

АНОТАЦІЯ

Корнійчук Т. С. Динаміка сталефібробетонних конструкцій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса. 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми — дослідженню основних динамічних властивостей залізобетонних та сталефібробетонних конструкцій у формі балок і плит.

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження, її актуальність, показаний зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовані мета та задачі досліджень, наведені положення наукової новизни та практичного значення отриманих результатів.

Підкреслюється, що вивченню поведінки залізобетонних конструкцій при статичній дії зовнішніх навантажень присвячена велика кількість як теоретичних, так і експериментальних робіт вітчизняних і зарубіжних вчених. Питання динаміки балок, плит, як і інших залізобетонних конструкцій, висвітлені набагато гірше.

Такий стан, очевидно, пояснюється тим, що динамічні розрахунки залізобетонних конструкцій пов'язані з рішенням цілого комплексу питань: визначення параметрів динамічних навантажень; граничних станів і способів їх нормування; облік зміни характеристик міцності та деформативних характеристик бетону та арматури; визначення зусиль в конструкціях і ін.

У першому розділі роботи проаналізовано сучасний стан досліджень фізико-механічних властивостей бетону та фібробетону при динамічних впливах, методів розрахунку конструкцій з цих матеріалів при різних видах коливань. Поведінка будь-якого матеріалу, в тому числі і бетону при динамічних навантаженнях істотно відрізняється від його реакції на статичні впливи, точно також іншими будуть пружні і деформативні характеристики. Для їх визначення відомі певні види випробувань. Для бетону такі

випробування проводилися різними дослідниками, що стосується фібробетону, то тут навіть результати статичних випробувань характеризується великим розкидом значень, а даних по динамічним випробуванням зовсім мало.

Серед відомих до теперішнього часу методів динамічних випробувань найбільшого поширення набув метод Кольського та багато його модифікацій, що дозволяють випробовувати зразки в умовах розтягування, зсуву, комбінованого навантаження, зі зміною історії і швидкості деформації в процесі навантаження, при циклічних і знакозмінних навантаженнях. Багаточисельні експерименти показують більш високу ударну в'язкість фібробетону, що робить його привабливим для застосування в конструкціях, що працюють при ударних та імпульсних навантаженнях.

Перспективним виявляється метод Тейлора, який через простоту в реалізації знаходить широке застосування для визначення динамічних властивостей. Цей метод дає хороші результати при визначенні межі текучості для матеріалів, поведінка яких близько до ідеально-пластичній поведінки.

Дослідження конструкцій з бетону та, особливо, з фібробетону, що працюють при динамічних впливах, носять одиничний характер, і обмежуються локальними експериментами, або чисельним моделюванням без узагальнених висновків. Більш уваги приділяється дослідженню таких видів динамічних навантажень, як імпульсне, ударне та вибухове, але тут основним інструментом є сучасні скінчено-елементні програми.

Другий розділ присвячений теоретичним методам визначення частот і форм власних коливань балок і плит, що застосовуються в класичній динаміці.

При цьому підкреслюється, що стосовно конструкцій з бетону та фібробетону всі ці методи мають обмежений характер, тобто дозволяють вивчати коливання при початковому модулю пружності або при порівняно

невеликих навантаженнях на конструкцію, коли діаграму деформування матеріалу можна вважати лінійною.

Основне рівняння вільних коливань балок, особливості його розв'язання при різних граничних умовах. Наведені конкретні частотні рівняння, для яких отримані частоти і власні форми коливань з метою подальшого їх застосування для розглянутих в роботі конструкцій.

Додатково показано, що нижча частота коливань може розглядатися, як динамічний критерій жорсткості балок, а визначення максимального прогину в попередньо напруженій балці можливо за нижчою частотою коливань.

Далі розглянуто аналітичне визначення частот і форм коливань плит. Особлива увага приділяється прямокутній плиті постійної товщини, що шарнірно оперта по протилежним сторонам, бо цей дуже важливий в практичному відношенні випадок має аналітичне рішення, яке в подальшому буде застосовано у роботі. Для інших граничних умов пропонується вживати асимптотичний метод розрахунку плит.

У третьому розділі наведені результати аналітичних, експериментальних і комп'ютерних досліджень динаміки балок.

Спочатку були виконані випробування фібробетону на ударну в'язкість. План проведеного експерименту по визначенню ударної в'язкості включав два етапи. На першому етапі міцність і деформаційні характеристики бетону і сталеві фібробетону визначалися на бетонних призмах розмірами $100 \times 100 \times 400$ мм і кубах $100 \times 100 \times 100$ мм. На другому етапі були виготовлені зразки з бетону і сталеві фібробетону оптимального складу, проведені експерименти по визначенню статичної та динамічної міцності при вигині, а потім — випробування на ударну в'язкість на маятниковому копрі МК-30.

Наступним було експериментальне визначення власних частот і форм коливань залізобетонних та фібробетонних балок.

Для проведення експериментальних досліджень за участю автора розроблено випробувальний стенд MODAL-2, який пройшов необхідну верифікацію. Експериментально і аналітично (по формулам другого розділу

роботи) визначені власні частоти коливань залізобетонних і сталевібробетонних балок. Армування всіх балок стержневою арматурою було однаковим. Додатково частоти визначені із застосуванням чисельно-аналітичного методу граничних елементів. Визначено також частоти коливань з урахуванням нелінійної діаграми деформування бетону і фібробетону.

Наостаннє виконано комп'ютерне моделювання та скінчено-елементний модальний аналіз балок у чотирьох програмах – ЛІРА-САПР, SCAD, ANSYS і SOFiSTiK. Наведено порівняльний аналіз всіх отриманих даних.

У четвертому розділі розглядається динаміка залізобетонних і фібробетонних пустотних плит перекриття і аеродромних плит.

Серійні пустотні і аеродромні плити виготовлені на підприємстві ТОВ «Великодолинський завод ЗБК» у двох варіантах – звичайному та з додаванням сталевібри, а моделі плит виготовлені в лабораторії кафедри будівельної механіки, де й проведені всі випробування.

Визначені механічні характеристики використовуваних матеріалів. Розглянуто вільні коливання модельної пустотної плити у варіантах: бетонна та фібробетонна плита, шарнірно обперта по чотирьох сторонах та така ж плита, шарнірно обперта по двох коротких сторонах при вільних двох інших сторонах. Розглянуто серійні пустотні плити, шарнірно обперті по двох коротких сторонах при вільних двох інших сторонах.

Визначені власні частоти і форми коливань серійних аеродромних плит та їх моделей по двох схемах навантаження – в середині прольоту та на консолі. В усіх випадках частоти і форми власних коливань визначені аналітично, експериментально та шляхом комп'ютерного моделювання і скінчено-елементного аналізу у програмах SOFiSTiK і ANSYS. Наведено порівняльний аналіз всіх отриманих даних.

Випробування зразків фібробетону з різними відсотками дисперсного армування на ударну в'язкість (використовувалися три типи фібри — із

загнутими кінцями, хвильова й плющена) показали, що ударна в'язкість суттєво зростає при наявності фібри, але тип фібри не виявляє на неї практично ніякого впливу. Зразки, армовані зі змістом фібри 1,0 і 1,5 % незначно відрізняються по ударній в'язкості, що дає підставу рекомендувати 1,0 відсоток дисперсного армування за обсягом, як при статичних навантаженнях, так і при динамічних.

Аналіз результатів дослідження балок показав, що спектр частот, обчислений методом скінчених елементів, на 4 % нижчий, чим обчислений аналітично; результати розрахунку в SOFiSTiK на 2 % відрізняються від результатів, отриманих в ПК ЛПА; розбіжність з експериментальними даними досягає 20 %, причому, усі частоти, обчислені експериментально, більші частот, обчислених аналітично або методом скінчених елементів.

Аналіз результатів дослідження пустотних та аеродромних плит показав, що спектр частот, обчислений методом скінчених елементів, на 4 % нижчий, чим обчислений аналітично; результати розрахунку в SOFiSTiK на 2 % відрізняються від результатів, отриманих в ANSYS; розбіжність з експериментальними даними досягає 15 %, причому, усі частоти, обчислені експериментально, більші частот, обчислених аналітично або методом скінчених елементів.

У всіх проведених дослідженнях спектр частот фібробетонних конструкцій вищий, ніж у бетонних, що дає підставу рекомендувати фібробетон для виготовлення конструкцій, які будуть працювати в умовах динамічних впливів.

Ключові слова: бетон, фібробетон, динаміка, модальний аналіз, частота коливання, форма коливання, експеримент, метод скінчених елементів, SOFiSTiK, ANSYS.

SUMMARY

Korniichuk T. S. Dynamics of steelfiberconcrete structure. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscripts.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 192 – Construction and civil engineering. – Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, 2021.

The dissertation is devoted to the decision of an actual problem – to the study of the main dynamic properties of reinforced concrete and reinforced concrete structures in the form of beams and slabs.

In the introduction the choice of the research topic is substantiated, its urgency, the connection of work with scientific programs, plans, themes is shown, the purpose and tasks of researches are formulated, the provisions of scientific novelty and practical value of the received results are resulted.

It is emphasized that a large number of both theoretical and experimental works of domestic and foreign scientists are devoted to the study of the behavior of reinforced concrete structures under the static action of external loads. Issues of dynamics of beams, slabs, as well as other reinforced concrete structures, are covered much worse.

This state is obviously explained by the fact that the dynamic calculations of reinforced concrete structures are associated with the solution of a range of issues: determining the parameters of dynamic loads; limit states and methods of their rationing; accounting for changes in strength characteristics and deformable characteristics of concrete and reinforcement; determination of efforts in constructions, etc.

In the first section of the work the current state of research of physical and mechanical properties of concrete and fibro concrete under dynamic influences, methods of calculation of structures from these materials at different types of oscillations are analyzed. The behavior of any material, including concrete under

dynamic loads is significantly different from its response to static effects, just as others will be elastic and deformable characteristics

To determine them, certain types of tests are known. For concrete, such tests were conducted by various researchers with regard to fiber concrete, then even the results of static tests are characterized by a large scatter of values, and data on dynamic tests are very small.

Among the hitherto known methods of dynamic testing, the method of Kola and many of its modifications have become the most widespread, allowing to test samples under tensile, shear, combined loading, with changing history and rate of deformation during loading, cyclic and alternating loads. Numerous experiments have shown higher impact strength of fiberglass, which makes it attractive for use in structures operating under shock and impulse loads.

The Taylor method is promising, which due to its ease of implementation is widely used to determine the dynamic properties. This method gives good results in determining the yield strength for materials whose behavior is close to the ideal plastic behavior.

Studies of structures made of concrete and, in particular, of fibro concrete, operating under dynamic influences, are isolated in nature and are limited to local experiments or numerical simulations without generalized conclusions. More attention is paid to the study of such types of dynamic loads as pulse, shock and explosive, but here the main tool is modern finite element programs.

The second section devoted to theoretical methods for determining the frequencies and shapes of natural oscillations of beams and slabs used in classical dynamics.

It is emphasized that with respect to concrete and fiber concrete structures, all these methods are limited, ie allow to study the oscillations at the initial modulus of elasticity or at relatively low loads on the structure, when the deformation diagram of the material can be considered linear.

The basic equation of free oscillations of beams, features of its solution under different boundary conditions. Specific frequency equations for which

frequencies and natural forms of oscillations are received for the purpose of their further application for the designs considered in work are resulted.

Additionally, it is shown that the lower oscillation frequency can be considered as a dynamic criterion of beam stiffness, and the determination of the maximum deflection in the prestressed beam is possible by the lower oscillation frequency.

Next, we consider the analytical definition of frequencies and forms of oscillations of the plates. Particular attention is paid to a rectangular plate of constant thickness, which is hinged on opposite sides, because this very important case in practical terms has an analytical solution, which will be used in the future. For other boundary conditions, it is proposed to use the asymptotic method of plate calculation.

In the third section the results of analytical, experimental and computer researches of dynamics of beams are resulted.

Initially, tests of fiberglass for impact strength were performed. The plan of the experiment to determine the toughness included two stages. At the first stage, the strength and deformation characteristics of concrete and reinforced concrete were determined on concrete prisms $100 \times 100 \times 400$ mm and cubes $100 \times 100 \times 100$ mm. In the second stage, samples were made of concrete and reinforced concrete of optimal composition, experiments were performed to determine the static and dynamic bending strength, and then – tests for toughness on the pendulum copra MK-30.

The next was the experimental determination of natural frequencies and oscillation forms of reinforced concrete and fiber concrete beams.

A test bench was developed for experimental research with the participation of the author MODAL-2, which has passed the required verification. Experimentally and analytically (according to the formulas of the second section of the work) the natural frequencies of oscillations of reinforced concrete and reinforced concrete beams are determined. Reinforcement of all beams with rod reinforcement was the same. Additionally, the frequencies are determined using

the numerical-analytical method of boundary elements. The oscillation frequencies are also determined taking into account the nonlinear deformation diagram of concrete and fibro concrete.

Finally, computer modeling was performed and elemental modal analysis of beams in four programs was completed. – LIRA-SAPR, SCAD, ANSYS i SOFiSTiK. A comparative analysis of all obtained data is given.

In the fourth chapter the dynamics of reinforced concrete and fibro concrete hollow core slabs and aerodrome slabs is considered.

Serial hollow and airfield plates are made at the enterprise "Velikodolinsky plant ZBK" in two versions – ordinary and with the addition of steel fiber, and models of plates are made in the laboratory of the Department of Structural Mechanics, where all tests were conducted.

The mechanical characteristics of the used materials are determined. The free oscillations of the model hollow slab in the variants are considered: concrete and fibro concrete slab, hinged on four sides and the same slab, hinged on two short sides with two other free sides. Serial hollow slabs hinged on two short sides with two other free sides are considered.

The natural frequencies and forms of oscillations of serial aerodrome plates and their models are determined according to two load schemes – in the middle of the span and on the console. In all cases, the frequencies and forms of natural oscillations are determined analytically, experimentally and by computer modeling and finite element analysis in programs SOFiSTiK and ANSYS. A comparative analysis of all obtained data is given.

Tests of fiber concrete samples with different percentages of dispersed reinforcement on toughness (used three types of fiber - with curved ends, wave and flattened) showed that the toughness increases significantly in the presence of fiber, but the type of fiber has almost no effect on it . Samples reinforced with a fiber content of 1.0 and 1.5% differ slightly in toughness, which gives reason to recommend 1.0 percent dispersed reinforcement by volume, both under static and dynamic loads.

Analysis of the results of the study of beams showed that the frequency spectrum calculated by the finite element method is 4% lower than calculated analytically; the results of the calculation in SOFiSTiK differ by 2% from the results obtained in the PC LIRA; the discrepancy with the experimental data reaches 20%, and all frequencies calculated experimentally are greater than the frequencies calculated analytically or by the finite element method.

Analysis of the results of the study of hollow and aerodrome plates showed that the frequency spectrum calculated by the finite element method is 4% lower than calculated analytically; the results of the calculation in SOFiSTiK differ by 2% from the results obtained in ANSYS; the discrepancy with the experimental data reaches 15%, and all frequencies calculated experimentally are greater than the frequencies calculated analytically or by the finite element method.

In all studies, the frequency range of fiber concrete structures is higher than that of concrete, which gives reason to recommend fiber concrete for the manufacture of structures that will work under dynamic influences.

Keywords: concrete, fibro concrete, dynamics, modal analysis, oscillation frequency, oscillation shape, experiment, finite element method, SOFiSTiK, ANSYS.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Сурьянинов Н. Г., Маковкина Т. С. Экспериментальные исследования свободных колебаний железобетонных и фибробетонных балок. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, 2019. Вип. №74. С. 75-81. ISSN 2415-377X. doi: 10.31650/2415-377X-2019-74-75-81.

<http://visnyk-odaba.org.ua/archive74.html>

2. Surianinov M., Makovkina T., Chuchmai O. Experimental and computer researches of hollow-core slabs oscillations. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, 2020. Вип. №78. С. 63-70. ISSN 2415-377X. doi: 10.31650/2415-377X-2020-78-63-70.

<http://visnyk-odaba.org.ua/archive78.html>

3. Сурьянинов Н. Г., Маковкина Т. С. Аналитические и экспериментальные исследования свободных колебаний сталефибробетонных балок. *Міжвузівський збірник «Наукові Нотатки»* Луцький національний технічний університет, 2019. Вип. №66. С. 351-355. ISSN: 24-15-39-66.

https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/issue/view/37/43

4. Makovkina T. S., Surianinov M. H., Chuchmai O. M. Modal analysis of reinforced concrete and fiber concrete. *The scientific journal Mechanics and Mathematical Methods*, 2021. Vol. №1 (3). С. 95-106. ISSN: 2618-0650.

<http://mmm-journal.com.ua/journals/5/8.pdf>

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

5. Surianinov N. G., Balduk P. G., Makovkina T. S. Fundamental solutions of the problem on ortotropic plates vibrations. *European Journal of Technical and Natural Sciences*, 2018. No. 2. P. 29-32. ISSN 2414-2352.

http://ppublishing.org/upload/iblock/ff7/EJT-2_2018.pdf

6. Сурьянинов Н. Г., Бажанова А. Ю., Маковкина Т. С. Свободные колебания ортотропных пластин. *Open Access Peer-reviewed Journal. Science Review*, March 2018. Vol. 2. No 3(10). P. 53-57. ISSN 2544-9346. DOI: 10.31435/rsglobal_sr.

<https://rsglobal.pl/index.php/sr/index>

7. Vyhnanets M., Neutov S., Surianinov M., and Makovkina T. Experimental research on the mechanical properties of steel fiber concrete. *International Journal of Recent Scientific Research Research*, July 2020. Vol. 11. Issue, 07 (A). P. 39100–39104. ISSN 0976-3031. DOI: 10.24327/IJRSR.

<https://recentscientific.com/experimental-research-mechanical-properties-steel-fiber-concrete>

8. Surianinov M., Andronov V., Otrosh Y., Makovkina T., Vasiukov S. Concrete and Fiber Concrete Impact Strength. *Materials Science Forum this link is disabled*, 2020. Vol. 1006. P. 101–106. ISSN 1662-9752. (Index Scopus).

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.101>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

9. Сурьянинов Н. Г., Маковкина Т. С. Вынужденные колебания связанных фибробетонных балок при их аппроксимации системой с двумя степенями свободы. *Актуальні проблеми інженерної механіки: тези доповідей V Міжнар. конф. Одеса, 2018. С. 153–154.*

10. Балдук П. Г., Сидорчук М. М., Маковкіна Т. С. Лабораторні та комп'ютерні дослідження сталеві фібробетонних балок. *74-я науково-технічна*

конференція професорсько–викладацького складу академії: тези доповідей. ОДАБА, 2018. С. 305. ISBN 978–617–7195–61–9.

11. Бажанова А. Ю., Маковкина Т. С., Чопенко С. В. Экспериментальные исследования свободных колебаний железобетонных и фибробетонных балок. VI Міжнародна конференція. *Актуальні проблеми інженерної механіки: тези доповідей.* Одеса, 2019. С. 29–30.

12. Неутов С. Ф., Корнеева И. Б., Выгнанец М. М., Маковкина Т. С. Экспериментальные исследования сталефибробетонных конструкций. VI Міжнародна конференція. *Актуальні проблеми інженерної механіки: тези доповідей.* Одеса, 2019. С. 147–149.

13. Сурьянинов Н. Г., Маковкина Т. С., Чучмай А. М. Экспериментальные и компьютерные исследования колебаний пустотных плит. VII Міжнародна конференція. *Актуальні проблеми інженерної механіки: тези доповідей.* Одеса, 2020. С. 230–232.

14. Сурьянинов Н. Г., Маковкина Т. С., Кириченко Д. А. Стенд для проведения модального анализа. Новые направления развития приборостроения. *13–я Міжнародна науково-технічна конференція молодих науковців та студентів: тези доповідей.* Мінськ, 2020. С. 276.