

АНОТАЦІЯ

Максюта О. В. Напружено-деформований стан та несуча здатність стиснутих залізобетонних двотаврових пошкоджених елементів. – Кваліфікаційна праця.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, 2022.

Дисертаційне дослідження присвячене вивченню впливу різних параметрів на несучу здатність стиснутих залізобетонних двотаврових колон, пошкоджених в процесі експлуатації.

У **вступі** роботи приведене обґрунтування вибору теми дослідження, сформульовані мета та задачі досліджень, наукова новизна та практичне значення роботи, представлена її загальна характеристика та зв'язок з науковими програмами.

Перш за все, слід зазначити, що залізобетон займає лідируючі позиції, як матеріал, що найчастіше використовується у будівельній галузі. В даний час до залізобетону пред'являють високі вимоги якості, перш за все це стосується високої міцності, вогнестійкості, щільності, здатності чинити опір, як статичним так і динамічним навантаженням, сейсмостійкості, довговічності. Щодо останнього, то довговічність залізобетонних конструкцій може досягати, за певних сприятливих умов, понад 100 років. Але за певних умов, наприклад, збільшення навантажень на конструкцію при реконструкції та при модернізації устаткування, навпаки, привести будівельні конструкції до аварійних станів і змусити виконувати ремонт навіть раніше, ніж це передбачено. В умовах важкого економічного стану країни в наш час, дуже важливим є саме продовження строку експлуатації будівель і споруд.

Наукова новизна отриманих результатів пролягає в тому, що в ході дослідження експериментально вивчена робота пошкоджених в процесі

експлуатації залізобетонних колон двотаврового поперечного перерізу, вивчено вплив параметрів пошкодження та величини ексцентриситету прикладання зовнішнього зусилля, визначено ступінь їх впливу на несучу здатність зразків, встановлено залежності деформацій від діючого навантаження, що дозволило визначити напружено-деформований стан зразків, виділити основні характерні схеми руйнування, висунути основні передумови та розробити методику розрахунку пошкоджених залізобетонних колон двотаврового поперечного перерізу на основі чинних нормативних документів, удосконалено методику визначення залишкової несучої здатності залізобетонних стиснутих елементів двотаврового поперечного перерізу, пошкоджених в процесі експлуатації.

У **першому розділі** дисертації представлений детальний огляд та аналіз існуючих досліджень стосовно вивчення працездатності та напружено-деформованого стану як бетону й арматури, так і залізобетонних конструкцій в цілому за дії ексцентрично прикладених стискаючих навантажень. Особливу увагу приділено розгляду існуючих нормативних та авторських методів розрахунку залишкової несучої здатності стиснутих залізобетонних елементів за дії моменту, як в одній, так і в двох площинах.

В ході літературного аналізу встановлено, що особливості впливу складного навантаження (косий позацентровий стиск) на роботу залізобетонних конструкцій та вплив на них оточуючого середовища розглядалися в роботах Алексєєва С.М., Бабіча Є.М., Бамбури А.М., Барашикова А.Я., Бліхарського З.Я., Бондаря В.О., Бондаренка В.М., Васильєва А.І., Вікторова А.М., Глаголи І.І., Грунау Е., Дорофєєва В.С., Клименка Є.В., Коляди В.І., Кочкарьова Д.В., Москвіна В.М., Павлікова А.М., Підвального А.І., Попеско А.Н., Семка О.В., Хміля Р.С., Холода П.Ф., Чемпіона С., Ягупова Б.А., Яковенка І.А., Яременка О.Ф., Böttcher J., Kys K., Riedel W., Scholz E., Hirne W.G., Suchan M., Polder R.V. та інших.

Проте, у дослідників ще не склалася єдина думка щодо впливу багатьох чинників і факторів зовнішнього впливу на характер деформування та

руйнування залізобетонних стиснутих елементів, пошкоджених в процесі експлуатації. Зокрема, недостатньо вивченою є робота косостиснутих елементів, ексцентриситет в двох площинах у яких виник не від наявності ексцентриситетів в двох напрямках, а в результаті пошкодження колон по висоті.

Практично відсутні дані щодо роботи залізобетонних косостиснутих колон двотаврового поперечного перерізу, пошкоджених в процесі експлуатації, на їх залишкову несучу здатність.

У **другому розділі** роботи наведені план експериментальних досліджень, обґрунтування та передумови вибору дослідних факторів, детальний опис методики проведення випробувань дослідних зразків-колон.

В рамках запланованих досліджень були проведені випробування серії колон із 15 моделей двотаврового поперечного перерізу з габаритними розмірами , $b \times h = 200 \times 300$ мм, з різними типами пошкодження, у вигляді різних глибин і кутів площини пошкодження. Режим проведення експерименту був однаковий для усіх колон. Заплановано дослідження різних комбінацій параметрів пошкоджень – три різних кута пошкоджень в поєднанні з трьома типами глибини пошкодження: глибина пошкодження 20, 60 і 100 мм; кут пошкодження 0° , 30° і 60° .

Заплановані серії дослідів виконували за три факторним трирівневим планом Бокса-Бенкіна.

Для створення макетів пошкоджень на зразках з ушкодженнями використовувалися бруски з відповідної форми з пінополістиролу.

Армування виконувалося у вигляді просторових в'язаних каркасів з робочою арматурою А 400 С Ø 12 мм та поперечними стержнями (хомутами) з арматури класу А 240 Ø 6 мм. Для підвищення міцності бетону в місцях можливої концентрації напружень (по кінцях колон) встановлювалося по три сітки непрямого армування з арматури Ø 6 мм класу А 240.

Бетонування, виконувалося готовим промисловим бетоном класу С 25/30 на будівельному майданчику.

З метою визначення напружено-деформованого стану бетону середнього за висотою пошкодженого перерізу колон на бетон наклеювалися (по контуру) електротензорезистори базою 50 мм з величиною електричного опору 120 Ом.

Випробування пошкоджених колон на короточасну дію стискаючого навантаження проводилось на 500-тонному гідравлічному пресі типу 2ПГ-500 №37 (м. Армавір), шкала на 200 тс, ціна поділки 666 кгс в лабораторії кафедри Залізобетонних конструкцій та транспортних споруд Одеської державної академії будівництва та архітектури.

Третій розділ дисертації присвячений аналізу отриманих експериментальних даних. А саме в ньому розглядається вплив вибраних факторів на залишкову несучу здатність пошкоджених стиснутих конструкцій.

За критерій руйнування дослідних балок було прийнято досягнення одного із факторів: значні деформації бетону та арматури, надмірна ширина розкриття тріщин, надмірні прогини колони та значний спад і подальша неможливість сприймати навантаження (падіння тиску в гідравлічній системі преса).

В середньому (за висотою) перерізі дослідного зразка по контуру наклеювалися тензорезистори на бетонну поверхню. Це дало можливість визначити величину відносних деформацій бетону на кожному ступеню навантаження.

Аналіз показав, що збільшення площі пошкодження призводить до збільшення ексцентриситету прикладання стискаючого зусилля.

Залежно від початкового ексцентриситету прикладання стискаючої сили та додаткового ексцентриситету, що виникає в перерізі з пошкодженням, за прийнятих параметрів варійованих величин може бути два види напружено-деформованого стану:

- перший напружено-деформований стан, коли увесь переріз, що досліджується – стиснутий;

- другий напружено-деформований стан, коли з'являється стиснута частина поперечного перерізу переріз.

На початку процесу навантаження до рівня $N/N_p=0,3$) має місце практично пружна робота бетону. При збільшенні навантаження все більше проявляється пластична складова деформування бетону, про свідчить викривлення кривої деформування. Описаний характер деформування отриманий, як для стиснутого, так і для розтягнутого бетону, але для останнього – в меншій мірі.

В процесі навантаження в дослідних зразках спостерігалася поява та розвиток нормальних тріщин в розтягнутій зоні бетону. В дослідних колонах з відносно невеликими ексцентриситетами, практично перед руйнуванням в найбільш стиснутій зоні перерізів пошкоджених колон утворювались поздовжні тріщини. Причиною появи таких тріщин є початок руйнування бетонного масиву від стиску.

В колонах мало місце випинання найбільш стиснутої поздовжньої робочої арматури. Передчасному випинанню арматури сприяла відсутність бетону в зоні пошкодження, як опори для робочих стержнів.

Результати дослідження залишкової несучої здатності пошкодженого перерізу і відповідний розрахунок в ПК ЛІРА САПР не дає достатньо точний результат розрахунку, тобто, при виконанні простого алгоритму дій не можливо отримати руйнуючі зусилля для прийняття подальших рішень щодо пошкодженого елемента. Коефіцієнт варіації відхилення теоретичних значень від експериментальних становить 0,444.

Аналіз експериментально-статистичних моделей (COMPEX) показав, що колони можуть витримувати максимальне руйнівне навантаження при куті нахилу фронту пошкодження 60° , мінімальній глибині пошкодження та при відсутності відносного ексцентриситету. А найменше руйнівне навантаження колони можуть витримати при відсутності кута нахилу фронту

пошкодження, максимальній глибині пошкодження та максимальним відносним ексцентриситетом прикладеного навантаження.

В четвертому розділі дисертаційної роботи представлені теоретичні основи та передумови для створення інженерної методики розрахунку залишкової несучої здатності стиснутих пошкоджених залізобетонних елементів двотаврового поперечного перерізу.

Основні передумови розрахунку:

1. Приймаємо гіпотезу плоских перерізів.
2. Напруження в стиснутій зоні розподіляються рівномірно з інтенсивністю ηf_{cd} .
3. Напруження в арматурі приймаються залежно від висоти стиснутої зони бетону. Зусилля у розтягнутій зоні сприймаються арматурою і не більші за розрахунковий спротив розтягненню f_t .
4. Робота розтягнутого бетону не враховується.
5. Приймаємо умову паралельності силових площин: площа дії зовнішніх і внутрішніх сил співпадають або паралельні залежно від розрахункового випадку.
6. Враховуємо оголення арматурних стрижнів $\sigma_{кр}$.
7. Вводяться поняття *прямого* пошкодження та пошкодження *під кутом*, які відповідають випадкам розрахунку, фронт пошкодження має прямолінійну форму.

Створено алгоритм розрахунку пошкоджених стиснутих і косостиснутих елементів, завдяки якому можна знайти невідомі величини.

В п'ятому розділі дисертації наведено детальний приклад розрахунку однієї з випробуваних колон. Результати співставлення свідчать про задовільний збіг теоретичних значень з величинами, отриманими при натурному експерименті (розбіжність в середньому не більше ніж на 12,2%). Це означає, що метод може бути застосований в будівельній практиці.

Результати, отримані в даній науково-дослідній роботі, впроваджені в практику проектування та експлуатації будівель, а також використовуються в навчальному процесі закладів вищої освіти.

Ключові слова: залізобетонні колони, двотавровий поперечний переріз, залишкова несуча здатність, пошкодження в процесі експлуатації, оголені арматурні стрижні.

ABSTRACT

Maksiuta O. V. Stress-strain state and bearing capacity of compressed reinforced concrete I-beam damaged elements. – Qualification work.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 192 – Construction and civil engineering. – Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, 2022.

The dissertation research is devoted to the study of the influence of different parameters on the bearing capacity of compressed reinforced concrete I-beams damaged during operation.

The **introduction** of the work provides a justification for the choice of research topic, formulates the purpose and objectives of research, scientific novelty and practical significance of the work, presents its general characteristics and connection with scientific programs.

First of all, it should be noted that reinforced concrete occupies a leading position as the material most commonly used in the construction industry. At present, high quality requirements are imposed on reinforced concrete, first of all, it concerns high strength, fire resistance, density, ability to resist both static and dynamic loads, seismic resistance, and durability. As for the latter, the durability of reinforced concrete structures can reach, under certain favorable conditions, more than 100 years. But under certain conditions, for example, an increase in the load on the structure during the reconstruction and modernization of equipment, on the contrary, lead building structures to emergency conditions and force repairs to be carried out even earlier than planned. In the conditions of the difficult economic state of the country in our time, it is very important to extend the life of buildings and structures.

The scientific novelty of the obtained results lies in the fact that during the study the work of damaged in the process of operation of reinforced concrete columns of I-beam cross section was studied, the influence of damage parameters and eccentricity of external force was studied. dependence of deformations on the

applied load, which allowed to determine the stress-strain state of the samples, to identify the main characteristic schemes of fracture, to put forward the main prerequisites and to develop a method of calculating damaged reinforced concrete columns of I-beam cross-section. cross section damaged during operation.

The **first section** of the dissertation presents a detailed review and analysis of existing research on the study of performance and stress-strain state of both concrete and reinforcement, and reinforced concrete structures in general under the action of eccentrically applied compressive loads. Particular attention is paid to the consideration of existing normative and author's methods of calculating the residual bearing capacity of compressed reinforced concrete elements under the action of moment, both in one and in two planes.

In the course of the literature analysis it was established that the peculiarities of the influence of complex load (oblique extracentric compression) on the work of reinforced concrete structures and the influence of the environment on them were considered in the works of Alekseev S.M., Babich Ye.M., Bambura A.M., Barashikov A.Ya., Blikharsky Z.Ya., Bondary V.O., Bondarenko V.M., Vasiliev A.I., Viktorov A.M., Glagola I.I., Grunau E., Dorofeev V.S., Klymenko Ye.V., Kolyady V.I., Kochkarev D.V., Kos Ž., Moskvin V.M., Pavlikov A.M., Pidvalny A.I., Popesko A.N., Semka O.V., Khmily R.S., Kholod P.F., Champion S., Yagupov B.A., Yakovenko I.A., Yaremenko O.F., Böttcher J., Kys K., Riedel W., Scholz E., Hirne W.G., Suchan M., Polder R.B. and others.

However, researchers have not yet reached a consensus on the influence of many factors and factors of external influence on the nature of deformation and destruction of reinforced concrete compressed elements damaged during operation. In particular, the work of obliquely compressed elements, eccentricity in two planes in which arose not from the presence of eccentricities in two directions, but as a result of damage to the columns in height, is insufficiently studied.

There are almost no data on the operation of reinforced concrete oblique columns of I-beam cross section, damaged during operation, on their residual bearing capacity.

In the **second section** of the work the plan of experimental researches, substantiation and preconditions of a choice of research factors, the detailed description of a technique of carrying out of tests of experimental samples-columns are resulted.

As part of the planned research, a series of columns of 15 models of I-beam cross-section with overall dimensions, $b \times h = 200 \times 300$ mm, with different types of damage, in the form of different depths and angles of the damage plane. The mode of the experiment was the same for all columns. It is planned to study different combinations of damage parameters – three different damage angles in combination with three types of damage depth: damage depth 20, 60 and 100 mm; damage angle 0° , 30° and 60° .

The planned series of experiments were performed according to a three-factor three-level Box-Benkin plan.

Bars of the corresponding form from expanded polystyrene were used for creation of models of damages on samples with damages.

Reinforcement was performed in the form of spatial knitted frames with working reinforcement A 400 C \varnothing 12 mm and transverse rods (clamps) of reinforcement class A 240 \varnothing 6 mm. To increase the strength of concrete in places of possible concentration of stresses (at the ends of the columns) was installed three grids of indirect reinforcement of reinforcement \varnothing 6 mm class A 240.

Concreting was performed with ready-made industrial concrete class C 25/30 on the construction site.

In order to determine the stress-strain state of the concrete of the average height of the damaged section of the columns on the concrete were glued (along the contour) electrotensor resistors with a base of 50 mm with an electrical resistance of 120 Ohms.

Testing of damaged columns for short-term compressive load was carried out on a 500-ton hydraulic press type 2PG-500 № 37 (Armavir), scale on 200 tons, the price of 666 kg in the laboratory of the Department of Reinforced Concrete Structures and Transport Structures of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture .

The **third section** of the dissertation is devoted to the analysis of the obtained experimental data. Namely, it considers the influence of selected factors on the residual bearing capacity of damaged compressed structures.

One of the following factors was considered to be the criterion of destruction of test beams: significant deformations of concrete and reinforcement, excessive crack opening width, excessive deflections of the column and significant drop and subsequent inability to accept the load (pressure drop in the hydraulic system).

In the middle (height) section of the prototype along the contour were glued strain gages on the concrete surface. This made it possible to determine the magnitude of the relative deformations of the concrete at each load stage.

The analysis showed that increasing the area of damage leads to an increase in the eccentricity of the application of compressive force.

Depending on the initial eccentricity of the application of compressive force and the additional eccentricity that occurs in the cross section with the damage, the accepted parameters of the variables can be two types of stress-strain state:

- the first stress-strain state, when the entire cross-section under study is compressed;

- the second stress-strain state, when the compressed part of the cross section of the cross section appears. At the beginning of the loading process to the level of $N/N_p=0,3$) there is almost elastic work of concrete. With increasing load, the plastic component of deformation of concrete is increasingly manifested, as evidenced by the curvature of the deformation curve. The described nature of deformation is obtained for both compressed and stretched concrete, but for the latter – to a lesser extent.

During the loading process, the appearance and development of normal cracks in the stretched zone of concrete was observed in the experimental samples. In experimental columns with relatively small eccentricities, longitudinal cracks were formed in the most compressed cross-sectional area of the damaged columns almost before destruction. The reason for the appearance of such cracks is the beginning of the destruction of the concrete mass from compression.

In columns there was a protrusion of the most compressed longitudinal working armature. Premature protrusion of the reinforcement was facilitated by the lack of concrete in the area of damage, as a support for the working rods.

The results of the study of the residual bearing capacity of the damaged section and the corresponding calculation in the PC LIRA CAD does not give a sufficiently accurate calculation result, i.e. when performing a simple algorithm it is not possible to obtain destructive efforts to make further decisions about the damaged element. The coefficient of variation of the deviation of theoretical values from experimental ones is 0,444.

Analysis of experimental-statistical models (COMPEX) showed that the columns can withstand the maximum destructive load at an angle of inclination of the damage front 60° , the minimum depth of damage and in the absence of relative eccentricity. And the least destructive load of the column can withstand the absence of the angle of the damage front, the maximum depth of damage and the maximum relative eccentricity of the applied load.

The **fourth section** of the dissertation presents the theoretical foundations and prerequisites for creating an engineering method for calculating the residual bearing capacity of compressed damaged reinforced concrete elements of I-beam cross section.

The main prerequisites for the calculation:

1. We accept the hypothesis of flat sections.
2. The stresses in the compressed zone are evenly distributed with intensity

ηf_{cd} .

3. Stresses in the reinforcement are accepted depending on the height of the compressed zone of concrete. The forces in the stretched zone are perceived by the reinforcement and are not greater than the calculated tensile resistance f_t .

4. The work of stretched concrete is not taken into account.

5. We accept the condition of parallelism of force planes: the plane of action of external and internal forces coincide or are parallel depending on a settlement case.

6. We take into account the exposure of the reinforcing bars σ_{kp} .

7. The concepts of direct damage and damage at an angle are introduced, which correspond to the cases of calculation, the front of the damage has a rectilinear shape.

An algorithm for calculating damaged compressed and obliquely compressed elements has been created, thanks to which it is possible to find unknown quantities.

The **fifth section** of the dissertation provides a detailed example of the calculation of one of the tested columns. The results of the comparison indicate a satisfactory coincidence of the theoretical values with the values obtained in the field experiment (discrepancy on average not more than 12,2%). This means that the method can be applied in construction practice.

The results obtained in this research work are implemented in the practice of design and operation of buildings, as well as used in the educational process of higher education institutions.

Key words: reinforced concrete columns, I-beam cross-section, residual bearing capacity, damage during operation, bare reinforcing bars.