

АНОТАЦІЯ

Лободанов М.М. Міцність та деформативність згинаних залізобетонних елементів з пошкодженням бетону за дії навантаження. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – будівництво та цивільна інженерія. Галузі знань 19 – архітектура та будівництво – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню завдання дослідження впливу пошкодження бетону стиснутої зони, отриманого за дії навантаження, на міцність та деформативність згинаних залізобетонних елементах прямокутного перерізу.

В розділі 1 проведено аналіз досліджень з даної тематики, виконаних на території України та закордоном. Описано причини виникнення та типи пошкоджень залізобетонних конструкцій в цілому та із акцентуацією на пошкодженні бетону. Найчастіше причиною пошкоджень бетону є вплив агресивного середовища. Пошкодження конструкції при цьому відбуваються за дії навантаження різної інтенсивності – починаючи від впливу власної ваги конструкцій, та з додаванням технологічного обладнання, рухомих механізмів, атмосферних впливів (сніг, вітер), тощо. Дія навантаження викликає появу тріщин в залізобетонних конструкціях, що призводить до зростання деформативності. Наявні напруження та деформації в бетоні і арматурі елементів пришвидшують поширення пошкоджень. В такому випадку є необхідність підсилення та відновлення експлуатаційної придатності цих конструкції. При виборі та прийнятті ефективного методу підсилення важливо володіти повною інформацією про напружено-деформований стан залізобетонних конструкцій та вплив наявних пошкоджень.

На підставі огляду літературних джерел сформульовано задачі досліджень.

В розділі 2 подано програму та методику експериментальних досліджень.

Виконано математичне моделювання впливу пошкоджень в стиснутій зоні в згинаних залізобетонних елементах типу прямокутної балки. Порівняно вплив на несучу здатність двох факторів: рівня навантаження і втрати захисного шару в стиснутій зоні бетону, а також розглянуто вплив їх одночасної дії. Проведено два варіанта моделювання для визначення фактору, що має пріоритетний вплив на несучу здатність елемента. Перший варіант призначений для формування матриці залежності впливу факторів на несучу здатність елемента з подальшим визначенням коефіцієнтів впливу і формування рівняння регресії. Аналізуючи рівняння було отримано значення впливу факторів і їх взаємодії на несучу здатність елемента. Другий варіант - моделювання експерименту в програмному комплексі Femap NX Nastran. При аналізі отриманих даних було сформовано таблицю з варіації факторів і їх комбінації та демонстрації їх впливу на максимальні сумарні переміщення моделі, з подальшим аналізом цих даних. Залізобетонні балки, пошкоджені без початкового рівня навантаження, демонстрували деформаційність у 1,48 рази більшу, ніж контрольні. Зразки, які отримали подібні пошкодження при рівні навантаження 0,3 від несучої здатності контрольного зрізця, показали менший приріст деформації (в 1,18 рази), ніж контрольні балка. Можна виділити основним фактором рівень навантаження для згинаних залізобетонних балках при пошкодженні в стиснутій зоні (при втраті захисного шару). Отриманні результати підтверджують актуальність і доцільність в проведенні експериментів з метою визначення залишкової несучої здатності пошкоджених залізобетонних елементів.

Для виконання досліджень було виготовлено залізобетонні балки розмірами 100×100×2100 мм, бетонні призми розмірами 150×150×600 мм, бетонні куби 150×150×150 мм, бетонні циліндри діаметром 100 мм і висотою 200 мм. Для визначення фізико-механічних характеристик арматури випробувано по 3-и зразки для кожного діаметру арматури, відібраних з тієї ж партії поставки.

Залізобетонні балки випробовувано шляхом виконання поетапного навантаження двома зосередженими силами в третинах прольоту. З метою

вимірювання деформацій бетону та арматури використовували індикатори годинникового типу, для прогинів – прогиноміри Аістова.

Залізобетонні балки поділено на дві серії. 1-ша серія дослідних зразків армована робочою арматурою 2Ø14A500С, тоді як 2-га серія була виготовлено з робочим армуванням у вигляді 2Ø12A500С. Усі інші параметри дослідних зразків ідентичні.

Пошкодження виконували при рівнях навантаження 0.3; 0.5 та 0.7 від M_{ult}^{exp} (де M_{ult}^{exp} – згинальний момент, при якому відбулося вичерпання несучої здатності залізобетонних балок внаслідок текучості робочої арматури). Дослідний зразок навантажували згідно розробленої методики, і при досягненні відповідного рівня навантаження здійснено пошкодження стиснутого бетону в центральному перерізі. Геометричні розміри пошкодження становили 20×30 мм або 80×30 мм (де 20 мм і 80 мм ширина пошкоджень, 30 мм глибина пошкоджень, і на всю ширину балки). Пошкодження виконували поетапно, із кроком зростання глибини пошкодження 10 мм. Після цього балки продовжували поетапно навантажувати, аж до вичерпання несучої здатності, за методикою як до виконання пошкодження. Вибрані варіанти ширини пошкодження, обумовлено дослідженням впливу розподіленого та точкового пошкодження бетону в стиснутій зоні на несучу здатність та деформативність згинаних залізобетонних елементів.

В **розділі 3** наведено отримані результати міцності та деформативності залізобетонних балок.

Фізичне руйнування контрольних балок із робочою арматурою 2Ø14A500С відбувалось в момент досягнення текучості в розтягнутій арматурі та роздроблення стиснутої зони бетону. Руйнування дослідних зразків 1-ї серії із пошкодженням виконаним при 0, 0.7 M_{ult}^{exp} розмірами 20x30 мм та при 0.5 M_{ult}^{exp} розмірами 80x30 мм, відбулось за рахунок роздроблення стиснутої зони бетону. Такий тип фізичного руйнування залізобетонних зразків 2-ї серії було зафіксовано після проведеного експерименту, окрім зразків пошкоджених при 0.5, 0.7 M_{ult}^{exp} .

Приріст прогинів залізобетонних балок (до пошкодження) відбулося аналогічно як і для контрольних балок. Проте під час пошкодження стиснутого бетону, при сталому навантаженні, прогини зростали інтенсивніше та з такою ж динамікою зростали при подальшому навантаженні зразка.

Аналіз результатів експериментальних випробувань показав, що несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженою зоною стиснутого бетону зменшується в порівнянні з контрольними зразками. Зниження несучої здатності залізобетонних балок 1-ї серії в порівнянні з зразками, що отримали пошкодження без навантаження становило 22.89%. В той час, як пошкодження виконане за дії навантаження в залізобетонних балках 1-ї серії, продемонстрували зниження несучої здатності на 17.57...23.61% відносно контрольних зразків. Вплив варіювання ширини пошкодження в стиснутій зоні бетону на несучу здатність не суттєвий, оскільки він не перевищує 1%.

Результати випробовування зразків 2-ї серії, пошкоджених без навантаження, показали зниження несучої здатності на 6.13...16.77% в порівнянні з контрольними зразками тієї ж серії. Пошкодження за дії навантаження залізобетонних балок 2-ї серії (з робочою арматурою Ø12A500C) призвело до зниження несучої здатності на 6.14...23.32% відносно контрольних. В 2-ї серії пошкодження виконанні розмірами 80×30мм продемонстрували приріст несучої здатності в діапазоні 12.8...15.91% відносно залізобетонних зразків з пошкодженнями розмірами 20×30мм, а також було зафіксовано залежність від рівня навантаження, при якому виконувалось пошкодження.

Зміна ширини пошкодження стиснутої зони (з 20 мм до 80 мм) впливає на залишкову несучу здатність залізобетонних балок кожної серії по різному.

В розділі 4 запропоновано методику розрахунку залізобетонних балок з пошкодженням стиснутого бетону в центральному перерізі за дії навантаження на базі деформаційної моделі, згідно діючих норм. На першому етапі визначено параметри напружено-деформованого стану залізобетонних балок до здійснення пошкодження. На другому етапі розрахунку визначено параметри із врахуванням зміни геометричних характеристик внаслідок отриманого

пошкодження і до вичерпання несучої здатності. Дослідні зразки 1-ї серії продемонстрували відхилення несучої здатності експериментальних результатів відносно теоретичних в межах 4.03...10.57%. Балки 2-ї серії із робочою арматурою 2Ø12A500C показали відхилення несучої здатності визначеної експериментальним та теоретичним шляхом в межах -1.73...15.37% в сторону завищення експериментальних даних. Максимальне відхилення теоретичного та експериментального значень несучої здатності балок 2-ї серії, які пошкоджені до дії навантаження із розмірами пошкодження 80×30 мм, становило 15.37%. Інші експерименти не перевищили відхилення 10.62%.

Аналіз отриманих теоретичних та експериментальних результатів показав, що запропонована методика розрахунку показала задовільну збіжність отриманих результатів. Що дозволяє використовувати дану методику теоретичного розрахунку для визначення напружень в бетоні та робочій арматурі, і прогини в залізобетонних елементах прямокутного перерізу з пошкодженням стиснутого бетону за дії навантаження в центральному перерізі.

Ключові слова: залізобетонна балка, згинанні залізобетонні елементи, пошкодження бетону, стиснута зона бетону, за дії навантаження, несуча здатність, міцність, нормальні перерізи, деформації.

ABSTRACT

Lobodanov M.M. Strength and deformability of bending reinforced concrete elements with damaged concrete under load. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation is presented to obtain the degree of Doctor of Philosophy on a specialty 192 – Construction and Civil Engineering, in the area of expertise 19 – Architecture and Construction, Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2021.

The dissertation is devoted to solve the problem of the influence of concrete damage in the compressed zone, receiving under load, on strength and deformability of the bending reinforced concrete elements of rectangular section.

Section 1 is analysed researching on this topic conducted in Ukraine and abroad. The causes and types of reinforced concrete structures damage generally and with an accentuation on concrete damage are described. The most common cause of concrete damage is the impact of an aggressive environment. Construction damage occurs under a load of different intensities - starting from the structure`s own weight influence, and with the addition of technological equipment, movable mechanisms, environmental impact (snow, wind), etc. The load action causes cracks in the reinforced concrete structures, which leads to an increase in deformability. Existing stresses and strains in the concrete and reinforcement elements accelerate the spread of damage. In this case, there is a need for strengthening or restoring the serviceability of these structures. When choosing and adopting an effective method of reinforcement, it is important to have complete information about the stress-strain state of reinforced concrete structures and the impact of existing damage.

Based on a review of literature sources, research objectives are formulated.

Section 2 is presented the program and methods of experimental research.

Theoretical researching of the influence of damage in the compressed area in bending reinforced concrete elements is presented. The main attention is paid to the comparison of the impacting two factors on the bearing capacity: level of loading and the loss of the cover in the compressed area. In the first step, carried the formation of a matrix of the depending impact of each factor on the bearing capacity with the subsequent determination of coefficient of influence and the formation of the regression equation. Analysing the regression equation, obtained results of the impact of factors, and their interaction, on the bearing capacity of the element. Second step is modelling experiment, using software “Femap with NX Nastran”. Thereafter, there was created a table of the distribution factors and their combinations with the indications of their impact on the carrying capacity of the model. It is possible to

concluding, that the main factor is the initial level of loading, when the bending reinforced concrete beams received damages. Tested beams were damaged without an initial load level showed a deformability of 1.48 times greater than the regular. Samples, what received a similar damage at a load level of 0.3 from the bearing capacity of the regular, showed a smaller increase of deformability (1.18 times) than regular beam. The obtained results show the relevance and expediency of conducting experiments with the aim of determination of the residual bearing capacity in damaged reinforced concrete elements.

To perform the research, reinforced concrete beams with dimensions of 100×100×2100 mm, concrete prisms with dimensions of 150×150×600 mm, concrete cubes of 150×150×150 mm, concrete cylinders with a diameter of 100 mm and a height of 200 mm were made. To determine the physical and mechanical characteristics of the reinforcement, 3 samples were tested for each diameter of the rebar, which is taken from the same batch.

Reinforced concrete beams were tested by performing a phased load with two concentrated forces in thirds of the span. In order to measure the deformations of concrete and reinforcement, clock-type indicators were used, for deflections - an Aistov deflection indicators.

Reinforced concrete beams are divided into two series. The 1st series of samples is reinforced with working rebars 2Ø14A500C, while the 2nd series is made with working reinforcement in the form of 2Ø12A500C. All other parameters of the samples are identical.

Damage was performed at load levels of 0.3; 0.5 and 0.7 from M_{ult}^{exp} (where M_{ult}^{exp} is the bending moment at which the bearing capacity of reinforced concrete beams was exhausted due to the yield of the working reinforcement). The samples were loaded according to the developed method, and when the appropriate load level was reached, the compressed concrete in the central section was damaged. The geometric dimensions of the damage were 20×30 mm or 80×30 mm (where 20 mm and 80 mm width of the damage, 30 mm depth of damage, and the entire width of the beam). The damage was performed in stages, with a step of increasing the depth of 10 mm. After

that, the beams continued to be gradually loaded, until the load-bearing capacity was exhausted, according to the method, which used before damaging. The selected variants of damage width are conditioned by the study of the influence of distributed and pointed damage to concrete in the compressed zone on the bearing capacity and deformability of bending reinforced concrete elements.

Section 3 is described the results of the researching strength and deformability of reinforced concrete beams.

Physical destruction of control beams with working reinforcement 2Ø14A500C was occurring at the moment of achieving yielding in the stretched reinforcement and crushing compressed zone of concrete. Typical destruction of samples with damage that have been performed without load and under initial load in the 1st series is crushing compressed zone of concrete. In the 2nd series, for control and damaged samples with and without load, typical fracture is the crushing compressed concrete zone too, except for samples damaged at

Increasing deflections of reinforced concrete beams (before damage) occurred in the same way as for control beams. However, during the damage of compressed concrete, under constant loading, the deflections increased more intensively and with the same dynamics increased with further loading of the sample.

Analysis of the results of experimental tests showed that the load-bearing capacity of reinforced concrete beams with a damaged area of compressed concrete is reduced compared to control samples. The decrease in the bearing capacity of reinforced concrete beams of the 1st series in comparison with the samples that received damage without load was 22.89%. While the damage was performed under the action of load in reinforced concrete beams of the 1st series, showed a decrease in bearing capacity by 17.57... 23.61% relative to control samples. The effect of varying the width of the damage in the compressed zone of concrete on the load-bearing capacity is not significant, because it does not exceed 1%.

The results of testing the samples of the 2nd series, damaged without load, showed a decrease in bearing capacity by 6.13... 16.77% compared with control samples of the same series. Damage due to the load of reinforced concrete beams of

the 2nd series (with working reinforcement $\text{Ø}12\text{A}500\text{C}$) led to a decrease in bearing capacity by 6.14... 23.32% relative to the control.

In the 2nd series of damage, the $80\times 30\text{mm}$ performance showed an increase in bearing capacity in the range of 12.8 ... 15.91% relative to reinforced concrete samples with $20\times 30\text{mm}$ damage, and was recorded dependence of the applied load level at which the damage was performed.

Changing the width of the damage to the compressed zone (from 20 mm to 80 mm) affects the residual load-bearing capacity of reinforced concrete beams of each series in different ways.

Section 4 is proposed a method for calculating reinforced concrete beams with damage of the compressed concrete in the central section under the action of load on the basis of the deformation model, according to current rules. At the first stage, the parameters of the stress-strain state of reinforced concrete beams before damage are determined. At the second stage of calculation the parameters are determined taking into account the change of geometrical characteristics due to the received damage and until the bearing capacity is exhausted. The experimental samples of the 1st series showed the deviation of the bearing capacity of the experimental results relative to the theoretical ones in the range of 4.03 ... 10.57%. Beams of the 2nd series with working rebars $2\text{Ø}12\text{A}500\text{C}$ showed the deviation of the bearing capacity determined experimentally and theoretically in the range of -1.73 ... 15.37% in the direction of overestimation of the experimental data. The maximum deviation of the theoretical and experimental values of the bearing capacity of the beams of the 2nd series, which are damaged by the load with a damage size of $80\times 30\text{ mm}$, was 15.37%. Other experiments did not exceed the deviation of 10.62%.

Analysis of the obtained theoretical and experimental results showed that the proposed calculation method showed satisfactory convergence of the results. That allows you to use this method of theoretical calculation to determine the stresses in concrete and working reinforcement, deflections in reinforced concrete elements of rectangular cross section with damaged compressed concrete under the action of load.

Keywords: reinforced concrete beam, bending reinforced concrete elements, damaged concrete, compressed concrete zone, under load, bearing capacity, strength, bending moment, deformations.

Список опублікованих праць

Публікації у наукових фахових виданнях України

1. Лободанов М. М., Вегера П. І., Бліхарський З. Я. Аналіз впливу основних видів дефектів та пошкоджень на несучу здатність залізобетонних елементів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. 2018. № 888. С. 93–100.

2. Лободанов М. М., Вегера П. І., Бліхарський З. Я. Аналіз основних методів дослідження впливу пошкоджень на несучу здатність в залізобетонних елементах // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. / Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування. Рівне, 2018. Вип. 36. С. 389–396.

3. Кущенко В. М., Канюк В. М., Лободанов М. М. Підсилення фундаментів шахтних вентиляційних установок за умов техногенної ерозії ґрунтової основи // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. 2019. № 912. С. 108–114.

4. Лободанов М. М., Вегера П. І., Бліхарський З. Я. Визначення несучої здатності залізобетонних балок з пошкодженням за дії навантаження // Наука та будівництво. 2020. № 26(4). С. 26-32.

Публікації у закордонних наукових періодичних виданнях

5. Lobodanov M., Vegera P., Blikharskyu Z. Influence analysis of the main types of defects and damages on bearing capacity in reinforced concrete elements and their research methods // Production Engineering Archives. 2019. Vol. 22. P. 24–29.

Публікації тез та доповідей за матеріалами конференцій

6. Lobodanov M., Vegera P., Blikharskyu Z. Planning experiment for researching reinforced concrete beams with damages // Lecture Notes in Civil

Engineering (Proceedings of CEE 2019. Advances in resource-saving technologies and materials in civil and environmental engineering). 2020. Vol. 47. P. 243–250. *(Виконано визначення пріоритетності факторів впливу на несучу здатність залізобетонних елементів з отриманим пошкодженням за дії навантаження)*. (Scopus).

7. Lobodanov M., Vegea P., Blikharskyu Z. Influence of Damages in the Compressed Zone on Bearing Capacity of Reinforced Concrete Beams // Lecture Notes in Civil Engineering (International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering). 2020. Vol. 100. P. 260–267.

8. Лободанов М. М., Вегера П. І., Бліхарський З. Я. Дослідження сумісного впливу пошкодження стиснутої зони бетону та недостатнього армування в згинаних залізобетонних елементах // Експлуатація та реконструкція будівель і споруд : тези доповідей III всеукраїнської науково-практичної конференції, 17-18 грудня 2020 р., Одеса - Одеса: Одеська Державна академія будівництва та архітектури. – С. 157.