

ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ НОРМАЛЬНИХ ПЕРЕРІЗІВ НЕРОЗРІЗНИХ ЗГИНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЩО ЗАЗНАЮТЬ ДІЇ СТАТИЧНИХ ПОВТОРНИХ І ЗНАКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ

DETERMINATION OF NORMAL SECTIONS STRENGTH OF CONTINUOUS BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS SUBJECTED TO STATIC REPEATED AND ALTERNATING LOADS

Масюк Г.Х., к.т.н., проф., ORCID ID: 0000-0001-5207-3111, **Сірочук В.І.**, аспірант, ORCID ID: 0000-0007-8590-949X (Національний університет водного господарства та природокористування), **Ющук О.В.**, к.т.н., викладач, ORCID ID: 0000-0001-6266-3445, **Чорна І.В.**, к.т.н., викладач, ORCID ID: 0000-0002-7106-6766 (Відокремлений структурний підрозділ «Рівненський фаховий коледж» Національного університету біоресурсів та природокористування України)

Masyuk G.H., PhD in Engineering, Professor, ORCID ID: 0000-0001-5207-3111, **Sirochuk V.I.**, Postgraduate student, ORCID ID: 0000-0007-8590-949X (National University of Water and Environmental Engineering), **Yushchuk O.V.**, PhD in Engineering, Lecturer, ORCID ID: 0000-0001-6266-3445, **Chorna I.V.**, PhD in Engineering, Lecturer, ORCID ID: 0000-0002-7106-6766 (Separate structural subdivision "Rivne Professional College" of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine)

В статті наведена удосконалена методика визначення напружено-деформованого стану і міцності нормальних перерізів нерозрізних залізобетонних балок та їхньої несучої здатності за діючими нормативними документами з урахуванням зміни механічних характеристик бетону за дії повторних і знакозмінних навантажень. Теоретичні рішення задовільно збігаються з експериментальними даними.

The article presents an improved methodology for determining the stress-strain state and strength of normal sections of continuous reinforced concrete beams and their bearing capacity according to current regulations, taking into account changes in the concrete mechanical characteristics under the action of repeated and alternating loads. The theoretical solutions are in satisfactory agreement with the experimental data.

On the basis of experimental and theoretical studies, the authors have proposed an improvement of the strength determining methodology of normal sections of bending reinforced concrete elements, including statically

undefined, subjected to repeated and alternating loads. The methodology for normal sections strength determining of bending elements, set out in the current regulatory documents, does not take into account the peculiarities of changes in the stress-strain state and strength of sections under the above loads. And these changes are significant, especially at high levels, as shown by experimental results when testing prototypes of static and continuous beams. These changes occur due to changes in the physical and mechanical properties of concrete, deformation and its elastic modulus. Using mathematical operations, the equations for determining the forces in the normal section of bending reinforced concrete elements are established.

Ключові слова: нормальні перерізи, напружено-деформований стан, згинальні елементи, повторні знакозмінні навантаження.
normal sections, stress-strain state, bending elements, repeated alternating loads.

Вступ. На практиці проектування згинальних залізобетонних конструкцій важливо знайти напружено-деформований стан на різних стадіях роботи і достовірність розрахункової оцінки при експлуатації. Використання в розрахунках реальних діаграм деформування перерізів згинальних елементів дозволяє враховувати фізичну не лінійність бетону і арматури.

Повторні і знакозмінні навантаження, які в більшості випадків діють на конструкції, до яких відносяться і сейсмічні, в певній мірі впливають на зміну механічних характеристик бетону. Такі навантаження залежно від їх рівня і кількості циклів повторювань можуть спричинити збільшення або зменшення міцності бетону, змінювати характер діаграми деформування, його початковий модуль пружно пластичності, максимальні деформації перед руйнуванням [1, 2].

Нерозрізні згинальні елементи перекриттів багатоповерхових промислових і громадських будівель в процесі експлуатації зазнають дії повторних і знакозмінних навантажень. Слід зазначити, що існуюча методика розрахунку згинальних елементів, в тому числі і нерозрізних балок, не враховує дії вище зазначених навантажень і їх впливу на міцність нормальних перерізів. Крім того, характерна різноманітність конструктивних рішень, видів бетону і арматури, умов виготовлення конструкцій, експлуатації будівель і інше. При цьому достовірність розрахункової оцінки конструкцій дозволяє виявити резерви їх несучої здатності.

Аналіз останніх досліджень. Аналізуючи дослідження останніх десятиліть слід зазначити, що з'явився новий підхід до побудови розрахунку згинальних залізобетонних елементів, які характеризуються складними напружено-деформованими станами і умовами навантаження, на основі методів деформаційних моделей з використанням повних діаграм деформування бетону. Це роботи Є.М. Бабича [1, 2, 3], А.М. Бамбури [4], А.Я. Барашикова [5], В.С. Дорофеева [6] і багато інших. У вище вказаних працях досліджувались різні параметри роботи згинальних елементів, а саме

міцність нормальних і похилих перерізів, тріщиностійкість і деформативність, прогини і ширина розкриття тріщин. Що стосується досліджень міцності нормальних перерізів згинальних елементів, що зазнають дії повторних і знакозмінних навантажень, то їх кількість значно обмежена.

Мета і задачі досліджень. На основі теоретичних досліджень, з урахуванням проведених експериментів, удосконалити методику розрахунку міцності нормальних перерізів згинальних елементів за дії статичних повторних і знакозмінних навантажень.

Виклад основного тексту. В лабораторії кафедри ПЦБІС було проведено ряд експериментальних досліджень напружено-деформованого стану і роботи згинальних залізобетонних елементів статично визначених і нерозрізних балок з визначенням міцності нормальних перерізів за дії повторних і знакозмінних навантажень [7, 8, 9].

Для встановлення міцності нормальних перерізів згинальних залізобетонних елементів симетричного профілю використовували нелінійну залежність $\sigma - \varepsilon$. При цьому деформації стиснутої і розтягнутої арматури апроксимувались квадратними параболою:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{sp} &= a_{1p}\varepsilon + a_{2p}\varepsilon^2 & \text{при } \varepsilon \geq 0 \\ \sigma_{sp} &= a_{1c}\varepsilon + a_{2c}\varepsilon^2 & \text{при } \varepsilon \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де коефіцієнти a_{1p} , a_{2p} , a_{1c} , a_{2c} визначаються із умови мінімуму функціоналів середньоквадратичного відхилення теоретичних діаграм деформування матеріалу в порівнянні з експериментальними.

На основі залежності (1) отримали формулу для визначення нормальної сили, яка викликає в поперечному перерізі згинального елемента від арматури при однозначному одноразовому і повторному навантаженні (рис. 1). При дії знакозмінних навантажень дана сила в поперечному перерізі буде виникати поперемінно в нижній і верхній зонах.

$$N_s = \sum_j [a_{j1} (\varepsilon_R - c_j \mathfrak{N}) + a_{j2} (\varepsilon_R - c_j \mathfrak{N})^2] A_{sj} \quad (2)$$

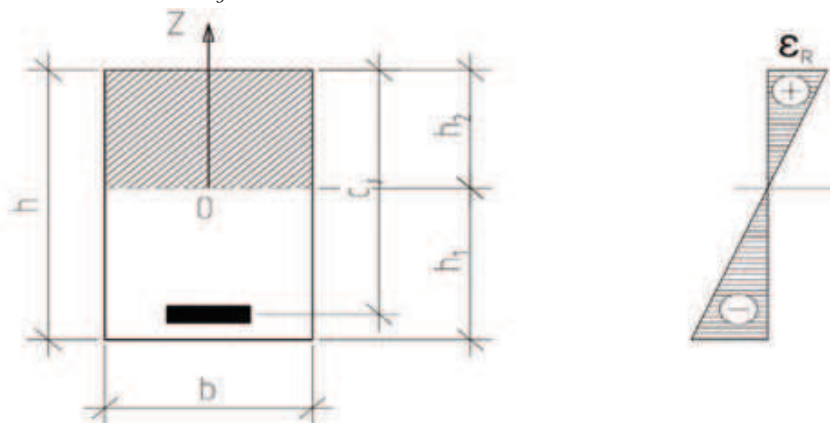


Рис. 1. Поперечний переріз прямокутного залізобетонного елемента; деформації в перерізі.

Згинальний момент в перерізі елемента від арматури відносно нейтральної осі.

$$M_S = -\frac{1}{\aleph} \sum_j [a_{j1}(\varepsilon_R - c_j \aleph)^2 + a_{j2}(\varepsilon_R - c_j \aleph)^3] A_{sj}, \quad (3)$$

де ε_R - відносна деформація стиску крайніх волокон бетону; \aleph - кривизна згинального елемента; c_j - відстань від j -го стержня арматури до крайніх волокон бетону; j - індекс, який враховує наявність арматури з різними фізичними властивостями; A_{sj} - площа j -го стержня арматури.

За дії повторних і знакозмінних навантажень згинальний момент і повздовжня сила визначені за рівняннями (3) і (2) необхідно помножити на відповідні коефіцієнти умов роботи бетону γ , наведених в [7].

Використовуючи нелінійну залежність (1) при деформації стиснутої зони бетону згинального елемента ($a_1=0$), отримаємо нормальну силу для симетричного прямокутного перерізу

$$N_b = b \cdot h \cdot a_N (2\varepsilon_R - h \cdot \aleph) \quad (4)$$

При визначенні згинального моменту в стиснутій зоні бетону використовувати кубічну параболу $a_M \varepsilon^3$

$$M_b = \frac{b \cdot h \cdot a_m}{\aleph} (3\varepsilon_R^2 - 3h\varepsilon_R \aleph + h^2 \aleph^2), \quad (5)$$

де a_N, a_M - коефіцієнти апроксимації, які залежать від виду і класу бетону.

Отже, отримані формули застосовуються для залізобетонних елементів симетричного профілю. При цьому умови міцності за нормальними перерізами:

$$\left. \begin{aligned} M &\leq M_b + M_s \\ \pm N &\leq N_b + N_s \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

При визначенні параметрів N_b і M_b за дії повторних і знакозмінних навантажень також необхідно помножити на відповідні коефіцієнти умов роботи бетону γ , наведених в [7].

Функції, які зв'язують деформації ε_K і кривизни \aleph , отримали із другого рівняння системи при розв'язанні квадратного рівняння. При цьому кривизна згинального елемента, що розглядається може бут додатною або від'ємною.

Якщо проаналізувати результати експериментів, наведених в [6], то роботу від моменту завантаження до руйнування згинального елемента можна охарактеризувати за допомогою діаграми, показаної на рис. 2. Дана діаграма апроксимується чотирма кривими або ломаними лініями. Використання нелінійної залежності $\sigma - \varepsilon$ для бетону і арматури, дає можливість оцінити міцність і деформативність перерізів згинальних залізобетонних елементів на всіх стадіях роботи. На висхідній ділянці

діаграми нелінійні деформації характеризуються накопиченням пошкоджень структури бетону, збільшенням тріщин в згинальному елементі і пружнопластичною роботою повздовжньої арматури. По мірі включення в роботу розтягнутої повздовжньої арматури нерівномірність деформацій в стиснутій зоні бетону і відбувається перерозподіл зусиль в перерізі. В стадії зменшення міцності перерізі згинального елемента на нисхідній ділянці спостерігається зменшення напружень при інтенсивному розвантаженні розтягнутої повздовжньої арматури. При цьому зменшення згинального моменту супроводжується зміною плеча внутрішньої пари сил і розвантаженням повздовжньої арматури в перерізі. Діаграму роботи перерізу залізобетонних елементів покажемо чотирма неперервними стадіями роботи.

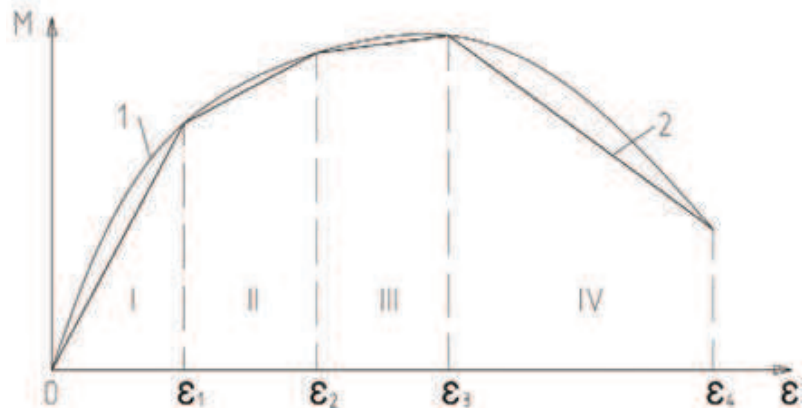


Рис. 2. Діаграма роботи перерізу згинального залізобетонного елемента
1 – апроксимація кривими лініями; 2 – теж, ломаними лініями; I – пружна робота перерізу; II- пружнопластична робота бетону і арматури; III – пластична робота перерізу; IV – стадія зменшення міцності перерізу.

Пружна робота згинального елемента характеризується стадією I. В стадії II утворюються тріщини в бетоні і конструкція працює в пружнопластичній стадії. В стадії III спостерігається пластична робота конструкції з розвитом площиною текучості арматури між тріщинами в залізобетоннім елементі. При частковому руйнуванні стиснутої зони бетону зменшується плече внутрішньої пари сил і відбувається розвантаження арматури (стадія IV). В подальшому бетон руйнується і залишковий момент сприймається силами внутрішнього тертя і повздовжньою арматурою.

Висновки. Запропонована методика дозволяє з потрібною точністю розраховувати міцність нормальних перерізів згинальних залізобетонних конструкцій. Отримані формули можна застосовувати для елементів симетричних перерізів (прямокутних, двотаврових, П-подібних, круглих).

Методику розрахунку можна використовувати при підсиленні і реконструкції будівель і споруд, коли потрібно установити несучу здатність згинальних елементів в стадії експлуатації.

Значний економічний ефект досягається при врахуванні роботи найбільш деформованого перерізу при зменшенні несучої здатності.

1. Бабич Є.М., Масюк Г.Х. Особливості опору бетону в залізобетонних елементах малоцикловим однозначним і знакозмінним навантаженням. Міжвідомчий наук.-техн. зб. Будівництво в сейсмічних районах України. Київ, НДІБК, 2004, вип. 60. С. 665-668.

Babich E.M., Masyuk G.H. Features of concrete resistance in reinforced concrete elements to low-cycle single-valued and alternating loads. Interdepartmental scientific and technical collection. Construction in seismic areas of Ukraine. Kyiv, Research Institute of Civil Engineering, 2004, issue 60. 665-668 p.

2. Бабич Є.М., Бабич В.Є. Удосконалення розрахунку нерозрізних залізобетонних балок з використанням деформаційної моделі нормальних перерізів. Таврійський наук. вісник. Херсон, 1999. С. 18-24.

Babych E.M., Babych V.E. Improvement of calculation of continuous reinforced concrete beams using the deformation model of normal sections. Tavriyskyi nauk. vestnik. Kherson, 1999. 18-24 p.

3. Бабич Є.М. Ільчук Н.І. Міцність і деформативність важкого бетону при малоцикловому стисненні. Зб. наук. пр. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне, УДУВГП, 2003, вип. 9. С. 166-173.

Babych E.M., Ilchuk N.I. Strength and deformability of heavy concrete under low-cycle compression. Collection of scientific papers Resource-efficient materials, structures, buildings and structures. Rivne, USUIAA, 2003, issue 9. 166-173 p.

4. Бамбура А.М., Подобенко Т.М. Експериментальні дослідження впливу на діаграму « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » бетону на багаторазового повторних навантажень високого рівня. Зб. наук. пр. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне, 2005, вип. 12. С.100-108.

Bambura A.M., Podobenko T.M. Experimental studies of the effect on the diagram of concrete on repeated high-level loading. Collection of scientific papers Resource-efficient materials, structures, buildings and constructions. Rivne, 2005, issue 12. 100-108 p.

5. Барашиков А.Я., Колякова В.М. Експериментально-теоретичні дослідження бетону при тривалих навантаженнях. Вісник нац. унів. «Львівська політехніка», 2007. №600. С.3-9.

Barashikov A.Y., Kolyakova V.M. Experimental and theoretical studies of concrete under long-term loads. Bulletin of the National Univ. "Lviv Polytechnic, 2007. №600. 3-9 p.

6. Дорофеев В.С., Карпюк В.М., Крантовская Е.Н. Прочность, трещиностойкость и деформативность неразрезных железобетонных балок: монография. Одесса. ОДАБА, 2010. С.175.

Dorofeev V.S., Karpiuk V.M., Krantovska E.N. Strength, crack resistance and deformability of continuous reinforced concrete beams: monograph. Odesa. ODESA STATE UNIVERSITY OF CIVIL ENGINEERING, 2010. 175 p.

7. Ющук О.В. Несуча здатність, тріщиностійкість і деформативність нерозрізних балок за дії мало циклових повторних і знакозмінних навантажень: дис. к.т.наук: 05-23-01. Рівне. НУВГП. 2021. С.160.

Yushchuk O.V. Bearing capacity, crack resistance and deformability of continuous beams under low-cycle repeated and alternating loads: Candidate of Technical Sciences (PhD): 05-23-01. Rivne. NUVGP. 2021. 160p.

8. Григорчук А.Б. Вплив знакозмінних навантажень на міцність нормальних перерізів залізобетонних елементів, що згинаються: дис. канд. техн. наук: 05-23-01: Рівне, 2001. С.164.

Grigorchuk A.B. Influence of alternating loads on the strength of normal sections of reinforced concrete bending elements: PhD thesis: 05-23-01: Rivne, 2001. 164 p.

9. Караван В.В. Деформативність і тріщиностійкість згинальних елементів при дії знакозмінних навантажень: дис. канд. техн. наук: 05-23-01. Рівне, 2004. С. 149.

Karavan V.V. Deformability and crack resistance of bending elements under alternating loads: Candidate of Technical Sciences (PhD): 05-23-01. Rivne, 2004. 149 p.