

Wpływ dodatków mineralnych na gęstość upakowania mieszanek trójskładnikowych

Influence of mineral additives on the packing density of ternary mix

Akanksha Pathania^a, Abhilash Shukla^{a*}, Rajneesh Vashisht^{a*}

^aDepartment of Civil Engineering, Jaypee University of Information Technology Wakhnaghat, Solan, Himachal Pradesh, India

*corresponding author: Rajneesh Vashisht, e-mail: rajneeshvashishtid@gmail.com

Streszczenie

Za pomocą metody Puntkego zbadano wpływ dodatku popiołu lotnego, popiołu z łusek ryżowych, metakaolinu oraz żużla o dużym rozdrobieniu, na gęstość upakowania mieszanek trójskładnikowych. Wprowadzenie dodatków mineralnych o uziarnieniu mniejszym od cementu portlandzkiego zwiększa gęstość upakowania mieszanki, poprzez wypełnianie wolnych przestrzeni pomiędzy ziarnami cementu, a w efekcie powoduje wzrost wytrzymałości na ścislenie betonu. Głównym celem badań było zwiększenie gęstości upakowania poprzez częściowe zastąpienie cementu materiałami drobnoziarnistymi. Cement zastępowano w ilościach od 10% do 40%, co 5%. Zbadano wiele różnych kombinacji, a wyniki wykazały, że maksymalną gęstość upakowania wynoszącą 0,586 miały próbki o zawartości 75% cementu, z dodatkiem popiołu lotnego oraz żużla o bardzo dużym rozdrobieniu, bez zastosowania superplastyfikatora. Dodatek superplastyfikatora jeszcze bardziej zwiększał gęstość upakowania, przy mniejszym stosunku wody do spoiwa.

Słowa kluczowe: gęstość upakowania, popiół lotny, popiół z łusek ryżowych, bardzo drobny żużel, metakaolin

Summary

The effect of fly ash, rice husk ash, metakaolin, ultra-fine slag on the packing density of ternary mix was studied in this paper, using Puntke's method of particle packing. The addition of these mineral additives, whose particle size is lower than that of the Ordinary Portland Cement, improves the packing density of cement, by filling the voids between the cement grains, which results in increased compressive strength of concrete. The main aim of this research was to increase the packing density by replacement of cement with fine materials. Cement replacement was carried out from 10% to 40% in steps of 5%. Many combinations were tested and results showed that a maximum packing density of 0.586 was achieved at 75% cement content along with fly ash and ultra-fine slag, without addition of the superplasticizer. Addition of superplasticizer further increased the packing at lower water to binder ratio.

Keywords: Packing density, fly ash, rice husk ash, ultrafine slag, metakaolin

1. Wprowadzenie

Upakowanie ziaren zawsze miało duże znaczenie w przypadku produkcji betonu o dobrych właściwościach, przede wszystkim związanych z wytrzymałością i trwałością. Zastosowanie dodatków mineralnych, których ziarna są mniejsze od ziaren cementu portlandzkiego, zwiększa upakowanie takiej mieszanki poprzez wypełnianie wolnych przestrzeni pomiędzy ziarnami cementu, ale również zmniejsza wodożądność. Najważniejszym czynnikiem, związanym z upakowaniem ziaren, jest dobór materiałów o odpowiednim uziarnieniu, zapewniającym uzyskanie maksymalnej gę-

1. Introduction

The concept of particle packing has always been very important factor in production of concrete with good properties, principally strength and durability. The addition of mineral additives, whose particle size is lower than that of cement, improves the packing as these takes up the voids between the cement grains and in fact also reduces the water demand. The foremost measure for the particle packing involves the selection of appropriate sizes of materials to get maximum packing density and minimum voids. The increase in particle packing can increase the hydration

stości upakowania i jak najmniejszej objętości wolnych przestrzeni. Wzrost upakowania ziaren może przyspieszyć proces hydratacji i uszczelnienie mikrostruktury, które przyczynia się do wyraźnego wzrostu wytrzymałości na ściskanie betonu (1). Long i in. (2) badali wpływ bardzo drobnych proszków na zawartość zaczynów i stwierdzili, że gęstość upakowania wzrosła, a wytrzymałość na ściskanie osiągnęła 200 MPa. Kwan i Chen (3) także stwierdzili, że dodatek bardzo drobnego cementu do zaczynu powodował wzrost gęstości upakowania i poprawił płynność. Beton zawierający składniki drobniejsze od cementu ma dobrą gęstość upakowania i wykazuje mniejszą skłonność do wydzielania mlecza oraz skurczu, co w efekcie prowadzi do zwiększonej wytrzymałości (4). Produkcja betonu wysokowartościowego [BWW] wiąże się z koniecznością zastosowania bardzo dużej zawartości cementu, co z kolei wymaga zwiększonej produkcji cementu i finalnie prowadzi do dużej emisji dwutlenku węgla. Dodatki mineralne zastępujące cement ograniczają jego ilość w mieszance betonowej, dzięki czemu można zmniejszyć niekorzystny wpływ na środowisko naturalne (5). Zastępowanie cementu dodatkami mineralnymi obniża koszty produkcji i zmniejsza skurcz betonu (4). Upakowanie ziaren można zbadać stosując wiele metod, na przykład Puntkego, lub metodę gęstości względnej i upakowania na mokro (2, 6).

W badaniach zastosowano różne dodatki, a mianowicie popiół lotny [V], popiół z łusek ryżowych [PŁR], metakaolin [MK], bardzo drobny żużel [BDŻ], w celu osiągnięcia efektu upakowania ziaren w mieszankach trójskładnikowych, zbadanego za pomocą metody Puntkego. Jest ona znana również jako metoda minimalnej wodożądności, w której próbkę poddaje się ciągiem ostukiwaniu i wstrząsaniu (7). Neville (8) podał, że stosunek wody do spoiwa [w/s] powinien być minimalny dla betonu wysokowartościowego [BWW]. Metoda opracowana przez Puntkego (9) w 2002 roku opiera się na zasadzie, że woda dodana do mieszanki wypełnia puste przestrzenie między ziarnami, a nadmiar wody pojawia się na powierzchni mieszanki, wskazując punkt nasycenia i podając rzeczywistą minimalną wodożądność. Zbadano wiele próbnych kombinacji mieszanek z różną zawartością dodatków mineralnych [(CEM + PŁR + V), (CEM + MK + BDŻ), (CEM + V + BDŻ), (CEM + MK + V), (CEM+BDŻ+PŁR) i (CEM + MK + PŁR)], a zawartość dodatków zastępujących cement wynosiła od 5% do 40%, co 5%. Zawartość dodatków mineralnych ustalono zgodnie z kolejnością ich reaktywności. Spośród tych dodatków mineralnych MK, BDŻ i PŁR są bardzo reaktywne i ich zawartość procentowa była większa w porównaniu do V, który jest ostatni pod względem reaktywności (10).

W pracy pokazano, w jaki sposób zmiana zawartości różnych dodatków mineralnych prowadzi do zmiany gęstości upakowania i wodożądności mieszanki. Wraz ze wzrostem zawartości drobnoziarnistych materiałów, upakowanie wzrastało do pewnej optymalnej ilości tych materiałów, po czym dalszy wzrost drobnoziarnistych dodatków zmniejszał gęstość upakowania. Możliwą przyczyną tego spadku może być większa zawartość drobnych frakcji, która prowadzi do zwiększenia powierzchni właściwej i finalnie wodożądności, co zmniejsza gęstość upakowania (11). Dlatego konieczne jest

process; enhance the microstructure, which evidently increases the compressive strength of concrete (1). Long et al. (2) studied the effect of ultrafine powders on the compactness of the pastes and found that packing density was increased and compressive strength up to 200 MPa was achieved. Kwan and Chen (3) were also found that addition of superfine cement to the pastes increased packing density and improved the flow properties. Concrete having materials finer than cement provides good packing density and shows reduced bleeding and shrinkage, which ultimately leads to higher strengths (4). Very high content of cement is required for the production of high performance concrete [HPC] which in turn requires large production of cement, which further leads to the high carbon dioxide emissions. Proportioning of the concrete mix with mineral additives reduces the cement content in concrete and hence this environmental impact, can be lowered (5). Replacement of cement reduces the production cost and lowers the shrinkage problem of concrete (4).

Particle packing can be achieved with many methods among others such as Puntke's method, relative density method and wet packing method (2, 6). In this paper various fillers such as fly ash [FA], rice husk ash [RHA], metakaolin [MK], ultra-fine slag [UFS] have been used for particle packing of ternary blend using Puntke's method, also known as minimum water requirement method, which focuses on continuous tapping and shaking (7). It was quoted by Neville (8) that water/binder ratio should be the lowest for High Performance Concrete [HPC]. The method which was developed by Puntke (9) in 2002 is based on principle that the water added to the mix fills the voids in between the grains and the excess water appears at the surface of the mix, indicating the saturation point which is indeed the minimum water required. Many mix trials were tested with different percentages of mineral additives [(OPC + RHA + FA), (OPC + MK + UFS), (OPC+ FA + UFS), (OPC + MK + FA), (OPC+UFS+RHA) and (OPC + MK + RHA)] and cement replacement from 5% to 40%, at intervals of 5%. Percentages of mineral additives were decided according to their reactivity order. Among these mineral additives MK, UFS and RHA are highly reactive and were kept high in percentage as compared to FA, which stands last in the order of reactivity (10).

This paper shows how variation in the content of different mineral additives leads to the change in packing density and water demand of the mix. With the increase in the percentage of fine materials, the packing increased up to a certain optimum percentage of these materials and the further increase in the fine content lowered the density values. The possible reason for this slump could be that the higher fine content leads to increase in the specific surface area and ultimately of the water demand, which lowers the packing density (11). Therefore, it is required to add the optimum dosage of mineral additives, in order to achieve the maximum packing. For further improvement of packing density SP was added.

dodanie optymalnej ilości dodatków mineralnych, do osiągnięcia maksymalnego upakowania. Natomiast w celu dalszej poprawy gęstości upakowania dodano superplastyfikator [SP].

2. Materiały i metody

2.1. Materiały

Zastosowano cement portlandzki klasy 53, wyprodukowany przez cementownię Ambuja Cement w Darlaghat, w stanie Himachal Pradesh w Indiach, spełniający wymagania normy indyjskiej IS: 12269 (2013) (12). Zastosowany popiół lotny klasy F pochodził z elektrociepłowni PSPCL w Ghanauli, w stanie Pendżab w Indiach. Nadzwyczaj drobny żużel wyprodukowany przez firmę Counto Microfine Products Ltd. w Goa, jest niezwykle drobnym produktem nowej generacji, o małej zawartości krzemianu wapnia, zgodnym z normą indyjską IS: 12089 (1987) (13). Metakaolin, wyprodukowany przez Kaomin Industries LLP, w Vadodrze, w indyjskim stanie Gujarat, jest bardzo reaktywną pucolaną określoną jako nadzwyczaj drobny materiał, o średniej wielkości ziaren około 1-2 mikrometrów, spełniający wymagania normy indyjskiej IS: 1489-2 (1991) (14). Popiół z łusek ryżowych wyprodukowała firma KGR Fusions Private Limited, w Ludhianie, w indyjskim stanie Punjab. Zastosowano superplastyfikator na bazie polikarboksyłanu, o zawartości fazy stałej wynoszącej 36%. Ciężar właściwy i skład tlenkowy materiałów podano odpowiednio w tablicach 1 i 2.

Skład chemiczny materiałów zbadano za pomocą rentgenowskiej spektroskopii fluorescencyjnej. Rozkład wielkości ziaren oznaczono metodą dyfrakcyjną [aparatem firmy Horiba]. Rozkład wielkości ziaren pokazano na rysunku 1.

Tablica 1 / Table 1

CIĘŻAR WŁAŚCIWY MATERIAŁÓW

SPECIFIC GRAVITY OF MATERIALS

Materiał / Material	Ciężar właściwy Specific gravity
Cement portlandzki / OPC 53	3.15
Nadzwyczaj drobny żużel / Ultra fine slag	2.86
Metakaolin	2.5
Popiół z łusek ryżowych / Rice husk ash	2.53
Popiół lotny / Fly ash	2.17

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD CHEMICZNY SKŁADNIKÓW, %

CHEMICAL COMPOSITION OF RAW MATERIALS, %

Materiał / Material	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SiO ₂	MgO
CEM / OPC 53	4.74	61.23	3.37	0.961	0.129	19.25	1.87
BDŻ / UFS	12.42	34.78				25.68	11.76
V / FA	21.34	6.9	3.82	0.93	0.14	56.52	1.66
MK	29.54	0.07	1.06	3.74	1.43	61.72	0.18
PŁR / RHA	0.45	0.63	0.64	2.93	0.13	86.76	0.45

2. Material and methods

2.1. Materials

The cement used was OPC 53, procured from Ambuja Cement, Darlaghat, Himachal Pradesh, conforming to IS: 12269 (2013) [12]. Class F fly ash was procured from PSPCL Ghanauli, Punjab. Ultrafine slag, procured from Counto Microfine Products Limited Goa is a new generation ultrafine, low calcium silicate product conforming to IS: 12089 (1987) [13]. Metakaolin, procured from Kaomin Industries LLP, Vadodra, Gujarat, is a highly reactive pozzolan classified as ultra-fine, with an average particle size around 1-2 microns conforming to IS: 1489-2 (1991) [14]. Rice husk ash was procured from KGR fusions Private Limited, Ludhiana, Punjab. Superplasticizer used was polycarboxylate based SP having solid mass content of 36%. The specific gravity and oxide composition of materials are given in Table 1 and Table 2 respectively.

Chemical compositions were obtained by X-ray fluorescence. The particle size distribution was measured with diffraction method [Horiba]. The particle size distribution is shown in Fig.1.

2.2. Experiments

Experimental work was carried out in two parts: firstly, the calculation of packing density by Puntke's method without SP and secondly, checking the effect of SP addition on packing density.

2.2.1. Puntke's method

Initially, 100 g of cementing material: cement + mineral additives was weighed and taken in a container with rounded straight walls. Adding the water gradually, mixing with the help of a stirrer and continuous tapping was done until the mix got a closed surface. After that water was added drop by drop with the help of a dropper and following the same procedure of mixing and tapping till the mix obtained a glossy surface, what was considered as an indication of saturation point. Above procedure was repeated two times and the average of three iterations was considered. The time taken for one iteration was approximately 10 minutes.

Packing density ϕ was calculated by using the formula:

$$\phi = 1 - [V_w / (V_w + V_p)]$$

where: V_w - volume of water, V_p - volume of powder.

2.2. Metody

Badania przeprowadzono w dwóch częściach: w pierwszej obliczono gęstość upakowania metodą Puntkego w mieszankach bez dodatku SP, a w drugiej sprawdzono wpływ dodatku SP na gęstość upakowania.

2.2.1. Metoda Puntkego

Na początku odważono 100 g suchego materiału: cementu + dodatków mineralnych i całość umieszczono w pojemniku o zaokrąglonych ściankach. Dodając stopniowo wodę, mieszano za pomocą mieszadła i jednocześnie obstukiwano naczynie, aż do uzyskania gładkiej powierzchni. Następnie, za pomocą wkraplacza dodawano po jednej kropli wodę, postępując zgodnie z tą samą metodą mieszania i stukania, aż mieszanina uzyskała błyszczącą powierzchnię, co uważano za wskaźnik punktu nasycenia. Powyższą metodę powtórzono dwa razy i uwzględniono średnią z trzech iteracji. Czas potrzebny na jedną iterację wynosił około 10 minut.

Gęstość upakowania ϕ obliczono za pomocą wzoru:

$$\phi = 1 - [V_w / (V_w + V_p)]$$

gdzie: V_w – objętość wody, V_p – objętość składników stałych.

Masy przeliczono na objętość, dzieląc je przez ciężar właściwy danego materiału.

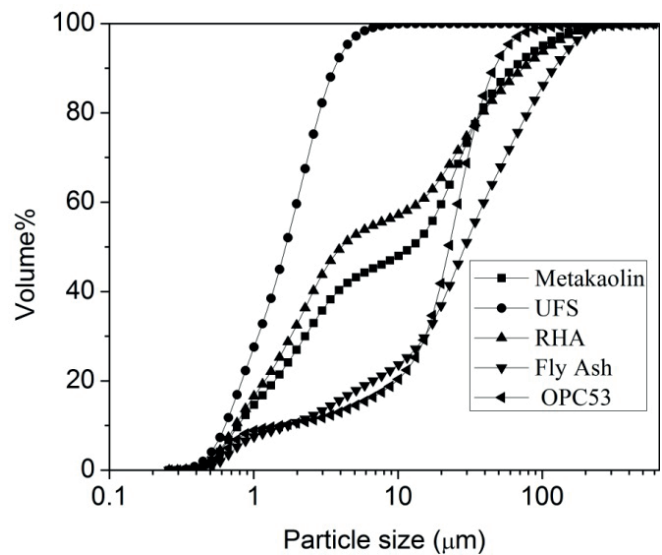
Ponadto zestawy, które osiągnęły maksymalną gęstość upakowania, sprawdzono pod kątem dodatkowego wpływu SP. Dodatek SP wynosił od 0,65% do 0,95%, w odstępach co 0,05%, masy całkowitej cementu i dodatków mineralnych, przy współczynniku w/s wynoszącym 0,19. Ilość SP, przy której powierzchnia mieszanki stawała się błyszcząca, uznawano za optymalną, po czym obliczano gęstość upakowania.

2.3. Analiza statystyczna

Wyniki w formie graficznej przygotowano w programie Origin 8.0, służącym do analizy i wizualizacji danych.

3. Wyniki i dyskusja

Częściowe zastąpienie cementu dodatkami mineralnymi przeprowadzono stosując następujące kombinacje V i PŁR, MK i BDŻ, V i BDŻ, V i MK, BDŻ i PŁR, MK i PŁR. Cement zastępowano dodatkami mineralnymi w ilości od 5% do 40%, w odstępach co 5%. Przygotowano około 230 zestawów, w celu osiągnięcia maksymalnej gęstości upakowania ziaren, bez dodatku SP. Minimalna, uzyskana gęstość upakowania w próbkach bez dodatku SP wynosiła 0,538, a maksymalna 0,586. Omówiono różne kombinacje, a te, które dały maksymalną gęstość upakowania dodatkowo pokazano w tablicy 3.



Rys. 1. Rozkład wielkości ziaren

Fig. 1. Particle size distribution

Masses were converted into volumes by dividing them with each materials specific gravity.

Further the combinations which yielded maximum packing density were checked for the effect of addition of SP. Dosage of SP was varied from 0.65 % to 0.95% of the total cementing material in the increments of 0.05%, keeping the w/b ratio as fixed at 0.19. The dosage of SP at which surface of the mix appeared glossy, was considered the optimum and packing density was then calculated.

2.3. Statistical analysis

The graphical representation of results has been prepared in Origin 8.0 i.e. The Data Analysis and Graphing workspace.

3. Results and discussion

Partial replacement of cement was done on mass basis with combinations of FA and RHA, MK and UFS, FA and UFS, FA and MK, UFS and RHA, MK and RHA respectively. Replacement of cement was varied from 5% to 40% in the increment of 5 %. About 230 combinations were tried for achieving maximum particle packing density, without SP. Without SP minimum packing density obtained was 0.538 and maximum achieved was 0.586. Different combinations tried are discussed below and the combinations which yielded maximum packing density are shown in Table 3.

3.1. Cement + Rice Husk Ash + Fly Ash, designated as CRF

Thirty-seven mixes were tried with this combination of additives and cement replacement was varied from 5% to 40% at the intervals of 5%. It was noticed that the packing density increased with replacement of cement up to 25% and then decreased with further replacement. In this case w/b ratio was 0.255 at 5% replacement of cement and as replacement reached 40%, it was increased to

Tablica 3 / Table 3

GĘSTOŚĆ UPAKOWANIA ZESTAWÓW, W KTÓRYCH UZYSKANO NAJWYŻSZE WYNIKI

PACKING DENSITY OF DIFFERENT COMBINATIONS WITH HIGHEST PACKING DENSITY

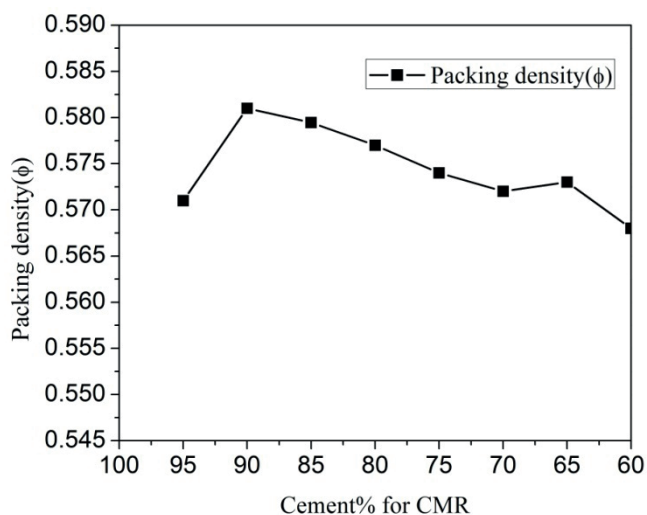
Zestaw Combination	CEM / OPC53, %	PŁR / RHA, %	V / Fly ash, %	MK, %	BDŻ / UFS, %	Stosunek w/s w/b ratio	Gęstość upakowania Packing density, -
CRF20	75	16.25	8.75	0	0	0.257	0.571
CMU8	90	0	0	2.5	7.5	0.225	0.581
CFU20	75	0	12.5	0	12.5	0.24	0.586
CFM1	95	0	2.5	2.5	0	0.245	0.569
CRU8	85	7.5	0	0	7.5	0.245	0.571
CRM1	90	2.5	0	2.5	0	0.245	0.567

3.1. Cement + popiół z łusek ryżowych + popiół lotny [zestawy CRF]

Przygotowano 37 zestawów z tą kombinacją dodatków, przy czym cement zastępowano w ilości od 5% do 40%. Stwierdzono, że gęstość upakowania wzrastała wraz z ilością zastępowanego cementu do 25%, po czym zmniejszała się, przy większej ilości dodatków. W tym przypadku stosunek w/s wynosił 0,255 przy 5% dodatków zastępujących cement, natomiast przy 40%, wzrósł do 0,3. Zakres gęstości upakowania wynosił od 0,546 do 0,571. Zmiany gęstości upakowania, w zależności od ilości cementu pokazano na rysunku 2.

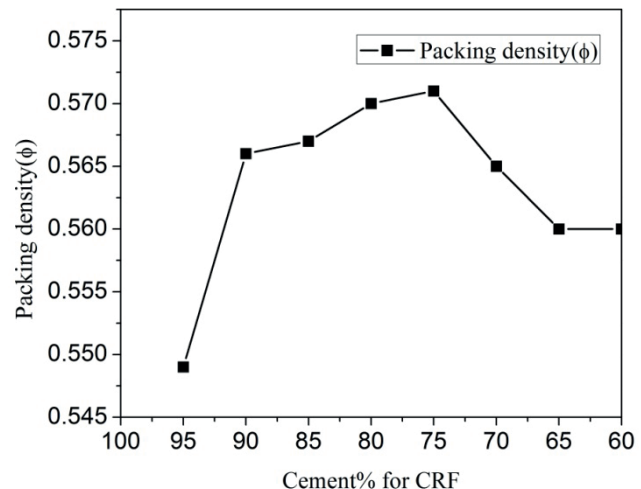
3.2. Cement + metakaolin + bardzo drobny żużel [zestawy CMU]

Przygotowano siedemdziesiąt zestawów z różną ilością MK i BDŻ. Cement zastępowano tymi dwoma dodatkami w ilości od 5% do 40%. Ponieważ zarówno MK, jak i BDŻ są bardzo drobnoziarniste, stwierdzono, że w tym przypadku gęstość upakowania stopniowo zmniejszała się, jeżeli cement zastąpiono tymi dodatkami, w ilości przekraczającej 10%. W tym przypadku zakres stosunku w/s wynosił 0,237-0,284, w zależności od ilości dodatków zastępu-



Rys. 3. Zmiany gęstości upakowania w zależności od zawartości cementu dla zestawów CMU

Fig. 3. Variation of packing density with cement% for CMU



Rys. 2. Zmiany gęstości upakowania w zależności od ilości cementu dla zestawów CRF

Fig. 2. Variation of packing density with cement % for CRF

0.3. The range of packing density found in this case was from 0.546 to 0.571. The variation of packing density with cement percentage is shown in Fig. 2.

3.2. Cement + metakaolin + ultrafine slag, designated as CMU

Seventy combinations were tried with different percentages of MK and UFS. Replacement varied from 5% to 40%, with these two mineral additives. As both MK and UFS are very fine, it was seen that in this case packing density was gradually decreasing, after 10% cement replacement. Here w/b ratio range was 0.237 – 0.284, as replacement of cement was varied from 5% to 40% respectively. The range of packing density in this case was 0.550 – 0.581. The variation of packing density with cement percentage is shown in Fig. 3.

3.3. Cement + Fly Ash + Ultrafine Slag designated as CFU

Testing thirty-five combinations, reflected that with addition of FA and UFS, particle packing increased with cement replacement up to 25% and with further increase packing, density decreased. Here w/b ratio range was 0.235 – 0.245 as replacement of cement

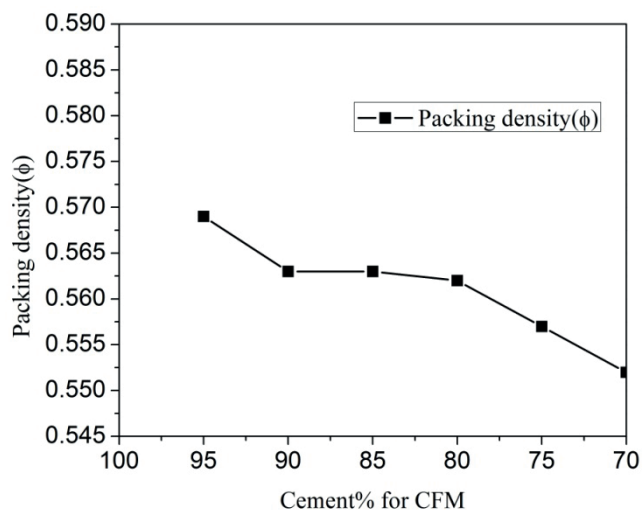
jących cement, w zakresie od 5% do 40%. Zakres gęstości upakowania w tym przypadku wynosił 0,550-0,581. Zmiany gęstości upakowania w zależności od zawartości cementu pokazano na rysunku 3.

3.3. Cement + popiół lotny + bardzo drobny żużel [zestawy CFU]

Przygotowanie trzydziestu pięciu zestawów wykazało, że po dodaniu V i BDŻ upakowanie cząstek wzrastało przy zastępowaniu cementu dodatkami do 25%, a przy dalszym wzroście gęstości upakowania malała. Zakres stosunku w/s wynosił 0,235-0,245, w zależności od zawartości dodatków zastępujących cement, w zakresie od 5% do 40% w postępie co 5%. Zakres gęstości upakowania osiągnięty w tym przypadku wynosił 0,559–0,586. Zmiany gęstości upakowania w zależności od ilości cementu pokazano na rysunku 4.

3.4. Cement + popiół lotny + metakaolin [zestawy CFM]

Po przygotowaniu około trzydziestu zestawów stwierdzono, że gęstość upakowania zmniejszała się ze wzrostem dodatku zastępującego cement od 5% do 30%. Zakres stosunku w/s wynosił 0,245 – 0,295, w zależności od ilości dodatków zastępujących cement w zakresie od 5% do 30%. Zakres gęstości upakowania wynosił 0,542–0,569. Zmiany gęstości upakowania w zależności od ilości cementu pokazano na rysunku 5.

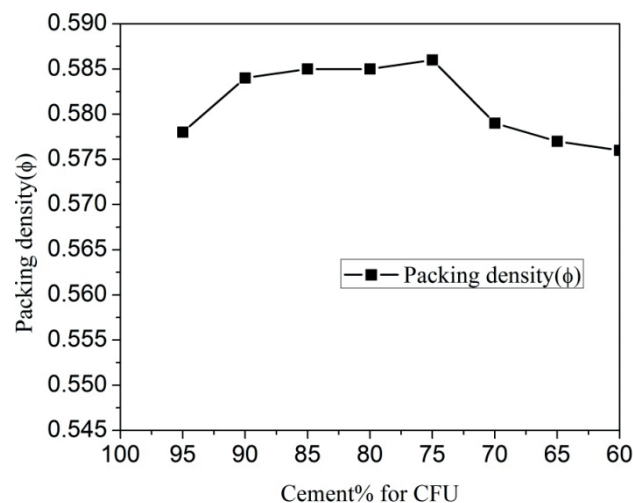


Rys. 5. Zmiany gęstości upakowania w zależności od ilości cementu dla zestawów CFM

Fig. 5. Variation of packing density with cement % for CFM

3.5. Cement + bardzo drobny żużel + popiół z łusek ryżowych [zestawy CUR]

W tym przypadku, po przygotowaniu około trzydziestu zestawów, stwierdzono, że gęstość upakowania cząstek rosła wraz z zastępowaniem cementu do 15%, a z dalszym wzrostem ilości dodatków, gęstość upakowania malała. W tym przypadku zakres stosunku w/s wynosił 0,245–0,287. Zakres gęstości upakowania wynosił 0,538–0,571. Zmiany gęstości upakowania w zależności od ilości cementu pokazano na rysunku 6.



Rys. 4. Zmiany gęstości upakowania w zależności od ilości cementu dla zestawów CFU

Fig. 4. Variation of packing density with cement % for CFU

was varied from 5% to 40%, at the intervals of 5%. The range of packing density found in this case was 0.559- 0.586. The variation of packing density with cement percentage is shown in Fig. 4.

3.4. Cement + Fly Ash + Metakaolin, designated as CFM

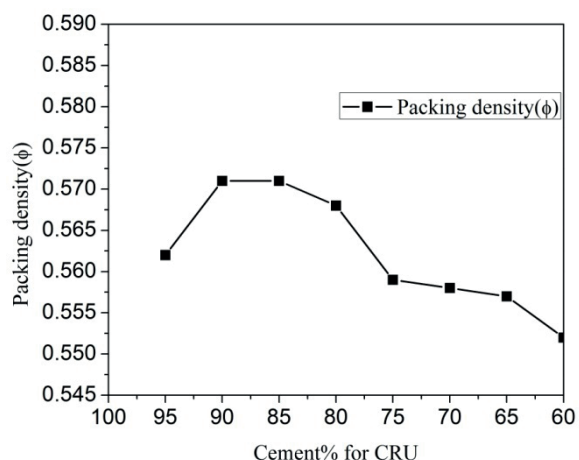
After trying about thirty combinations, it was observed that packing density decreased as replacement was varied from 5% to 30%. Here w/b ratio range was 0.245 - 0.295 as replacement of cement was varied from 5% to 30%. Found packing density range was 0.542 – 0.569. The variation of packing density with cement percentage is shown in Fig. 5.

3.5. Cement + Ultrafine Slag + Rice Husk Ash, designated as CUR

In this case, after trying about thirty combinations, it was seen that particle packing density increased with the replacement of cement up to 15% and with further replacement packing density decreased. In this case w/b ratio range was 0.245 – 0.287. Packing density range found was 0.538 – 0.571. The variation of packing density with cement percentage is shown in Fig.6.

3.6. Cement + Metakaolin + Rice Husk Ash, designated as CMR

After trying thirty combinations, it was noticed that packing density decreased with increase in cement replacement from 5% to 30%. In this case w/b ratio and packing density range observed was 0.245 – 0.315 and 0.535 – 0.567 respectively. The variation of packing density with cement percentage is shown in Fig.7. The probable cause for the decrease in packing density, after certain percentage of cement replacement noticed in each case, could be that increase in fine content increases the specific surface area, which requires more water to fill the voids, which further decreases the packing.



Rys. 6. Zmiany gęstości upakowania w zależności od zawartości cementu dla zestawów CRU

Fig. 6. Variation of packing density with cement % for CRU

3.6. Cement + metakaolin + popiół z łusek ryżowych, zestawy CMR

Po przygotowaniu trzydziestu zestawów stwierdzono, że gęstość upakowania malała wraz ze wzrostem zastępowania cementu przez dodatki mineralne, w zakresie od 5% do 30%. W tym przypadku zakres stosunku w/s i zakres gęstości upakowania wynosiły odpowiednio 0,245 – 0,315 i 0,535 – 0,567. Zmiany gęstości upakowania w zależności od ilości cementu pokazano na rysunku 7.

Prawdopodobną przyczyną spadku gęstości upakowania, po osiągnięciu pewnej zawartości dodatków mineralnych zastępujących cement, stwierdzonego w przypadku wszystkich zestawów, może wiązać się ze zwiększaniem powierzchni właściwej ze wzrostem zawartości drobnych frakcji, co z kolei zwiększa ilość wody potrzebnej do wypełnienia pustych przestrzeni, a to pogłębia spadek gęstości upakowania.

3.7. Wpływ superplastyfikatora

SP dodano do zestawów, które osiągnęły maksymalną gęstość upakowania jak to pokazano w tabelicy 3. W każdym zestawie ilość superplastyfikatora zmieniała się od 0,65% do 0,95%, co 0,05%,

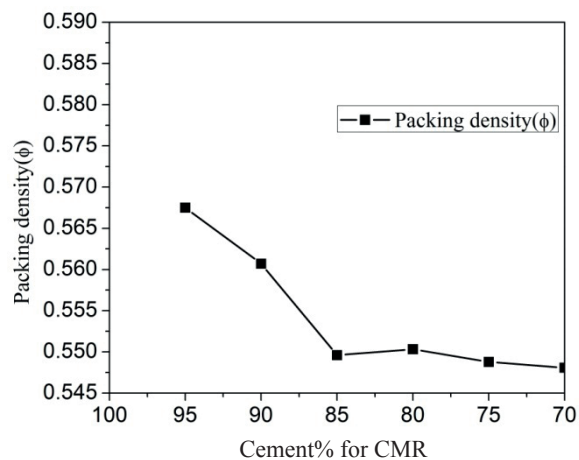
Tablica 4 / Table 4

GĘSTOŚĆ UPAKOWANIA W RÓŻNYCH ZESTAWACH Z DODATKIEM SUPERPLASTYFIKATORA

PACKING DENSITY OF DIFFERENT COMBINATIONS WITH SUPERPLASTICIZER

Zestaw Combination	TCM*	CEM / OPC53, %	PŁR / RHA, %	V / Fly ash, %	MK, %	BDŻ / UFS, %	Stosunek w/s w/b ratio	SP, %	Gęstość upakowania Packing density φ, -
CRF20	100	75	16.25	8.75	0	0	0.19	0.95	0.651
CMU8	100	90	0	0	2.5	7.5	0.19	0.9	0.636
CFU20	100	75	0	12.5	0	12.5	0.19	0.85	0.648
CFM1	100	95	0	2.5	2.5	0	0.19	0.9	0.637
CRU8	100	85	7.5	0	0	7.5	0.19	0.9	0.639
CRM1	100	95	2.5	0	2.5	0	0.19	0.9	0.636

* całkowita zawartość procentowa cementu i dodatków mineralnych / total content of cement and mineral additives



Rys. 7. Zmiany gęstości upakowania w zależności od ilości cementu dla zestawów CMR

Fig. 7. Variation of packing density with cement % for CMR

3.7. Effect of superplasticizer

SP was added to the combinations which yielded maximum packing density in above test results [Table 3]. For each combination superplasticizer was varied from 0.65% to 0.95% of total cementing materials in the increments of 0.05%, at w/b ratio of 0.19. The optimum dosage of superplasticizer and respective packing density of these six combinations is shown in Table 4. It was seen that packing density increased after the addition of SP at the lower water content, because SP acts as a dispersant, after getting adsorbed on the surface of materials and lowers water demand. Maximum packing density of 0.651 was obtained with the mix CRF20. The optimum dosage of SP and their respective packing density values, obtained for each combination are shown in Table 4.

3. Conclusions

Specific findings from the experimental results are the following:

- The packing density for six different sets was calculated using Puntke's method of particle packing. It was found that highest packing density of 0.586 was obtained with 75% Cement + 12.5% FA + 12.5% UFS, without the addition of SP. It can be concluded that these percentages of fine materials along

całkowitej masy cementu i dodatków mineralnych, przy stosunku w/s 0,19. Optymalne ilości superplastyfikatora oraz odpowiadające im gęstości upakowania w tych sześciu zestawach, pokazano w tabelicy 4. Stwierdzono, że gęstość upakowania wzrastała po dodaniu SP przy mniejszej zawartości wody, ponieważ SP spełnia rolę czynnika dyspergującego, ulegającego adsorpcji na powierzchni ziaren i zmniejszającego wodożądność. Maksymalną gęstość upakowania wynoszącą 0,651 uzyskano dla mieszanki CRF20. Optymalne ilości SP i odpowiadające im wartości gęstości upakowania, uzyskane dla każdego zestawu, pokazano w tabelicy 4.

3. Wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły na wysunięcie następujących wniosków:

- Gęstość upakowania dla sześciu różnych zestawów obliczono za pomocą metody Puntkego. Największą gęstość upakowania 0,586 uzyskano dla mieszanki zawierającej 75% cementu + 12,5% V + 12,5% BDŻ, bez dodatku SP. Można stwierdzić, że takie zawartości drobnoziarnistych dodatków mineralnych i cementu, są optymalne do wypełnienia pustek i poprawy upakowania ziaren, co stanowi jedną z możliwości poprawy wytrzymałości na ściskanie betonu.
- Stwierdzono, że po uzyskaniu optymalnego udziału procentowego dodatków mineralnych, zwiększanie ich zawartości powodowało spadek gęstości upakowania. Prawdopodobnie zwiększenie powierzchni właściwej, wraz ze wzrostem zawartości drobnych frakcji, co powoduje wzrost wodożądności i ostatecznie gęstość upakowania maleje.
- Ponadto, po dodaniu superplastyfikatora do mieszanek, gęstość upakowania znacznie wzrosła we wszystkich sześciu zestawach, nawet pomimo mniejszej zawartości wody. Jest to prawdopodobnie spowodowane adsorpcją SP na powierzchni ziaren, co powoduje ich dyspersję, zmniejszając w ten sposób wodożądność i zwiększając gęstość upakowania.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować władzom Wyższej Szkoły Technologii Informatycznych Jaypee w Solan w Indiach za zapewnienie środków finansowych, niezbędnego sprzętu i miejsca do badań.

Literatura / References

1. Y. Peng, S. Hu, Q. Ding, Dense packing properties of mineral admixtures in cementitious material, *Particuology* **7**, 399-402 (2009)
2. G. Long, X. Wang, Y. Xie, Very-high-performance concrete with ultrafine powders, *Cem. Concr. Res.* **32**, 601-605 (2002).
3. J.J. Chen, A.K.H. Kwan, Superfine cement for improving packing density, rheology and strength of cement paste, *Cem. Concr. Comp.* **34**, 1-10 (2012).
4. M. Abd Elrahman, B. Hillemeier, Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high performance concrete: An experimental approach, *Constr. Build. Mater.* **58**, 225-233 (2014).

with cement are the optimum to fill the voids and improve the particle packing, which forms one of the basis for improved compressive strength in concrete.

- It was noticed that when percentages of the mineral additives were increased, after obtaining optimum of their content, the packing density decreased. It may be attributed to the fact that specific surface area increases as fine particles content is increased, which leads to increase in the water demand and ultimately the packing density decreases.
- Further with the addition of superplasticizer to the mixes, the packing density increased significantly, even at the lower water content, in all the six cementing materials combinations. The reason behind this phenomenon is that the SP gets adsorbed on the surface of the materials particles and leads to their dispersion, thereby reducing the requirement of water and increase in the packing.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge Jaypee University of Information Technology, Solan, India for providing funds, essential facilities and environment for research.

5. S. Fennis, J.C. Walraven, Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design, *Heron*, **57**, 73–101 (2012).
6. H.H.C. Wong, A.K.H. Kwan, Packing density of cementitious materials: part 1—measurement using a wet packing method, *Mater. Struct.* **41**, 689-701 (2008).
7. P. Nanthagopalan, M. Haist, M. Santhanam, H.S. Müller, Investigation on the influence of granular packing on the flow properties of cementitious suspensions, *Cem. Concr. Comp.* **30**, 763-768 (2008).
8. A.M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th ed., Prentice Hall, 2011
9. W. Puntke, Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken. *Beton Schriftenreihe* **52**, 242-249 (2002).
10. R. Walker, S. Pavía, Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime–pozzolan pastes, *Mater. Struct.* **44**, 1139-1150 (2011).
11. A.K.H. Kwan, J.J. Chen, Adding fly ash microsphere to improve packing density, flowability and strength of cement paste, *Powder Technology*, **234**, 19-25 (2013).
12. IS: 12269: Ordinary Portland Cement, 53 grade- Specification, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, (2013).
13. IS: 12089: Specification for granulated slag for the manufacture of Portland slag cement, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, (1987).
14. IS:1489-2, Portland-Pozzolana Cement Specification, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, (1991).