

Metoda projektowania mieszanki zbrojonego włóknami samozagęszczającego się betonu w oparciu o model upakowania materiału ściśliwego

Mix design methodology for fibrous self compacting concrete based on compressible packing model (CPM)

1. Wprowadzenie

Rozwój samozagęszczającego się betonu (BSZ) oznacza ważny krok w kierunku poprawy wydajności i warunków pracy w budownictwie oraz w prefabrykacji. Zmniejszenie porowatości może poprawić właściwości młodego jak i stwardniałego betonu. Można zawsze zwiększyć zawartość matrycy w betonie i dobrać odpowiedni wymiar i rodzaj stosu okruszowego kruszywa aby uzyskać beton o odpowiednio małej przepuszczalności (1, 2). Ponadto, zmniejszenie jamistości kruszywa pozwala także wytwarzać ekonomiczniej mieszankę betonową ponieważ wymaga ona mniejszej ilości zaczynu (3, 4). Beton samozagęszczający się ma większą zawartość drobnych frakcji niż gruboziarnistego materiału co pośrednio powoduje, że jego właściwości odpowiadają BWW (5, 6). Stosowanie BSZ wyklucza konieczność wibracji i usuwa problem nieprzeszkolonych pracowników. Jednak stopniowe zmniejszenie liczby wyszkolonych pracowników pociągnęło za sobą obniżenie jakości prac budowlanych (7, 8). BSZ skraca okres budowy, eliminuje hałas spowodowany wibracją i zapewnia utrzymanie dobrego poziomu w trakcie transportu i układania betonu, zapewnia gładką powierzchnię i jednorodność materiału (9, 10). Ponadto zmniejsza się powstawanie rys i inne uszkodzenia mikrostruktury. W celu poprawy właściwości BSZ stosuje się domieszki, w szczególności superplastyfikatory i domieszki modyfikujące lepkość. W związku z tym, że BSZ zawiera więcej drobnego materiału, jest mało pustek w betonie. Z tego względu w pewnej objętości trzeba więcej zaczynu cementowego, co poprawia płynność betonu. Zapotrzebowanie na wodę ulega zmniejszeniu w związku ze stosowaniem superplastyfikatorów. Domieszki modyfikujące lepkość ułatwiają uzyskanie dobrej jednorodności i zmniejszają tendencję do segregacji.

Betony samozagęszczające się, zbrojone włóknami stalowymi (BSZZWS) wykorzystują zalety BSZ we wczesnym okresie poprzez usunięcie powstawania rys i wykazują lepsze właściwości po

1. Introduction

The development of Self Compacting Concrete (SCC) marks an important stride towards improved efficiency and working conditions on construction sites and in the prefab industry. Decrease in porosity can enhance the performance of concrete in the fresh and hardened states. It is always possible to densify the matrix in concrete and adjust the size and nature of the granular skeleton to yield a concrete with reasonable impermeability (1, 2). Further, the decreased pores can also result in an economical mix as the paste required will be less in these mixes (3, 4). Self Compacting Concrete is a concrete which utilizes more fines than coarser material to indirectly result in a high performance concrete (5, 6). The use of Self Compacting Concrete (SCC) bypasses the need for external vibration, eliminating the problem of unskilled labor. Also, the gradual reduction in the number of skilled workers has led to the reduction in the quality of construction work (7, 8). SCC shortens the construction period, eliminates noise due to vibration, and provides high stability during transport and placement, providing uniform surface quality and homogeneity (9, 10). Furthermore, there is a reduction in cracking and micro structural defects. To improve the performance of SCC, chemical admixtures, in particular, superplasticizers and Viscosity Modifying Admixtures (VMA) are used. As SCC has more fines, the voids in the concrete are few. Thus, for a given volume, more amount of cement paste is available, because of which the fluidity of concrete improves. The water demand is reduced with use of water reducing admixtures as superplasticizers. Superplasticizer dosages influence the properties of concrete such as fluidity and strength. Viscosity Modifying Agents (VMA) helps to provide very good homogeneity and reduces the tendency to segregate.

Steel Fiber Reinforced Self Compacting Concrete (SFRSCC) combines the benefits of SCC in the fresh state by avoiding cracking and shows an improved performance in the hardened state as compared to conventional concrete due to the addition of the fibers.

stwardnieniu w porównaniu z konwencjonalnymi betonami, w wyniku wprowadzenia włókien. Otwiera się w związku z tym nowe pole do zastosowań tego kompozytu. Projektowanie mieszanki oparto na opracowanym modelu upakowania materiału ściśliwego (UMŚ) w celu uzyskania dobrego upakowania i na tej podstawie składu kruszywa. Ocenę jakości mieszanek BSZ oparto na badaniu rozplywu, wykorzystując pierścień – J, lejek – V oraz metodę rozplywu – L, a uzyskane wyniki wykorzystano stosując specyfikację EFNARC (European Federation of National Associations Representing Concrete) (11). Przeprowadzono także pomiary wytrzymałości na ściskanie w celu poznania tych właściwości betonu. Najważniejszym celem pracy było opracowanie metody projektowania BSZZWS zapewniającej najmniejszą porowatość dzięki właściwemu upakowaniu co powinno zapewnić dobre właściwości i ekonomiczne wytwarzanie. Metoda projektowania na zasadzie ZMŚ powinna zapewnić właśnie ten rodzaj betonu (12).

2. Znaczenie badań

Zaprojektowanie prawidłowego składu mieszanki ma duże znaczenie w procesie uzyskania dobrego samozagęszczającego się betonu. W praktyce świeży BSZ wykazuje dużą płynność, zdolność do samozagęszczania się i odporność na segregację, co razem wzięte zmniejsza ryzyko powstawania pustek w betonie. Ta dobra jakość BSZ stwarza możliwość znacznej poprawy trwałości budowli z żelbetu i zapewnia wykonalność. Samozagęszczanie się betonu zależy w znacznym stopniu od rodzaju zastosowanych materiałów i składu mieszanki. Porowatość stosu okruszowego (kruszywo i włókna okruszowe) określa ilość zaczynu potrzebną do wypełnienia tych pustek. W tym zakresie dwa różne czynniki mogą przewidzieć ten stan i zmniejszyć porowatość. Jedną drogą do osiągnięcia optymalnych wymiarów i stosunku grube/drobne kruszywo, niezbędne do wytworzenia zwartej betonu jest koncepcja modelu upakowania ściśliwego materiału. Wyniki doświadczeń dotyczących upakowania porównano z numeryczną prognozą wynikającą z UMŚ. Niezbędne parametry wejścia, niezbędne do przeprowadzenia symulacji z pomocą modelu UMŚ oznaczono doświadczalnie. Doświadczenia mające na celu ustalenie racjonalnej metody projektowania mieszanki i metod badania samozagęszczania się przeprowadzono przy założeniu, że samozagęszczający się beton będzie normowym betonem. Postępowanie zgodne z projektowaniem mieszanki metodą Nansu (13) ma pewne ograniczenia i wymaga przyjęcia zbyt wielu założeń. Ten artykuł opisuje metodę UMŚ (12) w celu przewidywania zawartości upakowania BSZZWS i przedstawia właściwości mechaniczne betonu różnych klas zaprojektowanych tą metodą. Pracę przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym opracowano mieszanki BSZ zawierające i nie zawierające włókien dla kilku klas betonu, a w drugim etapie sprawdzono zaproponowaną metodę dla innych, pośrednich mieszanek.

3. Program doświadczeń

Program doświadczeń polegał na opracowaniu składu BSZ bez i z dodatkiem włókien stalowych, oparty na odpowiednim upako-

Due to its special characteristics new fields of application can be explored. A mix design procedure based on Compressible Packing Model (CPM) was developed to obtain an accurate packing fraction, and thus, aggregate proportions. To qualify the SCC mixes slump flow, J-Ring, V-funnel, L-flow tests were conducted and the fresh properties obtained are checked against the EFNARC (European Federation of National Associations Representing Concrete) Specifications (11). Compressive strength tests were conducted to know the strength properties of the mixes. The primary objective of the work was to develop the mix design procedure for SFRSCC that can provide least porosity by effective packing and there by ensure high performance and economical mixes. CPM (12) method of mix design can develop such a type concrete.

2. Research significance

Designing an appropriate mix proportion is a very important aspect in the process of getting a good Self Compacting Concrete. In practice, SCC in its fresh state shows high fluidity, self-compacting ability and segregation resistance, all of which contribute to reduction in the risk of honey combing of concrete. With these good qualities, the SCC produced can greatly improve the reliability and durability of the reinforced concrete structures. Self-compactability can be largely affected by the characteristics of materials and the mix-proportion. The porosity of the granular skeleton (aggregates and steel fibers) determines how much paste is required to fill its interstices. At this juncture, the two important aspects to be addressed are decreasing the porosity and prediction of the same. One way of arriving the optimum sizes and proportions of coarse/fine aggregate for preparing a dense concrete is the Compressible Packing Model (CPM) concept. Results of packing experiments are compared with numerical predictions of the CPM. The required input parameters to conduct simulations with the CPM were experimentally determined. Investigations for establishing a rational mix-design method and self-compactability testing methods have been carried out from the viewpoint of making self-compacting concrete a standard concrete. The popularly followed Nansu method of mix design (13) has certain limitations and involves too many assumptions. This paper describes the CPM method (12) to predict the packing density of SFRSCC and presents the mechanical properties of different grades of concrete designed based on the principles of CPM method. The work was carried out in two stages. In the first stage, fibrous and non-fibrous SCC mixes for certain grades of concrete was developed and in the second stage, validation of the developed procedure for other intermediary mixes.

3. Experimental program

The experimental program consisted of developing SCC mix proportions, for both without and with steel fiber, based on the packing fraction obtained accurately from the Compressible Packing Model concept. The proportions obtained based on the packing fraction from the CPM model are checked for the fresh properties as laid by EFNARC (11). The hardened strength properties were

waniu obliczonym za pomocą modelu UMŚ. Otrzymany skład zbadano określając właściwości mieszanki zgodnie z wytycznymi EFNARC (11), natomiast wytrzymałość zbadano na próbkach normowych zgodnie z IS:516 (14). W pierwszym etapie przygotowano trzy mieszanki o programowych wytrzymałościach M20, M40 i M60 zgodnie z normą hinduską IS: 456-2000 (13), przy czym jedna seria była bez, a druga z dodatkiem włókien. Po potwierdzeniu założonych wytrzymałości dla trzech klas betonu (M20, M40 i M60), kontynuowano cykl badań w celu otrzymania pośrednich klas betonu (M25, M30, M35, M45, M50 i M55). Przy projektowaniu ich składu wykorzystano zależność wytrzymałości od czynnika upakowania sprawdzonego dla trzech poprzednich betonów. Właściwości mieszanek tej drugiej serii oraz stwardniałego betonu sprawdzono także zgodnie z wytycznymi EFNARC. Zaprojektowano więc dziesięć mieszanek w oparciu o model UMŚ, który jest uporządkowany w sposób właściwy w przeciwieństwie do metody Nansu opierającej się na wielu założeniach (15).

3.1. Materiały

Stosowano cement portlandzki klasy 53 zgodnie z normą IS-12269 (16), o gęstości 3,15. Kruszywo drobne stanowił piasek rzeczny o uziarnieniu zgodnym z normą IS: 383 (17), dział II. Jego gęstość wynosiła 2,4. Kruszywo grube stanowiło łamany granit o maksymalnym uziarnieniu 20 mm, zgodny z normą IS: 383, o gęstości 2,65. Dodatki mineralne są zwykle stosowane w celu poprawy właściwości mieszanki i stwardniałego betonu, a także dla zmniejszenia kosztów. W tych badaniach użyto popiołu lotny. Jego gęstość wynosiła 2,186. Domieszki stosowane w technologii BSZ w celu poprawy urabialności i płynności i zapobieganiu segregacji. W badaniach zastosowano jako superplastyfikator sulfonowany kondensat naftalenowo-formaldehadowy SNF o nazwie handlowej SPW30 produkcji FOSROC w Bangalore w Indiach. Jako wodę zarobową oraz do dojrzewania próbek stosowano wodę pitną. Włókna stalowe były pofalowane i miały stosunek długości do średnicy 70 do 1. Ich dodatek wynosił 0,5%; wytrzymałość na rozciąganie przekraczała 650 MPa, a moduł sprężystości 210 GPa i gęstość 78,5 oraz wyróżniały się doskonałą odpornością korozyjną.

3.2. Projektowanie mieszanki

Gęstość upakowania stosu okruszowego wyznacza ilość zaczynu potrzebną do wypełnienia jam. Każdy nadmiar zaczynu przyczynia się do poprawy urabialności poprzez zmniejszenie tarcia włókien i kruszywa. Zmniejszenie jamistości obniża także koszty materiałowe i ma wpływ na związane z zaczynem właściwości betonu, na przykład skurcz. Włókna stalowe zwiększają porowatość stosu okruszowego, przy czym stopień zwiększenia zależy od względnego wymiaru ziarn kruszywa w stosunku do długości włókien. W celu prognozowania gęstości upakowania wykorzystano model upakowania materiału ściśliwego (UMŚ). Wytwarzanie BSZ wymaga przede wszystkim zaprojektowania odpowiedniego składu mieszanki i oceny właściwości otrzymanego betonu. W następujących punktach wyjaśniono obliczanie składu mieszanki w oparciu o UMŚ.

verified based on the tests conducted on standard test specimens. In the first stage, three mixes M20, M40 and M60 [Mixes with characteristic compressive strengths of 20, 40 and 60MPa as per Indian Standard IS: 456-2000 (13)] for both no fiber and steel fiber inclusions were considered. The mix proportions obtained based on CPM were tested for the fresh properties as per EFNARC guidelines and hardened properties in accordance with IS: 516 (14). After confirming the results of three grades of concrete (M20, M40 and M60), the procedure was further used to validate the other intermediary mixes (M25, M30, M35, M45, M50 and M55). The packing factors for intermediary mixes were developed based on the established relation between the packing factor and grade of concrete obtained for these three mixes. The fresh and hardened properties of the new mixes were also validated to the satisfaction of EFNARC guidelines. Thus, a total ten mixes were designed based on CPM concept, which is systematic in approach unlike Nansu method (15) that is based on many assumptions.

3.1. Materials used

Cement: Ordinary Portland Cement (OPC) of 53 grade conforming to IS-12269 (16) with a specific gravity of 3.15 was used in the study.

Fine Aggregate: River sand conforming to zone-II of IS: 383 (17) was used in the study. The specific gravity was 2.4.

Coarse Aggregate: Properly graded crushed granite of 20 mm maximum size conforming to IS:383, was used as coarse aggregate. The specific gravity was 2.65.

Mineral Admixtures: Mineral admixtures are normally used to improve the fresh and hardened properties of concrete and also to reduce the cost of the constituent materials. Fly ash was used as a mineral admixture in the present investigations. The specific gravity of flyash was 2.186,

Chemical Admixtures: Chemical admixtures are commonly employed in SCC production, to the enhance workability and control segregation. In the present study, Superplasticizer SP 430 (From FOSROC chemicals, Bangalore, India), an SNF condensate was used. to develop the required flow properties of SCC.

Water: Potable water was used for mixing and curing.

Steel Fibers: Crimped steel fibers with an aspect ratio of 70 to 1, and volume fraction of 0.5% per cubic meter of concrete were used in this study. The fibres with the tensile strength greater than 650 MPa, a modulus of elasticity of 210GPa, and density of 78.5 KN/m³ with excellent corrosion resistance were used in the present study.

3.2. Mix design procedure

The packing density (a complement of porosity) of a granular skeleton determines the amount of cement paste that is required to fill the interstices. Any surplus amount of paste contributes to a better workability by reducing the friction between fibers and aggregates. Minimising the porosity also reduces the material costs and affects

3.2.1. Dobór grubego i drobnego kruszywa

Współczynnik upakowania kruszywa (WU) określa się jako stosunek masy kruszywa gęsto upakowanego w BSZ do luźno usypanego. Z tego względu WU wpływa na zawartość kruszywa w BSZ. Duży WU oznacza większą ilość grubego i drobnego kruszywa, a więc zmniejsza zawartość spoiwa w BSZ. Powoduje to zmniejszenie płynności, zdolności do samozagęszczania się i wytrzymałości na ściskanie. Z drugiej strony mały WU będzie oznaczał zwiększony skurcz suszenia betonu. Jest to związane z większą zawartością spoiwa co zwiększa koszty materiałowe. Ponadto, nadmiar spoiwa będzie także wpływał na urabialność i trwałość BSZ. Z tego względu duże znaczenie ma wybór optymalnego WU w projektowaniu mieszanki, tak aby zapewnić wymagane właściwości BSZ, a równocześnie brać pod uwagę ekonomiczność produkcji. Zawartość drobnego i grubego kruszywa można obliczyć następująco:

$$K_g = WU \cdot K_{g_i} \cdot [1 - (s/a)] \quad [1]$$

$$K_d = WU \cdot K_{d_i} \cdot (s/a) \quad [2]$$

gdzie:

K_g = zawartość kruszywa grubego w BSZ (kg/m^3),

K_d = zawartość kruszywa drobnego w BSZ (kg/m^3),

K_{g_i} = masa jednostki objętości luźno usypanego, powietrznie suchego kruszywa grubego (kg/m^3),

K_{d_i} = masa jednostki objętości luźno usypanego, powietrznie suchego kruszywa drobnego (kg/m^3),

WU = współczynnik upakowania,

(s/a) = stosunek objętościowy drobnego kruszywa do całego kruszywa.

3.2.2. Wyznaczenie składu kruszywa za pomocą UMS

W praktyce pomiar ϕ (rzeczywista gęstość upakowania) przeprowadza się wsypując suchą próbkę o masie M_s do cylindra o przekroju s i wysokości h . ϕ oblicza się następująco:

$$\text{Całkowita objętość zajęta przez kruszywo } V = S \cdot h \quad [3]$$

$$\text{Rzeczywista objętość } v \text{ kruszywa } v = M_s / WGP \quad [4]$$

(WGP = Względna Gęstość Pozorna)

$$\Phi = v/V = M_s / (S \cdot h \cdot WGP) \quad [5]$$

Rzeczywistą gęstość upakowania pojedynczego składnika mieszaniny oznaczono β_i

$$\beta_m = (1+1/Z)\phi \quad [6]$$

Z = wskaźnik zagęszczenia, który zależy od metody zagęszczania, = 4,1 po wsypaniu, 4,5 po uderzeniach prętem, 4,75 po wibracji, 9 po wibracji i sprasowaniu pod ciśnieniem 10 kPa. W niniejszych doświadczeniach $Z = 4,1$.

the paste-related aspects of concrete like shrinkage. Steel fibres increase the porosity of the granular skeleton; the degree of the increase depends on the relative size of the aggregate grains to the fiber length. In order to predict the packing density of the granular skeleton, the Compressible Packing Model (CPM) was applied. In producing SCC, the major work involves designing an appropriate mix proportion and evaluating the properties of the concrete thus obtained. The procedure of mix proportioning based on CPM is explained in the following steps.

3.2.1. Calculation of coarse aggregate and fine aggregate

The Packing Factor (PF) of aggregate is defined as the ratio of mass of aggregate of tightly packed state in SCC to that of loosely packed state. Clearly, PF affects the content of aggregates in SCC. A higher PF value would imply a greater amount of coarse and fine aggregates used, thus, decreasing the content of binders in SCC. Consequently, its flowability, self compacting ability and compressive strength will be reduced. On the other hand, a low PF value would mean increased drying shrinkage of concrete. As a result, more binders are required, thus, raising the cost of materials. In addition, excess binders used would also affect the workability and durability of SCC. Therefore, it is important to select an optimal PF value in the mix design method so as to meet the requirements of SCC properties, and at the same time accounting for economic feasibility. The content of fine and coarse aggregates can be calculated as follows.

$$K_g = WU \cdot K_{g_i} \cdot [1 - (s/a)] \quad [1]$$

$$K_d = WU \cdot K_{d_i} \cdot (s/a) \quad [2]$$

where

W_g = content of coarse aggregates in SCC (kg/m^3),

W_s = content of fine aggregates in SCC (kg/m^3),

W_{g_i} = unit volume mass of loosely piled saturated surface-dry coarse aggregate in air (kg/m^3),

W_{s_i} = unit volume mass of loosely piled saturated surface-dry fine aggregates in air (kg/m^3),

PF = packing factor,

(s/a) = volume ratio of fine aggregates to total aggregates.

3.2.2. Derivation of aggregate proportion using CPM

In practice, the measurement of ϕ (Real Packing Density) is done by pouring a dry sample of mass M_s in a cylinder of cross section S and height h . The calculation of ϕ is as follows:

$$\text{Total volume } V \text{ of packing: } V = S \cdot h \quad [3]$$

$$\text{Real volume } v \text{ of the aggregate: } v = M_s / BRD \quad [4]$$

(BRD = Bulk Relative Density)

$$\Phi = v/V = M_s / (S \cdot h \cdot BRD) \quad [5]$$

The virtual packing density of a single component mixture is denoted β_i

3.2.3. Po dodaniu włókien stalowych

Gęstość upakowania można wyliczyć z równania [7].

$$\varphi' = (1 - \varphi_f - N_{sf} \cdot v_p) \cdot \varphi \quad [7]$$

gdzie:

φ' = średnia gęstość upakowania jednoskładnikowej mieszanki i,

φ_f = procentowa zawartość włókien w stosie okruszowym,

N_{sf} = ilość włókien stalowych,

v_p = zakłócenia objętości pojemnika:

$$(\text{obj. w \%}) = (D_w - d/2) \cdot (B_w + k_F \cdot d) \quad [8]$$

gdzie:

D_w = długość włókien stalowych, d = średnia geometryczna średnica kruszywa, B_w = średnica włókien stalowych $k_F = 0,065$.

Rzeczywista gęstość upakowania jednoskładnikowej mieszanki oznaczono β_m

$$\beta_m = \left(1 + \frac{1}{Z}\right) \varphi' \quad [9]$$

3.2.4. Obliczenie efektu ściany pojemnika

Wyżej podana zmierzona gęstość upakowania β_m jest ograniczoną gęstością upakowania, ponieważ wpływa na nią efekt ściany, q , spowodowany ścianami pojemnika walcowego. W przypadku jednowymiarowego kruszywa o wymiarach d , rzeczywistą gęstość β_m należy skorygować, aby otrzymać niezakłóconą, rzeczywistą gęstość upakowania.

Zgodnie z zależnością:

$$\beta_i = q \cdot \beta_m \quad [10]$$

$$q = 1/(1 - (1 - k_w)(1 - (1 - d_i/d_c)2(1 - d_i/h))) \quad [11]$$

gdzie: k_w – współczynnik związany z kształtem ziaren, wynoszący 0,88 dla ziarn okrągłych i 0,73 dla ziarn w przypadku kruszywa łamanego, d_i = średnica kruszywa, d_c = średnica walcowego pojemnika, h = wysokość pojemnika.

Całkowita rzeczywista gęstość upakowania Y_i mieszaniny cząstek o dowolnej liczbie klas ziarnowych o niezależnej wartości β jest określona następującym równaniem, w którym wartość Y_i przedstawia objętość frakcji i tej klasy ziarnowej, gdy każda z i klas wymiarowych, która będzie zmieszana jest zmierzona w pojemniku przed połączeniem.

$$Y_i = \frac{\beta_i}{\left[1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left(1 - \beta_j + b_{ij} \left(1 - \frac{1}{\beta_j}\right)\right) y_j - \sum_{j=i+1}^n \left(1 - \frac{a_{ij} \beta_i}{\beta_j}\right) y_j\right]} \quad [12]$$

Uważa się, że udział odpowiadający ostatniej rzeczywistej gęstości upakowania wyznacza czynnik upakowania.

$$\beta_m = (1 + 1/K) \varphi \quad [6]$$

K = compaction index which depends on method of compaction, = 4.1 for pouring, 4.5 for striking with rod, 4.75 for vibration and = 9 for vibration and compaction at 10 kPa. In the present case, $K = 4.1$.

3.2.3. When steel fibers are included

The packing density can be calculated using Equation [7].

$$\varphi' = (1 - \varphi_f - N_{sf} \cdot v_p) \cdot \varphi \quad [7]$$

where,

φ' = mean packing density of a mono-disperse mix of group i ,

φ_f = percentage of fibers of the granular skeleton,

N_{sf} = number of steel fibers,

v_p = perturbed volume in a container:

$$(\text{Vol.-%}) = (L_f - d/2) \cdot (B_f + K_F \cdot d) \quad [8]$$

where:

L_f = length of steel fiber, d = geometrical mean diameter of the aggregate group, B_f = diameter of the steel fiber, $K_F = 0.065$.

The virtual packing density of a single component mixture is denoted β_m

$$\beta_m = \left(1 + \frac{1}{K}\right) \varphi' \quad [9]$$

3.2.4. Calculation of container wall effect

The above measured packing density β_m is a confined packing density, since it is altered by the wall effect, q , induced by the walls of the cylinder. In the case of a mono-sized aggregate of size d , the virtual density β_m , must be corrected to obtain the non-confined virtual packing density,

According to the relation:

$$\beta_i = q \cdot \beta_m \quad [10]$$

$$q = 1/(1 - (1 - k_w)(1 - (1 - d_i/d_c)2(1 - d_i/h))) \quad [11]$$

where, k_w is a coefficient linked with the form of the grains, equal to 0.88 for rounded grains and 0.73 for crushed grains, d_i = diameter of aggregate, d_c = diameter of cylindrical container, h = height of the container.

The overall virtual packing density Y_i for a mixture of any number of particle size classes with independent beta values is defined by the following Equation, where, the value y_j represents the volume fraction of the j^{th} size class when each of the i size classes to be mixed are measured in beakers before combination.

$$Y_i = \frac{\beta_i}{\left[1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left(1 - \beta_j + b_{ij} \left(1 - \frac{1}{\beta_j}\right)\right) y_j - \sum_{j=i+1}^n \left(1 - \frac{a_{ij} \beta_i}{\beta_j}\right) y_j\right]} \quad [12]$$

The proportion corresponding to least virtual packing density is considered to determine the packing factor.

3.2.5. Obliczenie efektu rozluźnienia (a_{ij})

Efekt rozluźnienia (a_{ij}) jest spowodowany przez dodanie małych cząstek, które rozpychają duże ziarna. Efekt ten można wyliczyć z równania [13]:

$$a_{ij} = (1 - (1 - d_j/d_i)^{1.02})^{0.5} \quad [13]$$

d_i oznacza średnią średnicę ziarna.

$$d_i = (d_{max} \cdot d_{min})^{0.5} \quad [14]$$

d_{max} = średnica największego ziarna w grupie

d_{min} = średnica najmniejszego ziarna w grupie

3.2.6. Efekt ściany spowodowany przez ziarna (b_{ij})

Ten efekt ściany jest spowodowany przez większe ziarna, powodujące odległości między ziarnami w mieszance, które są zbyt małe, aby mogły być wypełnione przez cząstki innych klas. Efekt ściany (b_{ij}) można obliczyć z równania [15]:

$$b_{ij} = 1 - (1 - d_i/d_j)^{1.50} \quad [15]$$

Wyliczenie mieszanki o składzie odpowiadającym klasie betonu M20 za pomocą modelu UMS jest szczegółowo wyjaśnione w następujących punktach. Także podane jest szczegółowe wyliczenie czynnika upakowania, a na tej podstawie zostanie ustalony stosunek kruszywa grubego do drobnego. Obliczenie rzeczywistej gęstości upakowania (β_i) w przypadku kruszywa o jednym wymiarze dla mieszanek BSZ bez włókien można obliczyć z równania (10), a wynik jest pokazany w tablicy 1.

W tablicach 2 i 3 pokazano szczegóły obliczenia efektu rozluźnienia (a_{ij}) i efektu ściany (b_{ij}). Wartości te obliczono z równań [13] i [15].

Rzeczywista gęstość upakowania mieszanki składającej się z różnych frakcji ziarnowych i jednej grupy dominującej.

$$\tilde{\alpha} = \frac{\beta_i}{\left[1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left(1 - \beta_i + \beta_i b_{ij} \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right) y_j - \sum_{j=i+1}^n \left(1 - \frac{a_{ij} \beta_i}{\beta_j} \right) y_j \right]} \quad [16]$$

$$a_{ij} = \text{efekt rozluźnienia} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1.02}}, \quad b_{ij} = \text{efekt ściany} =$$

$$1 - \{ [1 - (d_i/d_j)]^{1.5} \} \quad [17]$$

Wyznaczenie składu kruszywa w przypadku wielo-ziarnowej mieszanki wraz z rzeczywistą gęstością upakowania obliczono z równania [12], a szczegóły są zawarte w tablicy 4 dla mieszanin nie zawierających włókien. Efekty rozluźnienia i ściany w przypadku wielo-ziarnowych mieszanin oszacowano w oparciu o równania [16] i [17].

3.2.7. Obliczenie zawartości proszków

W celu zapewnienia dobrej płynności i odporności na segregację, zawartość spoiw (proszek) nie może być za mała. Jednak, zbyt

3.2.5. Calculation of loosening effect (a_{ij})

The loosening effect (a_{ij}) describes an effect where in the introduction of small particles forces apart the larger particles. The loosening effect (a_{ij}) is calculated using Equation [13].

$$a_{ij} = (1 - (1 - d_j/d_i)^{1.02})^{0.5} \quad [13]$$

The value d_i represents is the average particle diameter.

$$d_i = (d_{max} \cdot d_{min})^{0.5} \quad [14]$$

d_{max} = diameter of the largest particle in the group.

d_{min} = diameter of the smallest particle in the group.

3.2.6. Wall effect due to particles (b_{ij})

The wall effect (b_{ij}) describes an effect whereby larger particles cause interstitials in the mixture which are too small to be filled by other particle classes. The Wall effect (b_{ij}) is calculated using Equation [13].

$$b_{ij} = 1 - (1 - d_i/d_j)^{1.50} \quad [15]$$

A sample calculation explaining the mix proportioning of M20 grade of concrete based on CPM concept is explained in detail in the following sections. A detailed calculation of the packing factor and hence the coarse aggregate to fine aggregate ratios are also shown. The calculation of the Virtual Packing Density (β_i) for Mono sized aggregates for SCC mixes without fiber is calculated based on Equation [10] and is shown in Table 1.

Tables 2 and 3 show the details of the calculation of the loosening effect (a_{ij}) and the wall effect (b_{ij}). These values are calculated using Equations [13] and [15].

Virtual packing density of a poly disperse mix with i group dominant

$$\tilde{\alpha} = \frac{\beta_i}{\left[1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left(1 - \beta_i + \beta_i b_{ij} \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right) y_j - \sum_{j=i+1}^n \left(1 - \frac{a_{ij} \beta_i}{\beta_j} \right) y_j \right]} \quad [16]$$

$$a_{ij} = \text{loosening effect} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1.02}} \quad b_{ij} = \text{wall effect} =$$

$$1 - \{ [1 - (d_i/d_j)]^{1.5} \} \quad [17]$$

The calculation of the aggregate proportions for a poly-disperse mixture along with the Virtual Packing Density is calculated using Equation [12], and the details are shown in Table 4 for no fiber SCC mixes. The loosening and wall effects for poly dispersed mixes are evaluated based on Equations [16] and [17].

3.2.7. Calculation of powder content

To secure good flowability and segregation resistance, the content of binders (powder) should not be too low. However, too much cement used will increase the drying shrinkage of SCC. EFNARC provides guidelines for calculating powder content. From the

Tablica 1 / Table 1

RZECZYWISTA GĘSTOŚĆ UPAKOWANIA DLA RÓŻNYCH JEDNOWYMIAROWYCH KRUSZYW

VIRTUAL PACKING DENSITIES FOR DIFFERENT MONO SIZED AGGREGATES

Kruszywo/Aggregate Wymiar/Zakres, Size/Range, mm	20-16	16-12.5	12.5-10	10-4.75	4.75-2.36	2.36-1.18	1.18-0.6	0.6-0.15
Gęstość pozorna, Bulk density, kg/m ³	1410	1410	1410	1410	1560	1560	1560	1560
Średnie ziarno kruszywa, Mean aggregate size, mm	17.89	14.14	11.18	6.89	3.35	1.67	0.84	0.30
Wyjściowa masa Initial weight W_s , kg	7.5	7.3	7.38	7.21	7.9	8.04	7.91	7.71
Wysokość upakowania Blocked packing h , mm	300	300	300	300	300	300	300	300
Powierzchnia c/s area, cm ²	176.63	176.63	176.63	176.63	176.63	176.63	176.63	176.63
Gęstość Specific gravity	2.65	2.65	2.65	2.65	2.42	2.42	2.42	2.42
Gęstość upakowania Packing density Φ	0.534	0.520	0.525	0.513	0.616	0.623	0.617	0.600
Otrzymana gęstość upakowania Actual packing density $\beta_m = (1 + 1/k)\phi$	0.664	0.646	0.653	0.638	0.766	0.780	0.767	0.748
Rzeczywista gęstość upakowania Virtual packing density $\beta_i = q_i \beta_m$	0.716	0.687	0.686	0.658	0.772	0.783	0.769	0.748

Tablica 2 / Table 2

OBLICZENIE EFEKTU ROZLUŻNIENIA (a_{ij})

CALCULATION OF LOOSENING EFFECT (a_{ij})

$a[1][1] = 0$	$a[2][1] = 0$	$a[3][1] = 0$	$a[4][1] = 0$	$a[5][1] = 0$	$a[6][1] = 0$	$a[7][1] = 0$	$a[8][1] = 0$
$a[1][2] = 0.893$	$a[2][2] = 0$	$a[3][2] = 0$	$a[4][2] = 0$	$a[5][2] = 0$	$a[6][2] = 0$	$a[7][2] = 0$	$a[8][2] = 0$
$a[1][3] = 0.795$	$a[2][3] = 0.893$	$a[3][3] = 0$	$a[4][3] = 0$	$a[5][3] = 0$	$a[6][3] = 0$	$a[7][3] = 0$	$a[8][3] = 0$
$a[1][4] = 0.625$	$a[2][4] = 0.703$	$a[3][4] = 0.790$	$a[4][4] = 0$	$a[5][4] = 0$	$a[6][4] = 0$	$a[7][4] = 0$	$a[8][4] = 0$
$a[1][5] = 0.436$	$a[2][5] = 0.491$	$a[3][5] = 0.552$	$a[4][5] = 0.702$	$a[5][5] = 0$	$a[6][5] = 0$	$a[7][5] = 0$	$a[8][5] = 0$
$a[1][6] = 0.308$	$a[2][6] = 0.347$	$a[3][6] = 0.389$	$a[4][6] = 0.496$	$a[5][6] = 0.711$	$a[6][6] = 0$	$a[7][6] = 0$	$a[8][6] = 0$
$a[1][7] = 0.219$	$a[2][7] = 0.246$	$a[3][7] = 0.277$	$a[4][7] = 0.353$	$a[5][7] = 0.506$	$a[6][7] = 0.715$	$a[7][7] = 0$	$a[8][7] = 0$
$a[1][8] = 0.130$	$a[2][8] = 0.147$	$a[3][8] = 0.165$	$a[4][8] = 0.211$	$a[5][8] = 0.303$	$a[6][8] = 0.428$	$a[7][8] = 0.602$	$a[8][8] = 0$

Tablica 3 / Table 3

OBLICZENIE EFEKTU ŚCIANY (b_{ij})

CALCULATION OF WALL EFFECT (b_{ij})

$b[1][1] = 0$	$b[2][1] = 0.904$	$b[3][1] = 0.770$	$b[4][1] = 0.518$	$b[5][1] = 0.267$	$b[6][1] = 0.137$	$b[7][1] = 0.070$	$b[8][1] = 0.025$
$b[1][2] = 0$	$b[2][2] = 0$	$b[3][2] = 0.904$	$b[4][2] = 0.633$	$b[5][2] = 0.333$	$b[6][2] = 0.172$	$b[7][2] = 0.088$	$b[8][2] = 0.032$
$b[1][3] = 0$	$b[2][3] = 0$	$b[3][3] = 0$	$b[4][3] = 0.762$	$b[5][3] = 0.413$	$b[6][3] = 0.215$	$b[7][3] = 0.111$	$b[8][3] = 0.040$
$b[1][4] = 0$	$b[2][4] = 0$	$b[3][4] = 0$	$b[4][4] = 0$	$b[5][4] = 0.631$	$b[6][4] = 0.340$	$b[7][4] = 0.177$	$b[8][4] = 0.065$
$b[1][5] = 0$	$b[2][5] = 0$	$b[3][5] = 0$	$b[4][5] = 0$	$b[5][5] = 0$	$b[6][5] = 0.645$	$b[7][5] = 0.352$	$b[8][5] = 0.131$
$b[1][6] = 0$	$b[2][6] = 0$	$b[3][6] = 0$	$b[4][6] = 0$	$b[5][6] = 0$	$b[6][6] = 0$	$b[7][6] = 0.651$	$b[8][6] = 0.257$
$b[1][7] = 0$	$b[2][7] = 0$	$b[3][7] = 0$	$b[4][7] = 0$	$b[5][7] = 0$	$b[6][7] = 0$	$b[7][7] = 0$	$b[8][7] = 0.483$
$b[1][8] = 0$	$b[2][8] = 0$	$b[3][8] = 0$	$b[4][8] = 0$	$b[5][8] = 0$	$b[6][8] = 0$	$b[7][8] = 0$	$b[8][8] = 0$

duża zawartość cementu zwiększy skurcz suszenia BSZ. EFNARC podaje wytyczne pozwalające na obliczenie zawartości proszku. Na podstawie poprzednich badań wybrano cement i popiół lotny co zapewniało najmniejszą zawartość proszku zgodnie ze specyfikacją EFNARC (11).

previous studies, the cement and fly ash contents were decided based on the minimum powder content according to EFNARC specifications (11).

Tablica 4 / Table 4

UDZIAŁ KRUSZYWA W MIESZANKACH BSZ W PRZYPADKU MIESZANIN O RÓŻNYM UZIARNIENIU (BEZ WŁÓKIEN)
AGGREGATE PROPORTIONS FOR SCC MIXES FOR A POLY DISPERSE MIXTURE (WITHOUT FIBER)

Grupa i Group i		S/A	20-16	16-12.5	12.5-10	10-4.75	4.75-2.36	2.36-1.18	1.18-0.6	0.6-0.15	Y_{min}
M20	Udział Prop's	0.60	0.04	0.04	0.12	0.2	0.03	0.06	0.21	0.3	0.8718
	Y_i		1.695	1.528	1.394	1.231	1.174	1.073	0.9562	0.8718	
M40	Udział Prop's	0.60	0	0.05	0.05	0.3	0.03	0.06	0.21	0.3	0.8704
	Y_i		0	1.586	1.434	1.199	1.151	1.062	0.9517	0.8704	
M60	Udział Prop's	0.60	0	0	0.05	0.35	0.03	0.06	0.21	0.3	0.8697
	Y_i		0	0	1.457	1.182	1.140	1.057	0.9493	0.8697	

3.2.8. Oznaczenie zawartości wody

Aczkolwiek czynniki takie jak zawartość drobnego i grubego kruszywa, skład materiałów i okres dojrzewania mogą wpłynąć na wytrzymałość na ściskanie BSZ, to jednak stosunek woda/spoiwo (w/s) jest głównym czynnikiem określającym tę wytrzymałość. Im mniejszy jest wskaźnik upakowania kruszywa, tym większa będzie objętość zaczynu w BSZ. W efekcie, wytrzymałość na ściskanie będzie większa. Zawartość wody wyznacza się robiąc mieszanki próbne.

3.2.9. Oznaczenie dodatku superplastyfikatora

Można przygotować mieszanki próbne stosując skład obliczony jak to podano w poprzednich punktach. Następnie przeprowadza się badania BSZ w celu potwierdzenia właściwości świeżego i stwardniałego betonu. W przypadku braku możliwości otrzymania zadowalających wyników trzeba korygować skład aż do uzyskania zadowalających właściwości BSZ. Na przykład jeżeli mieszanka BSZ wykazuje złą płynność, zmniejsza się wskaźnik upakowania kruszywa, co umożliwi zwiększenie objętości spoiwa zapewniając poprawę urabialności. W zależności od występującego problemu można zmienić zawartość wypełniacza, piasku lub grubego kruszywa, względnie zastosować domieszkę modyfikującą lepkość, w celu ograniczenia segregacji mieszanki. Szczegóły składu objętościowego kruszywa w klasach M20, M40 i M60 BSZ, bez włókien, podano w tablicy 5.

4. Wpływ wskaźnika upakowania i rzeczywistej gęstości upakowania na wytrzymałość BSZ

W metodzie Nansu zakłada się wskaźnik upakowania (WU). Jednak, nie obejmuje to niskiej i wysokiej klasy betonu. W tym przypadku skład kruszywa odpowiadający najniższej rzeczywistej gęstości upakowania (RGU). W przypadku mieszanek o różnym uziarnieniu, odpowiadającym klasom betonu M20, M40, M60, wykorzystuje się w celu obliczenia wartości wskaźnika upakowania doświadczenia przeprowadzane w laboratorium. Z danych zawartych w tablicy 5 można zauważyć, że gdy wzrasta klasa wytrzymałości betonu, wskaźnik upakowania i rzeczywista gęstość upako-

3.2.8. Determination of the water content

Although factors such as fine and coarse aggregate contents, material proportions and curing age can affect the compressive strength of SCC, the water binder ratio (w/b) is the most prominent determinant of compressive strength. The smaller is the PF value, the more will be the paste volume in SCC. As a result, the compressive strength becomes higher. The water content is obtained through trial mixes.

3.2.9. Determination of the superplasticizer dosage

Adding an adequate dosage of Superplasticizer (SP) can improve the flowability, self-compacting ability and segregation resistance of fresh SCC to meet the design requirements. Optimum dosage of superplasticizer was determined based on trial mixes. As a guide, a dosage range of 500 ml to 1500 ml per 100 kg of cementitious material is normally recommended for the superplasticizer SP337 (SNF based condensate) in the present investigation.

3.2.10. Trial batches and tests on SCC

Trial mixes can be carried out using the material contents calculated as explained in the previous articles. The quality control tests for SCC were then performed to ensure the fresh and hardened properties. If satisfactory performance cannot be obtained, then adjustments should be made until all properties of SCC are satisfied. For example, when the fresh SCC shows poor flowability, the PF value is reduced to increase the binder volume and thus improve the workability. Depending on the problem, modifications in the filler, proportions of sand or coarse aggregate, and the use of viscosity modifying agent to put a control on the segregation of concrete was adopted. The details of the aggregate proportions by volume for M20, M40 and M60 grades SCC without fiber are shown in Table 5.

4. Effect of packing factor and virtual packing density on strength of SCC

In Nansu method, Packing Factor (PF) is assumed. However, this does not cover the low and higher grades of concrete. In the

Tablica 5 / Table 5

OBJĘTOŚCIOWY SKŁAD KRUSZYWA DLA KLAS M20, M40 I M60

AGGREGATE PROPORTION BY VOLUME FOR M20, M40 AND M60 GRADES

Mieszanka Mix	GK/DK* CA/FA	Wskaźnik upakowania Packing factor	Cement kg/m ³	Popiół lotny Fly ash kg/m ³	DK Fine aggregate kg/m ³	GK Coarse aggregate kg/m ³	Woda Water l/m ³	SP 430 l/m ³
M20	40/60	1.234	290	190	1155	776.00	211.7	22.62
M40	40/60	1.210	420	154	1132.56	780.00	226.8	17.64
M60	40/60	1.190	560	135	1113.84	720.19	254.0	28.00

*GK – grube kruszywo, DK – drobne kruszywo

wania wielofrakcyjnej mieszanki wzrasta. Zależność różnej wytrzymałości charakterystycznej betonu (M20, M40 i M60) od wskaźnika jest określona równaniem [18].

$$\text{Wskaźnik upakowania} = 1,254 - 0,001^* \quad [18]$$

* charakterystyczna wytrzymałość betonu

Wykorzystując równanie [18] można wyliczyć wskaźnik upakowania i RGU dla innych mieszanek, o pośrednich wytrzymałościach M25, M30, M35, M45, M50 i M55, jak to pokazano w tablicy 6. Wprowadzając najniższą rzeczywistą gęstość upakowania wielofrakcyjnej mieszanki, można oszacować skład kruszywa dla odpowiednich mieszanek, wykorzystując model ściśliwego materiału, co podano w tablicy 7.

W naszym przypadku, gdy włókna stalowe są dodane do betonu, trzeba wyznaczyć skład ZWSBSZ. Szczegóły RGU w przypadku jednofrakcyjnego kruszywa jego skład i udział innych składników w przypadku betonów klas M20, M40 i M60, zawierających włókna stalowe, są podane w tablicach 8, 9 i 10.

Można stwierdzić, że model UMŚ może być stosowany nawet w przypadku mieszanek BSZ z włóknami. Ustalono zależność charakterystycznej wytrzymałości betonu (ChWB) od wskaźnika upakowania w takich mieszankach w formie równania [19]:

$$\text{Wskaźnik upakowania} = 1,1784 - 0,0006 \cdot (\text{ChWB}) \quad [19]$$

Wykorzystując równanie [19] obliczono wskaźnik upakowania mieszanek z włóknami obejmujący M25, M30, M35, M45, M50 i M55 (tablica 11). W oparciu o najmniejszą rzeczywistą gęstość upakowania mieszanki wielofrakcyjnej oszacowano skład kruszywa wymienionych mieszanek stosując model UMŚ, co zamieszczono w tablicy 12.

5. Ocena właściwości świeżego betonu samozagęszczającego się

W tablicy 5 podano właściwości mieszanki BSZ, prognozowane w oparciu o model UMŚ. Mieszanka BSZ musi wykazywać podstawowe właściwości obejmujące zdolność do wypełniania deskowania, przejścia przez zbrojenie i odporność na segregację na poziomie odpowiadającym wytycznym EFNARC. Wyniki badań BSZ bez włókien i z włóknami podano odpowiednio w tablicach 13 i 14.

present case, the aggregate proportions corresponding to the lowest Virtual Packing Density (VPD) values for poly-disperse mixtures for M20, M40 and M60 grades of concrete is taken for calculating the PF value, experimentally in the laboratory. It can be noted from Table 5 that as the grade/strength of concrete increases the packing factor and virtual packing density of a poly-disperse mix decreases. The relation between the different characteristic strength of concrete (M20, M40 and M60) and Packing Factor is given in Equation [18].

$$\text{Packing factor} = 1,254 - 0,001^* \quad [18]$$

* Characteristic strength of concrete

Based on the Equation [18], the PF and VPD values are calculated for other intermediary mixes M25, M30, M35, M45, M50 and M55 as shown in Table 6. Using the lowest virtual packing density value of a poly-disperse mix the aggregate proportions are estimated for the respective mixes using Compressible Packing Model and are given in Table 7.

In the present case as steel fibers are also dispersed in the concrete matrix the proportions of SFRSCC mixes were to be determined. The details of the VPD's for mono sized aggregate, the aggregate proportions and the details of the ingredients for steel fiber based M20, M40 and M60 grade concretes are given in Tables 8, 9 and 10 respectively.

It can be noted that, CPM model can be used even in the case of fibrous SCC mixes. A relation was established between the

Tablica 6 / Table 6

WSKAŹNIK UPAKOWANIA (WU) I RZECZYWISTA GĘSTOŚĆ UPAKOWANIA (RGU) BETONÓW BEZ WŁÓKIEN

PACKING FACTOR (PF) AND VIRTUAL PACKING DENSITY (VPD) VALUES (WITHOUT FIBER)

Klasa betonu Grade of concrete	PF	VPD
M25	1.229	0.8716
M30	1.224	0.8713
M35	1.219	0.8711
M45	1.209	0.8706
M50	1.204	0.8703
M55	1.199	0.8701

Tablica 7 / Table 7

SKŁAD KRUSZYWA DLA NAJMNIJSZEJ RGU, BETON BEZ WŁÓKIEN

AGGREGATE PROPORTIONS FOR THE LOWEST VPD VALUES (WITHOUT FIBER)

Klasa Grade	Grupa Group	20-16	16-12.5	12.5-10	10-4.75	4.75-2.36	2.36-1.18	1.18-0.6	0.6-0.15	Y_{min}
M25	Skład Prop's	0.04	0.04	0.10	0.22	0.03	0.06	0.21	0.3	0.8716
	Y_i	1.707	1.539	1.405	1.2268	1.1709	1.0715	0.9555	0.8716	
M30	Skład Prop's	0.04	0.04	0.07	0.25	0.03	0.06	0.21	0.30	0.8713
	Y_i	1.726	1.556	1.420	1.2192	1.1652	1.0688	0.9543	0.8713	
M35	Skład Prop's	0.01	0.01	0.14	0.24	0.03	0.06	0.21	0.30	0.8711
	Y_i	1.754	1.566	1.403	1.2126	1.1621	1.0674	0.9538	0.8711	
M45	Skład Prop's	0	0.03	0.08	0.29	0.03	0.06	0.21	0.30	0.8706
	Y_i	0	1.589	1.428	1.1999	1.1527	1.0630	0.9519	0.8706	
M50	Skład Prop's	0	0.02	0.07	0.31	0.03	0.06	0.21	0.30	0.8703
	Y_i	0	1.604	1.438	1.1941	1.1486	1.0610	0.9510	0.8703	
M55	Skład Prop's	0	0.04	0.03	0.33	0.03	0.06	0.21	0.30	0.8701
	Y_i	0	1.609	1.450	1.1910	1.1459	1.0597	0.9505	0.8701	

Tablica 8 / Table 8

RZECZYWISTA GĘSTOŚĆ UPAKOWANIA DLA RÓŻNYCH JEDNO-FRAKCYJNYCH KRUSZYW (WŁÓKNA STALOWE)

VIRTUAL PACKING DENSITIES FOR DIFFERENT MONO SIZED AGGREGATES (STEEL FIBERS)

Kruszywo / Aggregate Wymiar / Zakres Size / Range, mm	20-16	16-12.5	12.5-10	10-4.75	4.75-2.36	2.36-1.18	1.18-0.6	0.6-0.15
Gęstość pozorna, Bulk density, kg/m ³	1410	1410	1410	1410	1560	1560	1560	1560
Średnie ziarno kruszywa, Mean Aggregate Size, mm	17.889	14.142	11.180	6.892	3.348	1.669	0.841	0.3
Wyjściowa masa Initial weight W_s , kg	7.29	7.26	7.49	7.21	7.91	8.01	7.86	7.65
Wysokość upakowania Blocked packing h, mm	300	300	300	300	300	300	300	300
Powierzchnia C/S area, cm ²	176.63	176.63	176.63	176.63	176.63	176.63	176.63	176.63
Gęstość Specific gravity	2.65	2.65	2.65	2.65	2.42	2.42	2.42	2.42
Gęstość upakowania Packing density Φ	0.519	0.517	0.533	0.513	0.617	0.624	0.613	0.596
Otrzymana gęstość upakowania Actual packing density $\beta_m = (1+1/k)\Phi$	0.622	0.640	0.660	0.635	0.763	0.773	0.758	0.738
Rzeczywista gęstość upakowania Virtual packing density $\beta_i = q_i \cdot \beta_m$	0.671	0.680	0.693	0.655	0.769	0.776	0.760	0.739

W celu sprawdzenia składu mieszanek wyliczonych w oparciu o model UMŚ sporządzono 54 kostki 150 x 150 x 150 mm, 54 walce o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm oraz 54 beleczki 100 x 100 x 400 mm, przeznaczone odpowiednio do badań wytrzymałości na ściskanie, na rozciąganie przez rozłupywanie i wytrzymałości na zginanie. Wyniki tych badań zebrano w tablicy 15 tak dla

characteristic strength of concrete and the Packing Factor in these mixes and is given in Equation [19].

$$\text{Packing factor} = 1.1784 - 0.0006 \cdot \text{Characteristic strength of concrete} \quad [19]$$

Tablica 9 / Table 9

SKŁAD KRUSZYWA W MIESZANKACH ZWSBSZ W PRZYPADKU WIELOFRAKCYJNYCH MIESZANEK (WŁÓKNA STALOWE)
AGGREGATE PROPORTIONS FOR SFRSCC MIXES FOR A POLY-DISPERSE MIXTURE (STEEL FIBERS)

Grupa Group i		S/A	20-16	16-12.5	12.5-10	10-4.75	4.75-2.36	2.36-1.18	1.18-0.6	0.6-0.15	γ_{min}
20 MPa	Skład Prop's	0.60	0.04	0.04	0.12	0.2	0.03	0.06	0.21	0.3	0.8666
	γ_i		1.679	1.515	1.384	1.224	1.167	1.066	0.9497	0.8666	
40 MPa	Skład Prop's	0.60	0	0.05	0.05	0.3	0.03	0.06	0.21	0.3	0.8652
	γ_i		0	1.577	1.427	1.192	1.145	1.055	0.9453	0.8652	
60 MPa	Skład Prop's	0.60	0	0	0.05	0.35	0.03	0.06	0.21	0.3	0.8645
	γ_i		0	0	1.449	1.176	1.133	1.050	0.9429	0.8645	

Tablica 10 / Table 10

OBJĘTOŚCIOWY SKŁAD KRUSZYWA DLA KLAS M20, M40 I M60 (WŁÓKNA STALOWE)
AGGREGATE PROPORTION BY VOLUME FOR M20, M40 AND M60 GRADES (STEEL FIBERS)

Mieszanka Mix	GK/DK* CA/FA	Wskaźnik upakowania PF	Cement kg/m ³	Popiół lotny Fly ash kg/m ³	DK FA kg/m ³	GK CA kg/m ³	Woda Water l/m ³	SP 430 l/m ³
M20F	40/60	1.125	359	160	1100.00	680	215.00	18.00
M40F	40/60	1.099	420	154	1132.56	730	239.40	19.32
M60F	40/60	1.084	600	135	1113.84	730	239.54	30.00

* GK – grube kruszywo, drobne kruszywo

Tablica 11 / Table 11

WSKAŹNIK UPAKOWANIA (WU) I RZECZYWISTA GĘSTOŚĆ UPAKOWANIA (RGU) ZWSBSZ
PACKING FACTOR (PF) AND VIRTUAL PACKING DENSITY (VPD) VALUES (SFRSCC)

Klasa/Grade	WU/PF	RGU/VPD
M25	1.163	0.8663
M30	1.160	0.8660
M35	1.157	0.8658
M45	1.151	0.8653
M50	1.148	0.8650
M55	1.145	0.8648

BSZ z włóknami jak i bez włókien.

6. Wnioski

- Gęstość upakowania (odpowiednik porowatości) stosu okruszowego określa ilość zaczynu cementowego wymaganego do wypełnienia jego jamistości z pewnym nadmiarem, ten ostatni w celu poprawy urabialności przez zmniejszenie tarcia pomiędzy kruszywem i włóknami.
- Włókna stalowe w betonie zwiększają porowatość stosu okruszowego w różnym stopniu w zależności od stosunku wymiarów ziarn kruszywa do długości włókien.
- Projektowanie mieszanki w oparciu o model UMŚ zmniejszyło ilość prób w odróżnieniu od innych metod, w których potrzeba

From the Equation [19], the PF and VPD values were calculated for the fiber based mixes including M25, M30, M35, M45, M50 and M55 (Table 11). Using the lowest virtual packing density value for a poly-disperse mix the aggregate proportions were estimated for the respective mixes by using Compressible Packing Model and are shown in Table 12.

5. Evaluation of fresh properties of self compacting concrete

The fresh properties of the SCC mixes thus developed based on the CPM model are given in Table 5. Fresh SCC must possess the key properties including filling ability, passing ability and resistance to segregation at required levels satisfying EFNARC guidelines. The details of the test results for no fiber and steel fiber based SCC are given in Tables 13 and 14 respectively.

To qualify the mix proportions obtained by the CPM model, 54 cubes of 150 x 150 x 150 mm, 54 cylinders of 150mm diameter and 300 mm height and 54 prisms of 100 x 100 x 400 mm were cast for investigating the compressive strength, split tensile strength and the flexural strength respectively. The details of the mechanical properties obtained are given in Table 15 for no fiber SCC mixes and Steel Fiber based SCC mixes.

Tablica 12 / Table 12

SKŁAD KRUSZYWA DLA NAJMNIJSZEJ RGU (ZWSBSZ)

AGGREGATE PROPORTIONS FOR THE LOWEST VPD VALUES (SFRSCC)

Klasa Mix	Grupa Group	20-16	16-12.5	12.5-10	10-4.75	4.75-2.36	2.36-1.18	1.18-0.6	0.6-0.15	γ_{min}
M25	Skład Prop's	0.04	0.04	0.1	0.22	0.03	0.06	0.21	0.3	0.8663
	γ_i	1.6902	1.5257	1.3941	1.2185	1.1634	1.0645	0.9490	0.8663	
M30	Skład Prop's	0.04	0.04	0.08	0.24	0.03	0.06	0.21	0.30	0.8660
	γ_i	1.7013	1.5358	1.4034	1.2129	1.1594	1.0626	0.9482	0.8660	
M35	Skład Prop's	0.04	0.04	0.06	0.26	0.03	0.06	0.21	0.30	0.8658
	γ_i	1.7126	1.5460	1.4129	1.2073	1.1554	1.0607	0.9474	0.8658	
M45	Skład Prop's	0	0.05	0.06	0.29	0.03	0.06	0.21	0.30	0.8653
	γ_i	0	1.5669	1.4182	1.1929	1.1461	1.0564	0.9455	0.8653	
M50	Skład Prop's	0	0.02	0.07	0.31	0.03	0.06	0.21	0.30	0.8650
	γ_i	0	1.5947	1.4292	1.1870	1.1417	1.0542	0.9446	0.8650	
M55	Skład Prop's	0	0.02	0.05	0.33	0.03	0.06	0.21	0.30	0.8648
	γ_i	0	1.6057	1.4390	1.1817	1.1378	1.0524	0.9438	0.8648	

Tablica 13 / Table 13

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK (BEZ WŁÓKIEN)

DETAILS OF FRESH PROPERTIES (WITHOUT FIBER)

Metoda Test	Właściwości Property	Zakres Range	M20	M25	M30	M35	M40	M45	M50	M55	M60
Rozpliw na stoliku Slump flow, mm	Zdolność do wypełnienia Filling ability	650-800	653	660	672	687	700	720	750	735	756
T_{50} H50 flow, s	Zdolność do wypełnienia Filling ability	2-5	5	4	3	5	4	5	4	4	4
Lejek V V-Funnel, s	Zdolność do wypełnienia Filling ability	6-12	5	6	4	5	5	8	7	5	7
T_{5s} , s	Sgregacja Segregation	6-15	6	9	8	11	8	10	6	8	9
L-Box L-Box test	Zdolność do przepływu Passing ability	0.8-1.0	0.85	0.87	0.88	0.92	0.94	0.95	0.94	0.93	0.96
J-Pierścień J-Ring Test	Zdolność do przepływu Passing ability	0-10	9	8	9	5	6	7	8	9	5

ich dużo w celu zapewnienia odpowiednich właściwości mieszanki i stwardniałego betonu. Wszystkie uzyskane klasy betonu spełniały wytyczne EFNARC.

- Zależność pomiędzy wytrzymałością betonu i wskaźnikiem upakowania występuje tak w przypadku BSZ jak i ZWSBSZ oraz dotyczy wszystkich badanych klas betonu.
- Właściwości mieszanki oraz stwardniałego betonu oznaczone dla wszystkich wybranych klas betonu okazały się zadowalające. Można podsumować, że metoda oparta na modelu UMS daje małą porowatość na skutek dobrego zagęszczenia grubego i drobnego kruszywa i zapewnia korzystne właściwości ekonomicznych mieszank.

6. Conclusions

- The packing density (a complement of porosity) of a granular skeleton determines the amount of cement paste that is required to fill the interstices and surplus of paste, if any contributes to a better workability by reducing the friction between fibers and aggregates.
- Steel fibers dispersed in concrete enhance the porosity of the granular skeleton to a varying degree basing on the ratio of relative size of the aggregate grains to the fiber length.
- The mix design approach based on CPM method ensured least number of trials unlike other methods, where, a number

Tablica 14 / Table 14

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK (Z WŁÓKNAMI)

DETAILS OF FRESH PROPERTIES (WITH STEEL FIBER)

Metoda Test	Właściwości Property	Zakres Range	M20	M25	M30	M35	M40	M45	M50	M55	M60
Rozpływ na stoliku, Slump flow, mm	Filling ability	650-800	650	655	659	678	695	705	742	722	738
T_{50} , H50 flow, s	Filling ability	2-5	4	3	3	4	3	3	4	3	3
Lejek V, V-Funnel, s	Filling ability	6-12	7	6	8	10	11	8	8	9	8
T_5 , s	Segregation	6-15	7	10	12	11	9	10	11	7	12
L-Box L-Box Test	Passing ability	0.8-1.0	0.84	0.87	0.91	0.90	0.92	0.93	0.92	0.92	0.93
J-Pierścień J-Ring Test	Passing ability	0-10	8	9	7	6	5	8	7	10	8

Tablica 15 / Table 15

Właściwości betonów po 28 dniach

Details of hardened properties at 28 days (without and with steel fiber)

Klasa betonu Grade of concrete	Wytrzymałość/Strength, MPa					
	Na ściskanie Compressive strength		Na rozciąganie przez rozłupywanie Split tensile strength		Na zginanie Flexural strength	
	SCC	SFRSCC	SCC	SFRSCC	SCC	SFRSCC
M20	31.27	33.50	2.15	2.34	3.13	3.67
M25	37.82	39.15	2.46	2.54	3.57	3.84
M30	41.56	43.87	3.12	3.75	3.82	4.15
M35	46.52	48.24	3.72	3.84	4.17	4.72
M40	51.27	53.65	4.12	4.36	4.44	4.96
M45	56.32	59.87	4.56	4.81	4.87	5.14
M50	64.12	68.25	5.04	5.29	5.16	5.47
M55	66.89	70.02	5.64	5.98	5.24	5.98
M60	72.56	75.12	6.25	6.54	5.46	6.12

6. Model upakowania materiału ściśliwego zapewnia dokładne oznaczenie wskaźnika upakowania w odróżnieniu od metody Nansu, która opiera się na pewnych założeniach. Tę metodę można także stosować do projektowania mieszanek BSZ z dodatkiem włókien.

Literatura / References

- Hajime Okamura, Masahiro Ouchi, "Self-Compacting Concrete", Journal of Advanced Concrete Technology, 1, 1, 5 (2003).
- P. L. Domone, "Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies", Cem. Concr. Comp., 28, 197 (2006).
- R. Sri Ravindrarajah, F. Farrokhzadi, A. Lahoud, Properties of flowing concrete and self-compacting concrete with high-performance superplasticizers, Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium, p. 17, Reykjavik, Iceland, August 2003.

of trials are required for the satisfaction of fresh and hardened properties. All the grades of concrete considered satisfied the EFNARC specifications.

- A relation between the characteristic strength of concrete and Packing factor is suggested for SCC and SFRSCC for a range of grades of concrete ranging from low, medium to high strength.
- The fresh and hardened properties obtained in case of all the chosen grades of concrete were found to be satisfactory. It can be concluded that CPM method ensures least porosity by effective packing of the coarse and fine aggregates resulting in evolving high performance and economical mixes.
- The Compressible Packing Model (CPM) approach enables the accurate determination of the packing factor unlike in case of Nansu method which is based on certain assumptions. This method can be applied for designing Fibrous SCC mixes also.

4. K. Ozawa, M. Kunishima, K. Maekawa, K. Ozawa, "Development of High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures". Proceedings of the second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), Vol. 1, p. 445, January 1989.
5. Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study H.J.H. Brouwers, H.J. Radix / Cem. Concr. Res. **35**, p. 2116 (2005).
6. M. L. V. Prasad, P. Rathish Kumar, "Fiber Reinforced Self Consolidating Concrete (FRSCC) using coarse aggregate from Building Demolished Waste", Journal of ING-IABSE, Vol. 40, No. 4, Dec 2010-Feb 2011.
7. P. Rathish Kumar, M. L. V. Prasad, "Fresh and Hardened Properties of Glass and Polypropylene Fiber Reinforced Self Compacting Concrete", 2nd National Conference on Current Trends in Technology, Ahmedabad, p. 210, Nov 29th - Dec 1st.
8. M. L. V. Prasad, P. Rathish Kumar, "Strength of Fiber Reinforced Self Compacting Concrete using Recycled Aggregate from Building Demolished Waste", 2nd national conference on material and structures (MAST), Warangal, 14-15 December 2007.
9. M. L. V. Prasad, P. Rathish Kumar, "Strength Studies on Polypropylene Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete", National Conference on "Advances in Construction Materials & Equipments, Jabalpur, January 12, 13th 2008.
10. M. L. V. Prasad, P. Rathish Kumar, "Comparative Study of Glass and Polypropylene Fiber Reinforced Self Compacting Concrete(FRSCC)", National Conference on "Emerging Trends in Civil Engineering for Infrastructure Development(ETC-ID 2008), Raipur, Feb15, 16th 2008.
11. Specifications and guidelines for Self Compacting Concrete, Published by EFNARC in February 2005.
12. Concrete Mixture Proportioning, De Larrard, F. (1999a), London: E&FN Spon.
13. IS:456-2000, Indian Standard Code of Practice for Plain and Reinforced Concrete Structures, Bureau of Indian Standards.
14. IS:516-1956 (Reaffirmed 1999), Indian Standard Method of Tests for Strength of Concrete, Bureau of Indian Standards.
15. Nan Su, Kung-Chung Hsu, His-Wen Chai, "A simple mix design method for self-compacting concrete", Cem. Concr. Res., **6**, p.1799 (2001).
16. IS: 12269, Indian Standard Code, Specifications for 53 Grade Ordinary Portland cement, Bureau of Indian Standards.
17. IS-383-1970, Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete, Bureau of Indian Standards.