

АНОТАЦІЯ

Єсванджия В.Ю. Посилення балкових елементів, пошкоджених під час бойових дій, з використанням фібробетону. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, 2024.

Дисертаційне дослідження присвячене вивченню несучої здатності, деформативності та тріщиностійкості пошкоджених залізобетонних балкових елементів, підсилених сталеві фібробетоном.

У **вступі** 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.

У **першому розділі** дисертації представлений детальний огляд та аналіз існуючої нормативної бази з методів розрахунку та підсилення залізобетонних балок. Особливу увагу приділено розгляду існуючих нормативних документів України і пропонованих у них методів підсилення пошкоджених балок. Зазначено, що на даний час в Україні є майже один основний нормативний документ, який регламентує ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій, який поширюється на проектування, виконання і приймання робіт з ремонту і підсилення несучих і огорожувальних бетонних, залізобетонних, кам'яних, армокам'яних, сталевих і дерев'яних конструкцій і фундаментів, а також основ будівель і споруд, в тому числі в особливих умовах експлуатації..

Підсиленням залізобетонних балок займалися багато вчених, як нашої країни, так і закордонних — А.Б. Барашиков, Є.М. Блалі, З.Я. Бліхарський, О. П. Борисюк, Б.А. Боярчук, М.О. Валовой, Д.І. Дубіжанський, Ю.Ю. Зятюк,

І.В. Задорожнікова, І.В. Мельник, Д.В. Попруга, Л.В. Потієнко, Я.В. Римар, А.К. Салех, С.Д. Семенюк, О.П. Сунак та інші.

Сучасні дослідження характеризуються застосуванням нових високоефективних будівельних матеріалів, таких як міцні бетони, сталеві фібробетон, полімербетон, базальтобетон. Широко застосовується композитна арматура на основі арамідних, скляних та вуглецевих волокон. Але робота, присвячена підсиленню балок сталеві фібробетоном дуже мало.

Різноманітність методів посилення конструкцій та, зокрема, балок, зумовлює різні підходи до теоретичних розрахунків посилень. Наприклад, посилення зони ушкодження фібробетоном можна уявити математичною моделлю тіла з включенням. А посилення з використанням полімерів, армованих вуглецевим волокном, це вже завдання механіки композитів.

Складність математичних моделей посилень призводить до того, що теоретичні розрахунки посилень пошкоджених конструкцій частіше виконують чисельними методами. Це метод скінчених різниць або (частіше) метод скінчених елементів з моделюванням та реалізацією алгоритму у сучасних інженерних програмах.

Виконаний огляд приводить до висновку про те, що вивчення параметрів напружено-деформованого стану пошкоджених залізобетонних балок, підсилених сталеві фібробетоном, є актуальною проблемою.

У **другому розділі** роботи описуються експериментальні дослідження пошкоджених балок, посилених фібробетоном, виконані безпосередньо автором роботи.

Відповідно до програми досліджень несучої здатності, деформативності та тріщиностійкості пошкоджених залізобетонних балок, підсилених сталеві фібробетоном на кафедрах будівельної механіки та опору матеріалів було розроблено спеціальний стенд. Плоско-поперечний вигин навантаження випробовуваної балки створюється за допомогою гідравлічного домкрата і металевої балки двотаврової траверсою, що передає на балку дві рівні

зосереджені сили. Навантаження, що створюється, контролюється зразковим динамометром системи Токаря і кільцевим динамометром, що виконує роль опори.

У процесі випробувань фіксувалося навантаження, що передається на балку, прогини та деформації. Виконано дослідження серії балок із різним характером ушкоджень. Варіювалася зона пошкодження (розтягнута та стиснута), геометрія зони пошкодження та спосіб посилення. Дослідження проводили на балках прямокутного перерізу розмірами 200x120мм, армованих двома вертикальними каркасами.

Досліджувані зразки балок були розподілені на три групи. У першій групі пошкоджено стиснуту зону, у другій та третій — розтягнуту. Зразки кожної групи з відповідним пошкодженням виготовлялися одночасно, і додатково до кожної групи додавалася непошкоджена балка. Крім того, виготовлялися призми та куби з метою визначення фізико-механічних властивостей матеріалу цих зразків. Для виготовлення зразків матеріалу при замішуванні бетонної маси рівномірно додавалася фібра, загальний обсяг якої становив 2% обсягу самого виробу.

За результатами експериментальних досліджень призм побудовано діаграму деформування бетону, графіки зміни відносних лінійних деформацій фібробетону, а також графіки, що відображують порівняння характеру деформування бетону та фібробетону. Випробування зразків матеріалів показали, що введення до складу бетону сталевого фібрового волокна у кількості 2 % за обсягом збільшує межу міцності на стиск на 15,3%. Початковий модуль пружності фібробетону означеної суміші на 38,0% вище, ніж у звичайного бетону такого складу.

Дослідні зразки балок випробовували на дію одноразового короткочасного ступінчасто зростаючого навантаження до руйнування або досягнення граничного стану, коли ширина розкриття похилих тріщин і стріла прогинів перевищували допустимі значення. Критеріями руйнування дослідних зразків було також досягнення граничних значень деформацій в

бетоні або арматурі, надмірно велике розкриття похилих або нормальних тріщин, істотне збільшення стріли прогину балки-зразка, відсутність збільшення або падіння показів манометра насосної станції силової установки.

Третій розділ дисертації присвячений результатам дослідження несучої здатності та тріщиностійкості пошкоджених балок, посилені фібробетоном.

Спочатку за різними існуючими методиками було визначено теоретичне значення несучої здатності залізобетонної балки без ушкоджень, а потім її несучу здатність визначили експериментально. За результатами побудовано графік зміни прогинів під дією навантаження, що зростає, графіки залежності відносної поздовжньої деформації від навантаження для лівої та правої опорних частин балки, а також для зони її чистого згину.

На наступному етапі досліджень було визначено несучу здатність трьох груп посилені балок. Перша група складалася з трьох зразків, що мали пошкодження стиснутої зони; у другій групі було два зразки з пошкодженнями у розтягнутій зоні. Третя група — лише один зразок також з пошкодженням розтягнутої зони, але тут було комбіноване підсилення — фібробетон та у зоні чистого вигину підсилення обоймою з кутика 30х30х3.

Окрім несучої здатності, для кожного зразка визначені прогини та відносні поздовжні деформації.

Одночасно було досліджено тріщиноутворення у непошкодженій балці та у пошкоджених балках, посилені фібробетоном, фіксувалося навантаження, при якому утворилася перша тріщина, загальна кількість тріщин, початкова та кінцева ширина розкриття кожної з них.

Підкреслюється, що за винятком першого посиленого зразка, в усіх випадках спостерігалось утворення тріщин переважно у зонах зрізу, а руйнування усіх зразків відбувалось за похилими перерізами.

В четвертому розділі дисертаційної роботи розглядалось комп'ютерне моделювання та скінчено-елементний аналіз пошкоджених балок.

Незважаючи на те, що всі програмні комплекси реалізують метод скінчених елементів, процес розв'язання задачі в кожному з них має свої

особливості, які незначно, але все ж таки впливають на результат. По-перше, в різних програмах задіяні різні скінчені елементи; по-друге, відрізняються процеси побудови скінчено-елементної сітки и, як наслідок, кількість скінчених елементів при однаковій геометричній моделі конструкції. У зв'язку з цим для комп'ютерного моделювання пошкоджених балок та визначення їх напружено-деформованого стану після підсилення різними методами в роботі використані три програмних комплекси — SOFiSTiK, Autodesk Robot Structural Analysis та ЛПА-САПР.

Отримані результати порівнюються один з одним та з результатами експериментальних досліджень.

У **п'ятому розділі** розглядаються результати експериментальних досліджень підсилення пошкоджених балок з підвищеним армуванням.

Аналіз результатів підсилення пошкоджених балок, наведений у попередніх розділах, показав ефективність застосованих способів посилення. Але руйнування усіх шести випробуваних зразків проходило за похилими перерізами у приопорній зоні. Тріщиноутворення в області підсилення майже не спостерігалось, що робило неможливим відслідкувати характер руйнування балки безпосередньо у підсиленій зоні. У зв'язку з цим було прийняте рішення провести додаткові випробування пошкоджених балок, але з підвищеним їхнім армуванням стрижневою арматурою. У зоні прольоту зрізу все поперечне армування було виконано стрижнями А240 Ø6 мм з кроком 44 мм. Крім того, у першій серії випробувань ці стрижні були з'єднані з поздовжньою арматурою в'язальним дротом, а в новій серії з'єднані зварюванням.

Досліджувані три зразки пошкоджених балок з оновленим армуванням: один з пошкодженням 40 % перерізу у стиснутій зоні; один з пошкодженням 40 % перерізу у розтягнутій зоні. Обидва ці зразка були посилені у зоні пошкодження тільки фібробетоном. Третій зразок також мав пошкодження 40 % перерізу у розтягнутій зоні, крім того, тут була розірвана поздовжня арматура та прилеглі до неї хомути. При ремонті пошкодження поздовжню арматуру з'єднали зварюванням таким же стрижнем А400 Ø12 мм, але хомути

не відновлювали, а використовували комбіноване посилення — фібробетоном та додатково сталеву обіймою з кутика 30x30x3 мм

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: балка, пошкодження, посилення, бетон, фібробетон, зразок, випробування, несуча здатність, тріщиностійкість, комп'ютерне моделювання.

ABSTRACT

Yesvandzhyia V. Yu. Reinforcement of beam elements damaged during hostilities using fiber concrete.

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, 2024.

The dissertation study is devoted to the study of the load-bearing capacity, deformability and crack resistance of damaged reinforced concrete beam elements reinforced with steel fiber concrete.

In the **introduction**, the justification for the choice of the research topic is given, the purpose and tasks of the research, scientific novelty and practical significance of the work are formulated, its general characteristics and connection with scientific programs are presented.

The **first chapter** of the thesis presents a detailed review and analysis of the existing regulatory framework on methods of calculation and reinforcement of reinforced concrete beams. Special attention is paid to the consideration of the existing normative documents of Ukraine and the methods proposed in them for strengthening damaged beams. It is noted that currently in Ukraine there is almost one main normative document that regulates the repair and strengthening of load-bearing and enclosing building structures, which applies to the design, execution and acceptance of repair and strengthening of load-bearing and enclosing concrete, reinforced concrete, stone, reinforced stone, steel and wooden structures and foundations, as well as foundations of buildings and structures, including in special operating conditions.

Reinforcement of reinforced concrete beams was carried out by many scientists, both from our country and from abroad — A.B. Barashikov, E.M. Blali, Z.Ya. Bliharzkyi, O.P. Borysyuk, B.A. Boyarchuk, M.O. Valovoi, D.I.

Dubizhanskyi, Yu.Yu. Zyatuk, I.V. Zadorozhnikova, I.V. Melnyk, D.V. Popruga, L.V. Potienko, Ya.V. Rymar, A.K. Saleh, S.D. Semenyuk, O.P. Sunak and others.

Modern research is characterized by the use of new highly effective building materials, such as strong concrete, steel fiber concrete, polymer concrete, basalt concrete. Composite fittings based on aramid, glass and carbon fibers are widely used. But there are very few robots dedicated to reinforcing beams with steel-reinforced concrete.

The variety of methods of strengthening structures and, in particular, beams, leads to different approaches to theoretical calculations of reinforcements. For example, reinforcement of the damage zone with fiber concrete can be represented by a mathematical model of the body with an inclusion. And strengthening with the use of polymers reinforced with carbon fiber is already a task of the mechanics of composites.

The complexity of mathematical models of reinforcements leads to the fact that theoretical calculations of reinforcements of damaged structures are often performed using numerical methods. This is the finite difference method or (more often) the finite element method with modeling and implementation of the algorithm in modern engineering programs.

The performed review leads to the conclusion that studying the parameters of the stress-strain state of damaged reinforced concrete beams reinforced with steel fiber concrete is an urgent problem.

The **second section** of the work describes experimental studies of damaged beams reinforced with fiber concrete, performed directly by the author of the work.

In accordance with the research program of the load-bearing capacity, deformability and crack resistance of damaged reinforced concrete beams reinforced with steel fiber concrete, a special stand was developed at the departments of construction mechanics and resistance of materials. The flat transverse bending of the load of the tested beam is created with the help of a hydraulic jack and a metal beam with a two-beam traverse, which transmits two equal concentrated forces to

the beam. The load created is controlled by a sample dynamometer of the Tokar system and a ring dynamometer that acts as a support.

During the tests, the load transmitted to the beam, deflections and deformations were recorded. A study of a series of beams with different types of damage was carried out. The damage zone (stretched and compressed), the geometry of the damage zone and the method of strengthening were varied. The research was carried out on beams of rectangular cross-section with dimensions of 200x120 mm, reinforced with two vertical frames.

The studied beam samples were divided into three groups. In the first group, the compressed zone was damaged, in the second and third - the stretched zone. Specimens of each group with corresponding damage were produced simultaneously, and an undamaged beam was additionally added to each group. In addition, prisms and cubes were made in order to determine the physical and mechanical properties of the material of these samples. For the production of material samples, when mixing the concrete mass, fiber was uniformly added, the total volume of which was 2% of the volume of the product itself.

According to the results of experimental studies of prisms, a diagram of concrete deformation, graphs of changes in relative linear deformations of fiber concrete, as well as graphs showing a comparison of the nature of deformation of concrete and fiber concrete were constructed. Tests of material samples showed that the introduction of steel fiber into the composition of concrete in the amount of 2% by volume increases the compressive strength limit by 15.3%. The initial modulus of elasticity of fiber concrete of the specified mixture is 38.0% higher than that of ordinary concrete of this composition.

Test samples of the beams were tested for the effect of a one-time short-term gradually increasing load until destruction or reaching the limit state, when the opening width of inclined cracks and the arrow of deflections exceeded the permissible values. The criteria for the failure of the test samples were also the achievement of the limit values of deformations in concrete or reinforcement, excessively large opening of inclined or normal cracks, a significant increase in the

deflection of the sample beam, no increase or decrease in the readings of the pressure gauge of the pumping station of the power plant.

The **third chapter** of the dissertation is devoted to the results of the study of the load-bearing capacity and crack resistance of damaged beams reinforced with fiber concrete.

First, the theoretical value of the load-bearing capacity of a reinforced concrete beam without damage was determined using various existing methods, and then its load-bearing capacity was determined experimentally. Based on the results, a graph of the change in deflections under the influence of an increasing load, graphs of the dependence of the relative longitudinal deformation on the load for the left and right supporting parts of the beam, as well as for the zone of its net bending, was constructed. At the next stage of research, the bearing capacity of three groups of reinforced beams was determined. The first group consisted of three samples with compression zone damage; the second group had two samples with damage in the stretched zone. The third group is only one sample also with damage in the stretched zone, but here there was a combined reinforcement - fiber concrete and in the zone of clean bending reinforcement with a clip from the corner 30x30x3. In addition to the bearing capacity, deflections and relative longitudinal deformations are determined for each sample.

At the same time, crack formation in the undamaged beam and in the damaged beams reinforced with fiber concrete was investigated, the load at which the first crack formed, the total number of cracks, and the initial and final opening width of each of them were recorded. It is emphasized that, with the exception of the first reinforced sample, in all cases the formation of cracks was observed mainly in the shear zones, and the destruction of all samples occurred along inclined sections.

In the **fourth chapter** of the dissertation, computer modeling and finite element analysis of damaged beams were considered. Despite the fact that all software complexes implement the method of finite elements, the process of solving the problem in each of them has its own peculiarities, which slightly but still affect the result. First, different finite elements are involved in different programs; secondly,

the processes of constructing a finite-element mesh and, as a result, the number of finite elements with the same geometric model of the structure are different. In this regard, for computer modeling of damaged beams and determination of their stress-strain state after strengthening by various methods, three software complexes were used in the work — SOFiSTiK, Autodesk Robot Structural Analysis and LIRA-SAPR. The obtained results are compared with each other and with the results of experimental studies.

The **fifth chapter** examines the results of experimental studies of strengthening damaged beams with increased reinforcement.

The analysis of the results of the strengthening of damaged beams, given in the previous sections, showed the effectiveness of the applied strengthening methods. But the destruction of all six tested samples took place along inclined sections in the support zone. Crack formation in the reinforcement area was almost not observed, which made it impossible to monitor the nature of the beam's destruction directly in the reinforced area. In this regard, it was decided to conduct additional tests of the damaged beams, but with increased reinforcement of them with rod reinforcement. In the section span area, all transverse reinforcement was made with A240 mm rods with a step of 44 mm. In addition, in the first series of tests, these rods were connected to the longitudinal reinforcement by knitting wire, and in the new series they were connected by welding.

Three samples of damaged beams with renewed reinforcement are studied: one with damage of 40% of the section in the compressed zone; one with 40% cross-sectional damage in the stretched zone. Both of these samples were reinforced in the damage zone only with fiber concrete. The third sample also had damage of 40% of the section in the stretched zone, in addition, the longitudinal reinforcement and adjacent clamps were torn. When repairing the damage, the longitudinal reinforcement was connected by welding with the same A400 mm rod, but the

clamps were not restored, but combined reinforcement was used — with fiber concrete and additionally with a steel bracket from a corner of 30x30x3 mm.

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

Keywords: beam, damage, strengthening, concrete, fiber concrete, specimen, test, bearing capacity, crack resistance, computer simulation.