використанням методів дослідження випадкових величин і процесів, що і визначило актуальність поставленої задачі [3, 4].

Мета і методи роботи. Серед різних конструктивних елементів будівель і споруд, колони найчастіше піддаються технологічним та аварійним впливам, що й зумовило мету цього дослідження.

Визначення обсягу експериментальних досліджень проводили з урахуванням активного експерименту [3].

При складанні плану повного факторного експерименту задавалися варіативними величинами:

- кількість циклів - n ;
- рівнем навантаження - η ;
- величиною відносного ексцентриситету - e_0/h .

Дослідні зразки виготовляли з бетону класу C25/30 у вигляді стійок, перерізом 200×200 мм., довжиною 1200 мм. Всі зразки заармовані стержневою арматурою періодичного профілю класу A400C, діаметром 16 мм. Прийнята довжина стійок виключала вплив гнучкості на роботу елемента [3].

За характером впливу поздовжнього навантаження зразки поділяли на дві групи:

I група - статичне одноразове навантаження;

II група - повторне навантаження з повним розвантаженням.

За результатами випробувань зразків першої групи встановлювали рівні повторного навантаження. Така методика експерименту дозволила виявити вплив повторних навантажень на міцнісні та деформативні характеристики конструкцій [3].

Значення міцності при одноразовому навантаженні було прийнято за еталон, відносно якого оцінювали міцність при повторних навантаженнях [3].

Характер пошкодження бетону у позacentрово стиснутих зразках від напружень стиску в бетоні при дії повторного навантаження залежав від величини ексцентриситету, що задається, і практично не залежить від рівня навантаження і числа циклів.

3. Виклад основного матеріалу

Результати досліджень [4] показали, що повторне навантаження для досліджуваних зразків призвело до збільшення несучої здатності порівняно з одноразовим навантаженням на 18-30% залежно від величини ексцентриситету та рівня навантаження.

Повторне навантаження зі збільшенням числа циклів ($n \leq 30$) сприяє реалізації міцністних властивостей за рахунок ущільнення структури бетону. Тому для методики розрахунку міцності конструкцій необхідно дослідити міцність бетону при випадкових навантаженнях.

Для опису такого навантаження використовували методи випадкових величин і процесів. У цій роботі такий підхід реалізований на основі методу Монте-Карло [10].

Технологія застосування цього методу полягала у наступному: шляхом відтворення за допомогою ПЕОМ набору псевдовипадкових чисел моделювалася вибіркова реалізація випадкового навантаження за заданим законом розподілу, як функції числа циклів.

Після випробувань бетонних призм за заданою програмою, отримали реалізації параметрів напружено деформованого стану бетону.

Проводячи статистичну обробку отриманих реалізацій обчислювали ймовірнісні характеристики досліджуваних параметрів.

У запропонованій роботі верхній рівень зовнішнього впливу вважався рівномірно - розподіленим та моделювався за формулою (1):

$$\eta = a + b \cdot RND(x), \quad (1)$$

де a – нижня межа рівня впливу; b - інтервал варіювання; $RND(x)$ – випадкове число в інтервалі $[0,1]$.

Було прийнято: $a=0,4$; $b=0,5$, тобто верхній можливий рівень навантаження дорівнював 0,9.

На рисунку 1 наведено конкретна програма навантаження, на кожному циклі нижній рівень дорівнює 0.

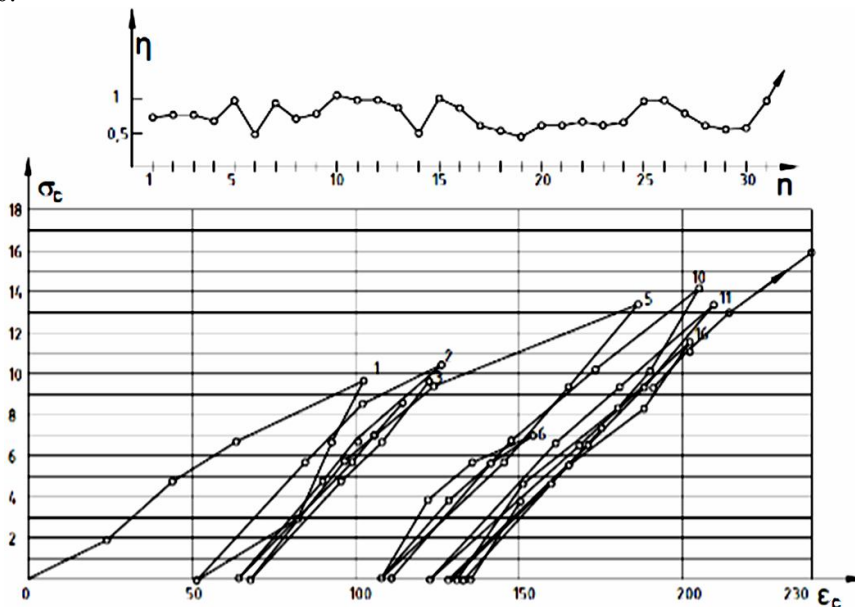


Рис. 1 Деформації бетону $\sigma_c - \epsilon_c$

Випробування були проведені на бетонних призмах з розмірами 100x100x400 мм, виконаних з важкого бетону класу C25/30 [13].

Приведені залежності $\sigma_c - \varepsilon_c$ (рис. 1) дозволили виконати аналіз історії навантаження на параметри напружено деформованого стану поточного циклу. Загальна кількість циклів прийнято $n = 30$.

Можна відзначити, якщо на даному циклі $\eta_n > \eta^{\max}$ для всіх попередніх циклів, тоді ширина петлі гістерезису значна, відбувається зростання залишкових деформацій.

Наступний після цього цикл із $\eta_{n+1} < \eta_n$ має незначну ширину петлі, що свідчить про віджимання пластичних деформацій і про пружну роботу матеріалу, тобто спостерігається адаптація бетону до режиму навантаження.

При $\eta_{n+1} > \eta_n$ відбувається зростання залишкових деформацій та нова петля збільшується.

Статистична обробка результатів випробувань дозволила отримати апроксимуючі рівняння для побудови залежностей $\sigma_c - \varepsilon_c$ на кожному циклі навантаження ($n = 30$):

$$\bar{\varepsilon}_{\text{ост}}^n = 49 + 58 \lg(n) \quad (r=0.93), \quad (2)$$

$$\sigma_{n\uparrow} = 0.4236 \cdot n^{1.9626 \cdot 10^{-2}} \cdot (\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_{\text{ост}}^n) \cdot 0.7989 \cdot e^{-2.017 \cdot 10^{-3} \bar{\varepsilon}} \quad (r=0.92), \quad (3)$$

$$\sigma_{n\downarrow} = 0.4768 \cdot n^{1.9626 \cdot 10^{-2}} \cdot (\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_{\text{ост}}^{n+1})^{0.6717} \cdot e^{5.683 \cdot 10^{-3} \bar{\varepsilon}}, \quad (\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_{\text{ост}}^{n+1}) \quad (r=0.85), \quad (4)$$

де $\bar{\varepsilon} = \varepsilon \cdot 10^5$; $[\sigma] = \text{МПа}$; $\sigma_{n\uparrow}$ – напруження на n -му півциклі навантаження; $\sigma_{n\downarrow}$ – теж саме, розвантаження.

Дослідження другої похідної від функції (3), (4) дозволили проаналізувати наявність точок перегину та відповідно опуклості цих функцій:

$$2c\beta \cdot 1/\varepsilon + c^2 + \beta(\beta - 1) \cdot 1/\varepsilon^2, \quad (5)$$

де $c = -2.017 \cdot 10^{-3}$, $\beta = 0.7987$ для $\sigma_{n\uparrow}$, $c = 5.5843 \cdot 10^{-3}$, $\beta = 0.6718$ для $\sigma_{n\downarrow}$.

Функція (3) до досягнення максимального значення при $\varepsilon_c = 39,5$ не має точок перегину і звернена опуклістю в бік осі σ_c . Функція (4) при значенні $\varepsilon_c = 29$ має точку перегину. Для $\varepsilon_c < 29$ - функція має опуклість у бік осі σ_c , для $\varepsilon_c > 29$ - опуклість у бік осі ε_c . Аналіз формул (3), (4) показав, що зі зростанням числа циклів величина модуля пружності зростає. Це надалі є однією з передумов збільшення несучої здатності позацентрово стиснутих елементів при циклічних навантаженнях.

Важливою характеристикою випадкового процесу є кореляційна функція, що характеризує тісноту зв'язків між ординатами процесу в залежності від відстані між точками:

$$K(\tau) = \langle S(t) \cdot S(t+\tau) \rangle, \quad (6)$$

де $K(\tau)$ – функція кореляції; $S(t)$ - випадкова функція; t – параметр; $\langle \rangle$ - операція імовірнісного усереднення.

Припустимо, що випадкова функція $S(t) = \varepsilon(n)$. Тоді кореляційна функція даного випадкового процесу, побудована для залишкових деформацій, має вигляд (7):

$$K(\tau) = 11.16 - 9.33 \cdot 10^{-3} \tau, \quad \tau \in [0, 1]. \quad (7)$$

Аналіз приведеної функції показав, що вона є лінійною і незначно згасає в залежності від відстані, що є різницею циклів, тобто значення залишкових деформацій на даному циклі істотно залежить від історії навантаження бетону.

Прийнявши $\bar{\varepsilon}_{\text{ост}}^n = 0$ та $\bar{\varepsilon}_{\text{ост}}^{n+1} = 0$, формули (3) та (4) дають можливість визначити дисипацію енергії на кожному циклі роботи бетону.

$$E_n = \int_{\sigma_{n\downarrow}}^{\varepsilon} \sigma_{n\uparrow} d\varepsilon - \int_{\sigma_{n\downarrow}}^{\varepsilon} \sigma_{n\downarrow} d\varepsilon. \quad (8)$$

Для підтвердження правильності обчислення енергії (8) на основі формул (3), (4) у роботі використано чисельне інтегрування залежності $\sigma_c - \varepsilon_c$ (рис. 1).

Для цього на кожному напівциклі (навантаження-розвантаження) залежність апроксимується за допомогою кубічних сплайнів:

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_k(\varepsilon) = \sum_{l=0}^3 \alpha_l^k \cdot (\varepsilon - \varepsilon_k)^l, \quad k=1,2,\dots,n, \quad (9)$$

$$\sigma(\varepsilon)_k = \sigma_k, \quad (10)$$

$$\sigma''(\varepsilon^H) = \sigma''(\varepsilon^K) = 0, \quad (11)$$

де ε^H та ε^K - початкове та кінцеве значення деформацій на відрізку, який розглядається.

Після визначення коефіцієнтів сплайнів, обчислення питомої енергії деформування бетону здійснювали за формулою:

$$\int_{\varepsilon_n}^{\varepsilon^k} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = \sum_{i=1}^N (h_i \sigma_i + 1/2 h_i^2 b_i + 1/3 h_i^3 c_i + 1/4 h_i^4 d_i), \quad (12)$$

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_i + b_i (\varepsilon - \varepsilon_i)^2 + c_i (\varepsilon - \varepsilon_i)^3 + d_i (\varepsilon - \varepsilon_i)^4, \quad (13)$$

$$h_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}, \quad (14)$$

$$b_i = (\sigma_{in} - \sigma_i) / h_i - h_i (\theta_{in} + \theta_i), \quad (15)$$

$$c_i = 3\theta_i, \quad (16)$$

$$\theta_i = m_i / 6, \quad (17)$$

$$d_i = (\theta_{in} + \theta_i) / h_i, \quad (18)$$

де m_i - коефіцієнти сплайнів.

Цей підхід реалізовано за допомогою ПЕОМ. Отримані значення дисипації енергії за випадкових навантажень (рис. 2).

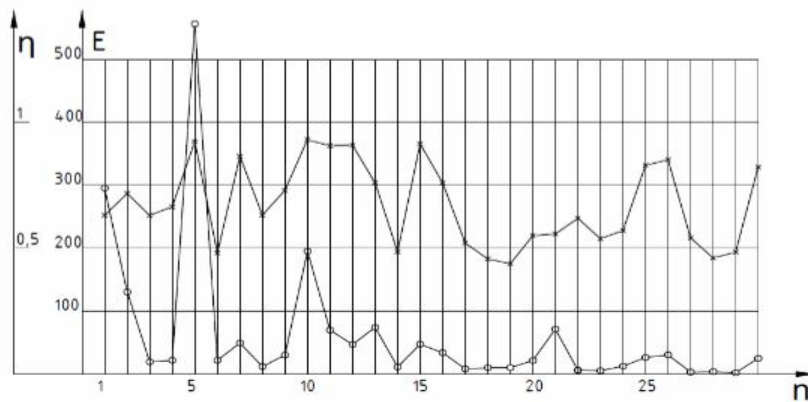


Рис. 2. Дисипація енергії

Введемо для максимальних рівнів навантаження позначення: η_1^{\max} , η_2^{\max} , η_k^{\max} .

Тоді можна зробити висновок, що сплеск дисипації енергії буде в тому випадку, якщо $\eta_1^{\max} > (\eta_{i-1}^{\max}, \dots, \eta_i^{\max})$. Звідси, на підставі передумови, що руйнування настає у тому випадку, коли повна енергія руйнування при одноразовому навантаженні до руйнування дорівнює критичному значенню сумарної дисипації енергії при випадкових навантаженнях, слід, що найбільш небезпечним для бетону є режим з рівнем навантаження, що збільшується. Зі збільшенням числа циклів навантаження дисипація енергії зменшується. Накопичення сумарної енергії дисипації стабілізується і можна говорити про те, що цей бетон при випадковому навантаженні є циклічно стабільним матеріалом.

Для підтвердження можливості використання результатів випробувань призм при дослідженні напружено-деформованого стану позацентрово стиснутих елементів у роботі визначено їх несучу здатність за формулою:

$$N = b \int \sigma_c dx + N'_s \pm N_s, \quad (19)$$

де N'_s - зусилля в арматурі найбільш стиснутої грані; N_s - зусилля в арматурі менш стиснутої грані; b – ширина перерізу.

Величина $b \int \sigma_c dx$ являє собою зусилля, що сприймає бетон.

Статистичний аналіз діаграм деформування, отриманий при експериментальному дослідженні бетону, показав, що деформації при одноразовому стиску задовільно апроксимуються поліном п'ятого ступеню:

$$\sigma_c = f_{cd} (6,9436 \cdot 10^{-12} \varepsilon^{*5} - 3,3059 \cdot 10^{-9} \varepsilon^{*4} + 556,10 \cdot 10^{-9} \varepsilon^{*3} - 60,021 \cdot 10^{-6} \varepsilon^{*2} + 9,3866 \cdot 10^{-3} \varepsilon^* + 8,5309 \cdot 10^{-3}), \quad (20)$$

де $\varepsilon^* = \varepsilon \cdot 10^5$, $[f_{cd}] = \text{МПа}$, $[\sigma_c] = \text{МПа}$.

За допомогою формули (20) визначали у кожній точці перерізу значення напружень. Статистична обробка результатів випробувань дала можливість побудувати залежність $\sigma = f(x)$ для різних ексцентриситетів прикладання зовнішнього впливу.

За результатами випробування призм на випадкове навантаження було встановлено, що збільшення призмової міцності при циклічних навантаженнях задовільно апроксимується залежністю:

$$f_{ck,prism} = f_{cd} \cdot n^{2,310^{-2}}, \quad (21)$$

де $f_{ck,prism} = f_n$ – призмova міцність бетону після навантаження n -циклами

Розрахунок позакентровано стиснутих елементів з малими ексцентриситетами при випадкових навантаженнях рекомендується виконувати згідно з (22) та (23):

$$N(n) \leq 0,715 \cdot n^{2,310^{-2}} \cdot f_{cd} b x + f_{yd} A_s - \sigma_s A_s, \quad (22)$$

$$N(n) \leq 0,715 \cdot n^{2,310^{-2}} \cdot f_{cd} b x (d - 0,39x) + f_{yd} A'_s (d - a'). \quad (23)$$

Визначення несучої здатності за цією методикою узгоджується зі значеннями несучої здатності, отриманих за допомогою регресійних рівнянь, складених на основі повного факторного експерименту. Розбіжність експериментальних даних несучої здатності позакентровано стиснутих елементів в порівнянні з теоретичними, які обраховані за (19) не перевищують 2%.

Даний підхід до дослідження бетону можна використовувати для визначення міцності та надійності будівельних конструкцій, що працюють при різних видах зовнішнього впливу, використовуючи апарат теорії випадкових величин та процесів.

4. Висновки

1. Розроблено методику дослідження напружено деформованого стану бетону при дії випадкових навантажень, яка реалізована за допомогою методу статистичних випробувань. Дана методика адекватно враховує реальний вплив на бетон та конструкції. Запропоновані формули визначення міцності бетону за випадковими навантаженнями можуть бути застосовані для бетонів різних класів за міцністю на стиск, а також для бетонів різних видів при відповідній модифікації.

2. Отримані апроксимуючі залежності для бетонів, схильних до випадкового навантаження. На основі аналізу другої похідної досліджено точки перегину функцій. Отримані результати підтверджені випробуваннями бетону випадковими впливами.

3. Аналіз кореляційної функції для залишкових деформацій при випробуванні бетонів на випадкове навантаження показує, що дана функція є лінійною, незначно зменшується в залежності від відстані, що є різницею циклів. Значення залишкових деформацій на даному циклі суттєво залежать від історії завантаження бетону.

4. На основі вивчення дисипації енергії бетону при випадкових навантаженнях зроблено висновок про його циклічну стабільність. Виявлено найбільш небезпечні з погляду структурних змін рівні завантаження бетону.

5. Статистична обробка результатів експериментальних досліджень випробувальних зразків дозволила отримати коефіцієнти регресійної моделі впливу кількості циклів, закону розподілу випадкового навантаження, класу бетону при визначенні несучої здатності при випадкових навантаженнях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Бабич Є.М., Крись Ю.О.* Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень: Монографія.- Рівне: Вид-во РДТУ, 1999.- 119 с.
2. *Бабич, В. Є.* Особливості роботи нерозрізних залізобетонних балок при повторних навантаженнях [Текст] / В. Є. Бабич // Будівельні конструкції : зб. наук. праць. – Київ : НДІБК, 2003. – Вип. 58. – С. 8-13.
3. *Чирва Т.Л., Черкаська Н.А., Чирва В.Н.* Методика визначення впливу випадкових навантажень на міцність залізобетонних стиснутих елементів. КТУ, Вісник 8, 2005. -с.37-49.
4. *Чирва Т.Л., Чирва В.Н., Черкаська Н.А.* Уточнення характеру та особливостей впливу випадкових навантажень на залізобетонні конструкції. «Сталій розвиток гірничо-металургійної промисловості – 2007- Кривий Ріг, 2007.- с.59-63.
5. *Барашиков А.Я., Колякова В.М.* Вплив історії навантаження на тривалу міцність бетону при довівісному стиску / А.Я., Барашиков, В.М. Колякова. // Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник "Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону. НДІБК – 2003. – Вип. 59. – С. 103-108.
6. *Колякова В.М.* Вплив історії навантаження на тривалу міцність бетону при довівісному стиску // Зб. наук.статей "Проблеми теорія і практика будівництва". ПДТУ – 1997. –С. 247-25.
7. Особливості напружено-деформованого стану і розрахунку залізобетонних конструкцій за дії циклічного навантаження високих рівнів: монографія /Карпюк В.М., Сьоміна Ю.А., Костюк А.І., Майстренко О.Ф. – Одеса: ОДАБА, 2018. - 233 с.
8. *Карпюк В. М., Албу К. І., Даниленко Д. С., Сьоміна Ю. А.* Вплив циклічного знакозмінного навантаження на міцність, трещиностійкість та деформативність залізобетонних елементів, що згинаються. - Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2014, № 6. с.56-68.
9. *Karpiuk V.M., Karpiuk V.M., Syomina, Yu.A.* Bearing capacity of common and damaged cfrp-strengthened r. C. beams subject to high-level low-cycle loading // Materials Science Forum Том 968 MSF, pp. 185 – 199.-2019 International Conference on Actual Problems of Engineering Mechanics, APEM 2019 Odessa. Код 231069 10.4028/www.scientific.net/MSF.968.185
10. *Карташов М. В.* Імовірність, процеси, статистика. — Київ : ВПЦ Київський університет, 2007. — 504 с.
11. *Aslani F.* Stress-strain model for concrete under cyclic loading / F. Aslani, R. Jowkarmeimandi // Magazine of Concrete Research. – Wollongong, Australia, 2012. – Vol. 64, Issue 8. – Pp. 673-685.
12. *Dorofeev V.* Their capacity steel cross-section eccentrically shrink or stretch beams / V. Dorofeev, V. Karpyuk, N. Petrov // Materials of 18 Conference «Theoretical Foundations of Civil Engineering », Polish – Ukrainian – Lithuanian Transactions– Warsaw, September, 2010. – P. 345-352.
13. *Chyrva T.L., Chyrva V.N.* The research of strength of eccentric compression reinforced concrete elements at random loading. Proceedings of the repair, 2007, 17th International Symposium, Brno, 2007 “Sanace-2007”.-p.379-384
14. *Kupfer, H., Hilsdorf, H. K., & Rusch, H.* (1969, August). Behavior of concrete under biaxial stresses. In Journal proceedings (Vol. 66, No. 8, pp. 656-666).
15. *Shamsoon Fareed.* (2018). Behavior of reinforced concrete slabs under accidental impacts [Data set]. ISEC PRESS. <https://doi.org/10.12755/ISEC.RES.2018.73>
16. *Nazar Oukaili, M. K.* (2019). Flexural ductility of structural concrete members subjected to limited cycles of repeated loading [Data set]. ISEC PRESS. <https://doi.org/10.12755/ISEC.RES.2019.81>
17. *Smorkalov D, Zhuravskiy O and Delyavskyy M.* Experimental and theoretical studies of single and double-layerslabs supported on four sides. In:AIP conf proc 2019,vol. 2077, paper no. 020052. College Park: AIP Publish-ing LLC
18. *Ahmed S. Eisa, Louay A. Aboul-Nour, Asmaa El-Ghamry, Martina Zeleňáková and Dušan Katunský* Flexural behavior of two-layer reinforced concrete slab with hollow cores Advances in Mechanical Engineering 2024, Vol. 16(2) 1–20 <https://doi.org/10.1177/16878132231224940>

REFERENCES

1. *Babych Ye.M., Krus Yu.O.* Betonni ta zalizobetonni elementy v umovakh malotsyklovykh navantazhen: Monohrafiia. (Concrete and reinforced concrete elements under short-cycle loads: Monograph). - Rivne: Vyd-vo RDTU, 1999.- 119 s.
2. *Babych, V. Ye.* Osoblyvosti roboty nerozriznykh zalizobetonnykh balok pry povtornykh navantazhenniakh [Tekst] (Features of the operation of continuous reinforced concrete beams under repeated loads [Text]) .- Budivelni konstruktsii : zb. nauk. prats. – Kyiv : NDIBK, 2003. –Vyp. 58. – S. 8-13.
3. *Chyrva T.L., Cherkaska N.A., Chyrva V.N.* Metodyka vyznachennia vplyvu vypadkovykh navantazhen na mitsnist zalizobetonnykh stysnutykh elementiv.(The method of determining the influence of random loads on the strength of reinforced concrete compressed elements).- KТУ, Visnyk 8, 2005 .-s.37-49.
4. *Chyrva T.L., Chyrva V.N., Cherkaska N.A.* Utochnennia kharakteru ta osoblyvostei vplyvu vypadkovykh navantazhen na zalizobetonni konstruktsii (Clarification of the nature and features of the impact of random loads on reinforced concrete structures).- «Stalyi rozvytok hirnycho-metallurhiinoi promyslovosti – 2007- Kryvyi Rih, 2007.- s.59-63.
5. *Barashkov A.Ia., Koliakova V.M.* Vplyv istorii navantazhennia na tryvalu mitsnist betonu pry dvovivisnomu stysku (Influence of load history on long-term strength of concrete under biaxial compression).- Budivelni konstruktsii.

- Mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk "Naukovo-tekhnichni problemy suchasnoho zalizobetonu. NDIBK – 2003. – Vyp. 59. – S. 103-108.
6. *Koliakova V.M.* Vplyv istorii navantazhennia na tryvalu mitsnist betonu pry dvovisnomu stysku (The influence of load history on the long-term strength of concrete under biaxial compression).- Zb. nauk.statei "Problemy teoriia i praktyka budivnytstva". PDTU – 1997. –S. 247-25.
 7. *Karpiuk V.M., Somina Yu.A., Kostiuk A.I., Maistrenko O.F.* Osoblyvosti napruzhenno-deformovanoho stanu i rozrakhunku zalizobetonnykh konstrukttsii za dii tsyklichnoho navantazhennia vysokyykh rivniv: monohrafiia (Features of the stress-strain state and calculation of reinforced concrete structures under the action of cyclic loading of high levels: monograph). – Odesa: ODABA, 2018. - 233 s.8.
 8. *Karpiuk, V. M. Albu K. I., Danylenko D. S., Somina Yu. A.* Vplyv tsyklichnoho znakovminnoho navantazhennia na mitsnist, treshchinostiikist ta deformatyvnist zalizobetonnykh elementiv, shcho zghynaiutsia (Effect of cyclic alternating load on the strength, crack resistance and deformability of reinforced concrete elements that bend). - Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka, 2014, № 6. s.56-68.
 9. *Karpiuk V.M., Karpiuk V.M., Syomina, Yu.A.* Bearing capacity of common and damaged cfrp-strengthened r. C. beams subject to high-level low-cycle loading // Materials Science Forum Том 968 MSF, pp. 185 – 199.-2019 International Conference on Actual Problems of Engineering Mechanics, APEM 2019 Odessa. Код 231069 10.4028/www.scientific.net/MSF.968.185
 10. *Kartashov M. V.* Imovirnist, protsesy, statystyka. (Probability, processes, statistics).- Kyiv : VPTs Kyivskiyi universytet, 2007. - 504 s.
 11. *Aslani F.* Stress-strain model for concrete under cyclic loading / F. Aslani, R. Jowkarmeidandi // Magazine of Concrete Research. – Wollongong, Australia, 2012. – Vol. 64, Issue 8. – Pp. 673-685.
 12. *Dorofeev V.* Their capacity steel cross-section eccentrically shrink or stretch beams / V. Dorofeev, V. Karpuk, N. Petrov // Materials of 18 Conference «Theoretical Foundations of Civil Engineering », Polish – Ukrainian – Lithuanian Transactions– Warsaw, September, 2010. – P. 345-352.
 13. *Chyryva T.L., Chyryva V.N.* The research of strength of eccentric compression reinforced concrete elements at random loading. Proceedings of the repair, 2007, 17th International Symposium, Brno, 2007 “Sanace-2007”-p.379-384
 14. *Kupfer, H., Hilsdorf, H. K., & Rusch, H.* (1969, August). Behavior of concrete under biaxial stresses. In Journal proceedings (Vol. 66, No. 8, pp. 656-666).
 15. *Shamsoon Fareed.* (2018). Behavior of reinforced concrete slabs under accidental impacts [Data set]. ISEC PRESS. <https://doi.org/10.12755/ISEC.RES.2018.73>
 16. *Nazar Oukaili, M. K.* (2019). Flexural ductility of structural concrete members subjected to limited cycles of repeated loading [Data set]. ISEC PRESS. <https://doi.org/10.12755/ISEC.RES.2019.81>
 17. *Smorkalov D, Zhuravskiy O and Delyavskyy M.* Experi-mental and theoretical studies of single and double-layerslabs supported on four sides. In:AIP conf proc 2019,vol. 2077, paper no. 020052. College Park: AIP Publish-ing LLC
 18. *Ahmed S. Eisa, Louay A. Aboul-Nour, Asmaa El-Ghamry, Martina Zeleňáková and Dušan Katunský* Flexural behavior of two-layer reinforced concrete slab with hollow cores Advances in Mechanical Engineering 2024, Vol. 16(2) 1–20 <https://doi.org/10.1177/16878132231224940>

Стаття надійшла 21.05.2024

Чирва Т.Л., Колякова В.М., Мартинов В.Л., Чирва В.М.

ВПЛИВ ВИПАДКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА МІЦНІСТЬ БЕТОННИХ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Відомо, що практично всі конструкції під час експлуатації піддаються невеликому, але повторному навантаженню, величина якого в деяких випадках може перевищувати експлуатаційні рівні та мати випадковий характер. До таких впливів відносяться пульсації вітру, аварійні, сейсмічні, технологічні, температурно-вологісні навантаження. Існуючі методи розрахунку конструкцій не враховують особливостей роботи залізобетону в реальних умовах, що піддаються випадковим навантаженням. Проте, таке навантаження, приводить до зростання і накопичення залишкових деформацій, збільшення кількості тріщин, порушенням зчеплення бетону та арматури, може призвести до вичерпання несучої здатності та передчасного виходу з ладу.

Серед різних конструктивних елементів будівель і споруд, колони найчастіше піддаються технологічним та аварійним впливам, що й зумовило мету цього дослідження.

Визначення обсягу експериментальних досліджень проводилося з урахуванням активного експерименту. При складанні плану повного факторного експерименту задавалися варіативними величинами: кількість циклів n ; рівнем навантаження η ; величиною відносного ексцентриситету e_0/h . Результати досліджень показали, що повторне навантаження для досліджуваних зразків призвело до збільшення несучої здатності порівняно з одноразовим навантаженням на 18-30% залежно від величини ексцентриситету та рівня навантаження. Для опису такого навантаження використовували методи випадкових величин і процесів. У цій роботі такий підхід реалізований на основі методу Монте-Карло. Технологія застосування цього методу полягає у наступному: шляхом відтворення набору псевдовипадкових чисел моделюється вибірка реалізація випадкового навантаження за заданим законом розподілу як функції числа циклів. Після випробувань бетонних призм за заданою програмою отримали реалізацію параметрів напружено деформованого стану бетону.

Проводячи статистичну обробку отриманих реалізацій обчислювали ймовірнісні характеристики досліджуваних параметрів. Статистична обробка результатів випробувань дозволила отримати апроксимуючі рівняння для побудови залежностей $\sigma_c - \varepsilon_c$ на кожному циклі навантаження. Для підтвердження можливості використання результатів випробувань призм при дослідженні напружено-деформованого стану позацентрово стиснутих елементів, у роботі визначено їх несучу здатність.

Визначення несучої здатності за цією методикою було узгоджене зі значеннями несучої здатності, отриманих за допомогою регресійних рівнянь, складених на основі повного факторного експерименту.

Даний підхід до дослідження бетону можна використовувати для визначення міцності та надійності будівельних конструкцій, що працюють при різних видах зовнішнього впливу (навантаження), використовуючи апарат теорії випадкових величин та процесів.

Ключові слова: навантаження, випадкові навантаження, залишкові деформації, тріщини, залізобетон.

Chyrva T.L., Koliakova V.M., Martinov V.L., Chyrva V.M.

INFLUENCE OF RANDOM LOADS ON THE STRENGTH OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

It is known that practically all structures during operation are subjected to small but repetitive loads, the magnitude of which in some cases may exceed operational levels and have a random nature. Such influences include wind pulsations, accidents, seismic, technological, temperature-humidity loads. Existing methods for calculating structures do not take into account the peculiarities of concrete behavior under real conditions subject to random loading. However, such loading leads to an increase in residual deformations, an increase in the number of cracks, disruption of the bond between concrete and reinforcement, and can lead to the exhaustion of bearing capacity and premature failure.

Among various structural elements of buildings and structures, columns are most often subjected to technological and emergency influences, which determined the purpose of this research.

The determination of the scope of experimental research was carried out taking into account active experimentation. When developing the plan of a full factorial experiment, the following variable quantities were set: number of cycles n ; load level η ; relative eccentricity value e_0/h . The research results showed that repeated loading for the investigated specimens led to an increase in bearing capacity compared to a one-time load by 18-30% depending on the magnitude of the eccentricity and the load level. To describe such loading, methods of random variables and processes were used. In this work, this approach is implemented based on the Monte Carlo method. The technology of applying this method is as follows: by reproducing a set of pseudo-random numbers, a selective realization of random loading is modeled according to a given distribution law as a function of the number of cycles. After testing concrete prisms according to a specified program, the realization of the parameters of the stress-strain state of concrete was obtained.

By conducting statistical processing of the obtained realizations, probabilistic characteristics of the investigated parameters were calculated. Statistical processing of test results allowed obtaining approximating equations for building dependencies $\sigma_c - \varepsilon_c$ on each load cycle. To confirm the possibility of using the test results of prisms in studying the stress-strain state of off-center compressed elements, their bearing capacity was determined in the work.

Determining the bearing capacity by this methodology was agreed with the values of the bearing capacity obtained using regression equations based on a full factorial experiment.

This approach to the study of concrete can be used to determine the strength and reliability of building structures operating under various types of external influences (loads) using the apparatus of the theory of random variables and processes.

Keywords: loads, random loads, residual deformations, cracks, reinforced concrete.

УДК 624.04

Чирва Т.Л., Колякова В.М., Мартинов В.Л., Чирва В.М. **Вплив випадкових навантажень на міцність бетонних і залізобетонних конструкцій** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА. 2024. – Вип. 113. – С. 139-148. – Укр.

Наведено експериментальні та теоретичні дослідження напружено деформованого стану бетонних та залізобетонних елементів за випадковими навантаженнями на основі методу статистичних випробувань. Отримані аналітичні залежності для деформацій та міцності бетону як функції від числа циклів навантаження. Результати даного дослідження покладено за основу запропонованих методів визначення міцності позацентрово стиснених елементів за випадкових навантажень. Достовірність методів підтверджена експериментальними дослідженнями. Представлені методи підходу дослідження бетону можуть бути використані при визначенні міцності та надійності конструкцій за випадковими навантаженнями.

Лл. 2. Бібліогр. 18 назв.

UDC 624.04

Chyrva T.L., Koliakova V.M., Martinov V.L., Chyrva V.M. **The influence of random loading on the strength of concrete and reinforced concrete structures** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – К.: KNUBA. 2023. – Issue 113. – P. 139-148.

The article describes experimental and theoretical researches of the stressed-deformed state of concrete and reinforced concrete elements under random loadings on the basis of statistical test method. Analytical dependences for deformations and strength of concrete as a function of loading cycle value have been obtained. The results of the concrete investigation have been taken as a principle of suggested determination methods of eccentrically compressed element strength at random loadings. Trustworthiness of methods has been confirmed by experimental researches. The presented methods of approach to the of concrete research can be used at investigation of construction strength and reliability.

Fig. 2. Ref. 18.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри архітектурних конструкцій КНУБА, Чирва Тетяна Леонідівна

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Мобільний тел.: +38(067) 701-11-69

E-mail: chyrva.tl@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6657-5443>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій КНУБА, Колякова Віра Маркусівна

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Мобільний тел.: +38(067) 509-06-05

E-mail: koliakova.vm@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6879-8520>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій КНУБА, Мартинов Вячеслав Леонідович

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Мобільний тел.: +38(063) 995-09-20

E-mail: arx.martynov@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0822-1970>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, директор ТОВ «Придніпров'я», Чирва Володимир Миколайович

Адреса робоча: 50096 Україна, м. Кривий Ріг, вул. Грибосдова, 26, ТОВ «Придніпров'я»

Мобільний тел.: +38(067) 569-13-86

E-mail: vlad.chyrva@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9163-0144>