



SHAHAB HASANINASAB¹⁾
 MOHAMMAD HASSAN JEBUR²⁾
 HASSAN SHARAFI³⁾

THE EFFECT OF NANO-CaCO₃ ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND PERMEABILITY OF ROLLER COMPACTED CONCRETE PAVEMENT (RCCP)

WPŁYW NANO-CaCO₃ NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE I PRZEPUSZCZALNOŚĆ NAWIERZCHNI Z BETONU WAŁOWANEGO (RCCP)

STRESZCZENIE. W pracy przedstawiono badania właściwości mechanicznych, nasiąkliwości i przepuszczalności nawierzchni z betonu wałowanego, zawierających różne ilości nanometrycznego węgla wapnia CaCO₃. Nano-cząstki CaCO₃ dodawano do betonu wałowanego i wyznaczano własności mechaniczne próbek. Wyniki badań wykazały, że nano-CaCO₃ może poprawić wytrzymałość nawierzchni z betonu wałowanego na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu. Nano-CaCO₃ użyty w ilości do 1% w miejsce cementu może przyspieszyć tworzenie się żelu uwodnionego krzemianu wapnia we wczesnych stadiach hydratacji dzięki zwiększonej ilości Ca(OH)₂. Zwiększenie udziału nano-CaCO₃ o więcej niż 1% skutkuje mniejszą wytrzymałością na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz większą nasiąkliwością i przepuszczalnością. Dodatek nano-CaCO₃ może zwiększyć ilość uwodnionego krzemianu wapnia, dzięki czemu poprawiają się właściwości mechaniczne betonu, wypełniają się pory powietrzne i zmniejsza się nasiąkliwość betonu.

SŁOWA KLUCZOWE: nano-węgiel wapnia CaCO₃, nawierzchnie z betonu wałowanego, przepuszczalność, właściwości mechaniczne.

ABSTRACT. The paper presents the investigations of the mechanical properties water absorption and porosity of the roller compacted concrete pavements (RCCP) with different amounts of nano-CaCO₃. The nano-particles of CaCO₃ were partially added to RCCP, and the mechanical properties of the specimens were measured. The results indicate that nano-CaCO₃ can improve the compressive strength and the tensile splitting strength of RCCP. The nano-CaCO₃ used up to 1% as a partial replacement for cement can accelerate the C-S-H gel formation at the early ages of hydration. This is due to increased crystalline Ca(OH)₂ amount during the early ages of hydration. Increasing nano-CaCO₃ content by more than 1% decreases the compressive and tensile splitting strength, and increases water absorption and permeability. The addition of CaCO₃ nano-particles may increase C-S-H content, which improves the mechanical properties of concrete, fills the concrete pores, and decreases water absorption and permeable voids volume.

KEYWORDS: mechanical properties, nano-CaCO₃, permeability, roller compacted concrete pavements.

DOI: 10.7409/rabd.018.013

¹⁾ Razi University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Tagh Bostan, 67149, Kermanshah, Iran; s.hasani@razi.ac.ir (✉)

²⁾ Razi University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Tagh Bostan, 67149, Kermanshah, Iran; mohhasan213@gmail.com

³⁾ Razi University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Tagh Bostan, 67149, Kermanshah, Iran; h_sharafi@razi.ac.ir

1. WPROWADZENIE

Nawierzchnie asfaltowe i sztywne niektórych autostrad i dróg ekspresowych na świecie dotyka poważny problem, polegający na koleinowaniu i na korozji zbrojenia, głównie w następstwie zwiększonej liczby mocno obciążonych samochodów ciężarowych, wysokiej temperatury otoczenia, działania silnie korozyjnych środowisk i innych czynników geomorfologicznych występujących wzdłuż wybrzeży. Dlatego nawierzchnia z betonu wałowanego stanowi alternatywę dla nawierzchni konwencjonalnych [1].

Beton wałowany jest jednym z szeroko stosowanych materiałów budowlanych. Chociaż jego własności zostały dobrze poznane na poziomie makrostrukturalnym, właściwości takich materiałów cementowych na poziomie mikrostrukturalnym wymagają dalszych badań. Zrozumienie natury i budowy betonu w mikro i nanoskali może pomóc w poprawie jego właściwości mechanicznych [2].

Najnowsze badania wykazały, że zastosowanie nano-materiału w betonach silnie wpływa na ich właściwości. Zastępując cement właściwie dobranymi nano-materiałami można poprawić wytrzymałość mechaniczną betonu. Wykazano, że mieszanka nano-ditlenku krzemu SiO_2 z nano-węglanem wapnia CaCO_3 zwiększa stosunek wytrzymałości na zginanie do wytrzymałości na ściskanie betonu ultrawysokowartościowego. Liu i in. [3] stwierdzili, że zwiększanie zawartości nano- CaCO_3 skutkuje zmniejszeniem rozpylności i skróceniem czasu wiązania, natomiast nie wpływa na wodochłonność mieszanki betonowej. Nano- CaCO_3 może aktywować hydratację cementu. Shaikh i Supit w [4] oraz Sato i Beaudoin w [5] wprowadzali nano- CaCO_3 do betonu zawierającego nieklinkierowe materiały wiążące, takie jak popiół lotny i granulowany żużel wielopieczowy. Składniki te, o dużej zawartości krzemianów i glinianów, reagowały z nano-cząstkami CaCO_3 wytwarzając dodatkową ilość uwodnionego krzemianu wapnia. W rezultacie uzyskano poprawę właściwości betonów o dużej zawartości popiołów lotnych [4]. Gdy osiągnięto optymalną zawartość nano- SiO_2 , wytrzymałość na zginanie i ściskanie betonu lub zaprawy także osiągnęła maksimum [5]. Ronget i in. [6] odkryli, że zwiększenie zawartości nano- SiO_2 o około 5% względem masy cementu skutkuje pogorszeniem własności mechanicznych. Jest to w pewnym stopniu spowodowane zbrzyleniem się cząstek nano- SiO_2 . Zmniejszanie się odległości między nano-cząstkami uniemożliwia konieczny wzrost kryształów $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i skutkuje niskim stosunkiem ilości formy krystalicznej do żelowej uwodnionego krzemianu wapnia oraz rozluźnieniem struktury matrycy cementowej [7].

1. INTRODUCTION

Asphalt and rigid pavements in some highways and expressways across the world have suffered extensive pavement problems, such as severe wheel path rutting and steel reinforcement corrosion, mainly due to increased numbers of heavily loaded trucks, prevailing high ambient temperatures, highly corrosive environments and other geomorphic factors along the seaboard. Therefore, the Roller-Compacted Concrete Pavement (RCCP) is an alternative to conventional pavements [1].

RCCP is one of the widely used construction materials. While its properties have been well studied at macrostructural levels, the properties of such cementitious materials at the micro level require further study. Understanding the structure and behaviour of concrete at the micro and nano-scale can help to improve mechanical properties of concrete [2].

Recent studies have shown that the use of nano-material in concretes strongly affects their properties. Replacement of cement with properly selected nano-materials can improve the mechanical strength of concrete. The nano-silica/ SiO_2 and nano-limestone/ CaCO_3 blend is proven to strengthen the flexural strength to compressive strength ratio of UHPC. Liu et al. [3] found that when increasing the content of nano-limestone, it decreases the flow ability and shortens the setting time, without affecting the water requirement for normal consistency of cement. Nano- CaCO_3 can activate cement hydration. Shaikh & Supit [4] and Sato and Beaudoin [5] combined the nano- CaCO_3 with concrete containing supplementary cementitious materials (SCMs), such as fly ash and ground granulated blast-furnace slag, where SCMs with high silicate and aluminate content reacted with CaCO_3 nano-particles to produce additional C-S-H in the system. As a result, high volume fly ash (HVFA) concretes were improved [4]. When the content of the nano- SiO_2 reached optimum value, the compressive and flexural strength of concrete or mortar also reached their maximum [5]. Ronget et al. discovered that increasing the nano- SiO_2 content by about 5% of cement mass decreases the mechanical properties. This is slightly due to the agglomeration of nano- SiO_2 particles [6]. Decreasing the distance between nano-particles prevents the necessary growth of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ crystals, and results in a small crystal to C-S-H gel ratio and a loose microstructure of the cement matrix [7].

Celem przedstawionych w pracy badań była analiza wpływu nano-węglanu wapnia na właściwości nawierzchni z betonu wałowanego i wyjaśnienie, w jaki sposób nano- CaCO_3 może przyczynić się do uzyskania odpowiednich nano-materiałów ulepszających właściwości betonu. Badano także wpływ różnych warunków klimatycznych na beton wałowany jako materiał używany do budowy dróg. Uszkodzenia nawierzchni drogowych występują na skutek oddziaływania kilku czynników, w tym różnic temperatury w ciągu dnia i nocy a także między porami roku oraz działania dużych obciążeń od ruchu kołowego.

2. METODOLOGIA

Nano-węglan wapnia CaCO_3 wybrano, aby zbadać wpływ nano-materiałów na nawierzchnie z betonu wałowanego. Materiały składowe betonu, w tym cement, kruszywo grube i drobne oraz wodę, dobrano zgodnie z zaleceniami ASTM. Aby właściwie zaprojektować mieszankę betonową należało zapewnić, że wszystkie składniki tej mieszanki, w tym kruszywa, piasek i cement, spełniają wymagania norm ASTM. Kruszywa i piasek zostały zbadane pod względem ciężaru właściwego, absorpcji, analizy sitowej, miąższości piasku, stabilności objętościowej, utraty kątów, wydłużenia, zawartości ziaren wydłużonych i płaskich i gęstości. Cement zbadano pod względem stopnia zmielenia, konsystencji normowej, czasu początku i końca wiązania oraz wytrzymałości na ściskanie zgodnie z ASTM. Po zweryfikowaniu materiałów zostały one użyte do wykonania mieszanki betonowej. Po kilku próbach uzyskano sztywną mieszankę o zerowym opadzie stożka i wytrzymałości na ściskanie wynoszącej 35 MPa przy badaniu na próbkach walcowych.

3. MATERIAŁY I PROGRAM BADAŃ

3.1. MATERIAŁY

W badaniach użyto cementu portlandzkiego typu II. Cement zbadano zgodnie z ASTM C109, C187, C191 i C204. Uzyskano wyniki zgodne z normami ASTM C150 [8-13]. Fizyczne i mechaniczne właściwości cementu zgodnego z ASTM C150 [12] przedstawiono w Tabl. 1.

Nano-materiały to materiały o maksymalnej wielkości cząstek od 1 do 1000 nanometrów (10^{-9} m). Węglan wapnia ma strukturę krystaliczną aragonitu lub kalcytu. Nano-węglan wapnia dostępny jest na rynku w postaci dwóch produktów: zmielonego węglanu wapnia i wytrąconego węglanu wapnia. Kształt i rozkład wielkości ziaren tych dwóch produktów są różne. Do pomiaru wielkości kryształów i ziaren stosuje się metody dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) i elektrońskiej mikroskopii transmisyjnej (TEM). W badaniach uży-

The aim of this research is to analyze the effects of nano- CaCO_3 on RCCP properties and how it can help to obtain the suitable nano-materials to improve the properties of concrete. This paper will also study the influence of different weather conditions on Roller Compacted Concrete (RCC), the material used in road construction. Road damages occur as a result of several factors including temperature differences during the day and night and between the seasons in a year and exposure to high traffic loads.

2. METHODOLOGY

Nano-limestone CaCO_3 has been selected to study the effect of nano-materials on RCCP. The concrete components were selected according to the ASTM specification including cement, coarse and fine aggregates, and water. In order to properly design the mixture, it was necessary to ensure that all components of the mixture, including the aggregates, sand and cement correspond to the ASTM international standards. The aggregates and sand were tested for specific gravity, absorption, and sieve analyses, fineness modulus of sand, soundness, and loss of angles, elongation, flakiness, as well as a density. The cement was tested for fineness, normal consistency, initial and final setting, and compressive strength. All of rates were selected according to ASTM. When the materials were verified they were used in designing the concrete mix. After several trials, a stiff zero-slump mix and a 35 MPa standard compressive cylinder was achieved.

3. MATERIALS AND EXPERIMENTAL

3.1. MATERIALS

In this study, type II Portland cement was used. The cement was tested according to ASTM C109, C187, C191 and C204. The results confirmed the conformity with the ASTM C150 requirements [8-13]. Table 1 illustrates the physical and mechanical properties of the cement and the requirements of ASTM C150 [12].

Nano-materials are materials with a maximum dimension between 1 and 1000 nano-meters (10^{-9} m). Calcium carbonate has a crystal structure of aragonite or calcite. Nano-calcium carbonate appears in two types of commercial products as a ground calcium carbonate (GCC) and precipitated calcium carbonate (PCC). The particle shape and particle size distribution of these two products are different. X-ray diffraction method (XRD) and transmission electron microscopy (TEM) are used to determine the crystal size and the primary particle size. In this research

to wytrąconego węgla wapnia. W Tabl. 2 przedstawiono własności fizyczne nano-cząstek węgla wapnia CaCO_3 wykorzystanego w badaniach.

the precipitated calcium carbonate (PCC) was used. Table 2 shows physical properties of calcium carbonate nano-particles CaCO_3 applied in this study.

Table 1. Cement characteristics according to testing and ASTM C150
Tablica 1. Charakterystyka badanego cementu i wymagania wg ASTM C150

Type of test Rodzaj badania	Related ASTM specification Odpowiednia norma ASTM	Characteristics Charakterystyki	Results Wyniki	Requirements of ASTM C150 II Wymagania dla cementu typu II wg ASTM C150
Setting time [minutes] Czas wiązania [minuty]	C191	Initial / Początek Final / Koniec	105 315	> 60 < 600
Mortar compressive strength [MPa] Wytrzymałość na ściskanie zaprawy [MPa]	C109	At age 3 days / Po 3 dniach At age 7 days / Po 7 dniach At age 28 days / po 28 dniach	13.5 29.6 47.3	Min. 12 Min. 17 No limit / Brak wymagań
Blaine fineness (cm^2/g) Powierzchnia właściwa wg Blaine'a (cm^2/g)	C204	–	3035	Min. 2800
Water demand [%] Wodożądność [%]	C187	–	27.5	No limit / Brak wymagań

Table 2. Physical properties of calcium carbonate nano-particles
Tablica 2. Właściwości fizyczne nano-cząstek węgla wapnia

Physical property Właściwość fizyczna	Value Wartość	Physical property Właściwość fizyczna	Value Wartość
Molecular weight [g/mol] Masa cząsteczkowa	100.09	Bulk density [g/cm^3] Gęstość nasypowa	0.68
Appearance Wygląd	White powder Biały proszek	Average particle size [nm] Średnia wielkość cząstki	10-45
Melting point [$^{\circ}\text{C}$] Temperatura topnienia	825	Size range Zakres wielkości	N/A nie dotyczy
Boiling point Temperatura wrzenia	Decomposes Rozkład	Crystal phase Faza krystaliczna	N/A nie dotyczy
Density Gęstość	N/A nie dotyczy	Morphology Budowa	cubic or hexagonal sześcienna lub heksagonalna
True density [g/cm^3] Gęstość rzeczywista	2.93		

W badaniach użyto kruszyw grubych, których chropowata tekstura zmniejsza ryzyko segregacji i zwiększa adhezję między kruszywem a zaczynem cementowym, a tym samym beton charakteryzuje się lepszymi właściwościami mechanicznymi. Analizę sitową drobnych i grubych kruszyw, której wyniki przedstawiono w Tabl. 3 i na Rys. 1-3, wykonano zgodnie z ASTM C136 [13].

Coarse aggregates were used in this study because their rough texture reduces the risk of segregation and increases the adhesion between aggregates and the cement paste, thereby enhancing the concrete's mechanical properties. As shown in Table 3 and Figs 1-3, the sieve analysis of fine and coarse aggregates was made according to ASTM C136 [13].

Table 3. Sieve analysis results for fine and coarse aggregates
 Tablica 3. Uziarnienie kruszywo drobnych i grubych

Sieve size / Rozmiar sita	Type of sample / Rodzaj próbki		
	Type one / Rodzaj pierwszy	Type two / Rodzaj drugi	Sand / Piasek
1-in. (25 mm)	100	–	–
3/4-in. (19 mm)	96	–	–
1/2-in. (12.5 mm)	52	100	–
3/8-in. (9.5 mm)	25	90	–
No. / Nr 4 (4.75 mm)	5	22	100
No. / Nr 8 (2.36 mm)	1	3	71.3
No. / Nr 16 (1.19 mm)	–	–	46.2
No. / Nr 30 (0.6 mm)	–	–	28.17
No. / Nr 60 (0.3 mm)	–	–	15.2
No. / Nr 100 (150 μ m)	–	–	3.4
No. / Nr 200 (75 μ m)	–	–	1

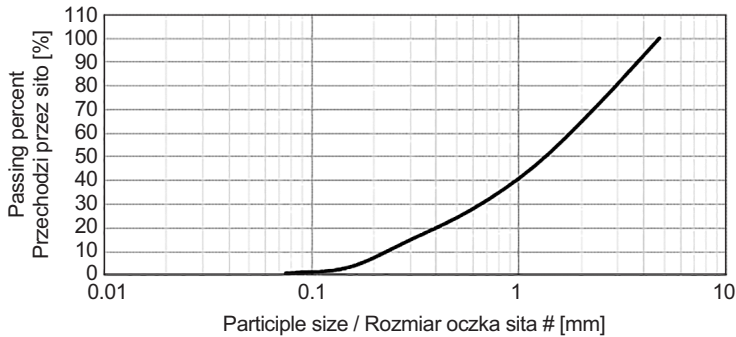


Fig. 1. Particle size distribution of sand
 Rys. 1. Uziarnienie piasku

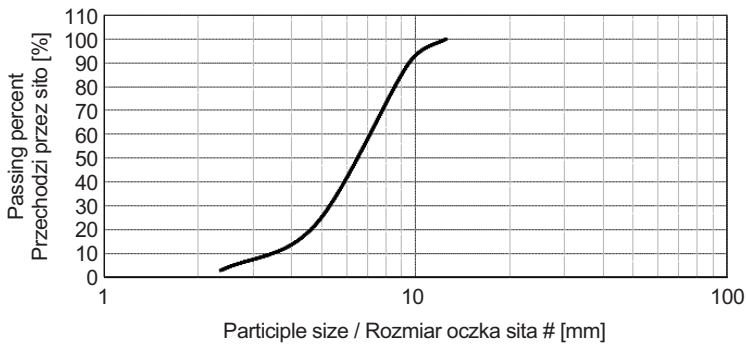


Fig. 2. Particle size distribution of type two
 Rys. 2. Uziarnienie kruszywa drugiego rodzaju

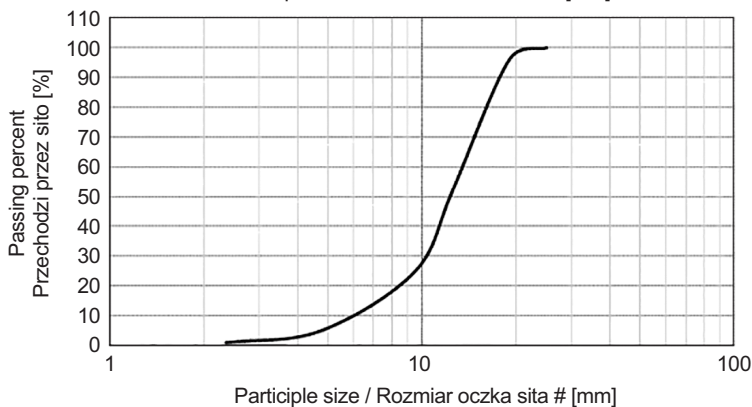


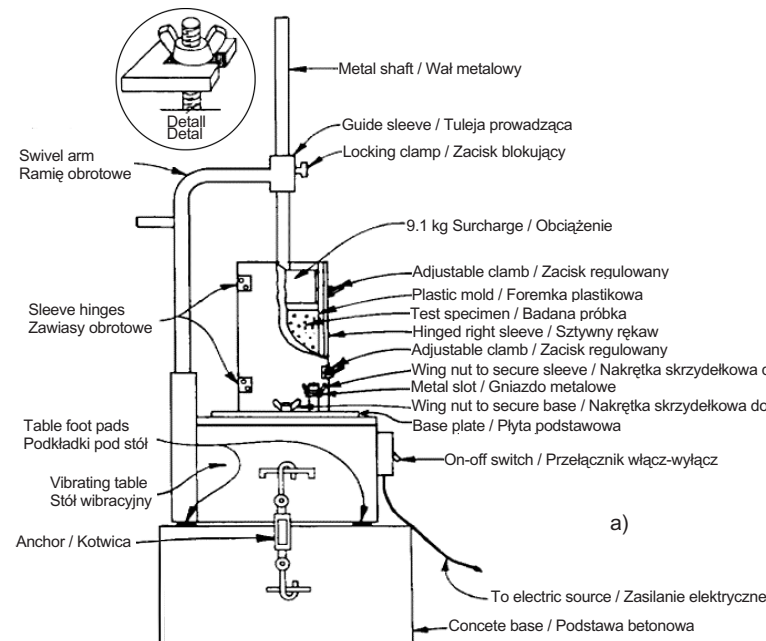
Fig. 3. Particle size distribution of type one
 Rys. 3. Uziarnienie kruszywa pierwszego rodzaju

3.2. PROGRAM BADAŃ

Po 28 dniach wytrzymałość betonu wynosiła 35 MPa. Mieszanka została zaprojektowana zgodnie z normowymi zasadami doboru proporcji dla betonu z zerowym opadem stożka (ACI 211.3R-02) [14]. Przyjęto następujące kryteria:

- 1) wytrzymałość na ściskanie: 35 MPa dla próbki walcowej po 28 dniach,
- 2) opad stożka: 0-25 mm,
- 3) nominalna maksymalna wielkość ziaren kruszywa: 19 mm,
- 4) współczynnik woda/cement: 0,47 dla projektowanej mieszanki,
- 5) ostateczny średni ciężar projektowanej mieszanki: jak w Tabl. 4.

Na Rys. 4 pokazano stół wibracyjny użyty do zagęszczania mieszanki betonu wałowanego zgodnie z normowymi zasadami wytwarzania betonu wałowanego w formach walcowych (ASTM C 1176 [15]). Najpierw kruszywa grube są dodawane do wody zarobowej zawierającej nano- CaCO_3 . Uruchomiana jest mieszarka i następnie do mieszanki dodawane są kruszywa drobne, cement i reszta wody. Po dodaniu tych składników mieszanka betonu wałowanego jest mieszana przez 3 minuty, pozostawiana na 3 minuty i ostatecznie mieszana przez 2 minuty.



3.2. EXPERIMENTAL PROGRAMME

The RCCP strength was 35 MPa at the age of 28 days. The mix was designed according to the Standard Practice for Selecting Proportions for no-Slump Concrete (ACI 211.3R-02) [14]. The design criteria were as follows:

- 1) compressive strength: 35 MPa for cylindrical specimens after 28 days,
- 2) slump: 0-25 mm,
- 3) nominal maximum aggregate size: 19 mm,
- 4) water to cement ratio: 0.47,
- 5) the final average weight for mix design: mix design listed in Table 4.

Fig. 4 illustrates the vibrating table, used for the RCC mixture based on the standard practice for making roller-compacted concrete in cylinder molds (acc. to ASTM C 1176 [15]). In this mixture, the coarse aggregates are initially added to a mixing water containing nano- CaCO_3 . The rotation of the mixer is then started, and fine aggregates, cement and remaining water are added to the mixture. Once the constituents have been added, the RCC mixture is mixed for 3 minutes, rested for 3 minutes, and finally mixed for final 2 minutes.

Table 4. The final average weight for the mix design
Tablica 4. Ostateczny skład projektowanej mieszanki

Material / Materiał	Weight / Ciężar [kg]
Water / Woda	189.8
Cement	331
Coarse aggregate / Kruszywo grube	1440
Fine aggregate / Kruszywo drobne	491.4
Total / Ogółem	2452.2

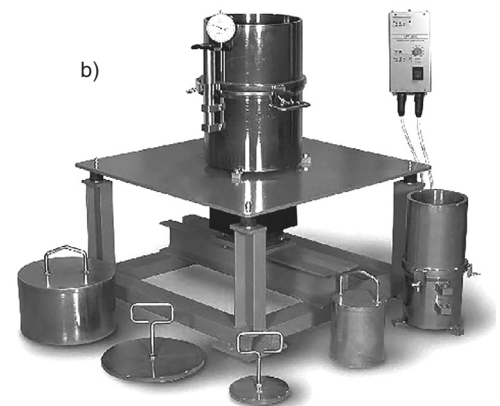


Fig. 4. Vibrating table: a) scheme, b) front view
Rys. 4. Stół wibracyjny: a) schemat, b) widok z przodu

Gdy mieszanka betonu wałowanego była gotowa dodano do niej nano-CaCO₃ w różnych proporcjach. W Tabl. 5 podano zawartość nano-materiału i głównych składników betonu.

After completing the RCCP mixture, the nano-CaCO₃ was added to the mix by different percentage. Table 5 illustrates the content of the nano-material and the main concrete components.

Table 5. Mix proportions with nano-CaCO₃ (marked NC)
Tablica 5. Proporcje mieszanki z nano-CaCO₃ (oznaczonej NC)

Mix No. Nr mieszanki	Nano-CaCO ₃ [kg]	Cement [kg]	Coarse Aggregate / Kruszywo grube [kg]	Sand / Piasek [kg]	Water / Woda [kg]
1. control / kontrolna	0.00	331	1440	491.4	189.8
2. NC 0.5%	1.65	329.35	1440	491.4	189.8
3. NC 1%	3.31	327.69	1440	491.4	189.8
4. NC 2%	6.62	324.38	1440	491.4	189.8
5. NC 3%	9.93	321.07	1440	491.4	189.8

Mieszanka betonowa została następnie umieszczona w formach o standardowym kształcie i wielkości. Próbkę walcową o średnicy D (15 cm) i wysokości H (30 cm) posłużyły do badania wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Mieszankę betonową umieszczono w formach zgodnie z ASTM C1176 [15].

The fresh concrete placed in standard shaped and sized molds. A D (15 cm) and H (30 cm) cylindrical specimens were used for testing the compressive and tensile splitting strength. The placement of fresh concrete into molds was done according to ASTM C1176 [15].

4. BADANIA I ICH WYNIKI

4.1. CZAS VEBE

Do mierzenia konsystencji mieszanki betonowej użyto metody Vebe zgodnie ze znormalizowanymi badawczymi metodami wyznaczania konsystencji i gęstości betonu wałowanego za pomocą stołu wibracyjnego [16]. Na Rys. 5 przedstawiono zależność między czasem Vebe a udziałem procentowym nano-CaCO₃.

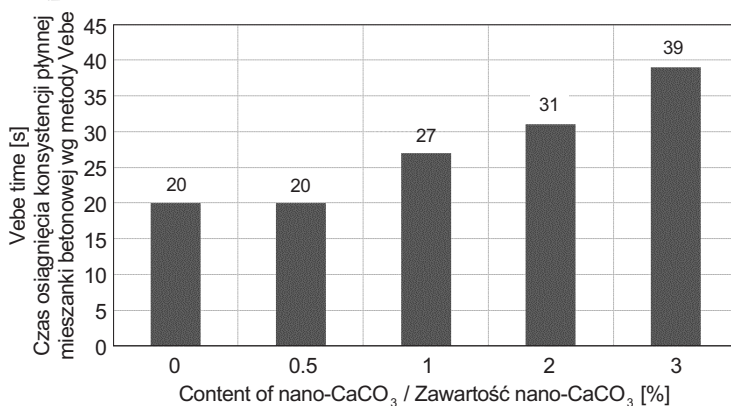


Fig. 5. Relationship between Vebe time and the content of nano-CaCO₃

Rys. 5. Zależność między czasem Vebe i zawartością nano-CaCO₃

4. TESTS AND RESULTS

4.1. VEBE TIME

The Vebe test was used to measure the consistency of fresh RCC according to the standard test methods for determining consistency and density of a roller-compacted concrete using a vibrating table [16]. Fig. 5 shows an adverse relation between Vebe time and the increasing nano-CaCO₃ percentage. The increase range was from 20 seconds for the control mix to 39 seconds for 3% of nano-CaCO₃. The addition of nano-CaCO₃ material in each stage increased the Vebe time by 20%. This was mainly due to the high specific area and extremely small particle sizes of nano-CaCO₃.

4.2. COMPRESSIVE STRENGTH

The compressive strength tests were carried out at the ages 7 and 28 days to check the ability of hardened concrete cubes or cylinder specimens to withstand vertical load. The compressive strength of cylindrical concrete specimens was determined according to ASTM C39 [17]. Fig. 6 illustrates the changes in strength at the increment of the nano-material content by 0.5% or 1%. The highest strength was observed after the addition of 1% of nano-CaCO₃ to cement. The addition of 2% and 3% of nano-CaCO₃ decreased the compressive strength.

Czas Vebe zwiększył się od 20 sekund dla mieszanki kontrolnej do 39 sekund dla 3% zawartości nano-CaCO₃. W wyniku dodania materiału nano-CaCO₃ w poszczególnych etapach czas Vebe zwiększył się o 20%, głównie dzięki dużej powierzchni właściwej i małym rozmiarom ziaren nano-CaCO₃.

4.2. WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono po 7 i 28 dniach dojrzewania, aby wyznaczyć zdolność stwardniałego betonu do przenoszenia obciążenia pionowego. Wytrzymałość na ściskanie próbek walcowych betonu wyznaczono zgodnie z ASTM C39 [17]. Rys. 6 przedstawia zmiany wytrzymałości przy zwiększaniu zawartości nano-węglanu wapnia o 0,5% lub 1% w stosunku do masy cementu. Największą wytrzymałość uzyskano po dodaniu 1% nano-CaCO₃ do cementu. Dodatek 2% i 3% nano-CaCO₃ do cementu zmniejszył wytrzymałość betonu na ściskanie.

4.3. WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu walcowych próbek betonu wyznaczono zgodnie z ASTM C496 [13]. Rys. 7 ilustruje wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu po 7 i 28 dniach przy dodaniu 0,5-1% nano-węglanu wapnia. Dodatek 2% i 3% nano-CaCO₃ do cementu nie poprawił wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, przeciwnie – wytrzymałość ta zmalała.

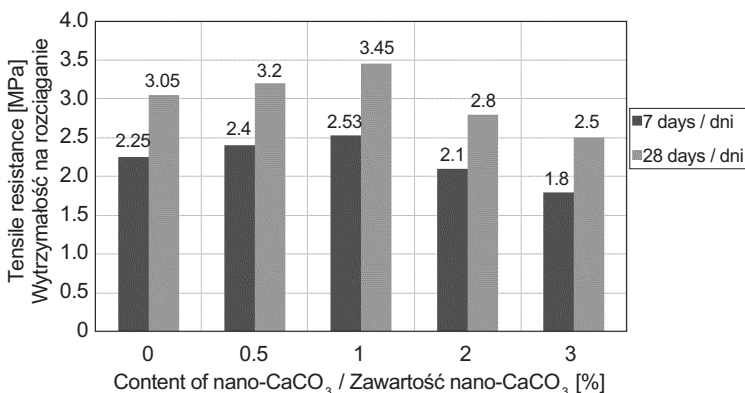


Fig. 7. Relationship between splitting tensile resistance and the content of nano-CaCO₃ after 7 and 28 days
Rys. 7. Zależność między wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu i zawartością nano-CaCO₃ po 7 i 28 dniach

Wytrzymałość betonu wałowanego na ściskanie i jego wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu zwiększa się w wyniku zmniejszenia zawartości i rozmiarów ziaren Ca(OH)₂, co występuje we wczesnych stadiach hydratacji

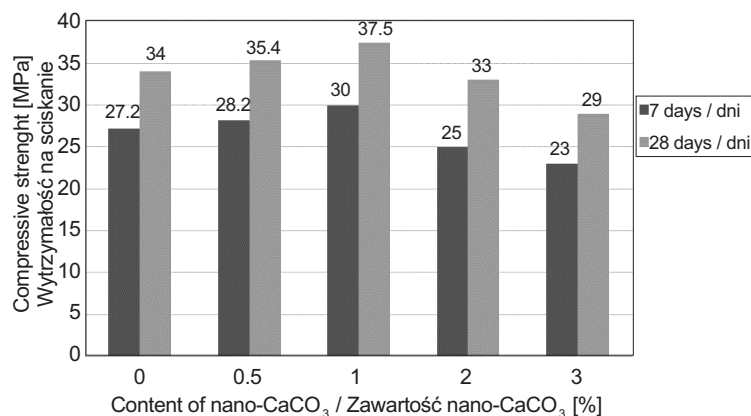


Fig. 6. Relationship between compressive strength and the content of nano-CaCO₃ after 7 and 28 days
Rys. 6. Zależność między wytrzymałością na ściskanie i zawartością nano-CaCO₃ po 7 i 28 dniach

4.3. TENSILE SPLITTING STRENGTH

Splitting test method determined the tensile splitting strength of cylindrical concrete specimens according to ASTM C496 [13]. Fig. 7 illustrates an increase in tensile splitting strength at 7 and 28 days for 0.5% to 1% nano-particles content, Afterwards, the addition of 2% and 3% of nano-CaCO₃ to the cement did not improve the strength, and instead the tensile splitting strength was decreased.

The compressive strength and tensile splitting strength of RCCP is improved by consuming and refinement of Ca(OH)₂ grains, which occurs during the early ages of cement hydration. Following the acceleration of cement hydration, many reaction products is formed at the later stahes of hydration. Loose net structure pores around the cement particles were filled with nano-CaCO₃, which decreased concrete porosity and increased the density. The results also showed that increasing nano-CaCO₃ content to more than 1% slightly decreased the compressive strength. Results show that nano-CaCO₃ particles are both very fine and have a high surface area to volume ratio. When the nano-CaCO₃ amount exceeds the critical value, agglomeration of nano-CaCO₃ particles becomes a problem, and nano-CaCO₃ cannot be well dispersed during mixing. As a result, a homogeneous and dense micro-structure of the materials fails to form.

4.4. WATER ABSORPTION AND POROSITY OF CONCRETE

To study the effect of nano-CaCO₃ on RCC micro-structure, a 150 × 150 × 150 mm cubic specimens according to the ASTM C 642-06 standard [18], were used

cementu. W późniejszych etapach hydratacji powstaje wiele produktów reakcji. Pory wokół cząstek cementu wypełniają się nano-CaCO₃, wskutek czego zmniejsza się porowatość betonu, a zwiększa jego gęstość. Wyniki badań wykazały także, że zwiększenie udziału nano-CaCO₃ do ponad 1% spowodowało nieznaczny spadek wytrzymałości na ściskanie. Z badań wynika, że cząstki nano-CaCO₃ są bardzo drobne i charakteryzują się wysokim stosunkiem powierzchni do objętości. Gdy ilość nano-CaCO₃ przekroczy wartość krytyczną, nano-CaCO₃ zaczyna się zbrylać i nie daje się rozproszyć podczas mieszania, na skutek czego nie powstaje jednorodna i gęsta mikrostruktura badanych materiałów.

4.4. NASIĄKLIWOŚĆ WODĄ I POROWATOŚĆ BETONU

Do zbadania wpływu nano-CaCO₃ na mikrostrukturę betonu wałowanego użyto próbek sześciennych o wymiarach 150 × 150 × 150 mm zgodnych z normą ASTM C 642-06 [18]. Próbkę te posłużyły do wyznaczenia nasiąkliwości i zawartości porów w betonie. Nasiąkliwość i zawartość porów obliczono odpowiednio z równania 1, 2 i 3:

- absorpcja po zanurzeniu [%]

$$[(B - A) / A] \times 100, \quad (1)$$

- absorpcja po zanurzeniu i gotowaniu [%]

$$[(C - A) / A] \times 100, \quad (2)$$

- objętość wolnych przestrzeni (porów) [%]

$$[(C - A) / (C - D)] \times 100, \quad (3)$$

gdzie:

A – masa suchych próbek,

B – masa próbek nasyconych,

C – masa próbek gotowanych,

D – pozorna masa próbek zanurzonych.

Jak widać na Rys. 8, dodatek 0,5% i 1% nano-CaCO₃ zmniejszył nasiąkliwość i zawartość wolnych przestrzeni w betonie. Wyniki pokazują także, że po 28 dniach dodatek 1% nano-CaCO₃ był skuteczniejszy niż dodatek 0,5%.

Wyniki badań pokazują, że gdy szybkość tworzenia się żelu uwodnionego krzemianu wapnia w obecności nano-CaCO₃ jest wystarczająco duża, procentowa nasiąkliwość próbek betonu wałowanego zanurzonych w wodzie zmniejsza się, a czas dojrzewania betonu wydłuża się. Tworzenie się żelu uwodnionego krzemianu wapnia zmniejszyło nasiąkliwość wodą wszystkich badanych próbek. Wodoprzepuszczalność związana jest bezpośrednio z zawartością porów powietrznych w betonie, wypełnianych przez uwodniony krzemian wapnia i nano-cząstki węglanu wapnia.

to determine the water absorption and porosity of the concrete. The absorption and void content were calculated according to equations 1, 2, and 3, respectively:

- absorption after immersion [%]

$$[(B - A) / A] \times 100, \quad (1)$$

- absorption after immersion and boiling [%]

$$[(C - A) / A] \times 100, \quad (2)$$

- volume of permeable pore space (voids) [%]

$$[(C - A) / (C - D)] \times 100, \quad (3)$$

where:

A – dry specimens' weight,

B – dry surface saturated specimens' weight,

C – boiled specimens' weight,

D – immersed apparent specimens' weight.

As shown in Fig. 8, the addition of 0.5% and 1% of nano-CaCO₃ reduced the water absorption and void content. Results also showed that 1% of nano-CaCO₃ performed better than 0.5% after 28 days.

The results show that when the rate of C-S-H gel formation in the presence of nano-CaCO₃ is high enough, the water absorption of RCCCP samples immersed in water decreases and the curing age increases. C-S-H gel formation reduces water absorption in all specimens. Water permeability is directly related to the content of the pores filled with C-S-H and nano-particles.

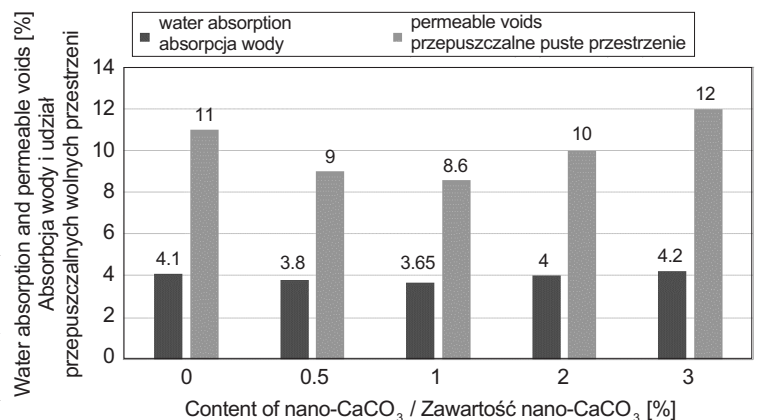


Fig. 8. Relationship between water absorption/permeable voids and the content of nano-CaCO₃ after 28 days

Rys. 8. Zależność między nasiąkliwością wodą i zawartością nano-CaCO₃ po 28 dniach

5. WNIOSKI

W przedstawionych badaniach po dodaniu nano-CaCO₃ do mieszanki betonowej pogorszyła się jej urabialność. Ponadto, konsystencja pogorszyła się, gdy zwiększono procentowy udział nano-CaCO₃ jako zamiennika cementu. Beton wałowany zawierający 1% nano-CaCO₃ charakteryzował się najwyższą wytrzymałością na ściskanie i wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu po 7 i 28 dniach. Po 28 dniach nasiąkliwość betonu wałowanego zawierającego 1% nano-CaCO₃ była o około 11% niższa niż kontrolnego betonu wałowanego. W porównaniu do betonu kontrolnego objętość wolnych przestrzeni w betonie wałowanym zawierającym 1% nano-CaCO₃ znacznie się zmniejszyła (do 22%) po 28 dniach. Wyniki badań wykazały, że stosowanie nano-węglanu wapnia w celu poprawy właściwości nawierzchni z betonu wałowanego jest uzasadnione.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Du H., Du S., Liu X.: Durability performances of concrete with Nano-silica. *Construction and Building Materials*, **73**, 2014, 705-712
- [2] Khotbehsara M.M., et al.: Effect of Nano-CuO and fly ash on the properties of self-compacting mortar. *Construction and Building Materials*, **94**, 2015, 758-766
- [3] Liu X., et al.: Effect of Nano-CaCO₃ on properties of cement paste. *Energy Procedia*, **16**, 2012, 991-996
- [4] Shaikh F.U., Supit S.W.: Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO₃) Nano-particles. *Construction and building materials*, **70**, 2014, 309-321
- [5] Sato T., Beaudoin J.J.: The effect of Nano-sized CaCO₃ addition on the hydration of OPC containing high volumes of ground granulated blast-furnace slag. *The 2nd International Symposium Advanced Concrete Science Engineering*. Quebec City, Canada, 2006
- [6] Rong Z., et al.: Effects of Nano-SiO₂ particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, **56**, 2015, 25-31
- [7] Li H., Zhang M.H., Ou J.P.: Abrasion resistance of concrete containing Nano-particles for pavement. *Wear*, **260**, 11, 2006, 1262-1266
- [8] ASTM C109/C109M Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999
- [9] ASTM C204-05 Standard test method for fineness of hydraulic cement by air permeability apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005

5. CONCLUSIONS

In this research, the use of nano-CaCO₃ in RCCP has reduced the workability of the concrete mix. Furthermore, increasing the percentage of cement replacement with nano-CaCO₃ further decreased the workability of the mix. The RCCP with 1% of nano-CaCO₃ yielded the highest compressive strength at 7 and 28 days. RCCP containing 1% of nano-CaCO₃ also yielded the highest tensile splitting strength at 7 and 28 days. The water absorption of RCCP containing 1% of nano-CaCO₃ was by about 11% lower than the RCCP control at 28 days. Compared to the RCCP control, the volume permeable voids of RCCP containing 1% of nano-CaCO₃ significantly decreases up to 22% at 28 days. According to the results of the experiments, the use of nano-limestone to improve Roller Compact Concrete Pavement properties is appropriate.

- [10] ASTM C191-07 Standard test method for time of setting of hydraulic cement by vicat needle. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007
- [11] ASTM C187-10 Standard test method for normal consistency of hydraulic cement. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010
- [12] ASTM C150-05 Standard specification for Portland cement. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005
- [13] ASTM C136-04 Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004
- [14] ACI 211.3R-02 Guide for selecting proportions for no-slump concrete. ACI Committee Report 211, 2009
- [16] ASTM C1170-06 Determining consistency and density of roller-compacted concrete using a vibrating table. ASTM International, Philadelphia, PA, 2006
- [17] ASTM C39/C39M-05 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International, Philadelphia, PA, 2005
- [18] ASTM C642-06 Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. ASTM International, Philadelphia, PA, 2006