

АНОТАЦІЯ

Полянський К. В. Напружено-деформований стан та несуча здатність похилих перерізів пошкоджених залізобетонних балок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, 2020.

Дисертаційне дослідження присвячене вивченню впливу пошкоджень стиснутої зони бетону на напружено-деформований стан та несучу здатність похилих перерізів та залізобетонних балкових елементів.

У *вступі* дисертації надане обґрунтування вибору даної теми дослідження, представлений зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами, наведені мета та задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення роботи, впровадження результатів роботи.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що після проведення серії досліджень вперше отримані нові дані залишкової несучої здатності похилих перерізів пошкоджених залізобетонних балок, отримані особливості тріщиноутворення та характер руйнування таких елементів, граничні прогини, напружено-деформований стан бетону та стрижнів поперечної арматури; встановлений вплив параметрів пошкоженості зразків, в тому числі, при різних прогонах зрізу на ці характеристики; запропонована методика з визначення залишкової несучої здатності похилих перерізів для елементів з такими пошкодженнями на основі існуючого нормативного методу.

У *першому розділі* дисертації проведено огляд існуючих наукових досліджень, що стосуються обраної теми з доступних літературних джерел. За результатами аналізу досліджень встановлено, що значна кількість будівель та споруд експлуатується з пошкодженими елементами, що в свою

чергу знижує терміни експлуатації цих конструкцій та призводить до аварійного стану.

Встановлено, що, на жаль, в чинних нормативних документах не міститься жодних рекомендацій для визначення залишкової несучої здатності для таких конструкцій, що значно ускладнює вибір раціонального підсилення та не завжди призводить до раціонального використання ресурсів.

В ході літературного аналізу з'ясовано, що дослідженнями несучої здатності похилих перерізів у своїх роботах займався ряд вчених: Байков В. М., Боришанський М. С., Гвоздев О. О., Голишев О. Б., Доля К. Х., Дмитренко А. О., Дорофеєв В. С., Дорошкевич Л. О., Залєсов О. С., Карпюк В. М., Клименко Є. В., Мурашев В. І., Столяров Я. В., Торяник М. С., Leonghart F., Mörsch E., Talbot A. N., Regan P. E., Ritter W. та інші. Проте, дослідження несучої здатності похилих перерізів в пошкоджених балках не проводилось і є наразі актуальним. Зокрема, дуже цікавим в подальшому є дослідження впливу пошкоджень в стиснутій зоні бетону у вигляді сколів при різних величинах відносного прогону зрізу.

Пошкодження в вигляді сколів бетону мають призводити до зміни напружено-деформованого стану – нейтральна вісь перестає бути паралельною осям балки, за рахунок цього виникає косий згин.

У *другому розділі* дисертації наведено розроблену програму та методику експериментальних досліджень для визначення залишкової несучої здатності похилих перерізів пошкоджених залізобетонних балок.

Розробка методики проводилась із застосуванням комплексу методів математичної статистики – планування експерименту. Згідно цього було виготовлено 15 дослідних зразків для проведення трирівневого трифакторного експерименту, що дозволяє отримати достовірні результати та максимальну точність вимірів при мінімальній кількості проведених дослідів. В якості факторів, обраних для дослідження, є: прогін зрізу a_v , висота сколу бетону h_1 та кут нахилу сколу бетону β_1 .

Підкреслюється, що всі прийняті матеріали зразків, технологія виготовлення, методи випробувань та обладнання відповідають вимогам чинних нормативних документів та дозволяють отримати експериментально достовірні дані. Для визначення характеристик матеріалів виготовлені контрольні зразки.

У *третьому розділі* дисертації описані отримані результати лабораторних досліджень. В ході дослідів визначені дані фізико-механічних характеристик бетону та арматури (бетон класу C25/30, повздовжня арматура класу A500C, поперечна арматура класу A240C) та випробувано 15 дослідних балок, які під дією короточасного ступенево-зростаючого зосередженого навантаження зазнали руйнування за похилими перерізами. В розділі аналізуються дані впливу пошкоджень та прогону зрізу на залишкову несучу здатність, прогини, характер тріщиноутворення, гранична ширина розкриття тріщин, напружено-деформований стан бетону та стрижнів поперечної арматури.

В ході аналізу встановлено, що несуча здатність зменшується при збільшенні площі пошкоджень та прогону зрізу. В межах кожного прогону зрізу зразки з більшою площею пошкодження витримували меншу поперечну силу, більше навантаження здатні були сприйняти зразки з меншою висотою пошкодження і більшим кутом нахилу пошкодження, ніж зразки з більшою висотою пошкодження і меншим кутом нахилу пошкодження. Несуча здатність при прогоні зрізу $a_v = 510$ мм в ушкоджених зразках Б2, Б3, Б4, Б5 становить 95,9%, 80,8%, 79,5%, 41,0% (відповідно) від несучої здатності неушкодженого Б1; при прогоні зрізу $a_v = 340$ мм в ушкоджених зразках Б7, Б8, Б9, Б10 становить 75%, 70%, 55%, 42,5% від несучої здатності неушкодженого Б6; при прогоні зрізу $a_v = 170$ мм в ушкоджених зразках Б12, Б13, Б14, Б15 становить 94,7%, 88,4%, 79%, 67,3% від несучої здатності неушкодженого Б11.

Простежується залежність, що зі збільшенням площі пошкодження зменшується гранична ширина розкриття тріщини. При чому в зразках

з меншою висотою пошкодження і більшим кутом нахилу пошкодження гранична ширина розкриття тріщини більше ніж в зразках з більшою висотою пошкодження і меншим кутом нахилу пошкодження. Видимі тріщини у неушкодженій грані з'являються на ступінь або декілька ступенів раніше. Пошкодження і збільшення їх площі призводять до зменшення граничних прогинів.

Виявлено, що відбувається зміна напружено деформованого стану бетону – відбувається нахил нейтральної осі майже паралельно фронту пошкодження. Напруження в поперечних стрижнях арматури не досягали межі текучості в зразках з найбільшою площею пошкодження та в усіх ушкоджених зразках при прогоні зрізу $a_v = 170$ мм, а саме зразки Б5, Б10, Б12...Б15.

Аналіз дослідних факторів за допомогою регресійного аналізу вказує на те, що серед дослідних факторів найбільший вплив на граничну поперечну силу чинить прогон зрізу, а кут пошкодження впливає значно меншою мірою як і глибина пошкодження.

У *четвертому розділі* дисертації наведені результати чисельного моделювання роботи дослідних зразків в ПК ЛІРА – САПР. Для проведення методом скінчених елементів нелінійного кроково-ітераційного розрахунку були застосовані фактичні діаграми напруження-деформації σ - ε бетону та арматури. Вказано, що результати несучої здатності показали гарну збіжність з результатами, отриманими в ході натурних випробуваннями, коефіцієнт варіації $\nu = 14,8\%$ (при абсолютній різниці в межах від 3,2% до 21,5%). Характер руйнування співпадає з результатами випробувань, крім зразків Б11...Б14 – там, де руйнування відбувалося від дроблення бетону на опорі. Вказується на подібності в характері деформування зразків та на деякі не співпадання граничних напружень в стрижнях поперечної арматури – вони не досягали межі текучості, на відміну від лабораторних досліджень в балках Б1...Б4, Б6...Б8, Б11. Відзначається, що моделювання в ПК ЛІРА – САПР може використовуватись для таких розрахунків, проте

процес від створення моделі до аналізу отриманих даних досить кропіткий та займає великий проміжок часу.

Наведено запропоновану методику з визначення залишкової несучої здатності похилих перерізів пошкоджених балок та створено зручний для використання алгоритм розрахунку. Виконане порівняння результатів проведеного розрахунку за запропонованою методикою з результатами експериментальних досліджень. Про доцільність його використання свідчить коефіцієнт варіації $v = 10,3\%$ (при абсолютній різниці в межах від 0,1% до 28,1%).

У *п'ятому розділі* дисертації наведені приклади застосування перевірочних розрахунків за запропонованою методикою для пошкоджених зразків Б4 та Б15. Також в розділі доповідається про впровадження отриманих результатів наукових досліджень в практику проектування при розробці проектів капітального ремонту Центру позашкільної роботи у м. Краматорськ та капітального ремонту головного корпусу Добропільської ЦЗФ у м. Добропілля, а також в навчальний процес при викладанні лекційного матеріалу здобувачам вищої освіти підготовки за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія в Одеській державній академії будівництва та архітектури, а також в Донбаській національній академії будівництва та архітектури.

Ключові слова: експериментальні дослідження, руйнування, пошкодження залізобетону, залізобетонні балки, залишкова несуча здатність, напружено-деформований стан, граничні деформації, граничний стан, прогін зрізу, метод розрахунку, похилий переріз, приопорні ділянки, нахил нейтральної осі.

ABSTRACT

Polianskyi K. V. Stress-strain state and the bearing capacity of the inclined sections of damaged reinforced concrete beams. Qualification scientific work on the manuscript.

The thesis for candidate degree of engineering science (PhD) in the specialty 192 – Construction and civil engineering – Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, 2020.

The thesis investigation is devoted to the study of the influence of damage of compressed concrete areas on the residual bearing capacity of the inclined sections and the stress-strain state of reinforced concrete beam elements.

In the *introduction* of the work, reasoning of the choice of research topic, relation of work with scientific programs, plans and topics, the purpose and tasks of research, scientific novelty and practical significance of the work, implementation of the results of the work are shown.

Scientific novelty of obtained results is that after series of studies the new data of the residual bearing capacity of inclined sections of damaged reinforced concrete beams were obtained. The new features of cracking and destruction character of elements, boundary deflections, stress-strain state of concrete and transverse reinforcement bars were obtained. The influence of the parameters of the damage (including at various values of shear span) of the samples on these characteristics is established. The methodology (based on an existing code method) of determining the residual bearing capacity of inclined sections for elements with such damages are proposed.

In the *first chapter* of thesis a review of existing scientific studies on the topic chosen from the available literature are provided. The analysis of studies found that a significant number of buildings operated with damaged elements which in turn reduces the service life of these structures and results in emergency condition.

It is established that the current codes do not contain any recommendations for calculating the residual bearing capacity for such structures. It greatly complicates the rational choice of rational strengthening and does not always lead to the rational use of resources.

During the literary analysis it was established that the research strength of the inclined sections were considered in the works of Baikov V. M., Boryshanskyi M. S., Hvozdiev O. O., Holyshev O. B., Dolia K. Kh., Dmytrenko A. O., Dorofieiev V. S., Doroshkevych L. O., Zaliesov O. S., Karpiuk V. M., Klymenko Ye. V., Murashev V. I., Stoliarov Ya. V., Torianyk M. S., Leonghart F., Mörsch E., Talbot A. N., Regan P. E., Ritter W. and others. However, the study of the strength of the inclined sections in the damaged beams has not been conducted and is currently relevant. In particular, very interesting in the future is to study the impact of damages in the compressed zone of concrete in the form of chips with different values of the shear span.

Damages in the form of chips of concrete should lead to a change in the stress-strain state – the neutral axis should cease to be parallel to the axis of the beam, due to which an oblique bend occurs.

In the *second chapter* of thesis program and methodology of experimental research to determine the residual bearing capacity of inclined sections in the damaged reinforced concrete beams are developed.

Development of methods carried out using complex mathematical statistics methods – experimental planning. According to that 15 prototypes for conducting three-level and three-factor experiment were made. It allow to get reliable results and maximum accuracy with a minimum number of experiments conducted as factors selected for study are: shear span a_v , height of concrete chips h_l and angle of concrete chips β_l .

It is emphasized that all taken samples of materials, manufacturing technology, testing methods and equipment comply with actual codes and experimentally yield reliable data. Test specimens were made to determine the characteristics of the materials.

In the *third chapter* of thesis the results of laboratory tests are described. During the experiments physical and mechanical properties of concrete and steel rebar (concrete grade of C25/30, longitudinal reinforcement grade of A500C, transverse reinforcement grade of A240C) are identified and 15 experimental beams are tested under short-stepwise increasing load. All of beams were destroyed by inclined sections. The data of the influence of the damage and the run of the slice on the residual bearing capacity, deflections, the nature of cracks, the limit width of crack opening, the stress-strain state of concrete and the bars of the transverse reinforcement are analyzed.

The analysis found that the bearing capacity decreases with increased area of damage and shear span. Within each shear span, specimens with a larger damage area withstood a shear force, more loads were able to accept specimens with a lower damage height and a greater inclination angle of damage than specimens with a higher damage height and a smaller inclination angle. The bearing capacity at the shear span $a_v = 510$ mm in the damaged samples B2, B3, B4, B5 is 95.9%, 80.8%, 79.5%, 41.0% (in accordance) of the bearing capacity of sample B1; at the shear span $a_v = 340$ mm in the damaged samples B7, B8, B9, B10 is 75%, 70%, 55%, 42.5% of the bearing capacity of sample B6; at the shear span $a_v = 170$ mm in the damaged samples B12, B13, B14, B15 is 94.74%, 88.4%, 79%, 67.3% of the bearing capacity of sample B11.

The dependence is observed that with increasing damage area the limit width of crack opening decreases, whereby in samples with smaller height of damage and greater angle of damage, the limit width of crack opening is greater than in samples with greater height of damage and smaller angle. Visible cracks in the undamaged side appear a step or several steps earlier. Damages and an increase in their area leads to a decrease in limit deflections.

It is revealed that there is a change in the stress strain state of concrete – there is a slope of the neutral axis almost parallel to the front damage. The stresses in the transverse bars of the reinforcement did not reach the yield point in the

specimens with the largest damage area and in all the damaged specimens during the shear span $a_v = 170$ mm, namely specimens B5, B10, B12...B15.

The analysis of the experimental factors with using regression analysis indicates that, among the experimental factors, the most significant effect on the ultimate shear force is the shear span, and the damage angle has a much smaller effect than the depth of damage.

In the *fourth chapter* of thesis the results of numerical modeling of prototypes in the software complex LIRA – CAD are shown. The actual stress-strain σ - ε diagrams of concrete and reinforcement were applied to perform the method of finite elements of nonlinear calculation. Indicated that the carrying capacity results showed good convergence compared with tests, coefficient of variation $\nu = 14,8\%$ (absolute difference in the range from 3.2% to 21.5%). Fracture coincides with the results of tests of samples except B11...B14 - where failure occurs by crushing concrete support. The similarities in the character of the deformation state of the specimens and some discrepancies in the boundary stresses in the bars of the transverse reinforcement are indicated – they did not reach the yield-strength, unlike the laboratory tests in the beams B1...B4, B6...B8, B11. It is noted that modeling in the software complex LIRA - CAD can be used for such calculations, but the process from model creation to analysis of the obtained data is rather painstaking and time consuming.

The proposed method for determining the residual bearing capacity of the inclined sections of the damaged beams is presented, and a calculation algorithm is easy to use are designed. Comparison of results for the proposed method of calculating the results of research are completed. On the feasibility of its use indicates the coefficient of variation $\nu = 10,3\%$ (absolute difference in the range from 0.1% to 28.1%).

In the *fifth chapter* of thesis examples of calculations for verifying the proposed method for damaged samples B4 and B15 are showed. The section also reports on the implementation of the results of scientific research into the design practice in the development of projects of overhaul of the extra-curricular work

center in Kramatorsk and overhaul of the main building of the Dobropilska CPP in Dobropillya and the introduction into the scientific process of teaching lectures to students of specialty 192 – Construction and civil engineering at the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, as well as in the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture.

Keywords: experimental investigations, destruction, damages in reinforced concrete, reinforced concrete beams, residual bearing capacity, stress-strain state, limit deformations, limit state, shear span, method of calculation, inclined sections, area near support, tilt of the neutral axis.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Polianskyi K. V. About the methodology of experimental investigation of the damages influence on the stress-strain state and the residual bearing capacity of the inclined sections of reinforced concrete beams. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 71. С. 73–77 (індексується наукометричною базою *Index Copernicus*).

2. Klymenko Ye. V., Boiadzhi A. O., Polianskyi K. V. About the experimental investigation of residual investigation of residual bearing capacity of damaged reinforced concrete beams inclined sections. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 75. С. 37–43 (індексується наукометричною базою *Index Copernicus*).

3. Клименко Є. В., Полянський К. В. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану пошкоджених залізобетонних балок. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 76. С. 24–30 (індексується наукометричною базою *Index Copernicus*).

4. Клименко Є. В., Антонюк Н. Р., Полянський К. В. Моделювання роботи пошкоджених залізобетонних балок "ЛІРА-САПР". *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 77. С. 58–65 (індексується наукометричною базою *Index Copernicus*).

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:

5. Клименко Е. В., Полянский К. В. Экспериментальное и теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния и несущей способности наклонных сечений поврежденных железобетонных

балок прямокутного сечення. *Проблемы современного бетона и железобетона*. 2019. № 11. С. 147–163.

6. Klymenko, Y., Kos, Z., Grynyova, I., Polianskyi, K. Investigation of Residual Bearing Capacity of Inclined Sections of Damaged Reinforced Concrete Beams. *Croatian Regional Development Journal*. 2020. Vol. 1., No. 1. pp. 16–29.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Клименко Є. В., Полянський К. В. Про стан досліджень залишкової несучої здатності похилих перерізів пошкоджених залізобетонних балок. *Актуальні проблеми інженерної механіки* : зб. тез доп. V міжнародної наук.-практ. конф., м. Одеса, 22-25 травня 2018 р. Одеса, 2018. С. 190–191.

8. Клименко Є. В., Полянський К. В. Випробування пошкоджених залізобетонних балок. *Експлуатація та реконструкція будівель і споруд* : зб. тез доп. III міжнар. конф., м. Одеса, 26-28 вересня 2019 р. Одеса, 2019. С. 73.

9. Клименко Е. В., Гринева И. И., Полянский К. В. Про исследования работы поврежденных железобетонных балок. *Современное строительство и архитектура. Энергосберегающие технологии* : сборник материалов XI Республиканской науч.-практ. конф., г. Бендеры, 20-21 нояб. 2019 г. Бендери, 2019. С. 29–33.