

## Metoda racjonalnego projektowania samozagęszczającego się betonu

### A rational mix design procedure for self compacting concrete

#### 1. Wprowadzenie

Beton samozagęszczający się (BSZ) jest betonem, który płynie i zagęszcza się pod wpływem własnego ciężaru. Wypełnia on całkowicie formy nie pozostawiając pustek. Zwykle betony samozagęszczające się mają wytrzymałość na ściskanie w granicach 60-100 MPa. W przypadku innych potrzeb mogą to być także betony niższej klasy. BSZ zostały opracowane na Uniwersytecie w Tokio przy poparciu czołowych producentów betonu w latach osiemdziesiątych, z przeznaczeniem do wytwarzania konstrukcji betonowych o gęstym zbrojeniu w strefach sejsmicznych (N. Bouzoubaa i M. Lachemi 2001). W związku z tym, że trwałość konstrukcji betonowych była ważnym zagadnieniem w Japonii, zmierzano do otrzymania takich konstrukcji o odpowiednim zagęszczeniu. Te wymagania doprowadziły do opracowania BSZ. Prace badawcze nad BSZ zostały po raz pierwszy opublikowane w roku 1989 (H. Okamura i K. Ozawa 1995).

Nan Su i in. (Nan Su, Kung-Chung Hsub i His-Wen Chai 2001) metodę projektowania BSZ oparli na czynnikach, które wpływają na skład mieszanki, a mianowicie: stopień zagęszczenia, stosunek kruszywa drobnego do całkowitej zawartości kruszywa oraz zawartość proszków. Jednak przyjęte w tej metodzie wielkości opierają się na założeniach. W oparciu o badania wytrzymałości i urabialności przeprowadzone ostatnio (S. Venkateswara Rao, 2010) stwierdzono, że wystąpiła znaczna zmiana w składzie mieszanki w zakresie stopnia zagęszczenia, uziarnienia kruszywa, stosunku drobne kruszywa-całe kruszywo, zawartości popiołu lotnego, cementu i wody. Zostało więc potwierdzone, że czynniki, których wielkości założyli w swojej metodzie Nan Su i in. (Nan Su, Kung-Chung Hsub i His-Wen Chai 2001) mają szczególne znaczenie. Równocześnie zostało potwierdzone, że jest potrzeba opracowania racjonalnej metody projektowania BSZ, która nie będzie oparta na założeniach. Niniejsze badania polegają na wykorzystaniu metody Nan Su i in., którą odpowiednio zmieniono w oparciu o wyniki doświadczalne.

#### 1. Introduction

Self Compacting Concrete (SCC) is a concrete, which flows and compacts only under gravity. It fills the mould completely without any defects. Usually self-compacting concretes have compressive strengths in the range of 60 - 100 N/mm<sup>2</sup>. However, lower grades can also be obtained and used depending on the requirement. SCC was originally developed at the University of Tokyo in Japan with the help of leading concrete contractors during 1980's to be mainly used for highly congested reinforced structures in seismic regions (N. Bouzoubaa and M. Lachemi, 2001). As durability of concrete structures was an important issue in Japan, adequate compaction by skilled labors was required to obtain durable concrete structures. This requirement led to the development of SCC. The work on SCC was first reported in 1989 (H. Okamura and K. Ozawa, 1995).

As per Nan Su's (Nan Su, Kung-Chung Hsub and His-Wen Chai, 2001) method of mix design of Self Compacting Concrete, the parameters that influence the mix proportions are packing factor, fine aggregate – total aggregate ratio and powder content. However, these values are based on assumptions in this method. From the strength and workability studies conducted on SCC in the present investigation (S. Venkateswara Rao, 2010), it was noted that there is a significant change in the mix proportions with respect to packing factor, effective size of aggregate, fine aggregate – total aggregate ratio, fly ash content, cement content and water content. It was hence felt that these parameters, which were otherwise assumed in Nan Su method (Nan Su, Kung-Chung Hsub and His-Wen Chai, 2001) based on some assumptions, are of reasonable importance. It was hence felt that there is a need to develop a rational mix design methodology for SCC which is not based on assumptions. In the present investigation, the existing Nan Su method (Nan Su, Kung-Chung Hsub and His-Wen Chai, 2001) has been suitably modified based on some experimental investigations.

## 2. Znaczenie badań

Większość wcześniejszych badaczy opracowywało BSZ przyjmując stosunek GK/DK (grubego kruszywa do drobnego kruszywa), zakładając ograniczoną zawartość grubego kruszywa i większą drobnego. Jest jednak bardzo ograniczona ilość prac uwzględniających wpływ wymiarów grubego kruszywa na właściwości BSZ. Mając to na uwadze, obecne doświadczenia zostały podjęte w celu zbadania wpływu wymiarów grubego kruszywa na klasę BSZ. Zawartość proszków ma największe znaczenie w procesie projektowania BSZ. W niniejszej pracy zastosowano maksymalną zawartość popiołu lotnego w mieszance BSZ, jako wypełniacza. Te doświadczenia mają na celu opracowanie mieszanek BSZ o dobrych wytrzymałościach i trwałości, stosując różne wymiary kruszywa grubego i zawartości popiołu lotnego. Badano trzy klasy betonu (C20, C30, C70).

## 3. Doświadczenia

Doświadczenia obejmowały przygotowanie i badanie próbek betonu, zmierzających do ustalenia maksymalnego wymiaru kruszywa grubego i maksymalnej zawartości popiołu lotnego. Doświadczenia, jak już wspomniano, obejmowały trzy klasy betonu: C20, C30 i C70. Właściwości materiałów stosowanych w badaniach podano w tabelicy 1. W pierwszym etapie znaleziono maksymalne uziarnienie kruszywa dla każdej klasy betonu. Początkowo wykorzystano metodę Nan Su i in. do projektowania składów trzech mieszanek. Uzyskano te składy dla każdej klasy betonu, uwzględniając różne wymiary kruszywa. Otrzymane składy opierały się na właściwościach mechanicznych BSZ i właściwościach świeżych betonów. Po znalezieniu maksymalnego uziarnienia kruszywa dla poszczególnych klas betonu, zbadano wpływ czterech dodatków popiołu lotnego dla betonu C20, sześć różnych dodatków dla C30 i pięć dodatków w przypadku klasy C70. Zbadano właściwości mieszanki i stwardniałego betonu. Maksymalny dodatek popiołu lotnego znaleziono w oparciu o właściwości mieszanki spełniającej wymagania przewodnika EFNARC (EFNARC, 2005), a stwardniałego betonu w oparciu o wytyczne IS456-2000. Stosując odpowiedni dodatek superplastyfikatora (SP) można osiągnąć wymaganą płynność, zdolność do samozagęszczania i eliminację segregacji mieszanki BSZ. W doświadczeniach zastosowano sulfonowany kondensat naftalenowo-formaldehydowy (SP 430 produkcji FOSROC chemicals, Indie). Zawartość SP dobrano na zasadzie prób i błędów, w celu spełnienia wymagań EFNARC. Stosowany dodatek SP zawarty był w granicach 1,5 do 1,8 masy cementu. Wyniki tych doświadczeń omówiono w następujących punktach.

## 4. Dyskusja wyników

### 4.1. Wpływ wymiarów kruszywa na wytrzymałość BSZ

Wymiar kruszywa odgrywa ważną rolę w wytrzymałości na ściskanie betonu (A. M. Neville 2000), a więc jest ważnym czynnikiem w projektowaniu betonu. W metodzie Nan Su i in. projektowania

## 2. Research significance

Most of the earlier researchers have developed SCC taking the CA/FA (coarse to fine aggregate) ratio and also considered the limited content of coarse aggregate and higher content of fines. But, there are very limited investigations reported considering the size effect of coarse aggregate content in the development of SCC. Keeping this in view, the present experimental investigation is taken up to study the effect of size of coarse aggregate in the development of different grades of Self Compacting Concrete. Powder content is the main aspect of SCC mix design. In the present work, fly ash is maximized in the SCC mixes as a filler material. The present investigation is mainly directed towards developing SCC mixes with good strength and durability, using different sizes of coarse aggregate and fly ash content. Three different grades (M20, M30 and M70), were investigated.

## 3. Experimental investigation

The experimental programme consisted of casting and testing specimens for arriving at the maximum size of aggregate and the maximum dosage of fly ash. A total of three grades of concrete are investigated viz. M20, M30 and M70 grades. The properties of materials used in the present investigation are given in Table 1. In the first stage, the effective maximum size of aggregate for each grade of concrete was arrived. Initially Nan Su method of mix design (Nan Su, Kung-Chung Hsub and His-Wen Chai, 2001) was adopted to arrive at the trial mix proportions. The mix proportion for each grade was arrived, taking the different sizes of aggregate into consideration. The effective size of aggregate was arrived for each grade of concrete, based on the mechanical properties and fresh properties of SCC. Once the effective size of aggregate was arrived for a particular grade of concrete, the next step was to maximize the dosage of fly ash. To maximize the fly ash with the effective size of aggregate, four different dosages of fly ash were considered for M20, six dosages were for M30 and five dosages were investigated for M70 grade concrete. The fresh and hardened properties were determined. The maximum dosage of fly ash was arrived based on the fresh properties satisfying EFNARC guidelines (EFNARC, 2005) and hardened properties as per IS 456-2000 (Code of practice for plain and reinforced concrete). Adding an adequate dosage of superplasticizer (SP) can improve the flowability, self compacting ability and segregation resistance of fresh SCC for meeting the design requirements. In the present work, SNF condensate (SP 430, it's a product of FOSROC chemicals (India) Pvt. Limited) was used as a water reducing admixture (superplasticizer). The dosage of SP was obtained based on trial and error to suit the requirements of EFNARC (EFNARC, 2005). The dosage of SP used was ranging from 1.5 to 1.8% by mass of cement. The results obtained in the above investigation are discussed in the following sections.

mieszanki nie wspomina się o wpływie wymiarów kruszywa. W ostatnich badaniach (S. Venkateswara Rao, 2010) ustalono maksymalny wymiar kruszywa dla różnej wytrzymałości betonu: małej, średniej i dużej. Stwierdzono, że ze zmniejszeniem wymiaru kruszywa grubego wzrasta wytrzymałość betonu. Zmiany maksymalnego wymiaru kruszywa w przypadku betonu o różnej wytrzymałości pokazano na rysunku 1. Natomiast w procesie projektowania składu mieszanek BSZ, przy uwzględnieniu praktycznej dostępności kruszywa o różnych wymiarach, ciągłą zmianę uziarnienia zapewniającego odpowiednią wytrzymałość betonu pokazaną na rysunku 1 sprowadzono do zmian skokowych. Ta metoda pozwala uniknąć trudności przy dobieraniu odpowiedniego uziarnienia kruszywa.

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI SKŁADNIKÓW BSZ

MATERIAL PROPERTY OF INGREDIENTS USED FOR SCC

Cement portlandzki klasy 53 Cement – OPC 53 grade		Popiół lotny / Fly ash	
Gęstość / Specific gravity	3.10	Miałkość / Fineness	335 m <sup>2</sup> /kg
Wodożądność / Normal consistency	29.5%	Zawartość SiO <sub>2</sub> / Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )	62.94%
Kruszywo grube / Coarse aggregate		Aktywność pucolanowa / Lime reactivity	9.8 MPa
Gęstość / Specific gravity	2.65	Superplastyfikator Superplasticizer – conplast SP430	
Gęstość nasypowa / Bulk density	1442	Gęstość / Specific gravity	1.22
Miałkość / Fineness modulus	7.16	Zawartość Cl / Chloride content	Brak Nil
Fine aggregate / Kruszywo drobne			
Gęstość / Specific gravity	2.55		
Gęstość nasypowa / Bulk density	1713		
Miałkość / Fineness modulus	2.19		

4.2. Wpływ upakowania na wytrzymałość BSZ

Ważne znaczenie ma dobranie odpowiedniego wskaźnika upakowania (WU) w celu uzyskania wymaganych właściwości BSZ. W metodzie Nan Su i in. założono wielkość tego czynnika w oparciu o pewne próby. Natomiast te próby nie obejmowały niskich klas i dużych klas betonu. W naszych doświadczeniach wielkość WU zmieniano w oparciu o doświadczalnie otrzymane wyniki obejmujące różne klasy betonu. Szczegółowe dane dotyczące wskaźnika upakowania i wytrzymałości różnych klas betonu na ściskanie po 28 dniach twardnienia podano w tablicy 2.

Zależność wskaźnika upakowania i klasy betonu pokazano na rysunku 2 oraz ujęto w formie następującej zależności:

$$\text{Wskaźnik upakowania} = 1,175 - 0,0008 \text{ wytrzymałość betonu } (f_c) \quad [1]$$

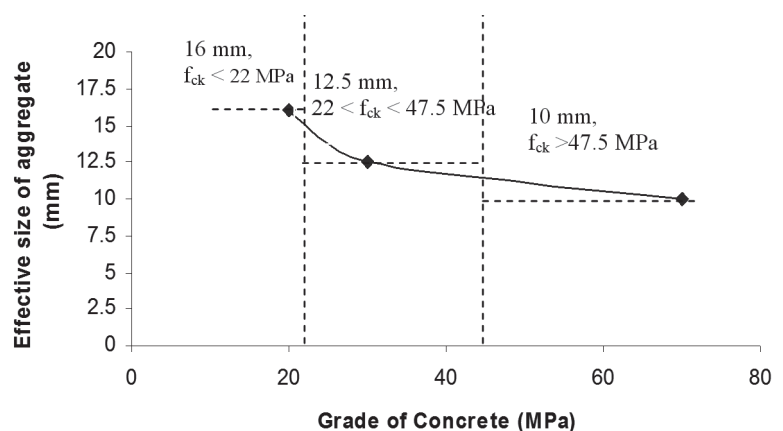
4.3. Wpływ stosunku drobnego kruszywa do całkowitej ilości kruszywa (D/C<sub>k</sub>) na wytrzymałość BSZ

W projektowanej przez Nan Su i in. mieszance utrzymywano stały stosunek drobnego kruszywa do całkowitej ilości kruszywa (D/C<sub>k</sub>) w przypadku wszystkich klas betonu. Na płynność, zdolność wypełniania szalunków i trwałość mieszanki BSZ duży wpływ ma stosunek objętościowy grubego i drobnego kruszywa oraz występuje jego maksymalna wartość, zapewniająca najlepszą urabialność BSZ. Jest więc stosunek drobnego kruszywa do całkowitej ilości kruszywa (D/C<sub>k</sub>) ważnym czynnikiem przy projektowaniu betonu o różnej wytrzymałości. Mając to na względzie wykorzystano wielkość stosunku D/C<sub>k</sub> w przypadku betonu o różnej wytrzymałości, pokazanej na rysunku 3. Doświadczalnie wyznaczony stosunek drobnego kruszywa do całkowitej ilości kruszywa w przypadku betonów trzech klas podano także w tablicy 3.

4. Discussion of test results

4.1. Effect of size of aggregate on the strength of SCC

The size of aggregate plays an important role on the compressive strength of concrete (A. M. Neville, 2000) and hence, on the design of concrete mix. In Nan Su method of mix design (Nan Su, Kung-Chung Hsub and His-Wen Chai, 2001), there is no mention of the influence of the size of aggregate. In the present investigation (S. Venkateswara Rao, 2010), the effective maximum size of aggregate for different strengths of concrete was obtained ranging from low, medium and high strength concrete. It was noted that as the strength of concrete increases, the effective size of coarse aggregate has decreased. The variations in effective size of aggregate for different strengths of concrete are represented in Fig. 1. However, for the purpose of design of SCC mixes and keeping in view of practical availability of different size of aggregates, the continuous variation of aggregate size with strength of concrete shown in Fig. 1 is idealized to a stepped variation. This idealization avoids difficulty in selecting a proper aggregate size.



Rys. 1. Maksymalne wymiary kruszywa dla betonu o różnej klasie

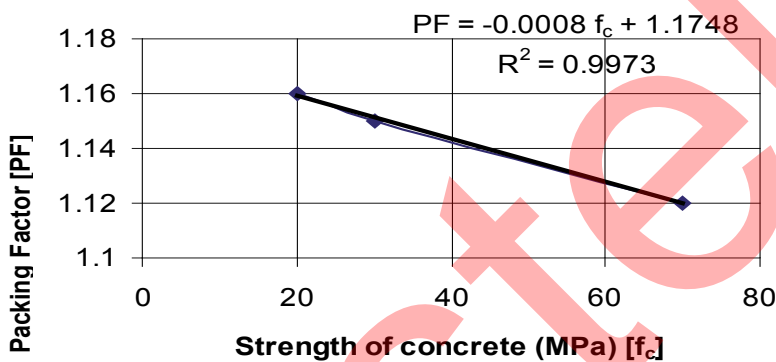
Fig. 1. Effective size of aggregate for different strengths of concrete

Tablica 2 / Table. 2

WSKAŹNIK UPAKOWANIA I WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE BETONU

DETAILS OF PACKING FACTOR AND COMPRESSIVE STRENGTHS

Klasa betonu Grade of concrete	Wymiar kruszywa, Size of aggregate, mm	Wskaźnik upakowania Packing factor	Wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach 28 days compressive strength, MPa
M20	20	1.16	25.40
	16	1.16	28.25
	12.5	1.16	26.88
	10	1.16	24.83
M30	20	1.15	35.85
	16	1.15	38.70
	12.5	1.15	41.20
	10	1.15	37.8
M70	20	1.12	74.00
	16	1.12	75.50
	12.5	1.12	77.10
	10	1.12	79.30



Rys. 2. Wskaźnik upakowania w przypadku betonu o różnej wytrzymałości

Fig. 2 Packing factor for various strengths of concrete

4.4. Wpływ zawartości cementu na wytrzymałość BSZ

W celu uzyskania dobrej płynności i zabezpieczenia przed segregacją zawartość cementu powinna być znaczna. W metodzie projektowania Nan Su i in. zawartość cementu obliczano w oparciu o założenie, że 1kg cementu zapewnia wytrzymałość betonu równą 0,14 MPa. Jest to oparte na wynikach doświadczeń przeprowadzonych na Tajwanie. Zawartość cementu wynikającą z doświadczeń S. Venkateswara Rao podano w tablicy 4. W tej pracy projektowanie oparte jest na wynikach doświadczalnych. Uzyskano krzywą zależności wytrzymałości betonu od zawartości cementu i ujęto tę zależność w formie wzoru.

Zawartość cementu można dla różnej wytrzymałości betonu wyznaczyć wprost z krzywej na rysunku 4. Zależność jest następująca:

$$\text{Zawartość cementu} = 10,238 + 9,535 \text{ wytrzymałość betonu } (f_c) \quad [2]$$

4.2. Effect of Packing Factor on the strength of SCC

It is important to select the optimal Packing Factor (PF) value in the mix design method so as to meet the requirements for SCC properties. In the Nan Su method (Nan Su, Kung-Chung Hsub and His-Wen Chai, 2001), PF is assumed based on some trials. However, these trials were not covering the low grades and higher grades of concrete. In the present case, the PF values are modified based on the experimentally obtained values ranging from low to high grade. The details of Packing Factor and the 28 days compressive strength for all grades of concrete was given in the Table 2.

The relationship between PF vs grade of concrete is shown in Fig. 2 and the equation is as follows.

$$\text{Packing factor (PF)} = 1.175 - 0.0008 \text{ strength of concrete } (f_c) \quad [1]$$

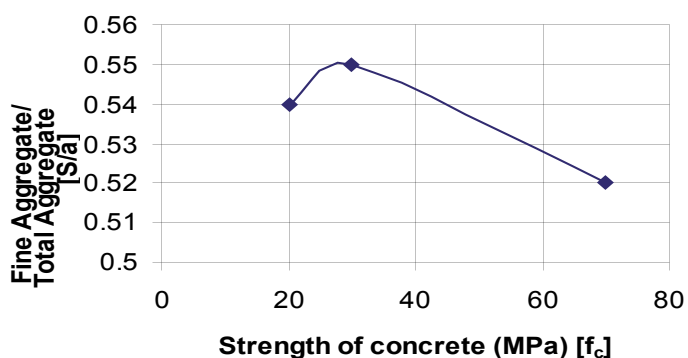
4.3. Effect of fine to total aggregate ratio (S/a) on the strength of SCC

In the Nan Su mix design (Nan Su, Kung-Chung Hsub and His-Wen Chai, 2001) procedure, fine aggregate to total aggregate ratio (S/a) has been taken constant for all grades of concrete.

Tablica 3 / Table 3

STOSUNEK DROBNEGO KRUSZYWA DO CAŁEJ ILOŚCI KRUSZYWA  
FINE AGGREGATE TO TOTAL AGGREGATE RATIO

Klasa betonu Grade of concrete	M20	M30	M70
Stosunek D/C <sub>k</sub>	0.54	0.55	0.52
Fine to total aggregate ratio (S/a)			



Rys. 3. Zależność wytrzymałości betonu od stosunku drobnego kruszywa do całej ilości kruszywa

Fig. 3. Fine aggregate to total aggregate ratio vs strength of concrete

Tablica 5 / Table 5

STOSUNEK WODA/CEMENT W PRZYPADKU TRZECH KLAS BETONU  
WATER/CEMENT RATIO FOR THREE GRADES OF CONCRETE

Klasa betonu Grade of concrete	M20	M30	M70
Stosunek w/c w/c ratio	1.105	0.78	0.38

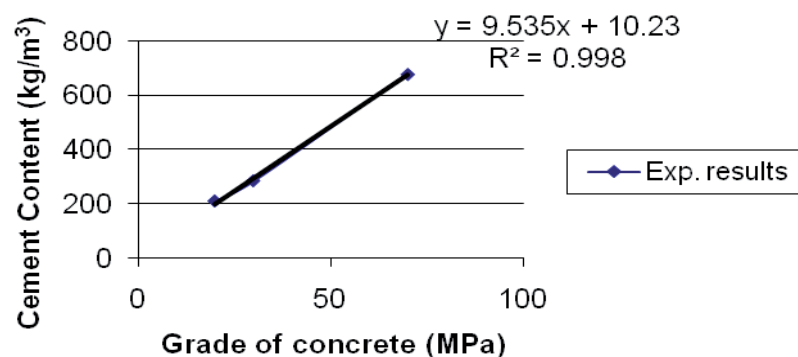
#### 4.5. Wpływ stosunku w/c na wytrzymałość BSZ

Ustalony na podstawie wyników doświadczalnych stosunek w/c w przypadku trzech klas betonu podano w tablicy 5. Zależność tę przedstawiono także na rysunku 6. Jak w przypadku zwykłego betonu zależność ta opiera się na prawie Abramsa (D. A. Abrams, 1918). Zależność tę można ująć w formie wzoru:

$$\text{wytrzymałość betonu (} f_c \text{)} = 22,456 (w/c)^{-1,17} \quad [3]$$

#### 4.6. Wpływ zawartości popiołu lotnego na wytrzymałość BSZ

Potrzebne są duże ilości składników proszkowych w celu zapewnienia samo-zagęszczania się (S. Subramanian, D. Chattopadhyay, 2002). Jednak jeżeli doda się nadmiar cementu, koszt materiałów i skurcz suszenia będzie wzrastał. W celu uniknięcia



Rys. 4. Zawartość cementu w betonach o różnej wytrzymałości

Fig. 4. Cement content for various strengths of concrete

Tablica 4 / Table 4

ZAWARTOŚĆ CEMENTU W PRZYPADKU TRZECH KLAS BETONU  
CEMENT CONTENT FOR THREE GRADES OF CONCRETE

Klasa betonu Grade of concrete	Zawartość cementu (wyniki doświadczalne) Cement content (from exp. results) kg/m³	Zawartość cementu (według Nan Su) Cement content (from Nan Su) kg/m³
M20	210	143
M30	285	216
M70	680	500

The flowability, filling ability and stability of fresh SCC are greatly influenced by ratio of volume between coarse aggregate and fine aggregate and there exists an optimum value to achieve the best workability of SCC. Hence, fine aggregate – total aggregate ratio (S/a) is an important parameter in the design of different strengths of concrete. Keeping this in view, the (S/a) values for different strengths of concrete has been taken from the Fig. 3. The ratio of fine aggregate to total aggregate for three grades of concrete, from the experimental results is shown in Table. 3.

#### 4.4. Effect of cement content on the strength of SCC

To get a good flowability and segregation resistance, the cement content should not be low. In the Nan Su mix design method (Nan Su, Kung-Chung Hsub and His-Wen Chai, 2001), the cement content was calculated based on the assumption that 1 kg of cement gives 0.14 MPa strength of concrete. This is based on experimental results obtained from trials conducted in Taiwan. The cement content obtained based on the experimental results (S. Venkateswara Rao, 2010) in this study is given in the Table 4. In the present study, design is based on the experimental results. A plot between strength of concrete and cement content was drawn and an equation was obtained.

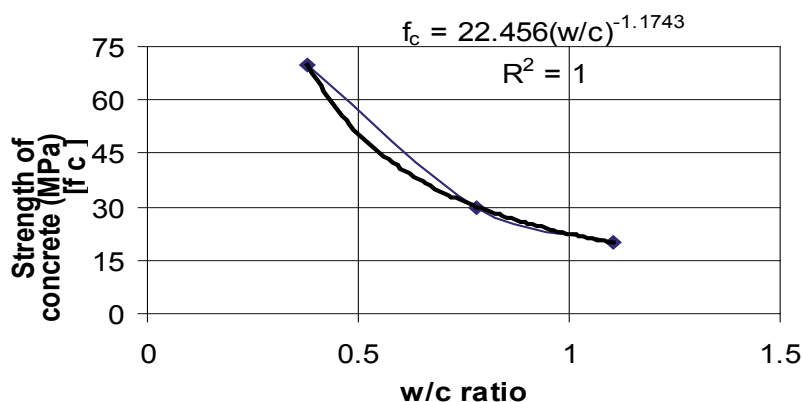
From Fig. 4, the cement content for various strengths of concrete can be directly taken from the graph. The relationship is as given below.

$$\text{Cement content}(c) = 10.238 + 9.535 \text{ strength of concrete (} f_c \text{)} \quad [2]$$

#### 4.5. Effect of w/c ratio on the strength of SCC

From the experimental results, w/c ratio for three grades of concrete is given in the Table 5. The relationship between strength of concrete and water – cement ratio was obtained based on the experimental results and is shown in Fig. 5. As in case of normal concrete, a relationship based on Abram's law (D. A. Abrams, 1918) for strength of concrete and w/c ratio was developed from the experimental results. The relation is

$$\text{Strength of concrete (} f_c \text{)} = 22.456 (w/c)^{-1,17} \quad [3]$$



Rys. 5. Stosunek w/c w przypadku betonów różnej wytrzymałości

Fig. 5. Water/cement ratio for different strengths of concrete

tych efektów stosuje się zwykle popiół lotny klasy F (S. G. Oh, T. Noguchi, F. Tomosawa, 1999) (A. W. Saak, H. M. Jennings, S. P. Shah, 2001). W naszej metodzie projektowania składu mieszanki stosowano tylko popiół lotny jako wypełniacz. Uzyskaną krzywą zależności wytrzymałości betonu i zawartości popiołu lotnego w całej ilości proszku pokazano na rysunku 6. Stwierdzono, że wytrzymałość betonu wzrasta ze spadkiem ilości popiołu lotnego w całej zawartości proszku.

% popiołu lotnego w proszku ( $f_a$ ) =

$$68,43 - 0,535 \text{ wytrzymałość betonu } (f_c) \quad [4]$$

Z tego równania można łatwo znaleźć zawartość popiołu lotnego w całej ilości proszków dla dowolnej wytrzymałości betonu.

## 5. Racjonalna metoda projektowania mieszanki samozagęszczającego się betonu

W oparciu o wyniki doświadczalne uzyskane w badaniach zaproponowano racjonalną i prostą metodę projektowania mieszanki BSZ. Kolejne kroki tej metody podano poniżej.

### Krok 1. Określenie zawartości grubego i drobnego kruszywa

Wyznacz w oparciu o rysunek 1 maksymalną wielkość grubego kruszywa dla wybranej wytrzymałości betonu. Znajdź wskaźnik upakowania dla danej wytrzymałości z rysunku 2. Załóż zawartość powietrza w BSZ w zakresie 1,5-2%. Na podstawie rysunku 3 wyznacz stosunek kruszywa drobnego do całkowitej ilości kruszywa ( $D/C_k$ ).

Zawartość drobnego i grubego kruszywa można obliczyć stosując następujące równania oparte na metodzie Nan Su i in. (3) projektowanie mieszanki:

$$W_G = WU \times W_N(1-D/C_k) \quad [5]$$

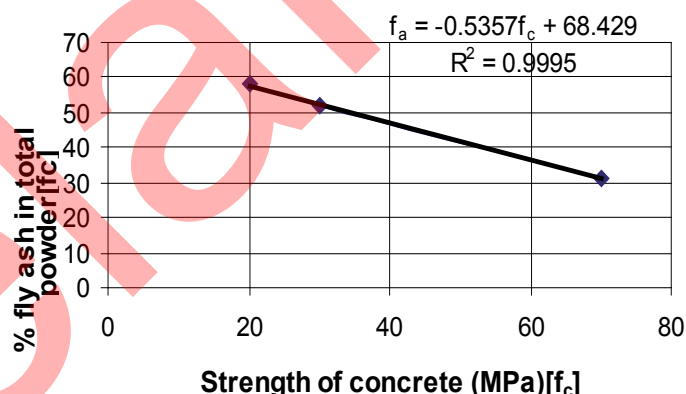
$$W_D = WU \times W_{dm}(D/C_k) \quad [6]$$

$W_G$  = zawartość kruszywa grubego w BSZ,  $\text{kg/m}^3$

$W_D$  = zawartość drobnego kruszywa w BSZ,  $\text{kg/m}^3$

## 4.6. Effect of fly ash content on the strength of SCC

Large amounts of powder materials are required to achieve the self compactability (S. Subramanian and D. Chattopadhyay, 2002). However, if an excess amount of cement is added, the cost of materials and drying shrinkage will increase. To avoid the above two, a pozzolanic material like fly ash, class - F is normally taken into consideration (S. G. Oh, T. Noguchi, F. Tomosawa, 1999) (A. W. Saak, Jennings H.M. and Shah S.P, 2001). In the present mix design procedure fly ash alone was taken as a filler material. A plot between strength of concrete and percentage fly ash in total powder is drawn as shown in Fig. 6. It was noted that as strength of concrete increases, the % fly ash content in total powder has decreased.



Rys. 6. Udział popiołu lotnego (%) w całej zawartości proszku w betonie o różnej wytrzymałości

Fig. 6. Fly ash content in total powder (%) vs strength of concrete

% fly ash in total powder ( $f_a$ ) =

$$68,43 - 0,535 \text{ strength of concrete } (f_c) \quad [4]$$

From the above equation, it is easy to find the percentage of fly ash content in total powder for any strength of concrete.

## 5. Rational mix design of self compacting concrete

From the results obtained in the present experimental investigation, a rational and simple mix design procedure is arrived for design of SCC. The stepwise procedure is given below.

### Step 1. Determination of coarse and fine aggregate content

From Fig. 1, obtain the effective size of coarse aggregate for a particular strength of concrete. Find the Packing Factor for a particular strength of concrete from Fig. 2. Assume the percentage of air in SCC ranging from 1.5 – 2%. From Fig. 3, obtain the fine aggregate to total aggregate ratio ( $S/a$ ).

$W_N$  = gęstość nasypowa luźno usypanego, suchego powierzchniowo grubego kruszywa,  $kg/m^3$

$W_{dm}$  = gęstość nasypowa luźno usypanego, suchego powierzchniowo drobnego kruszywa,  $kg/m^3$

WU = wskaźnik upakowania: stosunek masowy zagęszczonego kruszywa w BSZ do luźno usypanego

$D/C_k$  = stosunek objętościowy drobnego kruszywa do całkowitej objętości kruszywa

### Krok 2. Wyznaczenie zawartości cementu

Na podstawie rysunku 4 znajdź potrzebną ilość cementu dla wybranej wytrzymałości betonu.

### Krok 3. Wyznaczenie ilości wody

Na podstawie rysunku 5 wyznacz stosunek w/c i znajdź potrzebną ilość wody dla wybranej wytrzymałości betonu i znanej ilości cementu, wyznaczonej w Kroku 2.

### Krok 4. Wyznaczenie zawartości popiołu lotnego

Udział popiołu lotnego w całej ilości proszków można znaleźć z rysunku 6 i obliczyć jego zawartość potrzebną dla wybranej wytrzymałości betonu.

### Krok 5. Znalezienie dodatku superplastyfikatora

Dodatek SP można otrzymać metodą prób i błędów w celu uzyskania właściwości mieszanki BSZ określonej w wymaganiach EFNARC.

## 6. Przykład obliczeń w racjonalnej metodzie projektowania BSZ o wytrzymałości 40 MPa

Ten skład mieszanki betonowej miał wszystkie właściwości (płynność,  $T_{50cm}$ , wypływ z lejka i przechodzenie przez zbrojenie) spełniające wymagania BSZ. W tablicach 6 i 7 podano właściwości mieszanki i stwardniałego betonu klasy 40 MPa. Potwierdzono

Tablica 6. / Table 6

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI BSZ KLASY 40 MPa

FRESH PROPERTIES OF 40 MPa GRADE SCC

	Rozplyw Slump flow, mm	$T_{50}$ sec	Lejek V V-funnel sec	$T_5$ minutes	L-skrzynka L-box	J-pierścień J-ring mm
Wynik pomiaru / Test results	800	2	6	14	1	9
Zakres zmian według EFNARC Limits as per EFNARC	650 – 800	2 – 5	6 – 12	6 – 15	0.8 – 1	0 – 10

Tablica 7 / Table 7

WYTRZYMAŁOŚĆ STWARDNIAŁEGO BETONU C40

HARDENED PROPERTIES OF 40 MPa GRADE SCC

Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa	3 dni/days	7 dni/days	28 dni/days
	19.16	28.73	52.50

The content of fine and coarse aggregates can be calculated by using the following equations based on Nan Su method (3) of mix design:

$$W_g = PF \times W_{gl} (1-(S/a)) \quad [5]$$

$$W_s = PF \times W_{sl} (S/a) \quad [6]$$

Where

$W_g$  = Content of coarse aggregates in SCC ( $kg/m^3$ )

$W_s$  = Content of fine aggregates in SCC ( $kg/m^3$ )

$W_{gl}$  = Unit volume mass of loosely piled saturated surface-dry coarse aggregates in air ( $kg/m^3$ )

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

PF = Packing factor, the ratio of mass of aggregates of tightly packed state in SCC to that of loosely packed state in air

S/a = Volume ratio of fine aggregates to total aggregates.

### Step 2. Determination of cement content

Using the Fig. 4, find the required cement content for a particular strength of concrete.

### Step 3. Determination of water

From Fig. 5, obtain the w/c ratio and find the water content required for a particular strength of concrete by knowing the cement content in the step 2.

### Step 4. Determination of fly ash content

Percentage fly ash content in total powder can be obtained from Fig.6 and calculate the fly ash content required for a particular strength of concrete.

### Step 5. Determination of superplasticizer dosage

The dosage of SP was obtained based on trial and error to suit the fresh properties of SCC as per the requirements of EFNARC.

## 6. Model calculations based on rational mix design for 40 MPa SCC

A concrete mix obtained based on the above proportion of materials. The fresh concrete properties obtained ie. slump flow,  $T_{50}$  cm, V-Funnel,  $T_5$  minutes, J-Ring and L-Box are found to satisfy the

Charakterystyczna wytrzymałość			MPa	
Characteristic strength	= 40		N/mm <sup>2</sup>	
Niezbędna średnia wytrzymałość	= 48.25		MPa	
Target mean strength			N/mm <sup>2</sup>	
To jest	= 48		MPa	
Say			N/mm <sup>2</sup>	
Maksymalne wielkość kruszywa			10 mm	Na podstawie rysunku 1
Effective size of aggregate				From Fig. 1
Gęstość				
Specific gravity				
Kruszywo grube	Kruszywo drobne	Cement (Gc)	S.P	Popiół lotny
CA (Gg)	FA (Gs)			Fly Ash (Gf)
2.65	2.55	3.10	1.22	2.19
Gęstość nasypowa				
Bulk density				
Kruszywo grube (W <sub>N</sub> )		Kruszywo drobne (W <sub>dn</sub> )		
CA (Wgl)		FA(Wsl)		
1512	kg/m <sup>3</sup>	1566	kg/m <sup>3</sup>	
Wskaźnik upakowania / Packing factor = 1.17– (0.0008 x 48)				Na podstawie rysunku 2
				From Fig. 2
Powietrze w BSZ = 1.13				
Air in SCC = 1.5 %				
Wyznaczenie zawartości kruszywa grubego (KG)				
Determination of coarse aggregate (CA)				
Stosunek kruszywa drobnego do całej ilości kruszywa				Na podstawie rysunku 3
Fine aggregate to total aggregate ratio = 0.54				From Fig. 3
Ilość KG = WU x W <sub>N</sub> (1-D/C <sub>k</sub> )				
Amount of C A = PF x Wsl (1-(S/a))				
= 794.48 kg/m <sup>3</sup>				
Znalezienie zawartości kruszywa drobnego (KD) / Determination of fine aggregate (FA)				
Ilość KD = WU x W <sub>dn</sub> (D/C <sub>k</sub> )				
Amount of F A = PF x Wsl (S/a)				
= 946.73 kg/m <sup>3</sup>				
Wyznaczenie zawartości cement / Determination of cement				
Cement = 10.24 + (9.53 x 48)				Na podstawie rysunku 4
= 468 kg/m <sup>3</sup>				From Fig. 4
Znalezienie ilości wody / Determination of water				
Stosunek w/c w przypadku 48 MPa wynosi 0,52				Na podstawie rysunku 5
W/C ratio for 48 MPa is 0.52				From Fig. 5
Potrzebna ilość wody				
Water required is = 0.52 x 468				
= 243.36 kg/m <sup>3</sup>				
Obliczenie ilości popiołu lotnego / Determination of fly ash				
Zawartość popiołu w całej ilości proszków, %				Na podstawie rysunku 6
Fly ash content in total powder, % = 68.29 – (0.535 x 48)				From Fig.6
= 43%				
Ilość popiołu lotnego				
Fly ash content = (468 x 0.43) / 0.57				
= 353.05 kg/m <sup>3</sup>				



Obliczenie ilości SP / Determination of S.P dosage (Wsp)

Zawartość porszków

$$\begin{aligned}\text{Content of powder} &= (468.00 + 353.05) \\ &= 821.05 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Wybrano dodatek SP = 1,8% zawartości proszków / Select dosage of SP is 1.8% of powder content

Dodatek SP

$$\begin{aligned}\text{Dosage of S.P (Wsp)} &= (1.8 \times 821.05)/100 \\ &= 14.78 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Stosunek woda/spoiwo

$$\begin{aligned}\text{Water - Binder ratio} &= 243.36/821.05 \\ &= 0.3\end{aligned}$$

Skład mieszanki / Mix proportions

Składnik/Quantity	kg/m <sup>3</sup>	Stosunek do cement / Ratio
Cement	468.00	1
Popiół lotny/Fly ash	353.05	0.754
Kruszywo grube/C.A	794.48	1.698
Kruszywo drobne/F.A	946.72	2.023
Woda/Water	244.71	0.52
S P	14.78	0.031

więc poprawność tej metody projektowania betonu samozagęszczającego się.

## 7. Wnioski

Przeprowadzone doświadczenia pozwoliły na opracowanie racjonalnej metody projektowania BSZ. Metoda ta jest prosta i pozwala na dobranie składu mieszanki BSZ o założonej wytrzymałości. Stosowanie racjonalnej metody projektowania BSZ nie wymaga sprawdzania próbnego wybranego składu, jak to ma miejsce w metodzie Nan Su i in.

## Literatura / References

1. N. Bouzoubaa, M. Lachemi, "Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results", Cem. Concr. Res., **31**, 3, 413-420 (2001).
2. H. Okamura, K. Ozawa, "Mix design for self-compacting concrete". Concrete Library of Japanese Society of Civil Engineers, **25**, 6, 107-120 (1995).
3. Nan Su, Kung-Chung Hsub and His-Wen Chai. "A simple mix design method for self-compacting concrete", Cem. Concr. Res., **31**, 1799 – 1807 (2001).
4. S. Venkateswara Rao "Experimental studies on the effect of size of aggregate and fines on the strength and durability properties of Self Compacting Concrete", PhD thesis of JNTUH, 2010.
5. EFNARC, "Specification and guidelines for self-compacting concrete", European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures, May 2005.
6. IS: 456 – 2000 Code of practice for plain and reinforced concrete (fourth revision).
7. A. M. Neville, "Properties of Concrete", by – Longman, Pearson Education Asia Pte. Ltd, Fourth Edition, First Indian reprint 2000.
8. D. A. Abrams, "Design of concrete mixtures", Bulletin No. 1, Structural Materials Research Laboratory, Chicago: Lewis Institute 1918.

requirement of SCC. Table 6 and 7 shows the fresh and hardened properties of 40 MPa grade SCC. Thus, the methodology proposed is validated for 40 MPa concrete. Similarly, the same procedure can be used to design the mixes for any grade of concrete.

## 7. Conclusion

The experimental investigation conducted has led to the development of rational mix design for SCC. The procedure proposed is simple and various charts developed will guide in arriving the mix proportion of SCC for a particular desired strength. The problem in selection of trial values such as Packing Factor, cement content, fly ash content etc; as required in existing Nan Su method can be eliminated using the rational mix design method proposed for SCC.

## 8. Notations

- $f_c$  – Strength of concrete  
PF – packing factor  
S/a – fine aggregate to total aggregate ratio  
c – cement content  
 $f_a$  – percentage of fly ash in total powder

9. S. Subramanian, D. Chattopadhyay, "Experiments for mix proportioning of self-compacting concrete", *The Indian Concrete Journal*, 13-20 (2002).
10. S. G. Oh, T. Noguchi, F. Tomosawa, "Toward mix design for rheology of self-compacting concrete". In: *The 1st RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete*, 361-372, A. Skarendahl, O. Petersson, editors, RILEM Publications S.A.R.L., France 1999.
11. A. W. Saak, H. M. Jennings, S. P. Shah, "New methodology for designing self-compacting concrete", *ACI Materials Journal*, **98**, 6, 429-439 (2001).

Estelara