

АНОТАЦІЯ

Шестакова Л.Є. Модифіковані фібробетони з базальтовою фіброю для жорстких дорожніх покриттів.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. Одеська державна академія будівництва та архітектури – Одеса, 2024.

Метою роботи є розробка модифікованих фібробетонів для жорстких дорожніх покриттів з необхідної для доріг відповідної категорії міцністю та підвищеною довговічністю за рахунок використання раціональної кількості базальтової фібри і суперпластифікатора полікарбосилатного типу.

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету роботи і завдання досліджень, описано методи досліджень, наведені положення наукової новизни та практичного значення отриманих результатів.

У першому розділі проаналізовано особливості складу і властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів і досвід експлуатації доріг з жорсткими покриттями.

У розвинутих країнах об'єми будівництва дорожніх покриттів жорсткого типу поступово зростають. Цементобетонні покриття характеризуються стійкістю до утворення колій і хвиль, високою рівністю і низькою залежністю властивостей від температури навколишнього середовища. Завдяки високій довговічності жорсткі покриття дозволяють зменшити витрати на утримання доріг.

Показано, що ефективним прийомом підвищення міцності на розтяг при згині, як основної характеристики дорожніх бетонів, а також морозостійкості та зносостійкості бетону, є дисперсне армування, зокрема стійкою до корозії базальтовою фіброю. Це додатково сприяє можливості зниженню товщини дорожньої плити, що підвищує економічну ефективність жорстких покриттів. Для забезпечення необхідної легкоукладальності фібробетонів і зниження В/Ц

слід використовувати сучасні полікарбоксилатні суперпластифікатори. Кількість втягнутого повітря при приготуванні фібробетонів може суттєво змінюватися в залежності від сировинних матеріалів, факторів навколишнього середовища і технології виробництва. Ефективним прийомом регулювання цього показника є використання повітровтягуючих добавок.

За результатами проведеного аналізу сформульовано *робочу гіпотезу* роботи про доцільність використання базальтової фібри у комбінації з добавкою суперпластифікатором полікарбоксилатного типу для впливу на структуру бетону, який забезпечить підвищення показників міцності та довговічності бетонів жорстких дорожніх покриттів. Довговічність бетонів дорожніх одягів обумовлюється насамперед їх високою морозостійкістю і низькою стираністю. Окремо доцільно визначити вплив на структуру та ефективність повітровтягуючої добавки при її використанні в модифікованих фібробетонах дорожніх покриттів.

У *другому розділі* наведена загальна схема проведення досліджень, описана методика їх проведення і характеристика використаних матеріалів.

Для виготовлення бетонів і фібробетонів використовувалися: портландцемент ПЦ І-500 Р-Н, гранітний щебінь фракції 5-20 мм, кварцовий пісок, добавка суперпластифікатор STACHEMENT 2570/5/G, повітровтягуюча добавка MICROPORAN, базальтова фібра BAUCON®-bazalt з довжиною волокон 12 мм і діаметр 18 мкм.

У *третьому розділі* наведено результати першого етапу роботи, в рамках якого було проведено дослідження впливу базальтової фібри і повітровтягуючої добавки властивості і структуру бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів. Було досліджено властивості 12 складів бетонів, які були поділені на 3 серії. У кожній серії виготовлялися 4 склади з різною кількістю дисперсної арматури: без фібри, а також з фіброю у кількості 0,50, 0,75 і 1,0 кг/м³. В першій серії виготовлялися склади без повітровтягуючої добавки. В другій серії виготовлялися бетони і фібробетони з повітровтягуючою добавкою у кількості 0,05% від маси цементу, у третій – з повітровтягуючою

добавкою у кількості 0,15% від маси цементу. У всі бетонні суміші вводився суперпластифікатор у кількості 0,6% від маси цементу.

Встановлено, що при використанні дисперсного армування базальтовою фіброю В/Ц сумішей підвищується несуттєво. Бетонні та фібробетонні суміші, до яких вводилася добавка MICROPORAN, характеризувалися на 3,6-4.1% нижчим В/Ц.

При застосуванні повітровтягуючої добавки середня густина досліджених бетонів і фібробетонів зменшується на 1,9-5,4%. За рахунок зменшення середньої густини міцність на стиск бетонів знижується на 2-21%, також на 2-7% підвищується їх стиранисть (знижується зносостійкість). При цьому кількості повітровтягуючої добавки майже не впливає на міцність бетонів на розтяг при згині. При використанні повітровтягуючої добавки у кількості 0,05% від маси цементу морозостійкість бетонів і фібробетонів не змінюється, при використанні добавки MICROPORAN у кількості 0,15% для бетону без дисперсного армування марка за морозостійкістю підвищується з F200 до F300. Тобто застосування повітровтягуючої добавки для досліджених бетонів і фібробетонів має обмежену ефективність.

Натомість дисперсне армування оказує комплексний позитивний вплив на міцність і довговічність бетону жорсткого дорожнього покриття. При використанні фібри BAUCON®-bazalt у кількості 0,75-1 кг/м³ міцність бетону на стиск підвищується на 13-24%, міцність на розтяг при згині – на 21-29%, морозостійкість підвищується на рівень до 100 циклів. Також дисперсне армування на 14-15% знижує стиранисть бетону.

Завдяки використанню дисперсного армування базальтовою фіброю а також модифікації суперпластифікатором STACHEMENT 2570/5/G отримано фібробетони жорстких дорожніх покриттів з міцністю на стиск до 63,2 МПа, міцністю на розтяг при згині до 7,66 МПа та підвищеною довговічністю.

У *четвертому розділі* наведено результати другого етапу досліджень, який розширює діапазон використання отриманих результатів першого етапу досліджень для влаштування жорстких покриттів доріг різних категорій. Даний

етап виявляє вплив кількості суперпластифікатору і фібри на властивості бетонів з різною кількістю цементу.

Використовувалися методи оптимального планування експерименту і експериментально-статистичного моделювання. За 15-ти точковим оптимальним планом проведено експеримент, в якому варіювалися наступні фактори складу: кількість портландцементу (від 290 до 350 кг/м³), кількість базальтової фібри BAUCON®-bazalt з довжиною волокон 12 мм і діаметром 18 мкм (від 0,9 до 1,5 кг/м³), кількість суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G (від 0,6 до 1% від маси цементу).

Всі суміші мали рівну рухомість з ОК=2..3 см. Встановлено, що найменше В/Ц сумішей рівної рухомості досягається при введенні суперпластифікатору у кількості 0,8-0,9% від маси цементу. При зміні кількості базальтової фібри від 0,9 до 1,5 кг/м³ В/Ц суміші практично не змінюється.

За рахунок підвищення кількості портландцементу міцність фібробетонів на стиск очікувано зростає, при цьому у проектному віці більш відчутно, ніж у віці 3 діб. Підвищення дозування суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G з 0,6 до 0,9-1% викликає зниження В/Ц, за рахунок чого міцність на стиск фібробетонів зростає у віці 3 діб на 2,3-2,6 МПа, у віці 28 діб – на 3,2-3,8 МПа.

На рівень міцності на розтяг при згині фібробетонів найбільш суттєво впливає кількість цементу. За рахунок збільшення кількості базальтової фібри з 0,9 до 1,3-1,4 кг/м³ міцність на розтяг при згині у віці 3 діб зростає на 0,5-0,6 МПа, у віці 28 діб – на 0,7-0,8 МПа. Зміна кількості суперпластифікатору в межах факторного простору експерименту несуттєво впливає на міцність фібробетонів на розтяг при згині.

При збільшенні кількості цементу з 290 до 350 кг/м³ морозостійкість фібробетонів зростає на рівень до 100 циклів. При цьому за рахунок підвищення міцності також знижується стираність бетону, тобто зростає його зносостійкість. При підвищенні кількості базальтової фібри з 0,9 до 1,3-1,4 кг/м³ стираність бетонів знижується на 11-16%, а морозостійкість зростає

приблизно на 50 циклів. Зміна кількості суперпластифікатору несуттєво впливає на зносостійкість бетону. При цьому при підвищенні кількості добавки STACHEMENT 2570/5/G з 0,6 до 0,9% від маси цементу морозостійкість фібробетонів зростає на рівень до 50 циклів.

Завдяки застосуванню раціональної кількості базальтової фібри і суперпластифікатору отримано фібробетони з міцністю на стиск від 40 до 55 МПа, міцністю на розтяг при згині від 4,5 до 6 МПа, морозостійкістю від F200 до F300 і стираністю від 0,31 до 0,38 г/см² в залежності від кількості цементу в складі.

З використанням комплексу отриманих експериментально-статистичних моделей та методу багатокритеріальної оптимізації обрано оптимальні склади фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для доріг Ia, Ib і II/III категорій. Обрані склади мають найменшу собівартість при забезпеченій необхідній міцності для відповідної категорії дороги та підвищену довговічність.

Завершальний третій етап досліджень був присвячений впровадженню результатів у навчальний процес та виробництво, зокрема отриманих раціональних складів фібробетонів.

Результати проведених досліджень були використані Дочірнім підприємством «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України»». Рекомендовані склади фібробетонів з базальтовою фіброю використовувалися при влаштуванні жорсткого дорожнього покриття в процесі капітального ремонту автомобільної дороги загального користування державного значення Р-04 Київ – Фастів – Біла Церква – Звенигородка, км 212+220 – км 223+070, Звенигородського району Черкаської області.

Результати також були впроваджені в навчальний процес Одеської державної академії будівництва та архітектури при підготовці магістрів спеціальність 192 - Будівництво та цивільна інженерія за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги і аеродроми».

Ключові слова: цементобетонні покриття, жорсткий дорожній одяг, базальтова фібра, суперпластифікатор, повітровтягуюча добавка, міцність, довговічність, морозостійкість, стиранисть.

ABSTRACT

Shestakova L.E. Modified fiber concrete with basalt fiber for rigid pavements
PhD thesis. Specialty 192 – Construction and civil engineering – Odessa State
Academy of Civil Engineering and Architecture. – Odesa, 2024.

The goal of the work is the development of modified fiber concrete for rigid pavements with required strength and increased durability due to the use of a rational amount of basalt fiber and superplasticizer of the polycarboxylate type.

The introduction substantiates the choice of the research topic, shows the connection of the work with scientific programs, plans and topics, formulates the purpose of the work and research tasks, describes the research methods, states the scientific novelty and practical significance of the obtained results.

The first chapter analyzes the features of the composition, properties of rigid pavement concretes and the experience of operating roads with rigid pavements.

In developed countries, the volume of construction of rigid pavements is gradually increasing. Cement concrete coatings are characterized by resistance to the formation of ruts and waves, high uniformity and low dependence of properties on ambient temperature. Due to their high durability, rigid pavements allow to reduce road maintenance costs.

It is shown that an effective method of increasing of the flexural strength in bending, as the main characteristic of road concrete, as well as frost resistance and wear resistance of concrete, is dispersed reinforcement, in particular with corrosion-resistant basalt fiber. This additionally contributes to the possibility of reducing the thickness of the road slab, which increases the economic efficiency of rigid coatings. Modern polycarboxylate superplasticizers should be used to ensure the required workability of fiber concrete and to reduce W/C. The amount of entrained air during the preparation of fiber concrete can vary significantly depending on the raw materials, environmental factors and production technology. An effective method of regulating this indicator is the use of air entraining additives.

Based on the results of the analysis, a working hypothesis was formulated about the feasibility of using basalt fiber in combination with a polycarboxylate-type superplasticizer additive to influence on the structure of concrete, which will ensure an increase in the strength and durability of concrete for rigid pavements. The durability of concrete pavements is determined primarily by their high frost resistance and low abrasion resistance. Separately, it is expedient to determine the effect on the structure and efficiency of the air-entraining additive when it is used in modified fiber concrete pavements.

In *the second section*, the general scheme of conducting research, the methodology of research and the characteristics of the used materials are described.

For the production of concrete and fiber concrete, the following materials were used: Portland cement CEM I 42,5 R, granite crushed stone of fraction 5-20 mm, quartz sand, superplasticizer additive STACHEMENT 2570/5/G, air-entraining additive MICROPORAN, basalt fiber BAUCON®-basalt with a fiber length of 12 mm and a diameter of 18 μm .

The third section presents the results of the first stage of work, which included a study of the influence of basalt fiber and air-entraining additive on the properties and structure of concrete and fiber-reinforced for rigid pavements. The properties of 12 concrete compositions, which were divided into 3 series, were investigated. In each series, 4 compounds were produced with different amounts of dispersed reinforcement: without fiber, as well as with fiber in the amount of 0.50, 0.75 and 1.0 kg/m^3 . In the first series, compounds were produced without an air-entraining additive. In the second series, concrete and fiber concrete with an air-entraining additive in the amount of 0.05 % of the cement mass were produced, in the third series – with an air-entraining additive in the amount of 0.15 % of the cement mass. A superplasticizer in the amount of 0.6 % of the cement mass was introduced into all concrete mixes.

It was found that when using dispersed reinforcement with basalt fiber, the W/C of the mixtures increases insignificantly. Concrete and fiber concrete mixtures to

which the MICROPORAN additive was added were characterized by 3.6-4.1 % lower W/C.

When using an air-entraining additive, the average density of the studied concretes and fiber concretes decreases by 1.9-5.4 %. Due to the decrease in the average density, the compressive strength of concrete decreases by 2-21 %, and their abrasion resistance (wear resistance decreases) decreases by 2-7 %. At the same time, the amount of air-entraining additive has almost no influence on the flexural strength in bending of concrete. When using an air-entraining additive in the amount of 0.05 % of the mass of cement, the frost resistance of concrete and fiber concrete does not change, when using the MICROPORAN additive in the amount of 0.15 % for concrete without dispersed reinforcement, the brand for frost resistance increases from F200 to F300. That is, the use of an air-entraining additive for the tested concretes and fiber concretes has limited effectiveness.

Instead, dispersive reinforcement has a complex positive effect on the strength and durability of rigid pavements concrete. When using BAUCON®-basalt fiber in the amount of 0.75-1 kg/m³, the compressive strength of concrete increases by 13-24 %, the flexural strength in bending – by 21-29 %, frost resistance increases to the level of up to 100 cycles. Dispersed reinforcement also increases the abrasion resistance of concrete by 14-15 %.

Due to the use of dispersed reinforcement with basalt fiber and modification with superplasticizer STACHEMENT 2570/5/G, fiber concretes of rigid pavements with compressive strength up to 63.2 MPa, flexural strength in bending up to 7.66 MPa and increased durability were obtained.

The fourth section presents the results of the second stage of research, which expands the range of use of the results of the first stage of research for the construction of rigid pavements of various categories. This stage reveals the influence of the amount of superplasticizer and fiber on the properties of concrete with different amounts of cement.

Methods of optimal planning of the experiment and experimental-statistical modeling were used. According to the 15-point optimal plan, an experiment was

conducted in which the following composition factors varied: the amount of Portland cement (from 290 to 350 kg/m³), the amount of basalt fiber BAUCON®-basalt with a fiber length of 12 mm and a diameter of 18 μm (from 0.9 up to 1.5 kg/m³), the amount of superplasticizer STACHEMENT 2570/5/G (from 0.6 to 1 % of the cement mass).

All mixtures had equal workability with cone slump – 2.3 cm. It was established that the lowest W/C of mixtures with equal mobility is achieved with the introduction of superplasticizer in the amount of 0.8-0.9 % of the mass of cement. When the amount of basalt fiber changes from 0.9 to 1.5 kg/m³, the W/C of the mixture practically does not change.

Due to the increase in the amount of Portland cement, the compressive strength of fiber concrete is expected to increase, while at the design age it is more noticeable than at the age of 3 days. Increasing the dosage of superplasticizer STACHEMENT 2570/5/G from 0.6 to 0.9-1 % causes a decrease in W/C, due to which the compressive strength of fiber concrete increases at the age of 3 days by 2.3-2.6 MPa, at the age 28 days – by 3.2-3.8 MPa.

The amount of cement has the most significant effect on the level of flexural strength of fiber concrete. Due to the increase in the amount of basalt fiber from 0.9 to 1.3-1.4 kg/m³, the flexural strength in bending at the age of 3 days increases by 0.5-0.6 MPa, at the age of 28 days – by 0.7-0.8 MPa. Changing the amount of superplasticizer within the factor space of the experiment does not significantly affect the flexural strength in bending of fiber concretes.

When the amount of cement is increased from 290 to 350 kg/m³, the frost resistance of fiber concrete increases to the level of up to 100 cycles. At the same time, due to the increase in strength, the abrasion resistance of concrete also increases, that is, its wear resistance increases. When increasing the amount of basalt fiber from 0.9 to 1.3-1.4 kg/m³, the abrasion resistance of concrete increases by 11-16 %, and the frost resistance increases by approximately 50 cycles. Changing the amount of superplasticizer does not significantly affect the abrasion resistance of concrete. At the same time, when the amount of STACHEMENT 2570/5/G additive

is increased from 0.6 to 0.9 % of the cement mass, the frost resistance of fiber concrete increases to the level of up to 50 cycles.

Thanks to the use of a rational amount of basalt fiber and a superplasticizer, fiber concretes with compressive strength from 40 to 55 MPa, flexural strength in bending from 4.5 to 6 MPa, frost resistance from F200 to F300 and abrasion resistance from 0.31 to 0.38 g/cm² were received, depending on the amount of cement in the composition.

With the use of a complex of obtained experimental and statistical models and the method of multi-criteria optimization, the optimal compositions of fiber concrete rigid pavements for roads of Ia, Ib and II/III categories were selected. The selected compositions have the lowest cost price while providing the necessary strength for the corresponding road category and increased durability.

The final third stage of research was devoted to the implementation of the results in the educational process and production, in particular, the obtained rational compositions of fiber concrete.

The results of the conducted research were used by the subsidiary "Cherkasky Oblavtodor" of JSC "Roads of Ukraine". The recommended compositions of fiber concrete with basalt fiber were used during the construction of a rigid pavement in the process of capital repair of the public road of state importance P-04 Kyiv – Fastiv – Bila Tserkva – Zvenigorodka, km 212+220 – km 223+070, Zvenigorod district of Cherkasy region.

The results were also implemented in the educational process of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture in the preparation of masters in specialty 192 – Construction and civil engineering under the educational program "Roads and Airfields".

Key words: cement-concrete pavements, rigid road wear, basalt fiber, superplasticizer, air-entraining additive, strength, durability, frost resistance, abrasion resistance.