

АНОТАЦІЯ

Смирнов А. С. Бетони з використанням крупного заповнювача рециклінгового походження. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (19 – «Архітектура та будівництво»). – Навчально науковий інститут «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро, 2024.

Дана дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми одержання бетонів класів міцності С12/15, С16/20, С20/25 з крупним заповнювачем рециклінгового походження.

В умовах великої кількості руйнувань, спричинених військовими діями, існує необхідність в повторному застосуванні значних обсягів будівельних відходів після відповідної переробки. Серед загального масиву відходів демонтажу суттєву частку складає бетонний брухт, який після подрібнення та фракціонування можливо застосовувати як заповнювач для бетону. Таким чином, постає питання врахування його особливостей при розрахунку і виборі складу бетонів з заданими властивостями.

В першому розділі виконано аналіз джерел утворення бетонних та залізобетонних відходів. За результатами вивчення існуючих в Україні нормативно-технічних та декларативних документів встановлено, що під час демонтажу окремих будівельних конструкцій, знесення будівель і споруд, нового будівництва проєктні та будівельно-монтажні компанії мають здійснювати заходи, направлені на максимальне повторне застосування будівельних відходів, за необхідності після відповідної переробки. Розглянуто світовий досвід дослідження властивостей та застосування рециклінгових заповнювачів з 1970-х років ХХ століття.

На основі аналізу даних з літературних джерел визначені особливості рециклінгових крупних заповнювачів (РКЗ), а також характерні властивості бетонів з РКЗ. Встановлено, що в цілому фізико-механічні та експлуатаційні властивості РКЗ та бетону з РКЗ є дещо нижчими в порівнянні з натуральними заповнювачами (НЗ) та бетонами на НЗ. Але в залежності від вмісту РКЗ, методів подрібнення, якості сортування і фракціонування можливо досягти задані або з незначними погіршеннями властивості бетону з РКЗ. В той же час вартість такого бетону суттєво нижча порівняно з бетонами на натуральних заповнювачах.

РКЗ отримується шляхом подрібнення та переробки використаного бетону. Відповідно, РКЗ складається з двох головних фаз – натурального заповнювача та залишкового розчину. Таким чином, бетон з РКЗ є більш складною системою через наявність додаткових фаз – залишкового розчину та міжфазної контактної зони (МКЗ) між ним і натуральним заповнювачем, – які і визначають особливості РКЗ і бетонів з РКЗ. Проаналізовані існуючі методи розрахунку складів бетону з РКЗ. Виявлено, що такі методи на даний момент носять більше теоретичний характер і є досить трудомісткими та потребують значних витрат часу.

Розглянуто традиційний в Україні розрахунково-експериментальний метод підбору складу важкого бетону, покладений в основу національних стандартів. Встановлено, що існуючі підходи не дозволяють врахувати особливості РКЗ та закономірності формування структури бетону з РКЗ. На підставі цього висунута наукова гіпотеза про можливість врахування особливостей РКЗ при розрахунку і виборі складу бетону шляхом введення експериментально визначених поправок на походження і фізико-механічні властивості РКЗ. Також в розділі встановлені обмеження, прийняті в даній роботі, щодо отримання важких бетонів з РКЗ для певного виду конструкцій, що працюють на стиск та згин.

В другому розділі наведені характеристики застосованих під час дослідження місцевих матеріалів, а також описані методики

експериментальних досліджень властивостей РКЗ та бетону з РКЗ. Наведено зерновий склад натуральних заповнювачів, визначено хімічний та мінералогічний склади портландцементу ПЦ II/Б-Ш-400 (СЕМ II/В-S 32,5 N) виробництва Heidelbergcement, м. Кривий Ріг та нормальна густина цементного тіста. Встановлено, що зерновий склад НЗ в його природному стані не відповідає вимогам національних стандартів, що потребує його корекції. Розраховані склади бетонів, зразки з яких підлягали наступному подрібненню, та описані метод, засоби, обладнання, що застосовувалися для подрібнення.

В третьому розділі представлені результати фізико-механічних випробувань РКЗ, отриманих після подрібнення зразків бетону у віці 28 діб, 90 діб та 180 діб. Встановлено, що зерновий склад утворених після подрібнення сумішей фракцій не відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-75-98 через надмірний обсяг фракцій 10...20 мм та 0...5 мм. В той же час зерновий склад крупних фракцій, що і є РКЗ, в цілому відповідає вимогам нормативної документації. При вмісті крупних фракцій (>5 мм) в сумішах 82,9...84,9% вміст кожної фракції в РКЗ складає: 0,8...5,7% (20...25 мм), 63,3...70,1% (10...20 мм), 28,9...31,2% (5...10 мм).

Встановлено, що головним фактором, що має визначальний вплив на властивості РКЗ, є наявність залишкового розчину на зернах щебня. Його масовий вміст зростає разом зі зменшенням крупності фракцій, що призводить до зменшення насипної та середньої густини РКЗ. Насипна густина РКЗ фракцій 5...10 мм становила 1,05...1,1 г/см³, фракцій 10...20 мм – 1,2...1,27 г/см³. Середня густина зерен: фракцій 10...20 мм – 2,44...2,55 г/см³, фракцій 5...10 мм – 2,29...2,38 г/см³. Міцність за показником дробильності також зменшується разом із зменшенням розміру зерен: з 11,6...17,4% у фракціях 10...20 мм до 15,6...21,0% у фракціях 5...10 мм. За рахунок наявності пористого залишкового розчину водопотреба РКЗ в 7,8...8,7 разів вища за водопотребу НЗ.

Враховуючи виявлені закономірності у властивостях РКЗ, розроблені рекомендації щодо формування раціонального зернового складу РКЗ, які полягають у досягненні найбільшої насипної густини та найбільш щільного пакування зерен. Експериментально встановлено, що разом зі зменшенням в РКЗ вмісту фракції 5...10 мм за масою до мінімально допустимого на рівні 20% згідно з ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013 досягається найбільша насипна густина з найменшою порожнистістю. На основі цих рекомендацій підібрані три суміші РКЗ, які відрізнялися міцністю та складом бетону-джерела.

В четвертому розділі експериментально встановлені фізико-механічні властивості бетонів з РКЗ. На основі аналізу традиційного розрахунково-експериментального методу було зроблено припущення про те, що врахувати особливості РКЗ (наявність залишкового розчину та МКЗ, менші густина зерен, насипна густина та міцність, підвищені пористість та лещадність) можливо шляхом введення поправок до коефіцієнта якості заповнювачів A , який впливає на водо-цементне співвідношення, та до загальної витрати води. Експериментальне визначення зазначених поправок виконувалось, виходячи з умов рівномірності бетонів та рівнорухливості бетонних сумішей на НЗ та РКЗ. З цією метою був запланований двофакторний експеримент. В якості факторів, що варіюються, виступали цементно-водне співвідношення (Ц/В) та витрата води в бетонних сумішах на РКЗ. За результатами експерименту отримані рівняння регресії першого порядку, які встановлювали залежність рухливості бетонних сумішей з РКЗ та міцність бетонів з РКЗ від факторів, що варіювалися.

Для отримання проектних значень рухливості та міцності був розрахований та підібраний склад бетону класу С20/25 з рухливістю бетонної суміші з ОК=7 см. При цьому для забезпечення ідентичності зернового складу НЗ з отриманими сумішами РКЗ здійснювалось коригування вмісту в НЗ фракції 5...10 мм до рівня 20%. Отриманий склад бетону на НЗ прийнято як базовий для аналогічних складів з РКЗ на нижніх рівнях варіювання

факторів. На інших рівнях варіювання склад бетонів з РКЗ визначався лише інтервалами варіювання факторів.

Експеримент виконувався для кожної суміші РКЗ окремо. З запроєктованих складів бетону для кожної точки плану експерименту виготовлені по 3 зразки бетону з РКЗ. Для кожної бетонної суміші перед формуванням визначалась густина та рухливість за розпливом конуса. Для сумішей з витратою води на верхньому рівні варіювання розплив конуса становив 15,2...17,7 см, що відповідало ОК=8...10 см; з витратою води на нижньому рівні варіювання розплив конуса становив 10,8...12,4 см, що відповідало ОК=5,5...6 см. Густини бетонних сумішей становили 2,33...2,41 г/см³ незалежно від суміші РКЗ. Отримані густини виявились вищими за розрахункові. Очевидно в процесі замішування сумішей в змішувачі відбулося додаткове руйнування слабких зерен РКЗ, що разом з механічним впливом під час механічного ущільнення суміші та вібраційним впливом сприяло збільшенню щільності пакування зерен РКЗ.

Результати визначення рухливості бетонних сумішей очікувано корелювали з витратою води. В результаті розв'язку отриманих за результатами визначення рухливості бетонних сумішей рівнянь регресії, встановлено, що поправка на витрату води для забезпечення рівнорухливості бетонної суміші з РКЗ становить 1,4...1,6% від масового вмісту РКЗ.

Через 28 діб зразки-куби з бетону з РКЗ, що витримувались в нормальних термовологісних умовах, підлягали випробуванню на міцність на стиск. Визначалась також густина бетону, яка склала 2,2...2,33 г/см³. Отримані густини бетону корелювались з Ц/В та витратою води: найбільша густина у зразків з найбільшим Ц/В та найменшою витратою води.

За результатами визначення міцності бетону з РКЗ встановлено наступне. Очікувано зразки з більшим Ц/В мали більшу міцність бетону: 29,74...32,45 МПа в зразках бетону з Ц/В на верхньому рівні варіювання; 24,14...26,77 МПа в зразках бетону з Ц/В на нижньому рівні варіювання. За однакового Ц/В міцність бетону зразків з меншою витратою води виявилась

більшою, ніж у зразках бетону з більшим вмістом води. Крім цього отримані міцності бетону зразків з РКЗ на нижньому рівні варіювання факторів, що відповідало складу цільового бетону на НЗ, навіть перевищували значення міцності бетону на НЗ. Цей ефект спостерігався незалежно від складу сумішей РКЗ, з яких виготовлялися зразки. Таким чином, були встановлені закономірності формування структури бетону з РКЗ. Враховуючи пряму залежність між Ц/В та міцністю бетону, встановлено, що реальне Ц/В в сумішах з меншою кількістю води виявилось більшим від розрахункового. Очевидно, такий ефект пов'язаний з наявністю в РКЗ пористого залишкового розчину, з яким вода замішування миттєво взаємодіяла, заповнивши його пори, і, таким чином, підвищуючи Ц/В в контактних зонах між РКЗ та матрицею нового розчину.

Для розрахунку поправки на якість заповнювача розрахункове Ц/В було відкориговане шляхом зменшення витрати води на величину експериментально визначеної поправки на витрату води. Розв'язавши отримані рівняння регресії відносно Ц/В та використовуючи формулу Болоемея одержана величина поправки до коефіцієнта якості заповнювачів $\Delta A = -0,05$.

У п'ятому розділі представлені результати впровадження результатів дослідження під час виробництва бетону з РКЗ для влаштування підлоги в одному зі складських приміщень в м. Дніпрі ТОВ «ДНІПРО ЗБК». Наведена послідовність розрахунку складу бетону з РКЗ згідно з удосконаленим методом. Розрахований економічний ефект від заміщення НЗ на РКЗ складає 9,6% для бетону класу С12/15; 7,2% для бетону класу С16/20; 7,4% та 6,9% для бетону класу С20/25 в залежності від марки цементу в бетоні на НЗ. Зменшення емісії CO₂ у випадку застосування РКЗ складає 11% під час виготовлення бетону класу С16/20; 6,4% під час виготовлення бетону класу міцності С20/25 (за умови використання цементу марки М500, порівняно з бетоном на НЗ на цементі марки М500); 26,6% під час виготовлення бетону

класу міцності C20/25 (за умови використання цементу марки М500, порівняно з бетоном на НЗ на цементі марки М400).

Ключові слова: бетон, бетонні відходи, випробування, водопотреба, екологічний ефект, економічний ефект, зерновий склад, міцність, насипна густина, рециклінговий крупний заповнювач, розрахунок складу бетону, рухливість бетонної суміші, середня густина

ABSTRACT

Smyrnov A. Concrete with the use of coarse aggregate of recycling origin. – Qualifying scientific paper as a manuscript.

The thesis for PhD degree in specialty 192 «Construction and civil engineering» (19 – «Architecture and construction») – Educational Scientific Institute «Prydniprovskya State Academy of Civil Engineering and Architecture» of the Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, 2024.

This dissertation work is devoted to solving the important scientific and technical problem of obtaining concrete of strength classes C12/15, C16/20, C20/25 with coarse aggregates of recycling origin.

In the conditions of a large amount of destruction caused by military actions there is a need to reuse significant volumes of construction waste after appropriate processing. Among the total mass of demolition waste a significant share is concrete scrap, which after grinding and fractionation can be used as coarse aggregate for concrete. Thus the question arises of taking into account the features of that aggregate when mix designing and choosing the composition of concrete with given properties.

In the first chapter the sources of concrete and reinforced concrete waste have been analyzed. Based on the study of existing regulatory and technical and declarative documents in Ukraine it has been established that during the dismantling of individual building structures, demolition of buildings and structures, new construction design and construction companies are required to

implement measures aimed at maximizing the reuse of construction waste, after appropriate processing if necessary. The global experience of researching the properties and applications of recycled aggregates since the 1970s has been considered.

Based on the analysis of data from literary sources the peculiarities of recycled concrete aggregates (RCA) and the characteristic properties of concrete with RCA have been determined. It has been established that overall, the physical, mechanical, and operational properties of RCA and concrete with RCA are somewhat inferior compared to natural aggregates (NA) and concrete with NA. However, depending on the content of RCA, grinding methods, quality and thoroughness of sorting and fractionation of RCA, it is possible to achieve the specified properties of concrete with RCA, sometimes with slight deterioration. At the same time the cost of such concrete is significantly lower compared to concrete with NA.

RCA is obtained by crushing and processing of used concrete. Accordingly, RCA consists of two main phases – natural aggregate and residual mortar. Therefore, concrete with RCA is a more complex system due to the presence of additional phases – residual mortar and the interfacial transition zone (ITZ) between it and the NA. These phases define the characteristics of RCA and concrete with RCA. Existing methods of mix design of concrete with RCA have been analyzed. It has been found that these methods currently tend to be more theoretical and are quite time-consuming.

The common in Ukraine calculation-experimental method of mix design of heavy concrete, which is the basis of national standards, has been reviewed. It has been determined that existing approaches do not adequately account for the peculiarities of RCA and the regularities of the formation of concrete structure with RCA. Based on this, a scientific hypothesis has been proposed regarding the possibility of incorporating the features of RCA when mix designing and choosing the composition of concrete by introducing some experimentally determined adjustments that account for the origin and physical and mechanical properties of

RCA. Also, the limitations adopted in this work have been established in the chapter regarding the production of heavy concrete with RCA for some types of structures operating in compression and bending.

In the second chapter, characteristics of the local materials used during the research are given, along with a description of methods for experimental investigations into the properties of RCA and concrete containing RCA. The grain composition of natural aggregates is given, the chemical and mineralogical composition of Portland cement PC II/B-Sh-400 (CEM II/B-S 32.5 N) produced by Heidelbergcement, Kryvyi Rih, and the normal density of cement dough are determined. It has been determined that the grain composition of NA in its natural state does not meet the requirements of national standards, necessitating corrections. The compositions of the concretes, the samples of which were to be crushed, were designed, and the method, tools and equipment used for crushing were described.

The third chapter presents the results of physical and mechanical tests of RCA obtained after crushing concrete samples aged 28 days, 90 days and 180 days. It has been established that the grain composition of fractions (fine and coarse) formed after grinding does not meet the requirements of DSTU B V.2.7-75-98 due to the excessive volume of fractions 10...20 mm and 0...5 mm. At the same time the grain composition of coarse fractions, which is actually RCA, generally meets the requirements of regulatory documentation. With a content of coarse fractions (>5 mm) in mixtures ranging from 82.9% to 84.9%, the content of each coarse fraction solely in RCA is as follows: 0.8% to 5.7% for 20-25 mm, 63.3% to 70.1% for 10-20 mm, and 28.9% to 31.2% for 5-10 mm.

It has been established that the main factor significantly influencing the properties of RCA is the presence of residual mortar on the crushed stone grains. Its mass content increases as the particle size decreases, leading to a decrease in bulk density and specific density of RCA grains. The bulk density of fractions 5-10 mm ranged from 1.05 to 1.1 g/cm³, while for fractions 10-20 mm it ranged from 1.2 to 1.27 g/cm³. The specific density of grains was 2.44 to 2.55 g/cm³ for

fractions 10-20 mm and 2.29 to 2.38 g/cm³ for fractions 5-10 mm. The strength, as indicated by the crushing index, also decreases with a reduction in grain size from 11.6% to 17.4% in fractions 10-20 mm to 15.6% to 21.0% in fractions 5-10 mm. Due to the presence of porous residual mortar the water demand of RCA is 7.8 to 8.7 times higher than that of NA.

Taking into account the identified regularities in the properties of RCA, recommendations have been developed for forming a rational grain composition of RCA, which consists in achieving the highest bulk density and densest grain packing. Experimental findings indicate that reducing the mass content of the 5...10 mm fraction in RCA to a minimum permissible level of 20% according to DSTU-N B.V.2.7-299:2013 results in the highest bulk density with the lowest void content. Based on these recommendations three RCA mixtures were selected differing in strength and composition of the source concrete.

In the fourth chapter the physical and mechanical properties of concrete with RCA are experimentally determined. Based on analysis of the traditional calculation-experimental mix design method for heavy concrete assumptions were made that taking into account the features of RCA (presence of residual solution and ITZ, reduced specific and bulk densities and strength, increased porosity and content of flat particles) was possible by introducing adjustments to the quality coefficient of aggregates A, which affects the water-cement ratio, and to the total water consumption. The experimental determination of the mentioned adjustments was carried out based on the conditions of equal compressive strength of concrete and workability of concrete mixtures on NA and RCA. For this purpose a factorial experiment with two factors was planned. The variables were the cement-water ratio (C/W) and water consumption in concrete mixtures with RCA. According to the results of the experiment, first-order regression equations were obtained, which established the dependence of the workability of concrete mixtures with RCA and the compressive strength of concrete with RCA on variables.

To obtain the design values of workability and strength the mixture of concrete class C20/25 was designed and selected with the Slump value of the

concrete mixture 7 cm. Moreover, to ensure the identity of the grain composition of the NA with the obtained RCA mixtures the content of the NA fraction of 5...10 mm was adjusted to the level of 20%. The obtained composition of concrete with NA has been intended as a base for similar compositions with RCA at the lower levels for factors. At other levels the composition of concrete with RCA was determined only by the differences of factors.

The experiment was performed for each RCA mixture separately. For each point of the experimental plan 3 samples of concrete with RCA were made from the designed concrete mixes. For each concrete mixture the density and workability (slump cone spread) were determined before pouring into the molds. For mixes with water consumption at the upper level of factor the slump cone spread ranged from 15.2 to 17.7 cm, corresponding to a slump value of 8 to 10 cm. For mixes with water consumption at the lower level of factor the slump cone spread ranged from 10.8 to 12.4 cm, corresponding to a slump value of 5.5 to 6 cm. The densities of the concrete mixes ranged from 2.33 to 2.41 g/cm³ regardless of the RCA mixture. The obtained densities turned out to be higher than the calculated ones. It is evident that during the mixing process in the mixer there was additional breakdown of weak RCA grains. This, along with the mechanical compaction during the compaction process and the vibrational influence, contributed to an increase in the packing density of RCA grains.

The results of determining the workability of concrete mixtures were found to correlate as expected with water consumption. As a result of solving the regression equations derived from the results of determining the workability of concrete mixtures it was established that the water content adjustment required to achieve appropriate workability of concrete mixes with RCA is 1.4% to 1.6% of the mass content of RCA.

After 28 days the concrete cube samples containing RCA, which had hardened under normal thermo-humid conditions, underwent compressive strength testing. Also the density of the concrete was determined to range from 2.2 to 2.33 g/cm³. These densities were found to correlate with the W/C ratio and water

content, with higher densities observed in samples with higher W/C ratio and lower water content.

According to the results of compressive strength testing of concrete with RCA the following was established. As expected, samples with a higher C/W ratio exhibited greater strength of concrete: 29.74 to 32.45 MPa in samples of concrete with a C/W ratio at the upper level of factor; 24.14 to 26.77 MPa in samples of concrete with C/W ratio at the lower level of factor. Among samples with the same C/W ratio those with lower water content showed higher strength of concrete compared to those with higher water content. Additionally, the obtained strength of samples of concrete with RCA at the lower level of factors, which corresponded to the composition of the target concrete with NA, even exceeded the value of the strength of the concrete with NA. This effect was observed regardless of the composition of RCA mixtures used to prepare the samples. Thus, the regularities of the formation of the structure of concrete with RCA have been established. Considering the direct relationship between C/W ratio and concrete strength, it was found that the real C/W ratio in mixes with a smaller amount of water turned out to be greater than the calculated one. Obviously, this effect is related to the presence of a porous residual mortar in RCA, which instantly interacted with water during mixing, filling its pores and thereby increasing the effective W/C ratio in the contact zones between RCA and the matrix of the new mortar.

For the calculation of the adjustment for the quality of the aggregate, the estimated C/W ratio was adjusted by reducing the water consumption by the value of the experimentally determined adjustment for the water content. Solving the obtained regression equations relative to C/W ratio and using the Bolomey formula, the value of the adjustment to the quality coefficient of aggregates $\Delta A = -0.05$ was obtained.

The fifth chapter presents the results of the implementation of the research results during the production of concrete from RCA for laying the floor in one of the warehouses in the city of Dnipro by «DNIPRO ZBK LLC». The sequence of mix design of concrete with RCA according to the improved method is given. The

calculated economic effect of replacing NA with RCA is 9.6% for concrete of class C12/15; 7.2% for concrete of class C16/20; 7.4% and 6.9% for concrete of class C20/25, depending on the cement type in concrete with NA. The reduction of CO₂ emissions in case of using RCA is 11% during the production of concrete of class C16/20; 6.4% during the production of concrete of class C20/25 (provided that cement 42.5 R is used, as compared to concrete on NA using cement 42.5 R); 26.6% during the production of concrete of class C20/25 (provided that cement 42.5 R is used, compared to concrete on NA using cement 32.5 R).

Key words: concrete, concrete waste, tests, water consumption, ecological effect, economic effect, grain composition, strength, bulk density, recycling coarse aggregate, mix design of concrete, workability of concrete, specific density