

АНОТАЦІЯ

Метлицький В. В. Несуча здатність та тріщиностійкість фібробетонних циліндричних оболонок.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, 2025.

Дисертаційне дослідження присвячене підвищенню несучої здатності та тріщиностійкості залізобетонних довгих циліндричних оболонок шляхом їх додаткового дисперсного армування сталевую фіброю.

У **вступі** роботи приведені 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 існуючих досліджень стосовно основних методів аналізу роботи довгих циліндричних оболонок. Особливу увагу приділено питанням міцності та тріщиностійкості залізобетонних та фібробетонних циліндричних оболонок. Результати досліджень конструкцій на основі сталеві фібробетону базуються на роботах І.М. Ахвердова, Ю.М. Баженова, Н.І. Карпенка та багатьох інших дослідників.

В ході літературного аналізу встановлено, що у сучасних дослідженнях частіше розглядається покращення властивостей бетону за рахунок дисперсного армування, а дослідження сталеві фібробетонних конструкцій мають швидше приватний характер, а не системний, як це має місце при дослідженні залізобетонних або металевих конструкцій. Проаналізовано нормативну базу України, Європи та США. У нормативних документах немає чітких вказівок щодо вибору матеріалів і технологій, а також щодо їх ув'язування з вимогами, що пред'являються до конкретної конструкції. Ця

обстава є однією з причин незначного застосування сталевібробетонних конструкцій, зокрема, оболонок, у будівельній практиці нашої країни.

Аналіз літератури показує, що дослідженням несучої здатності та тріщиностійкості вібробетонних довгих циліндричних оболонок надається занадто мало уваги, тому цей напрямок досліджень є **актуальним**.

У **другому розділі** роботи запропоновано метод розрахунку довгої циліндричної оболонки, підкріпленої двома однаковими бортовими елементами та навантаженої вертикальним навантаженням. Як показали натурні та лабораторні експериментальні дослідження довгих циліндричних оболонок, що зазвичай застосовуються в практиці будівництва покриттів виробничих будівель, для яких характерні опирання конструкцій по кутах, рівномірно розподілені навантаження, досить велика жорсткість поперечних ребер і контуру оболонки, взаємний вплив поперечних згинальних і нормальних сил відсутній або цей вплив настільки незначний, що для спрощення розрахунку їм можна знехтувати. Розраховувати такі оболонки можна окремо в поздовжньому, а потім у поперечному напрямку, причому в поздовжньому напрямку оболонки розраховуються як балки коритоподібного перерізу, а в поперечному — як арки (у вигляді елементарної смужки, вирізаної в межах довжини оболонки). Запропоновано аналітичний метод розрахунку довгої циліндричної оболонки, підкріпленої двома однаковими бортовими елементами прямокутного поперечного перерізу та навантаженим вертикальним навантаженням. Розглянуто випадок, коли оболонка шарнірно оперта на криволінійних краях, та надано рекомендації з обліку інших граничних умов. У випадку на форму і розміри поперечного перерізу бортового елемента не накладається жодних обмежень.

Запропонований алгоритм передбачає можливість реалізації двох підходів — розрахунок за загальною напівбезмоментною теорією та розрахунок зі спрощуючими гіпотезами для пологих оболонок середньої довжини.

У дисертаційній роботі розглянуто перший підхід. Математично завдання зводиться до системи чотирьох лінійних рівнянь. Вирішуючи цю систему, можна визначити зусилля та переміщення, зумовлені дією додаткових крайових зусиль, а складаючи їх з відповідними компонентами безмоментного напруженого стану, отримати повні зусилля та переміщення у циліндричній оболонці.

Розглянуто два окремі випадки: пологі циліндричні оболонки середньої довжини (використовуються метод сил та метод переміщень) та багатохвильові оболонки, у яких бортовий елемент навантажений крайовими зусиллями з обох боків (використовується метод сил, розглянуто симетричне та косиметричне навантаження).

Третій розділ дисертації присвячений експериментальним та чисельним дослідженням несучої здатності довгих циліндричних оболонок. Описано конструкцію спеціального стенду, який було розроблено для проведення експериментальних досліджень. Описано процес виготовлення зразків матеріалу та дослідних зразків оболонок. Викладено методику досліджень. Виготовлено 4 моделі циліндричної оболонки із залізобетону та 4 моделі із фібробетону. Всі зразки мали постійну довжину та радіус поперечного перерізу, а варіювалися товщина оболонки та розміри поперечного перерізу бортових елементів. Розподілене вертикальне навантаження було прикладене по чотирьох смугах, шириною 13 см кожна, і лише тілом оболонки, тобто бортові елементи не навантажені. Оболонка шарнірно спирається з кутів на пластини 100x100мм. З метою отримання повної картини деформації поверхні оболонки у кожену з трьох зон, розташованих між ланцюгами навантаження, закріплені по чотири індикатори годинного типу з ціною поділу 0,01мм. Три індикатори (перший, п'ятий та дев'ятий) закріплені на бортовому елементі оболонки. Кожен четвертий з дванадцяти закріплений на гребені оболонки. Два середні індикатори з кожної четвірки (2 і 3; 6 і 7; 10 і 11) розташовані на рівнях $1/3$ і $2/3$ стріли підйому оболонки відповідно.

Крім індикаторів, на оболонку наклеєні тензометричні датчики, за допомогою яких відстежувалися деформації на верхній та нижній поверхнях. Процес навантаження закінчувався тоді, коли оболонка втрачала здатність чинити опір зовнішньому навантаженню. Величина навантаження, що відповідає цьому моменту, бралася за несучу здатність оболонки. Для усіх восьми випробуваних оболонок наведено несучу здатність та навантаження на початку тріщиноутворення. За показаннями вимірювальних приладів побудовано графіки зміни деформацій та прогинів під дією зростаючого навантаження. Виконано чисельні дослідження несучої здатності довгих циліндричних оболонок. Для комп'ютерного моделювання оболонок та визначення їх напружено-деформованого стану використано програмний комплекс Autodesk Robot Structural Analysis. Визначені напруження, прогини та погонні внутрішні зусилля в оболонках.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи представлені результати експериментального дослідження тріщиностійкості циліндричних оболонок та виконане порівняння результатів експериментальних та чисельних досліджень. Передбачена при проектуванні конструкції експериментального стенду блокова система навантаження дозволяє не тільки виміряти деформації на різних рівнях поверхні оболонки, а й відстежувати процес утворення (зародження) та розвитку тріщин на всіх етапах навантаження з можливістю вимірювання ширини їх розкриття. На кожному етапі витримували певний час, необхідний для зняття показань приборів, знаходження і фіксування тріщин, а також для замірів довжини, ширини їх розкриття, використовуючи трубку Брінелля. Здійснено фотофіксацію тріщиноутворення та на її основі — схематичне зображення тріщин у кожній з восьми оболонок. У процесі випробувань фіксувалася поява тріщин, кількість та характер їхнього розкриття. Для усіх випробуваних залізобетонних і фібробетонних оболонок наведені наступні експериментально визначені величини: несуча здатність та навантаження, при якому утворилася перша тріщина, навантаження зразків по ступенях, початкова ширина та кінцева ширина розкриття тріщин. Виходячи з

показань приладів, при проведенні експериментальних досліджень було встановлено, що максимальні напруження та прогини у всіх випробуваних оболонках спостерігаються в зоні розташування тензодатчика 21. Такі ж результати отримані при скінченно-елементному аналізі в програмі Robot Structural Analysis. Наведене порівняння результатів експериментальних досліджень з результатами скінченно-елементного аналізу. З порівняння випливає, що максимальна розбіжність у прогинах складає 7,4 %, в той час, як максимальна розбіжність у величинах напружень складає 13,8 %. Можна також побачити, що додаткове дисперсне армування практично не впливає на прогини оболонки.

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: циліндрична оболонка, залізобетон, фібробетон, експеримент, стенд, несуча здатність, тріщиноутворення, метод скінченних елементів, Robot Structural Analysis.

ABSTRACT

Metlizi V.V. Bearing capacity and crack resistance of fiber-reinforced concrete cylindrical shells.

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, 2025.

The dissertation research is devoted to increasing the bearing capacity and crack resistance of reinforced concrete long cylindrical shells by their additional dispersed reinforcement with steel fiber.

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

The **first section** of the dissertation presents a detailed review and analysis of existing research on the main methods of analyzing the operation of long cylindrical shells. Special attention is paid to the issues of strength and crack resistance of reinforced concrete and fiber-reinforced concrete cylindrical shells. The results of research on structures based on steel-fiber concrete are based on the works of I.M. Akhverdov, Yu.M. Bazhenov, N.I. Karpenko and many other researchers.

During the literature analysis, it was found that modern studies more often consider the improvement of concrete properties due to dispersed reinforcement, and studies of steel-fiber concrete structures are more likely to be of a private nature, rather than systemic, as is the case with the study of reinforced concrete or metal structures. The regulatory framework of Ukraine, Europe and the USA was analyzed. The regulatory documents do not contain clear instructions on the choice of materials and technologies, as well as on their connection with the requirements for a specific structure. This circumstance is one of the reasons for the insignificant use of steel-fiber concrete structures, in particular shells, in the construction practice of our country.

The analysis of the literature shows that too little attention is paid to studies of the bearing capacity and crack resistance of long cylindrical fiber concrete shells, therefore this area of research **is relevant**.

In the **second section** of the work, a method for calculating a long cylindrical shell supported by two identical side elements and loaded with a vertical load is proposed. As shown by full-scale and laboratory experimental studies of long cylindrical shells, which are usually used in the practice of constructing industrial building coatings, which are characterized by structural supports at the corners, evenly distributed loads, and a sufficiently high rigidity of the transverse ribs and the shell contour, the mutual influence of transverse bending and normal forces is absent or this influence is so insignificant that it can be neglected to simplify the calculation. Such shells can be calculated separately in the longitudinal and then in the transverse direction, and in the longitudinal direction the shells are calculated as beams of trough-shaped section, and in the transverse direction — as arches (in the form of an elementary strip cut out within the length of the shell). An analytical method for calculating a long cylindrical shell supported by two identical side elements of rectangular cross-section and loaded with a vertical load is proposed. The case is considered when the shell is hingedly supported on curved edges, and recommendations are given for taking into account other boundary conditions. In this case, no restrictions are imposed on the shape and dimensions of the cross-section of the side element.

The proposed algorithm provides for the possibility of implementing two approaches — calculation according to the general semi-moment-free theory and calculation with simplifying hypotheses for shallow shells of medium length.

The dissertation work considers the first approach. Mathematically, the problem is reduced to a system of four linear equations. By solving this system, it is possible to determine the forces and displacements caused by the action of additional edge forces, and by adding them with the corresponding components of the moment-free stress state, obtain the total forces and displacements in the cylindrical shell.

Two separate cases are considered: gentle cylindrical shells of medium length (the method of forces and the method of displacements are used) and multi-wave shells, in which the side element is loaded with edge forces from both sides (the method of forces is used, symmetric and skew-symmetric loading are distributed).

The **third section** of the dissertation is devoted to experimental and numerical studies of the bearing capacity of long cylindrical shells. The design of a special stand, which was developed for conducting experimental studies, is described. The process of manufacturing material samples and prototype shells is described. The research methodology is outlined. 4 models of a cylindrical shell made of reinforced concrete and 4 models made of fiber concrete were manufactured. All samples had a constant length and radius of cross-section, and the thickness of the shell and the dimensions of the cross-section of the side elements varied. The distributed vertical load was applied in four strips, 13 cm wide each, and only by the shell body, i.e. the side elements were not loaded. The shell is hingedly supported from the corners on 100x100mm plates. In order to obtain a complete picture of the deformation of the shell surface in each of the three zones located between the load chains, four watch-type indicators with a division value of 0.01mm are fixed. Three indicators (the first, fifth and ninth) are fixed on the side element of the shell. Every fourth of the twelve is fixed on the shell crest. The two middle indicators from each quadruple (2 and 3; 6 and 7; 10 and 11) are located at the levels of $1/3$ and $2/3$ of the shell lifting boom, respectively.

In addition to the indicators, strain gauges were glued to the shell, with the help of which deformations on the upper and lower surfaces were monitored. The loading process ended when the shell lost its ability to resist external load. The load value corresponding to this moment was taken as the bearing capacity of the shell. The bearing capacity and load at the beginning of crack formation are given for all eight tested shells. According to the readings of the measuring instruments, graphs of deformations and deflections under the action of increasing load were constructed. Numerical studies of the bearing capacity of long cylindrical shells were performed. For computer modeling of shells and determination of their stress-

strain state, the Autodesk Robot Structural Analysis software package was used. Stresses, deflections and linear internal forces in the shells were determined.

The **fourth section** of the dissertation presents the results of an experimental study of the crack resistance of cylindrical shells and a comparison of the results of experimental and numerical studies. The block loading system provided for in the design of the experimental stand allows not only to measure deformations at different levels of the shell surface, but also to track the process of formation (nucleation) and development of cracks at all stages of loading with the possibility of measuring the width of their opening. At each stage, a certain time was maintained, necessary for taking instrument readings, finding and fixing cracks, as well as for measuring the length and width of their opening, using a Brinell tube. Photofixation of crack formation was carried out and, based on it, a schematic image of cracks in each of the eight shells was created. During the tests, the appearance of cracks, the number and nature of their opening were recorded. For all tested reinforced concrete and fiber concrete shells, the following experimentally determined values are given: bearing capacity and load at which the first crack formed, loading of samples in stages, initial width and final width of crack opening. Based on the readings of the instruments, during experimental studies it was established that the maximum stresses and deflections in all tested shells are observed in the area of the load cell 21. The same results were obtained during finite element analysis in the Robot Structural Analysis program. A comparison of the results of experimental studies with the results of finite element analysis is given. From the comparison it follows that the maximum discrepancy in deflections is 7.4%, while the maximum discrepancy in stress values is 13.8%. It can also be seen that additional dispersed reinforcement has practically no effect on the shell deflections.

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: cylindrical shell, reinforced concrete, fiber-reinforced concrete, experiment, stand, bearing capacity, crack formation, finite element method, Robot Structural Analysis