

ОСОБЛИВОСТІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИОПОРНИХ ДІЛЯНОК НЕРОЗРІЗНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА ДІЇ МАЛОЦИКЛОВИХ ЗНАКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ

FEATURES OF THE STRESSED AND DEFORMED STATE OF SUPPORT SECTIONS OF NON-DIVIDED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER THE ACTION OF SMALL CYCLE VARIABLE 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 (ВСП «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)

За результатами експериментальних досліджень авторів і інших дослідників в статті наведена оцінка напружено-деформованого стану похилих перерізів приопорних ділянок одно пролітних і нерозрізних залізобетонних елементів за дії малоциклових знакозмінних навантажень і його зміни в залежності від плеча «зрізу» прикладання зовнішніх сил.

Based on the results of experimental studies by the authors and other researchers, the article presents an assessment of the stress-strain state of inclined sections of three-supported sections of single-span and continuous beams under the action of low-cycle alternating loads and its change depending on the 'cut' arm of the external forces.

Inclined sections at the supporting sections near the middle supports of continuous reinforced concrete elements have the highest stress-strain state, especially at the first intermediate support. This section is subject to the maximum bending moment and maximum transverse force arising from the external load. If the load is cyclic alternating, the stress-strain state in this section becomes more complicated, even at operating levels of $\eta=(0.5...0.6)N_u$. Since there is no characteristic of such a stress-strain state in statically

indeterminate bending elements under the action of the above loads in the current regulatory documents, the study of its features is promising. In this article, based on the analysis of those few publications by the author and other authors, the tasks of further experimental and theoretical study of the features of the stress-strain state of inclined sections at the support areas above the average supports of continuous bending elements under the action of few cyclic alternating loads are set.

Ключові слова: залізобетон, приопорні ділянки, похилі перерізи, нерозрізні елементи, малоциклові знакозмінні навантаження.
reinforced concrete, bearing areas, inclined cross-sections, inseparable elements, low-cycle alternating loads

Вступ. Проблема опору залізобетонних елементів при сумісній дії згинальних моментів і поперечних сил є однією із найбільш важливих і не до кінця вирішених проблем як в теорії залізобетону, так і в реальному проектуванні сучасних ефективних залізобетонних конструкцій. І якщо розрахунку міцності нормальних перерізів згинальних залізобетонних елементів в вітчизняній і зарубіжній літературі приділено достатньо багато уваги і публікацій, то розрахунку міцності похилих перерізів звичайних і, особливо, приопорних ділянок нерозрізних залізобетонних конструкцій присвячено досить мало публікацій і він залишається на сьогоднішній день далеким від досконалості.

Раніше для оцінки несучої здатності похилих перерізів використовувався найбільш відомий метод граничної рівноваги зусиль, які в них виникають. Але однією із причин незадовільної збіжності розрахункових по цьому методу і дослідних значень руйнуючої поперечної сили закладається в тому, що в розрахунковій моделі, діючих на той час Нормax, не враховувались такі внутрішні зусилля, як сили зчеплення бетону в критичній похилій тріщині, найбільші зусилля в повздовжній арматурі і цілий ряд інших факторів, в тому числі і зміну знака згинального моменту по довжині елемента.

В чинних нормах [1] розрахунок похилих перерізів рекомендується здійснювати на основі моделі стержневої системи («Фермової аналогії») європейських норм [2], хоча вплив цілого ряду факторів на несучу здатність остаточно не визначений. Немає механізму, який дозволяє визначати наповнення епюр нормальних і дотичних епюр у стиснутій зоні над небезпечною похилою тріщиною, відсутні аналітичні залежності для визначення її проекції на повздовжню вісь елемента як функції багатьох змінних. Відсутнє єдине розуміння фізичної природи «кабельного ефекту» в арматурі, що перетинає похилу тріщину, а також ряд інших визначальних факторів. Вказане обумовлює необхідність удосконалення визначення напружено-деформованого стану і розрахунку несучої здатності похилих

перерізів припорних ділянок, що потребує проведення додаткових експериментальних і теоретичних досліджень.

Аналіз останніх досліджень. Методи розрахунку згинальних елементів за похилими перерізами та критерії оцінки їх напружено-деформованого стану та міцності за час експериментальних і теоретичних досліджень у своєму розвитку зазнали значних змін. У класичному методі розрахунок проводиться за головними напруженнями розтягу на основі залежностей опору матеріалів «Фермова аналогія» передбачає повне сприйняття арматурою зусиль розтягу, а бетоном стиску. Згинальний залізобетонний елемент представлено у вигляді ферми з паралельними між собою стиснутими та розтягнутими поясами та кістяками. Цей метод в повній мірі не враховує специфіку поведінки згинальних залізобетонних елементів у зоні руйнування, що призводить до розходження між дослідною і теоретичною міцністю. При наявності поперечної арматури величина руйнівного навантаження перевищує теоретичне значення, а за її відсутності не забезпечується надійна робота конструкції. Удосконалення цього розрахунку за методом фермової аналогії відбувається шляхом введення різних емпіричних коефіцієнтів і створення нових аналогій (аркової, розпірної системи) [3, 4].

Однак, аналіз сучасних розробок в області розрахунку за похилими перерізами свідчить, що вони не досягли рівня вдосконаленості, які можна було б запропонувати до нормативних документів. Розрахункові моделі в більшості випадків мають емпіричний характер, зумовлений складністю оцінки напружено-деформованого стану залізобетонного елемента в зоні поперечного згину. Останнім часом виділено цілий ряд додаткових факторів, які впливають на несучу здатність похилих перерізів за похилими перерізами. Це роботи Y. Vanga [5], F. Gavanisa [6], Mohammeda A.O.I [7], W.W. Kuo [8], Дорофеева В.С. [9], Митрофанова В.П. [10, 11], Довженко О.О. [12]. У вказаних роботах враховано такі фактори: нагельний ефект у повздовжній арматурі; зчеплення бетону у берегах похилої тріщини; клиноподібність стиснутої зони над небезпечною похилою тріщиною; кут нахилу тріщини в місці прикладання зосередженої сили та висоту стиснутої зони бетону в кінці розрахункового перерізу, які залежать від величини проекції похилої тріщини S_0 . Виходячи із аналізу вище вказаного поставлені задачі досліджень.

Постановка мети та задачі досліджень: на основі аналізу експериментальних і теоретичних досліджень автора і інших авторів встановити особливості напружено-деформованого стану похилих перерізів припорних ділянок нерозрізних згинальних залізобетонних елементів при різних плечах зрізу за дії малоциклових знакозмінних навантажень зосередженими силами.

Методика і результати досліджень. В лабораторії кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд було проведено ряд експериментальних досліджень напружено-деформованого стану бетону і

арматури згинальних залізобетонних елементів в зоні «зрізу» похилих перерізів за дії малоциклових знакозмінних навантажень.

Результати експериментальних досліджень у вигляді основних параметрів, які характеризують напружено-деформований стан зони сумісної дії згинальних моментів і поперечних сил в однопролітних згинальних елементів, що завантажувались малоцикловими знакозмінними навантаженнями з різними плечами «зрізу», а також методика випробувань наведені в роботі [13]. На основі аналізу проведених досліджень було встановлено, що при циклічних однозначних навантаженнях в залізобетонних згинальних елементах з малим прольотом «зрізу» ($C_0 \leq 2d$) руйнування відбувається або по похилій стиснутій полосі шляхом розколвання бетону або по розтягнутій зоні в результаті розриву повздовжньої арматури в місці перетину з похилою тріщиною, або в результаті порушення анкерування арматури за похилою тріщиною. Напруження в поперечній арматурі в місці перетину її з похилою тріщиною перед руйнуванням елемента досягали, як правило, межі текучості. При збільшенні прольотів «зрізу» до $a/h = 3(a = 45\text{см})$ і $a/h = 4(a = 60\text{см})$ руйнування відбувалось віз роздавлювання з виколуванням бетону стиснутої зони.

Порівнюючи схеми тріщино утворення і руйнування дослідних зразків при однозначному статичному навантаженні можна констатувати, що із збільшенням прольоту «зрізу» числові значення небезпечної похилої тріщини C_0 спочатку збільшується до величини $3d$. Потім по мірі подальшого збільшення прольоту «зрізу» спостерігається зменшення C_0 до величини рівній d (робоча висота перерізу). Це пояснюється тим, що при збільшенні C_0 все більша кількість поперечних стержнів залучається до роботи і відбувається порушення рівноваги по іншій похилій тріщині з меншою величиною горизонтальної проекції, може бути вирішальним.

Як сказано в роботі [13] із зменшенням прольоту «зрізу» за дії малоциклових знакозмінних навантаженнях деформації бетону на ділянках похилих перерізів збільшуються при однакових рівнях завантаження. Поперечна арматура в похилих перерізах припорних ділянок деформується нерівномірно. В місцях перетину її з похилими тріщинами має місце значне збільшення деформацій в поперечних стержнях. Найбільше збільшення деформацій поперечної арматури при зміні знаку навантажень спостерігається в елементах при прольоті «зрізу» $a=45\text{см}$, а саме в 3,9 разів на першому циклі, при прольоті «зрізу» $a=30\text{см}$ в 2,0 рази, а при прольоті «зрізу» $a=60\text{см}$ в 1,25 рази. Це говорить про те що і напружено-деформований стан в похилих перерізах цих елементів буде різним.

Значні експериментально-теоретичні дослідження напружено-деформованого стану згинальних нерозрізних балок проведені і викладені авторами в роботі [14]. Автори детально проаналізували напружено-деформований стан і його зміни при однозначних статичних навантаженнях в нерозрізних залізобетонних балках. Також авторами виконаний аналіз методів

розрахунку похилих перерізів нерозрізних елементів, але при однозначних статичних навантаженнях.

В роботі [15] описано проведені експериментально-теоретичні дослідження напружено-деформованого стану нерозрізних залізобетонних балок за дії малоциклових повторних і знакозмінних навантажень, але при одному прольоті «зрізу», $a=60\text{см}$. Автором проаналізовано вплив малоциклових повторних і знакозмінних навантажень експлуатаційного рівня на зміну несучої здатності, тріщиностійкості і деформативності нерозрізних залізобетонних балок в порівнянні з однозначними статичними навантаженнями. На характер руйнування і напружено-деформований стан нерозрізних елементів суттєво впливають саме мало циклові знакозмінні навантаження, оскільки перерізи балки наскрізними тріщинами розділяються на окремі блоки. При чому біля опорних ділянок в похилих перерізах утворюються конусоподібні блоки за рахунок деструктивних процесів в бетоні стиснутої зони по-перемінно. Ці процеси і характеризують напружено-деформований стан похилих перерізів приопорних ділянок в нерозрізних елементах.

Висновки: На основі аналізу робіт присвячених дослідженню напружено-деформованого стану похилих перерізів одно пролітних і нерозрізних залізобетонних елементів, в тому числі їх приопорних ділянок. Для вирішення поставлених задач авторами заплановано проведення експериментально-теоретичних досліджень напружено-деформованого стану приопорних ділянок нерозрізних залізобетонних елементів при різних прольотах «зрізу» за дії малоциклових знакозмінних навантажень.

1. ДСТУ Б.В.2.6-156:2010 Бетонні та залізобетонні конструкції важкого бетону. Правила проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2011. -118с. – (Національний стандарт України).

DSTU B.V.2.6-156:2010 Betonni ta zalizobetonni konstruktzii vazhkoho betonu. Pravela proektuvannia. – K.: Minrehionbud Ukrainy, Derzhavne pidprijemstvo «Ukrarkhbudinform», 2011. -118s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

2. Eurocode-2: Desing of Concrete Structures. - Part 1-1: General Rules and Rules for Building EN 1992-1-1-[Final Draft, December, 2004]. – Brussels: CEN. – 2004. – 225p. – (Європейський стандарт).

3. Wilson C.D.A. Critical Reexamination of Classical Metal Plasticity/ C.D. Wilson. Journal of Applied Mechanics. – 2002. – Vol.69. – Iss.1. – pp.63-68.

4. Ashour A. K-H. Yang. Appilication of Plasticity Theory of Reinforced Concrete Deep Beams. A Review. Magazine of Concrete Research. – 2008. – Vol.60. – Iss. 9. – pp.657-884.

5. Yang V., Walraven J., J. den Uigl. Shear behavior of reinforced concrete beams without transverse reinforcement based on critical shear displacement. Journal of Structural Engineering. – 2016. – Vol.143(1), 04016146.

6. Cavagins F., Fernandez Ruiz M., Muttoni A. Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: an analysis of the critical shear crack development on the basis of test results. Engineering structures. -2015. –Vol.103. –pp. 157-173.

7. Mohammed A.O.I. Experimental studies of strength inclined sections bent elements from autoclaved aerated concrete. IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079. – Chapter 1, 022062.

8. Kuo W.W., Thomas T.C.H., Hwang S.J. Shear strength of reinforced concrete beams. ACI Structural Journal. -2014. –Vol.111. – pp.809-818.

9. Дорофеев В.С., Карпюк В.М., Петров Н.Н. Прочность, деформативность и трещиностойкость приопорных участков внецентренно растянутых и сжатых железобетонных балок. – Одесса: Издательство «Внешрекламсервис», 2011. -184с.

Dorofeev V.S., Karpiuk V.M., Petrov N.N. Prochnost, deformatyvnost y treshchynostoikost pryopornykh uchastkov vnetsentrenno rastianutykh y szhatykh zhelezobetonnykh balok. – Odessa: Yzdatelstvo «Vneshreklamservys», 2011. -184s

10. Mitrofanov V.P. Optimization strength theory of reinforced concrete bar elements and structures with practical aspects of its use. Building static notice. -2000. –Vol.71 - №71. – pp.73-125.

11. Митрофанов В.П., Пінчук Н.М. Врахування крихкості, псевдо пластичності бетону в розрахунках міцності при складних неоднорідних напружено-деформованих станах. Науковий вісник будівництва. – 2016. -№1. –с.101-107.

Mytrofanov V.P., Pinchuk N.M. Vrakhuvannya krykhhosti, psevido plastychnosti betonu v rozrakhunkakh mitsnosti pry skladnykh neodnorodnykh napruzhenno-deformovanykh stanakh. Naukovyi visnyk budivnytstva. – 2016. -№1. –s.101-107.

12. Довженко О.О., Погрібний В.В., Мальвана О.О., Шитова О.М. Методика розрахунку міцності у похилих перерізах балкових залізобетонних елементів. Зб. наук. пр. «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». -2021. –Вип. 40. – с.129-136.

Dovzhenko O.O., Pohribnyi V.V., Malivana O.O., Shytova O.M. Metodyka rozrakhunku mitsnosti u pokhylykh pererizakh balkovykh zalizobetonnykh elementiv. Zb. nauk. pr.. «Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy». -2021. –Vyp. 40. –s.129-136.

13. Корнійчук О.І. Міцність та тріщиностійкість похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів при дії малоциклових знакозмінних навантажень: Дис. канд. техн. наук. – Рівне, - 2009. -191с.

Korniichuk O.I. Mitsnist ta trishchynostiikist pokhylykh pereriziv zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv pry dii malotsyklovykh znakozminnykh navantazhen: Dys. kand. tekhn. nauk. – Rivne, - 2009. -191s.

14. Дорофеев В.С., Карпюк В.М., Крантовская Е.Н. Прочность, трещиностойкость и деформативность неразрезных железобетонных балок: Монография. – Одесса: Эвен, 2010. -175с.

Dorofeev V.S., Karpiuk V.M., Krantovskaia E.N. Prochnost, treshchynostoikost y deformatyvnost nerazreznykh zhelezobetonnykh balok: Monohrafiya. – Odessa: Efen, 2010. -175s.

15. Юшук 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.

Iushchuk O.V. Nesucha zdatnist, trishchynostiikist i deformatyvvnist nerozriznykh balok za dii malo tsyklovykh povtornykh i znakozminnykh navantazhen: dys. k.t.nauk: 05-23-01. Rivne. NUVHP. 2021. S.160.