

АНОТАЦІЯ

Сур'янінов В.М. Несуча здатність та тріщиностійкість фібробетонних конструкцій кільцевого перерізу.

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 вивченню несучої здатності та тріщиностійкості фібробетонних конструкцій кільцевого перерізу різного призначення.

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 несучої здатності та тріщиностійкості залізобетонних та фібробетонних конструкцій кільцевого перерізу. Особливу увагу приділяється дослідженням колодязів різного призначення та водопропускних труб, як найбільш поширених споруд кільцевого перерізу. Відзначаються роботи українських вчених О.В. Андрійчука, Є.М. Бабича, М.О. Давиденка, В.І. Борщова, В.І. Каськіва та закордонних — А. Szymczak-Graczyk, X. Liu, A. Figueiredo, De la Fuente.

Підкреслено ефективність застосування фібробетону у конструкціях кільцевого перерізу. Дослідження вітчизняних і зарубіжних вчених свідчать, що сталеві фібробетон має кращі фізико-механічні властивості, ніж звичайний бетон. Однак широкого застосування сталеві фібробетонних конструкцій у вітчизняній практиці будівництва на сьогоднішній день немає, що можна пояснити недостатніми дослідженнями роботи саме фібробетонних конструкцій; більшість робіт присвячено дослідженню фізико-механічних властивостей фібробетону.

З точки зору будівельної механіки згадані конструкції є циліндричними

оболонками, методи розрахунку яких розроблені в роботах В.З. Власова, А.Л. Гольденвейзера, Е. Рейсснера, О.В. Горика, Ю.С. Крутія та багатьох інших. Розглянуто також відповідну нормативну базу України, Європи та США.

Основні аналітичні методи розрахунку оболонок розроблені у минулому столітті. Питання несучої здатності та тріщиностійкості залізобетонних та фібробетонних циліндричних оболонок привертають увагу вчених, але виявляються складними, оскільки залізобетон та фібробетон – композиційні матеріали. У зв'язку з цим особлива увага приділяється експериментальним методам дослідження та комп'ютерного моделювання з наступним чисельним аналізом. Однак публікацій, які відображають результати таких досліджень, дуже мало.

Аналіз літературних джерел показує, що спорудам кільцевого перерізу, виготовленим з різних матеріалів, приділяється велика увага, але фібробетонні конструкції розглядаються недостатньо, тому обраний в дисертації напрямок досліджень є **актуальним**.

У **другому розділі** роботи запропоновано аналітичні методи розрахунку залізобетонних та фібробетонних конструкцій кільцевої форми поперечного перерізу. Перший метод — це чисельно-аналітичний метод граничних елементів. Для його застосування проведено аналогію розрахункової схеми циліндричного колодезя зі схемою вигину призматичної балки, що лежить на суцільній пружній основі.

З точки зору будівельної механіки залізобетонний опускний колодезь циліндричної форми являє собою замкнуту кругову циліндричну оболонку постійної товщини, навантажену по всій поверхні рівномірним нормальним тиском. Алгоритм розрахунку не залежить від величини і напрямку рівномірного тиску, тому для зручності вважається, що оболонка колодезя — це жорстко защемлена по торцях циліндрична оболонка постійної жорсткості під дією рівномірного зовнішнього тиску. Таку оболонку можна представити балковою моделлю, тобто існує аналогія розрахункової схеми циліндричного колодезя зі схемою вигину призматичної балки, що лежить на суцільній

пружній основі. Пружна поверхня кругової циліндричної оболонки, обмеженої по кінцях торцевими діафрагмами та навантаженої всебічним рівномірним зовнішнім тиском визначається диференціальним рівнянням, яке за своєю структурою представляє рівняння вигину призматичної балки відповідної жорсткості, лежачою на суцільній пружній основі та навантаженою рівномірно розподіленим навантаженням та поздовжньою силою. Таким чином, пружна поверхня кругової циліндричної оболонки, обмеженої по кінцях торцевими діафрагмами та навантаженої рівномірним зовнішнім тиском визначається неоднорідним диференціальним рівнянням четвертого порядку. Для цього рівняння розв'язок чисельно-аналітичним методом граничних елементів вже отримано. На підставі цього розроблено алгоритм розрахунку циліндричного колодезя методом граничних елементів.

Далі розроблено аналітичний метод розрахунку водопропускної труби, що опирається на змінну суцільну пружну основу Вінклера, який передбачає розкладання функцій, що шукаються, в ряди та був запропонований Ю.С. Крутієм для розрахунку на згин балок сталої жорсткості на неоднорідній пружній основі.

Третій розділ дисертації присвячено експериментальним дослідженням залізобетонних та фібробетонних колодезних кілець. Описано технологію виготовлення зразків кілець з використанням металевої заводської опалубки. Першу серію зразків складали кільця із звичайного бетону. При виготовленні кілець другої серії до бетону додавалася сталева анкерна фібра об'ємом 1% від загального обсягу бетону. Одночасно виготовлялися контрольні зразки призм та кубів для визначення фізико-механічних характеристик бетону та фібробетону. У кожній серії було випробувано по шість контрольних кубів розміром 100x100x100 мм і по три призми розміром 100x100x400 мм. Для випробувань кілець було змонтовано спеціальну силову платформу, конструкція якої забезпечує рівномірне навантаження кілець. У процесі випробувань фіксували навантаження і деформації окремих волокон бетону, які вимірювалися за допомогою індикаторів часового типу, встановлених в

характерних зонах за зовнішнім периметром кільця. За руйнівне навантаження приймали ту його величину, при якій кільце втрачало здатність чинити опір навантаженню. Побудовано графіки зміни деформацій та прогинів під дією зростаючого навантаження. Одночасно відстежували утворення, розвиток та розкриття тріщин.

Несуча здатність фібробетонного кільця виявилася 1,68 разів більшою, ніж залізобетонного. Процес тріщиноутворення у залізобетонному кільці почався на п'ятому ступені навантаження при навантаженні 55,0 кН, що склало 50% від несучої здатності. При цьому практично одночасно в зонах докладання зовнішнього навантаження утворилися 4 тріщини. Вони з'явилися на зовнішній поверхні, мали однакову початкову ширину розкриття 0,05 мм і тяглися по всій висоті кільця. На наступних ступенях навантаження появу нових тріщин не фіксували, кінцева ширина розкриття склала 0,6 мм.

Процес тріщиноутворення у фібробетонному кільці почався на сьомому ступені навантаження при навантаженні 77,0 кН, що склало 51,3% від несучої здатності. При цьому практично одночасно утворилися 3 тріщини на зовнішній поверхні, які тяглися по всій висоті кільця. Всі вони мали однакову початкову ширину розкриття 0,05 мм і кінцеву ширину розкриття 0,3 мм. На восьмому ступені навантаження при навантаженні 88,0 кН, що склало 56,8% від несучої здатності, утворилися 4 тріщини на внутрішній поверхні, які тяглися по висоті $(0,3-0,25)h$ (h — висота кільця). Всі вони мали однакову початкову ширину розкриття 0,05 мм і кінцеву ширину розкриття 0,1 мм.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи представлені результати експериментального дослідження несучої здатності та тріщиностійкості залізобетонних і фібробетонних пропускних труб. Випробування проводилися у два етапи: перший етап — попередні випробування на відкритому повітрі, другий етап — основні випробування у лабораторних умовах. Метою першого етапу було визначення орієнтовної несучої здатності залізобетонних і фібробетонних труб, а також візуальне спостереження характеру руйнування, наявності або відсутності обвального руйнування труб і характер розльоту

осколків, що дозволило зробити висновок про можливість безпечних випробувань у лабораторних умовах та необхідних для цього заходів. Для попередніх випробувань використовувався стенд, який раніше було розроблено для випробувань плит. Зразки пропускних труб армовані поздовжньою арматурою класу A400C діаметром 8 мм (дев'ять стрижнів по всій довжині труби, розташовані на однаковій відстані один від одного). Товщина захисного шару складає 15 мм. Використовується бетон класу C20/25 (визначений за результатами механічних випробувань зразків кубів і призм, виготовлених одночасно із зразками труб). При виготовленні фібробетонних зразків до бетону додавалася сталева анкерна фібра об'ємом 1% від загального об'єму бетону. Для проведення основних випробувань було спроектовано та виготовлено спеціальний стенд. Розглядалися два види граничних умов: шарнірне спирання труби по кінцях та пружна основа у вигляді глини. Передбачена при проектуванні конструкції стенду блокова система навантаження дозволяє виміряти деформації на різних рівнях поверхні труби й відстежувати процес утворення 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. Для усіх випробуваних зразків труб наведені наступні величини: несуча здатність та навантаження, при якому утворилася перша тріщина, навантаження зразків по ступенях, початкова ширина та кінцева ширина розкриття тріщин. Несуча здатність фібробетонної труби виявилася в 1,43 разів більшою, ніж залізобетонної при шарнірному спиранні та в 1,47 більшою при пружній основі. При обох варіантах граничних умов руйнування залізобетонної труби мало яскраво виражений крихкий характер. Руйнування фібробетонної труби мало в'язкий характер; повного руйнування труби не спостерігалось, кільцевий переріз труби перетворився на еліпс.

У п'ятому розділі представлені результати комп'ютерного моделювання

та чисельного аналізу кілець і труб методом скінченних елементів у програмах ANSYS і ЛІРА-САПР. Для водопропускних труб розглянуто два варіанти граничних умов — шарнірне спирання по кінцях та пружна основа у вигляді глини. Виконано порівняння теоретичних, експериментальних і чисельних результатів. Встановлено розбіжність у прогинах і напруженнях для кілець та водопропускних труб за результатами експерименту, аналітичних та чисельних розрахунків. Проведено порівняльний аналіз отриманих експериментальних, аналітичних та чисельних результатів. У залізобетонного кільця максимальна розбіжність експерименту та розрахунках методами граничних і скінченних елементів у прогинах складає 9,93 %; максимальна розбіжність у величинах напружень — 13,33 %. Для фібробетонного кільця ця розбіжність буде відповідно 9,90 % і 11,50 %. У залізобетонної труби з шарнірним спиранням по кінцях максимальна розбіжність у прогинах складає 10,72 %; максимальна розбіжність у величинах напружень — 13,05 %. Для фібробетонної труби ця розбіжність буде відповідно 10,31 % і 12,67 %. У залізобетонної труби на пружній основі максимальна розбіжність у прогинах — 9,75 %, у величинах напружень — 13,89 %. Для фібробетонної труби ця розбіжність буде відповідно 10,28 % і 14,90 %. У залізобетонної труби на пружній основі максимальна розбіжність у прогинах — 9,75 %, у величинах напружень — 13,89 %. Для фібробетонної труби ця розбіжність буде відповідно 10,28 % і 14,90 %.

Зроблено якісну та кількісну оцінку ефективності додаткового дисперсного армування колодязних кілець та водопропускних труб.

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: кільце, труба, залізобетон, фібробетон, експеримент, несуча здатність, тріщиноутворення, метод скінченних елементів, ANSYS, ЛІРА-САПР.

ABSTRACT

Surianinov V.M. Bearing capacity and crack resistance of fiber-reinforced concrete structures of circular cross-section.

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 the study of the bearing capacity and crack resistance of fiber-reinforced concrete structures of circular cross-section for various purposes.

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 bearing capacity and crack resistance of reinforced concrete and fiber-reinforced concrete structures of circular cross-section. Special attention is paid to the study of wells for various purposes and culverts, as the most common structures of circular cross-section. The works of Ukrainian scientists O.V. Andriychuk, E.M. Babych, M.O. Davydenko, V.I. Borshchov, V.I. Kaskiv and foreign scientists — A. Szymczak-Graczyk, X. Liu, A. Figueiredo, De la Fuente are noted.

From the point of view of structural mechanics, the mentioned structures are cylindrical shells, the calculation methods of which were developed in the works of V.Z. Vlasov, A.L. Goldenweiser, E. Reissner, O.V. Gorik, Y.S. Krutiya and many others. The relevant regulatory framework of Ukraine, Europe and the USA is also considered.

The analysis of literary sources shows that much attention is paid to structures of annular cross-section made of various materials, but fiber-reinforced concrete structures are not considered enough, therefore the research direction chosen in the dissertation is relevant.

In the **second section** of the work, analytical methods for calculating reinforced concrete and fiber-reinforced concrete structures of circular cross-section are proposed. The first method is the numerical-analytical method of boundary elements. For its application, an analogy is made between the calculation scheme of a cylindrical well and the scheme of bending of a prismatic beam lying on a solid elastic base.

From the point of view of structural mechanics, a reinforced concrete lowering well of cylindrical shape is a closed circular cylindrical shell of constant thickness, loaded over the entire surface with uniform normal pressure. The calculation algorithm does not depend on the magnitude and direction of uniform pressure, therefore, for convenience, it is assumed that the well shell is a cylindrical shell of constant stiffness rigidly clamped at the ends under the action of uniform external pressure. Such a shell can be represented by a beam model, that is, there is an analogy between the calculation scheme of a cylindrical well and the scheme of bending a prismatic beam lying on a solid elastic base.

The elastic surface of a circular cylindrical shell, bounded at the ends by end diaphragms and loaded with an all-round uniform external pressure, is determined by a differential equation, which in its structure represents the equation of bending a prismatic beam of the corresponding stiffness, lying on a solid elastic base and loaded with a uniformly distributed load and a longitudinal force.

Thus, the elastic surface of a circular cylindrical shell, bounded at the ends by end diaphragms and loaded with a uniform external pressure is determined by a non-homogeneous fourth-order differential equation.

For this equation, a solution by the numerical-analytical method of boundary elements has already been obtained. Based on this, an algorithm for calculating a cylindrical well using the boundary element method has been developed in the work.

Next, an analytical method for calculating a culvert resting on a variable continuous elastic Winkler base has been developed, which involves the expansion of the functions sought into series and was proposed by Yu.S. Torque for bending calculations of beams of constant stiffness on a non-uniform elastic base.

The third section of the dissertation is devoted to experimental studies of reinforced concrete and fiber-reinforced concrete well rings. The technology of manufacturing ring samples using metal factory formwork is described. The first series of samples consisted of rings made of ordinary concrete. When manufacturing rings of the second series, steel anchor fiber was added to the concrete in an amount of 1% of the total volume of concrete. At the same time, control samples of prisms and cubes were manufactured to determine the physical and mechanical characteristics of concrete and fiber-reinforced concrete. In each series, six control cubes measuring 100x100x100 mm and three prisms measuring 100x100x400 mm were tested. A special force platform was mounted for testing the rings, the design of which ensures uniform loading of the rings. During the tests, the loads and deformations of individual concrete fibers were recorded, which were measured using time-type indicators installed in characteristic zones along the outer perimeter of the ring. The destructive load was taken to be the value at which the ring lost its ability to resist the load. Graphs of changes in deformations and deflections under the influence of increasing load were constructed. At the same time, the formation, development and opening of cracks were monitored.

The bearing capacity of the fiber-reinforced concrete ring turned out to be 1.68 times greater than that of the reinforced concrete one. The process of crack formation in the reinforced concrete ring began at the fifth stage of loading at a load of 55.0 kN, which was 50% of the bearing capacity. At the same time, 4 cracks formed almost simultaneously in the zones of external load application. They appeared on the outer surface, had the same initial opening width of 0.05 mm and extended along the entire height of the ring. At the following loading stages, the appearance of new cracks was not recorded, the final opening width was 0.6 mm.

The process of crack formation in the fiber concrete ring began at the seventh loading stage at a load of 77.0 kN, which was 51.3% of the bearing capacity. At the same time, 3 cracks formed almost simultaneously on the outer surface, which extended along the entire height of the ring. All of them had the same initial opening width of 0.05 mm and a final opening width of 0.3 mm. At the eighth loading stage

at a load of 88.0 kN, which was 56.8% of the bearing capacity, 4 cracks formed on the inner surface, which extended along the height $(0,3-0,25)h$ (h — ring height). They all had the same initial opening width of 0.05 mm and final opening width of 0.1 mm.

The **fourth section** of the dissertation presents the results of an experimental study of the bearing capacity and crack resistance of reinforced concrete and fiber-reinforced concrete culverts. The tests were carried out in two stages: the first stage - preliminary tests in the open air, the second stage - main tests in laboratory conditions. The purpose of the first stage was to determine the approximate bearing capacity of reinforced concrete and fiber-reinforced concrete pipes, as well as visually observe the nature of the failure, the presence or absence of collapse failure of the pipes and the nature of the scattering of fragments, which allowed us to conclude that safe tests in laboratory conditions are possible and the measures necessary for this. A stand was used for preliminary tests, which was previously developed for testing slabs. Samples of culverts are reinforced with longitudinal reinforcement of class A400C with a diameter of 8 mm (nine rods along the entire length of the pipe, located at the same distance from each other). The thickness of the protective layer is 15 mm. Concrete of class C20/25 is used (determined by the results of mechanical tests of cube and prism samples manufactured simultaneously with pipe samples). When manufacturing fiber-reinforced concrete samples, steel anchor fiber was added to the concrete in a volume of 1% of the total volume of concrete. A special stand was designed and manufactured to conduct the main tests. Two types of boundary conditions were considered: articulated support of the pipe at the ends and an elastic base in the form of clay. The block loading system provided for in the design of the stand structure allows measuring deformations at different levels of the pipe surface and monitoring the process of formation 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. For all tested pipe samples, the

following values are given: bearing capacity and load at which the first crack was formed, loading of samples in stages, initial width and final width of crack opening. The bearing capacity of the fiber-reinforced concrete pipe was 1.43 times greater than that of the reinforced concrete pipe with hinged support and 1.47 times greater with an elastic base. Under both boundary conditions, the fracture of the reinforced concrete pipe had a pronounced brittle nature. The destruction of the fiber-reinforced concrete pipe had a viscous nature; complete destruction of the pipe was not observed, the annular cross-section of the pipe turned into an ellipse.

The **fifth section** presents the results of computer modeling and numerical analysis of rings and pipes by the finite element method in the ANSYS and LIRA-SAPR programs. For culverts, two options for boundary conditions were considered: hinged support at the ends and an elastic base in the form of clay. A comparison of theoretical, experimental and numerical results is made. The discrepancy in deflections and stresses for rings and culverts was established based on the results of the experiment, analytical and numerical calculations. A comparative analysis of the obtained experimental, analytical and numerical results was carried out. In a reinforced concrete ring, the maximum discrepancy between the experiment and calculations using the boundary and finite element methods in deflections is 9.93%; the maximum discrepancy in stress values is 13.33%. For a fiber-reinforced concrete ring, this discrepancy will be 9.90% and 11.50%, respectively. In a reinforced concrete pipe with a hinged support at the ends, the maximum discrepancy in deflections is 10.72%; the maximum discrepancy in stress values is 13.05%. For a fiber-reinforced concrete pipe, this discrepancy will be 10.31% and 12.67%, respectively. For a reinforced concrete pipe on an elastic base, the maximum discrepancy in deflections is 9.75%, in stress values is 13.89%. For a fiber-reinforced concrete pipe, this discrepancy will be 10.28% and 14.90%, respectively. For a reinforced concrete pipe on an elastic base, the maximum discrepancy in deflections is 9.75%, and in stress values is 13.89%. For a fiber-reinforced concrete pipe, this discrepancy will be 10.28% and 14.90%, respectively. A qualitative and quantitative assessment of the effectiveness of additional dispersed reinforcement of well rings

and culverts was made.

The results obtained in this research work are implemented in the practice of designing and operating buildings, and are also used in the educational process of higher education institutions.

Keywords: ring, pipe, reinforced concrete, fiber concrete, experiment, bearing capacity, crack formation, finite element method, ANSYS, LIRA-SAPR.