

АНОТАЦІЯ

Вигнанець М.М. Тріщиностійкість, деформативність та несуча здатність балкових фібробетонних конструкцій. 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 тріщиностійкості, деформативності та несучої здатності балкових фібробетонних конструкцій при дії короткочасних та тривалих навантажень.

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 коротко наведено історію виникнення фібробетону, встановлено галузі його раціонального застосування. Виконано огляд робіт стосовно досліджень сталеві фібробетону та сталеві фібробетонних конструкцій. Проаналізовано нормативну базу України та закордонних країн з розрахунку сталеві фібробетонних конструкцій. Особливу увагу приділено розгляду існуючих нормативних документів України і пропонованих у них методів розрахунку.

Результати досліджень конструкцій на основі сталеві фібробетону базуються на роботах І.М. Ахвердова, Ю.М. Баженова, Н.І. Карпенка і багатьох інших дослідників бетону і конструкцій на його основі. Що ж стосується робіт, безпосередньо присвячених вивченню роботи сталеві фібробетонних конструкцій, то їх явно недостатньо. Зазвичай, в дослідженнях окремо проводяться роботи щодо покращення властивостей матеріалу, і окремо виконується вдосконалення конструкцій за рахунок застосування СФБ, часто, без взаємозв'язку з їх статичною та динамічною роботою. Однак, в нормативних документах немає чітких вказівок щодо

вибору вихідних даних при проектуванні і виготовленні СФБК (СФЗБК), ні в частині вибору матеріалів і технологій, ні в питаннях, пов'язаних з вимогами, що пред'являються до конкретної конструкції. У зв'язку з цим складно очікувати повноцінної реалізації можливості підвищення техніко-економічних показників конструкцій на основі СФБ. Мабуть, це і є однією з причин того, що навіть на сьогоднішній день вони не знайшли гідного практичного застосування у вітчизняному будівництві.

Виконаний огляд приводить до висновку про те, що дослідження тріщиностійкості, деформативності та несучої здатності фібробетонних конструкцій, зокрема, балкових, є **актуальною** проблемою.

У **другому розділі** роботи описуються виконані авторкою експериментальні дослідження механічних властивостей сталеві фібробетону.

Наведені властивості сталеві фібри, аналіз впливу її геометрії на властивості сталеві фібробетонних конструкцій. Підкреслюється, що не завжди раціональні параметри фібрового армування, що були підібрані теоретично, забезпечать задані фізико-механічні характеристики конструкції на основі СФБ при дотриманні співвідношення «ціна-якість». Але дослідження структури СФБ дають змогу зрозуміти процеси, що відбуваються в матеріалі під впливом навантажень, а також перспективи та напрямки їх розвитку.

Проведені в роботі експериментальні дослідження включали в себе три етапи. Метою першого етапу було визначення оптимальних характеристик сталеві фібробетонної суміші. Обробка результатів першого етапу випробувань показала, що оптимальними характеристиками фібробетонної суміші є матриця з крупним заповнювачем 10 мм (при цьому кубикова міцність була значно вища, ніж при розмірі щебеню 20 мм, у всіх серіях дослідів) при 1,0% фібрового армування, оскільки при вищому відсотку фібрового армування збільшення кубикової міцності виявилось неістотним. Такий склад суміші і був прийнятий для проведення другого етапу випробувань. На другому етапі визначена кубикова та призмova міцність фібробетону, досліджений характер їх зміни з плином часу, визначені початковий модуль пружності і модуль

деформацій при короткочасному та тривалому навантаженні. І на 3 етапі призми довантажували до руйнування в силових стендах без попереднього розвантаження.

З аналізу результатів випливає: всі без винятку зразки, що перебували понад рік під дією довготривалого навантаження збільшили свою несучу здатність. Чим вище рівень довготривалого навантаження, тим більше ущільнюється бетон і, звісно, вища його тривала міцність. Встановлено, що призми із фібробетону, що знаходилися протягом 370 діб під дією тривалого навантаження, збільшили несучу здатність на 30-50% в залежності від рівня навантаження. Чим вище рівень навантаження, тим вища тривала міцність. Проведені дослідження показали, що, в порівнянні зі звичайним бетоном, структура фібробетону характеризується меншою кількістю великих пор і більш високою однорідністю. Як відомо, в звичайному бетоні утворюються контактні зони міжфазного шару з поліпшеними механічними властивостями. В фібробетоні ці зони опинилися в 5 - 6 раз більше, а їх загальна кількість збільшилась. Очевидно, це призводить до підвищення фізико-механічних характеристик матеріалу в цілому. Крім того, довільно орієнтована в зразку сталева фібра перерозподіляє градієнти напружень, що виникають під навантаженням, в результаті чого знижується концентрація напружень.

Аналіз результатів показав, що для практичного застосування можна рекомендувати аналітичну залежність, яка пов'язує міцність фібробетону і його вік, у вигляді поліному четвертої ступені, оскільки в цьому випадку коефіцієнт детермінації буде максимальним при всіх досліджених рівнях навантаження зразків фібробетону.

Третій розділ дисертації присвячений дослідженню несучої здатності балок при короткочасних навантаженнях. Теоретична несуча здатність залізобетонних балок за нормальними перерізами визначена за кількома існуючими методиками — з використанням діаграми деформування бетону у вигляді поліному п'ятої ступені; з використанням діаграми деформування

бетону у вигляді дробно-раціональної функції; з використанням спрощеної дволінійної діаграми деформування бетону. Визначена також теоретична несуча здатність залізобетонних балок за похилими перерізами. І, нарешті, визначена теоретична несуча здатність фібробетонних балок за нормальними та похилими перерізами. Підкреслюється, щодо рекомендації її визначення є в попередній редакції ДСТУ і чомусь відсутні у чинних нормах. В той же час такі рекомендації дають нормативні документи Європи, США та більшості провідних країн світу.

Наступна частина третього розділу присвячена експериментальним дослідженням несучої здатності балок, що були проведені авторкою роботи. На кожному етапі дослідження випробовувалися три серії балок різного виду (по три однакових зразки у кожній серії): І серія — балки із звичайного бетону; ІІ серія — балки зі сталевібробетону; ІІІ серія — балки комбінованого перерізу, у яких нижня (розтягнута) зона, яка дорівнює половині поперечного перерізу балки, виготовлена зі сталевібробетону, а верхня (стиснута) — зі звичайного бетону. У склад бетонної маси для ІІ та ІІІ серій зразків при замішуванні рівномірно додавалася фібра, загальний обсяг якої становив 1%.

На завершення розділу наведений порівняльний аналіз виконаних теоретичних та експериментальних досліджень.

В четвертому розділі дисертаційної роботи розглядалася деформативність та тріщиностійкість залізобетонних, фібробетонних та комбінованих балок при короткочасних навантаженнях. Виконаний теоретичний розрахунок балок за утворенням та розкриттям тріщин, визначений момент тріщиноутворення та ширина розкриття тріщин в нормальних перерізах.

Визначені прогини балок виходячи з чинних норм України та згідно з європейським стандартом Єврокод-2. Наведено методику та результати експериментальних досліджень прогинів при короткочасному навантаженні. У процесі випробування балок при короткочасному та довготривалому

навантаженні фіксували прогини, деформації окремих волокон бетону і навантаження, що прикладалось до зразка. Деформації вимірювали за допомогою тензорезисторів з базою 50 мм, які були наклеєні в зоні чистого згину в характерних точках по висоті перерізу балки. Крім тензорезисторів, деформації на тих же рівнях вимірювали за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм з базою 25 см.

З отриманих результатів випливає, що на початкових стадіях короткочасного навантаження прогини у всіх трьох балках ростуть за лінійною залежністю. Коли навантаження досягає рівня 20÷30 кН, спостерігається нелінійний характер. У балці I серії нелінійність починається дещо раніше і виражена чіткіше. За час навантаження прогини в балках I серії в 1,8 рази вищі, ніж у балках II серії.

Наведені також результати експериментальних досліджень тріщиностійкості трьох типів балок при короткочасному навантаженні.

У **п'ятому розділі** розглядається несуча здатність та тріщиностійкість залізобетонних, фібробетонних та комбінованих балок при тривалих навантаженнях. Розглянуто теоретичні аспекти визначення несучої здатності та тріщиностійкості балок при тривалих навантаженнях і результати їх експериментальних досліджень під навантаженням протягом 370 діб. Балка зі звичайного бетону в процесі тривалого навантаження знизилася свою несучу здатність на 5,5%. Сталефібробетонна балка підвищила несучу здатність із 75 кН до 80,7 кН, тобто на 7,6%. Встановлено, що стабілізація прогинів у балках II серії настає значно раніше (100 діб), ніж у балках I серії (175 діб). Прогини за час тривалого навантаження в балках всіх трьох серій зросли на (29÷34)%. На момент повторного навантаження склали: бетонна балка (I серія) – 1,07 см, комбінована (III серія) – 0,68 см та сталефібробетонна (II серія) – 0,6 см.

Ретельно досліджено тріщиностійкість балок всіх трьох серій з вимірюванням ширини розкриття тріщин та якісним і кількісним аналізом характеру їх утворення та розташування.

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

Ключові слова: балка, бетон, фібробетон, зразок, випробування, несуча здатність, тріщиностійкість, деформативність, прогин.

ABSTRACT

Vyhnanets M. M. Crack resistance, deformability and bearing capacity of beam fiber concrete structures.

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 crack resistance, deformability and load-bearing capacity of beam fiber concrete structures under the action of short-term and long-term loads.

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.

In the **first** chapter of the dissertation, the history of the appearance of fiber concrete is briefly given, and the areas of its rational application are established. A review of works related to the research of steel fiber concrete and steel fiber concrete structures was carried out. The regulatory framework of Ukraine and foreign countries for the calculation of steel-reinforced concrete structures has been analyzed. Special attention is paid to the consideration of the existing normative documents of Ukraine and the methods of calculation proposed in them.

The results of research on structures based on steel-reinforced concrete are based on the works of I.M. Akhverdova, Yu.M. Bazhenova, N.I. Karpenka and many other researchers of concrete and structures based on it. As for the works directly devoted to the study of the operation of steel-reinforced concrete

structures, they are clearly not enough. Usually, in research, work is carried out separately to improve the properties of the material, and the improvement of structures due to the use of SFB is carried out separately, often without interaction with their static and dynamic work. However, there are no clear instructions in the regulatory documents regarding the selection of initial data in the design and manufacture of the SFBC (SFBC), neither in terms of the choice of materials and technologies, nor in matters related to the requirements for a specific design. In this regard, it is difficult to expect full implementation of the possibility of increasing the technical and economic indicators of structures based on SFB. Perhaps, this is one of the reasons that even today they have not found a worthy practical application in domestic construction.

The performed review leads to the conclusion that the study of crack resistance, deformability and load-bearing capacity of fiber concrete structures, in particular, beam structures, is an urgent problem.

The **second** chapter of the work describes the author's experimental studies of the mechanical properties of steel fiber concrete.

The properties of steel fiber, the analysis of the influence of its geometry on the properties of steel fiber concrete structures are given. It is emphasized that not always the rational parameters of fiber reinforcement, which were selected theoretically, will provide the specified physical and mechanical characteristics of the structure based on SFB while maintaining the "price-quality" ratio. But the research of the structure of SFB makes it possible to understand the processes occurring in the material under the influence of loads, as well as the prospects and directions of their development.

The experimental studies carried out in the work included three stages. The purpose of the first stage was to determine the optimal characteristics of the steel fiber concrete mixture. The processing of the results of the first stage of the tests showed that the optimal characteristics of the fiber concrete mixture is a matrix with a coarse aggregate of 10 mm (at the same time, the cube strength was significantly higher than with a crushed stone size of 10 mm, in all series of

experiments) with 1.0% fiber reinforcement, because at a higher percentage of fiber reinforcement, the increase in cubic strength turned out to be insignificant. This composition of the mixture was adopted for the second stage of testing. At the second stage, the cubic and prismatic strength of fiber concrete was determined, the nature of their changes over time was investigated, the initial modulus of elasticity and the modulus of deformations under short-term and long-term loading were determined. And at the 3rd stage, the prisms were loaded to the point of failure in force stands without prior unloading.

From the analysis of the results, it follows: without exception, all the samples that were under long-term load for more than a year increased their bearing capacity. The higher the level of long-term load, the more concrete is compacted and, of course, its long-term strength is higher. It was established that the prisms made of fiber concrete, which were under the action of a long-term load for 370 days, increased the load-bearing capacity by 30-50%, depending on the level of load. The higher the load level, the higher the long-term strength. The conducted studies showed that, in comparison with ordinary concrete, the structure of fiber concrete is characterized by a smaller number of large pores and higher uniformity. As is known, contact zones of the interphase layer with improved mechanical properties are formed in ordinary concrete. In fiber concrete, these zones were 5-6 times larger, and their total number increased. Obviously, this leads to an increase in the physical and mechanical characteristics of the material as a whole. In addition, arbitrarily oriented steel fiber in the sample redistributes the stress gradients arising under the load, as a result of which the stress concentration is reduced.

The analysis of the results showed that for practical application it is possible to recommend the analytical dependence that connects the strength of fiber concrete and its age in the form of a polynomial of the fourth degree, since in this case the coefficient of determination will be maximum at all investigated load levels of fiber concrete samples.

The **third** chapter of the dissertation is devoted to the study of the load-bearing capacity of beams under short-term loads. The theoretical bearing capacity of reinforced concrete beams with normal cross-sections is determined by several existing methods - using a concrete deformation diagram in the form of a fifth-degree polynomial; using the concrete deformation diagram in the form of a fractional-rational function; using a simplified two-line diagram of concrete deformation. The theoretical bearing capacity of reinforced concrete beams along inclined sections is also determined. And, finally, the theoretical bearing capacity of fiber concrete beams according to normal and inclined sections is determined. It is emphasized that regarding the recommendation, its definition is in the previous version of the DSTU and for some reason is not in the current regulations. At the same time, such recommendations are given by normative documents of Europe, the USA and most of the leading countries of the world.

The next part of the third chapter is devoted to experimental studies of the load-bearing capacity of beams, which were carried out by the author of the work. At each stage of the research, three series of beams of different types were tested (three identical samples in each series): Series I - beams made of ordinary concrete; II series - steel-reinforced concrete beams; III series - beams of combined cross-section, in which the lower (stretched) zone, which is equal to half of the cross-section of the beam, is made of steel fiber concrete, and the upper (compressed) zone is made of ordinary concrete. Fiber, the total volume of which was 1%, was uniformly added to the composition of the concrete mass for the II and III series of samples during mixing.

At the end of the chapter, a comparative analysis of the performed theoretical and experimental studies is given.

In the **fourth** chapter of the dissertation, the deformability and crack resistance of reinforced concrete, fiber concrete and combined beams under short-term loads were considered. The theoretical calculation of the beams according to the formation and opening of cracks was performed, the moment of crack formation and the width of the crack opening in normal sections were determined.

Deflections of the beams are determined based on the current norms of Ukraine and in accordance with the European standard Eurocode-2. The methodology and results of experimental studies of deflections under short-term loading are presented. In the process of testing the beams under short-term and long-term loading, deflections, deformations of individual concrete fibers and the load applied to the sample were recorded. Deformations were measured using strain gauges with a base of 50 mm, which were glued in the zone of pure bending at characteristic points along the cross-section height of the beam. In addition to strain gauges, deformations at the same levels were measured using watch-type indicators with a division price of 0.01 mm with a base of 25 cm.

The obtained results show that in the initial stages of loading, the deflections in all three beams grow linearly. When the load reaches the level of 20÷30 kN, a nonlinear character is observed. In the beam of the I series, the nonlinearity begins somewhat earlier and is more clearly expressed. During the load, the deflections in beams of the I series are 1.8 times higher than in the beams of the II series.

The results of experimental studies of crack resistance of three types of beams under short-term loading are also presented.

The **fifth** chapter examines the bearing capacity and crack resistance of reinforced concrete, fiber concrete and combined beams under long-term loads. The theoretical aspects of determining the load-bearing capacity and crack resistance of beams under long-term loads and the results of their experimental studies under load for 370 days are considered. A beam made of ordinary concrete during long-term loading reduced its load-bearing capacity by 5.5%. The steel-reinforced concrete beam increased its bearing capacity from 75 kN to 80.7 kN, i.e. by 7.6%. It was established that stabilization of deflections in beams of the II series occurs much earlier (100 days) than in beams of the I series (175 days). Deflections during long-term loading in the beams of all three series increased by (29÷34)%. At the time of repeated loading, they were: concrete beam (I series) – 1.07 cm, combined (III series) – 0.68 cm and steel fiber concrete (II series) – 0.6 cm.

The crack resistance of the beams of all three series was thoroughly investigated with the measurement of the crack opening width and qualitative and quantitative analysis of the nature of their formation and location.

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, concrete, fiber concrete, sample, test, bearing capacity, crack resistance, deformability, deflection.