

Zmiany wytrzymałości na ściskanie betonu, w którym część cementu zastąpiono dodatkami mineralnymi

Compressive strength performance of high strength concretes using binary supplementary cementitious materials

1. Wstęp

Produkcja cementu zużywa dużo energii, co ma także znaczny wpływ na środowisko. Wiadomo, że produkcji jednej tony cementu towarzyszy uwolnienie jednej tony CO₂, w związku z czym roczna produkcja cementu wiąże się z emisją około 1,6 miliarda ton CO₂, co odpowiada około 7% całej ilości CO₂ (1, 2). To jest przyczyną, że zastępowanie cementu stało się ważnym zadaniem. Uzupełniające wiążące materiały budowlane były stosowane od wielu lat. Największe zastosowanie mają popioły lotne i pył krzemionkowy. Ogólnie określa się je terminem – pucolany. Pucolany są materiałami bogatymi w krzemionkę i tlenek glinu, które łączą się w obecności wody z wapnem tworząc związki identyczne z powstającymi, w wyniku hydratacji cementu. Inną zaletą, która jest rzadko wykorzystywana jest stosowanie tych materiałów jako wypełniaczy.

Cząstki popiołu lotnego mają takie samo lub nawet większe rozdrobnienie jak cement i są okrągłego kształtu, o wymiarach zawartych od 1 do 150 µm. Średni wymiar cząstek pyłów krzemionkowych wynosi 0,1 mikrona (zakres od 0,01 do 0,3 mikrona) co odpowiada 1/50 do 1/100 średniego wymiaru cementu i popiołów lotnych. Wpływ tych dodatków mineralnych jako wypełniaczy jest często ważniejszy od ich właściwości pucolanowych. Ponadto we wpływie pucolanowym, główną rolę odgrywa powierzchnia cząstek, natomiast uziarnienie tych materiałów ma decydujące znaczenie we wzmocnieniu strefy przejściowej, która stanowi najsłabszy obszar w betonie, a więc ma duży wpływ na jego właściwości. Odgrywa to dużą rolę w rozwoju betonu o dużej wytrzymałości.

Zastosowanie uzupełniających materiałów wiążących ma także duże znaczenie z uwagi na ich wpływ na pewne właściwości betonu (3, 4). Na przykład niektóre z tych materiałów opóźniają wiązanie betonu przy dodatku superplastyfikatorów i pewnego stosunku woda-spoivo (5). Niektóre inne oddziaływania, na przykład poprawa urabialności przez popiół lotny, powinny być łączone z mniejszą wczesną wytrzymałością (6, 7). Są to te zagadnienia, które czynią stosowanie dodatków mineralnych do wytwarzania

1. Introduction

Cement production is an energy intensive process which also has significant impact on the environment. It is known that production of one ton of cement is associated with release of one ton of CO₂ thereby the cement production annually contributes to production of about 1.6 billion tons of CO₂ making it approximately 7% of total amount (1, 2). It is this momentous consequence of using cement that has made its replacement such an important task. Supplementary cementitious materials (SCMs) have been used in building construction since many years. Fly ash and silica fume are most commonly used SCMs. The original term used to describe these materials was pozzolana. Pozzolanas are rich in silica and/or alumina and these oxides combine with lime in the presence of water to form compounds that are virtually identical to the compounds in hydrated Portland cement. Another advantage which was not realized until late was the filler effect of these materials.

Fly ash particles are equal or finer than that of the cement and are typically spherical, ranging in diameter from 1 to 150 µm. The average particle size of silica fume is of 0.1 microns (the size ranging from 0.01 to 0.3 microns) and are therefore 1/50th to 1/100th of the average size of cement and fly ash particles. This filler effect of SCMs is occasionally considered more important than the pozzolanic effect it develops. Also since pozzolanic activity takes place on the surface of particles, particle size distribution of these materials play a dominant role in improvement of cement paste – aggregate interfacial transition zone, which is the weakest link and therefore most important in concrete. This particular aspect of its use is very attractive in development of concrete with high strength.

The use of SCMs in development of High Strength Concrete (HSC) is of interest because of certain effects SCMs have on properties of concrete (3, 4). For example, some SCMs are known to retard the setting of HSC with same dosage of superplasticizer and water/binder ratio (5). Certain other effects like improvement of workability with fly ash needs to be dealt with lower early-age strength

betonów o dużych wytrzymałościach, szczególnie interesującym zagadnieniem, wymagają jednak odpowiedniego doboru składu aby wytworzyć oczekiwane właściwości kompozytu.

W prezentowanych badaniach zaprojektowano beton o dużych wytrzymałościach w zakresie 60 MPa w wyniku optymalizacji niektórych czynników, które mają wpływ na wytrzymałość. Badaniami objęto możliwość poprawy wytrzymałości betonu przez dodatek popiołu lotnego i superplastyfikatorów oraz zastępowania cementu pyłem krzemionkowym.

2. Znaczenie popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego w technologii betonu o dużych wytrzymałościach.

Jak wiadomo popiół lotny powstaje w procesie spalania zmielnego węgla i zostaje wytrącony w odpylaczu z gazów odlotowych z kotła. Właściwości popiołów lotnych różnych rodzajów są w miarę stabilne. Ich skład chemiczny jest złożony i zawierają głównie krzemionkę, tlenek glinu i żelaza, MgO oraz CaO. Fazami są kwarc, mullit, magnetyt i niespalony węgiel.

Krzemionka bezpostaciowa reaguje z wodorotlenkiem wapnia powstającym w procesie hydratacji cementu z utworzeniem fazy C-S-H. Jak powszechnie wiadomo, faza ta ma właściwości wiążące i zwiększa wytrzymałość mieszanki betonowej, a równocześnie dodatek popiołu zmniejsza ciepło hydratacji, zastępując część cementu. Zastępowanie cementu, najdroższego składnika betonu, tanim dodatkiem mineralnym, zapewniającym uzyskanie założonych wytrzymałości przynosi znaczny efekt ekonomiczny.

Pył krzemionkowy stanowiący produkt uboczny, przy produkcji metalicznego krzemu lub stopów krzemu z innymi metalami w elektrycznych piecach łukowych. Pył ten zawiera 82 do 85% bezpostaciowego SiO_2 . Średni wymiar cząstki wynosi 0,1 μ , a zakres od 0,01 do 0,3 mikronów.

Dostępność domieszek zmniejszających znacznie stosunek w/c otworzyła nowe możliwości stosowania pyłów krzemionkowych jako składnika spoiwa w betonie, zapewniając bardzo duże wytrzymałości (100 MPa) i trwałość tego kompozytu. Właściwości pucolanowe pyłów krzemionkowych są znacznie lepsze niż innych dodatków mineralnych.

3. Znaczenie doświadczeń

Pierwsze doświadczenia z produkcji BWW nie zawierających dodatków mineralnych wykazały, że beton ten wymaga małego stosunku w/c, mniejszego od 0,3 oraz dużego dodatku cementu, czyniąc go mniej ekonomicznie atrakcyjnym materiałem. Stwierdzono również, że praktyczna zawartość graniczna cementu wynosi około 500 kg/m^3 . Z doświadczeń Powersa (13) wynikało, że całkowita hydratacja cementu wymaga w/c około 0,38, w związku z tym 20-30% cementu w BWW pozostawało niezhidratyzowanych i nie brało udziału w przyroście wytrzymałości.

(6, 7). It is such cases which makes the integration of SCMs and HSC interesting, one which needs optimization to ensure desired performance.

In the current study a high strength concrete was designed to achieve a 28 days compressive strength in the range of 60 MPa by optimizing some of the factors that affect the compressive strength. The possibility of improving the strength of the concrete mix by adding fly ash and superplasticizers is studied. The effect of percentage replacement of cement with fly ash in silica fume concrete is investigated.

2. Role of fly ash and condensed silica fume in the production of HSC

Fly ash is a finely divided residue resulting from the combustion of ground or powdered coal and transported by the fume gases of boilers and collected by precipitators. Large quantity of fly ash is available as a waste by-product. The physical properties of different fly ashes are more or less uniform. Fly ash consists of complex chemical composition along with miscellaneous materials such as quartz, mullite, magnetite, and unburnt carbon. The chemical composition of siliceous fly ash contains mainly SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, and CaO. Silicon dioxide present in glass in fly ash reacts with calcium hydroxide, which is liberated from the cement during the process of hydration to form C-S-H phase. This phase has cementitious properties and is the most valuable component of concrete. In another words it is the pozzolanic activity of fly ash. It increases the strength of concrete mixes simultaneously reducing the heat of cement hydration, replacing a part of it by fly ash. Thus, it reduces also the quantity of cement to be used in concrete for the required strength and hence the saving in the scarce material.

Condensed Silica fume is a by product of the Ferro silicon alloy and silicon metal industries, where the silicon alloys are produced in submerged arc type electric furnaces. Silica fume contains more than 82 to 85% of SiO_2 in amorphous form. The average particle size is of 0.1 microns (the size ranging from 0.01 to 0.3 microns) and are therefore 1/50 th to 1/100th of the average size of cement and fly ash particles. It is also collected as a by-product in the production of other silicon alloys such as Ferro chromium, Ferromanganese, and Ferro magnesium and Calcium silicon.

The availability of high range water reducing admixtures (super plasticizers) has opened up new possibilities for the use of silica fume as part of cementing material in concrete to produce very high strength concrete (100 MPa) or high durability concrete. Unlike natural pozzolans and fly ash, the silica reaction involving silica fume exhibits excellent pozzolanic characteristics.

3. Research significance

In the early stages of development of High Strength Concrete (HSC) with cement without pozzolans as SCM's, it was observed that HSC requires low water to cement ratio (less than 0.3), neces-

Dodatki pucolanowe poza reakcją z wodorotlenkiem wapnia z hydrolizy cementu z utworzeniem C-S-H ulegają znacznie wolniej hydratacji, co zwiększa możliwości pełniejszego przereagowania cementu. W związku z tym dodatek pucolanowy umożliwia zastosowanie większej ilości cementu w betonie i zwiększa jego stopień hydratacji. Z tego względu dodatek popiołów lotnych i pyłów krzemionkowych, zastępujących część cementu, umożliwia atrakcyjniejszą ekonomicznie produkcję betonu.

4. Materiały i metody

Założono program doświadczalny w celu badania wpływu dodatku popiołu lotnego do BWW zawierającego pył krzemionkowy, o różnej wytrzymałości. Program ten obejmował wykonanie próbek z 25 różnych mieszanek cementowych, zmienną był różny dodatek popiołu lotnego zastępujący cement i pył krzemionkowy. Mieszanki podzielono na pięć serii o różnym stopniu zastępowania cementu. Z każdego składu przygotowano po 6 kostek. 3 kostki przeznaczono do badań wytrzymałości po 28 dniach, a następne 3 po 56 dniach.

4.1. Materiały

Stosowano portlandzki typ I zgodny z normą ASTM; jego ciężar właściwy wynosił 3,11. Grube kruszywo stanowił łamany granit. Jego ciężar właściwy wynosił 2,67, a moduł miałości 6,8. Rozkład ziaren był następujący: 12,5-10 mm = 37%; 10-4,75 mm = 58%; 4,75-2,36 mm = 5%.

Stosowano naturalny piasek rzeczny, o ciężarze właściwym 2,55 i module miałości 3,53. Kruszywo grube zmieszano z piaskiem w proporcji 70 i 30. Stosowano wodę wodociągową. Dodatkami mineralnymi były pył krzemionkowy o ciężarze właściwym 1,84 i module miałości 5,04%; aktywność pucolanową w próbie z wapnem wynosiła 2,34 MPa, a wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach 14,35 MPa, natomiast czas wiązania wynosił 40 minut -początek i 143 minuty - koniec. W celu uzyskania wymaganej urabialności stosowano superplastyfikator CONPLAST 430 (ciężar właściwy 1,220-1,225; nie zawiera chloru; nie jest zgodny tylko z cementem glinowym). Należy on do grupy sulfonowanych kondensatów naftalenowych i łatwo tworzy zawiesiny w wodzie. Umożliwia on zmniejszenie zawartości wody, nawet o 25%.

Popiół lotny ma gęstość 2,05; SiO₂ – 63,99%, krzemionka razem z tlenkami glinu i żelaza sięga 92,7%, CaO 1,71%, MgO 1,0%, anhydryt 0,73%, pH = 10, a straty prażenia 2,12%.

Projektowanie składu mieszanki oparto na metodzie ACI: cement: drobne kruszywo: grube kruszywo: 1:1,48:1,83, a stosunek w/c = 0,36. Formy wypełniano w dwóch warstwach, zagęszczając każdą z nich za pomocą wibratora.

Opad stożka utrzymywano na poziomie 75 mm. Zapewniono także brak segregacji mieszanki w trakcie formowania. Dodatek popiołu lotnego powodował wzrost jednorodności mieszanki betonowej. Natomiast ze wzrostem zawartości pyłu krzemionkowego nastę-

pitating the use of reduced water and very high cement content, making it less economically viable. It is also seen that there is a practical limit to its content at around 500 kg/m³. Powers (13) has shown that the least water cement ratio above which Portland cement can fully hydrate was 0.38, implying that about 20% of cement in HSC remained unhydrated and did not contribute to strength development.

The pozzolana particles besides reacting with calcium hydroxide of cement and contributing to the development of strength are hydrating much slower and consume less water, thus permitting higher cement content to be hydrated. Thus, the pozzolana particles make it possible to use increased cement content per unit concrete volume and also improve hydration of cement grains. Therefore, when FA and CSF are used to partly replace cement, not only the water binder ratio can be further reduced, but the maximum cement content itself also may be increased to produce concrete of higher strength at economically attractive costs.

4. Materials and methods

The experimental program was designed to study the effect of addition of fly ash to high strength silica fume concrete irrespective of compressive strength. The program consisted of casting and testing of specimen with 25 different concrete mixes. The variables studied were the percentage replacement of cement with silica fume and fly ash. Each mix was divided into 5 series on the basis of percentage replacement of cement by fly ash. For each batch 6 cubes were cast. Out of the 6 cubes, 3 cubes were used for finding compressive strength of 28 days while the other 3 were used for compressive strength at 56 days.

4.1. Materials used

Ordinary Portland cement conforming to ASTM Type 1 was used in the study. The specific gravity of cement was 3.11.

Machine crushed granite chips were used as coarse aggregate. The specific gravity and the Fineness modulus were 2.67 and 6.8 respectively. The size fraction was such that 37% of the aggregate used was passing through 12.5 mm sieve and retained on 10 mm sieve, 58% of the aggregate was passing through 10 mm sieve and retained on 4.75 mm sieve and the remaining 5% was passing 4.75 mm sieve and retained on 2.36 mm sieve.

River sand of grade-I was used. The specific gravity of the fine aggregate was found to be 2.55 and the fineness modulus was 3.53. The coarse aggregate and fine aggregate were mixed in the proportion of 70:30 to obtain the combined aggregate. Potable water was used for mixing and curing purposes

The mineral admixture used to obtain high strength concrete was indigenously available silica fume with specific gravity 1.84, fineness 5.04%, lime reactivity 2.34 MPa, compressive strength 14.35 MPa (7 days), initial setting time 40 minutes and final setting time 143 minutes.

Tablica 1 / Table 1

WZROST WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE SPOWODOWANY RÓŻNYMI DODATKAMI POPIOŁU LOTNEGO I PYŁU KRZEMIONKOWEGO

PERCENTAGE INCREASE IN COMPRESSIVE STRENGTH FOR DIFFERENT PROPORTIONS OF FLY ASH AND SILICA FUME CONTENTS

% of silica fume	% of fly ash	Compressive strength in MPa		% increase in compressive strength	
		28 days	56 days	28 days	56 days
0	0	57.60	62.74	-	-
	10	58.00	63.96	0.700	1.940
	20	59.50	65.78	3.300	4.840
	30	57.78	61.00	0.300	-2.770
	40	52.56	53.67	-8.75	-14.45
4	0	63.50	68.00	-	-
	10	66.50	69.50	4.700	2.200
	20	67.00	70.00	5.500	2.940
	30	65.00	67.50	2.300	-0.730
	40	57.50	60.11	-9.40	-11.60
8	0	66.00	71.00	-	-
	10	67.50	72.00	2.270	1.410
	20	69.50	74.90	5.300	5.500
	30	68.98	75.00	4.510	5.600
	40	62.50	70.00	-5.30	-1.40
12	0	70.50	72.00	-	-
	10	72.50	73.16	2.840	1.610
	20	74.00	79.11	4.960	9.870
	30	73.00	74.00	3.550	2.770
	40	63.00	67.50	-10.63	-6.25
16	0	70.50	72.00	-	-
	10	72.50	73.00	2.850	1.38
	20	74.00	79.00	5.000	9.72
	30	73.00	74.00	3.540	2.77
	40	63.00	67.50	-10.60	-6.25

powoła konieczność zwiększenia dodatku superplastyfikatora. Jego zawartość zmieniała się w zakresie od 200 do 300 ml gdy dodatek pyłu krzemionkowego wzrastał do 16%. Wszystkie kształtki betonowe zaformowano równocześnie i rozformowano po 24 h, umieszczając je w wodzie, gdzie dojrzewały do 28 lub 56 dnia.

Po zakończeniu dojrzewania oznaczano wytrzymałość na ściskanie za pomocą maszyny wytrzymałościowej, stosując szybkość wzrostu obciążenia wynoszącą 140 MPa na minutę. 150 kostek zgnieciono po 28 dniach i tyle samo po 56 dniach.

5. Wyniki i dyskusja

Wyniki pomiarów wytrzymałości na ściskanie w próbkach popiołu lotnego oraz zawartości pyłu krzemionkowego podano w tablicy 1. Na rysunkach 1-5 pokazano zmiany wytrzymałości na ściskanie w funkcji różnych dodatków popiołu lotnego zastępującego cement w próbkach o różnej zawartości pyłu krzemionkowego. Natomiast rysunki 6-10 podają procentowe zmiany wytrzymałości

In order to achieve the required workability, a super plasticizer CONPLAST 430 (Specific gravity 1.220 - 1.225 at 35°C, zero chloride content, not compatible only with high alumina cement, was used as a water reducing agent. It is a product of sulphonated naphthalene polymers and is available as a brown liquid, instantly dispersible in water. It has been specifically formulated to give a high water reduction up to 25%, without loss of workability.

The fly ash used in the experiments was having a specific gravity was 2.05, silica content of 63.99%, silica+ alumina +iron oxide content of 92.7%, calcium oxide of 1.71% , magnesium oxide of 1.0%, anhydride of 0.73%, water soluble salts of 0.04%, pH value of 10 and a loss on ignition of 2.12%.

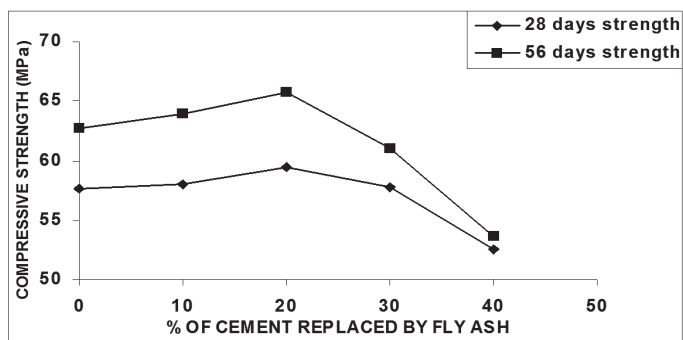
The mix proportion was designed as per ACI method. The quantities of cement, fine aggregate, coarse aggregate and water in kg/m³ was 535, 792.2, 979.62 and 192.6 respectively. The mix was placed in two equal layers. Each layer was compacted using platform vibrator to obtain dense concrete.

A slump of at least 75 mm was maintained throughout the work. It was ensured that there was no segregation of mix constituents while mixing or placing. It was observed that FA added concretes produced a slightly smoother finish in comparison to its counterparts. However,

the requirement of superplasticizer increased with increase of silica fume content.

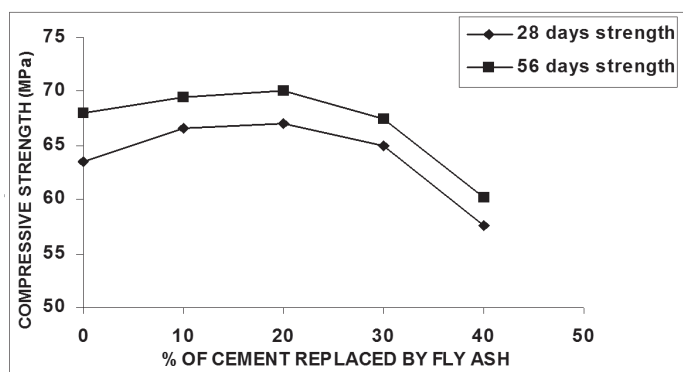
The quantity of superplasticizer added ranged from 200 ml (for 0% Silica fume) to 360 ml (for 16% silica fume) per each mix. The test specimens are simultaneously cast. The mix is placed in two equal layers. Each layer is compacted using platform vibrator. The specimens were removed from the moulds after 24±1/2 hours and were transferred to curing tank. Curing periods were 28 days and 56 days.

At the end of the curing period, the specimen were tested under the compression-testing machine of 3000 KN capacity. The rate of loading was 140 MPa per minute. Of the 150 total cubes half were tested for 28 days compressive strength and remaining half cubes were tested after 56 days.



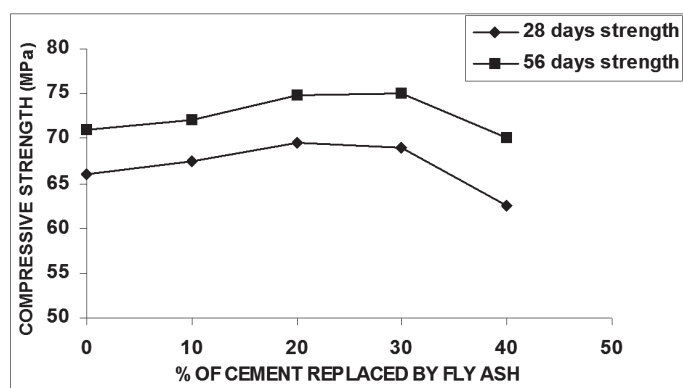
Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie betonu w zależności od ilości cementu zastąpionego popiołem lotnym

Fig. 1. Concrete compressive strength vs% of cement replaced by fly ash



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie betonu w zależności od ilości cementu zastąpionego popiołem lotnym w przypadku 4% zastąpienia pyłem krzemionkowym

Fig. 2. Compressive strength vs% of cement replaced by fly ash with 4% silica fume



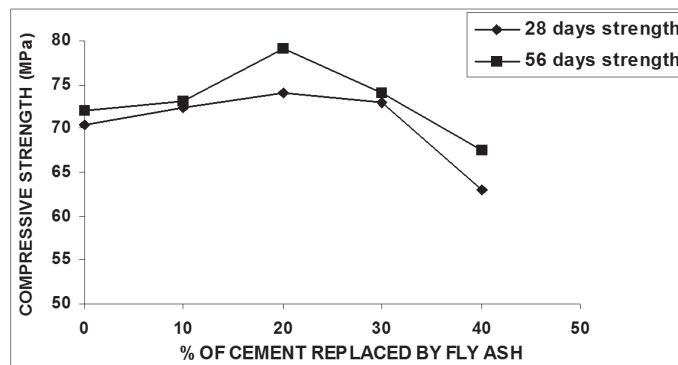
Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie betonu w zależności od ilości cementu zastąpionego popiołem lotnym w przypadku zastąpienia 8% pyłem krzemionkowym

Fig 3. Compressive strength vs% of cement replaced by fly ash with 8% silica fume

na ściskanie próbek w funkcji zmiany dodatku popiołu lotnego przy stałej zawartości pyłu krzemionkowego. Natomiast rysunki 11 i 12 pokazują zmiany wytrzymałości odpowiednio po 28 i 56 dniach próbek o różnych zawartościach popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego. Natomiast rysunek 13 podsumowuje wpływ zmiennej ilości dodatku pyłu krzemionkowego przy 20% zawartości popiołu lotnego zastępującego cement.

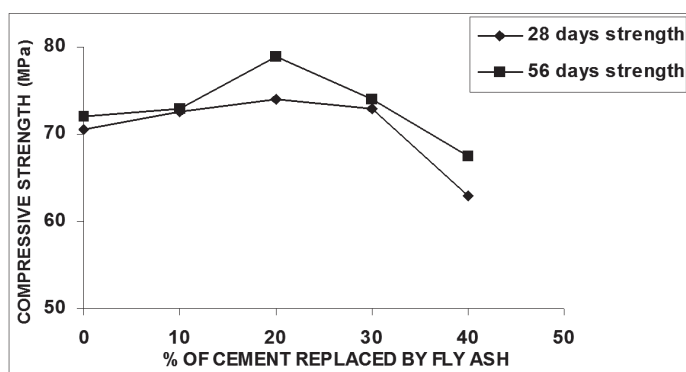
5. Results and discussions

The details of the mean compressive strength and the percentage increase in the compressive strength with different percentage replacements of cement by fly ash and silica fume were given in Table 1. Figs. 1 to 5, shows the variation of the compressive



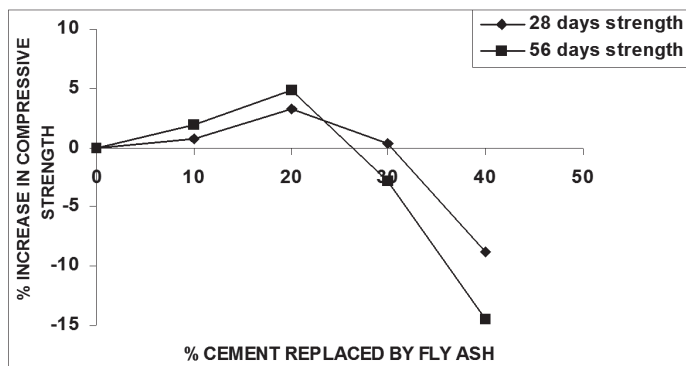
Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie betonu w zależności od ilości cementu zastąpionego popiołem lotnym w przypadku zastąpienia 12% pyłem krzemionkowym

Fig. 4. Concrete compressive strength vs% of cement replaced by fly ash with 12% silica fume



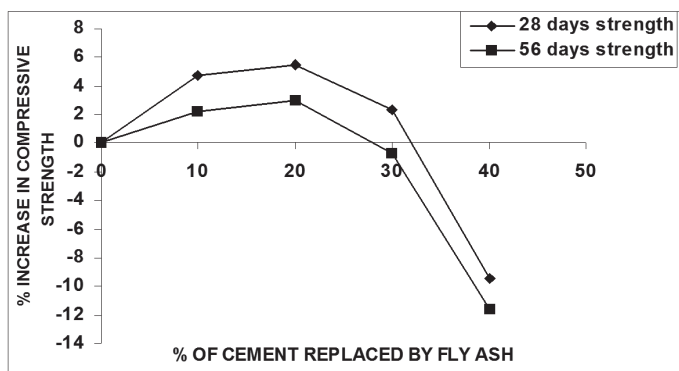
Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie betonu w zależności od ilości cementu zastąpionego popiołem lotnym w przypadku zastąpienia 16% pyłem krzemionkowym

Fig. 5. Concrete compressive strength vs% of cement replaced by fly ash with 16% silica fume



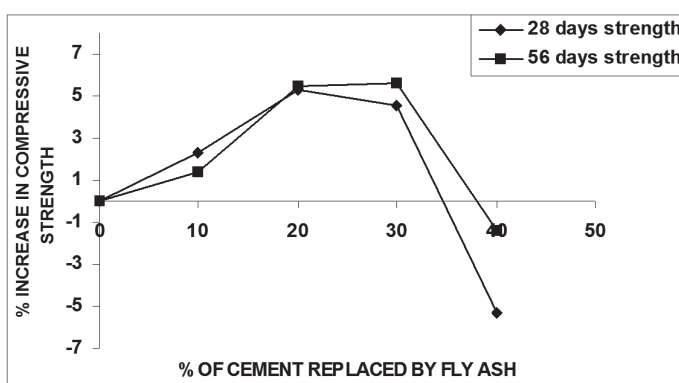
Rys. 6. % wzrostu wytrzymałości na ściskanie betonu w zależności od ilości cement zastąpionego popiołem lotnym

Fig. 6. % increase in concrete compressive strength vs% of cement replaced by fly ash



Rys. 7. % wzrostu wytrzymałości na ściskanie betonu w zależności od ilości cement zastąpionego popiołem lotnym w przypadku zastąpienia 4% pyłem krzemionkowym

Fig. 7. % increase in concrete compressive strength vs% of cement replaced by fly ash with 4% silica fume



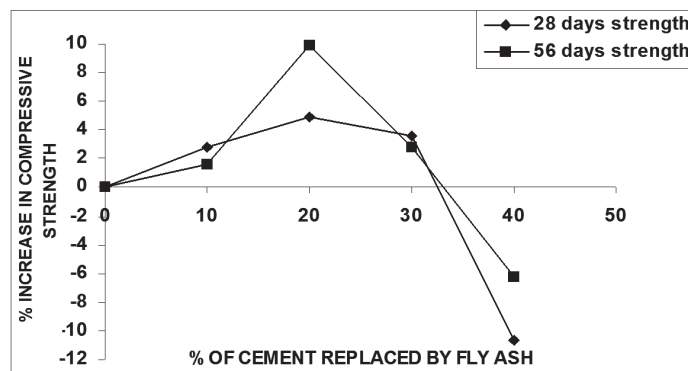
Rys. 8. % wzrostu wytrzymałości na ściskanie betonu w zależności od ilości cement zastąpionego popiołem lotnym w przypadku zastąpienia 8% pyłem krzemionkowym

Fig. 8. % increase in concrete compressive strength vs% of cement replaced by fly ash with 8% silica fume

5.1. Wpływ zmiennej zawartości popiołu lotnego na wytrzymałość na ściskanie

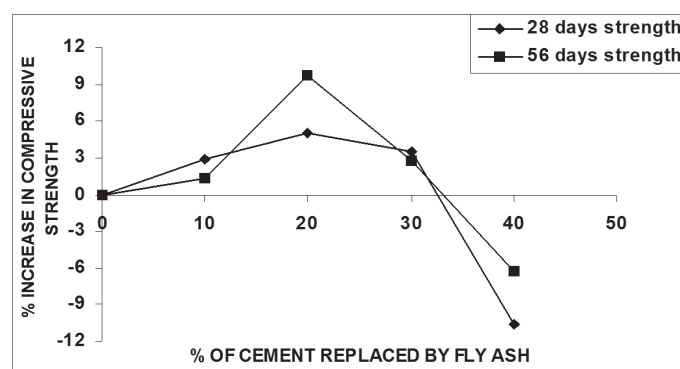
Stwierdzono, że wymagany dodatek superplastyfikatora utrzymującego stałą urabialność wzrasta wraz z zawartością pyłu krzemionkowego. Jak już podano ten wzrost mieścił się w zakresie od 200 do 360 ml, przy rosnącym dodatku pyłu krzemionkowego. Z rysunków 1-5 można wyciągnąć wniosek, że w przypadku 20% zastąpienia cementu popiołem lotnym beton osiąga najlepszą wytrzymałość, niezależnie od dodatku pyłu krzemionkowego. W przypadku mniejszego od 20% dodatku popiołu lotnego wytrzymałość betonu jest gorsza. Wytrzymałość kostek zawierających 20% popiołu lotnego wzrasta z dodatkiem pyłu krzemionkowego aż do 16% w zakresie od 3,3 do 5,5%. Natomiast zastępowanie cementu popiołem lotnym zwiększenie występowało do 20%, niezależnie od zawartości pyłu krzemionkowego.

Drugie ważne spostrzeżenie dotyczy dodatku pyłu krzemionkowego, którego zawartość rosnąca do 12% powoduje wzrost wytrzymałości betonu, a po przekroczeniu tej ilości praktycznie nie ma wpływu. Wpływ tej krzemionki jako mikro-wypełniacza występuje



Rys. 9. % wzrostu wytrzymałości na ściskanie betonu w zależności od ilości cement zastąpionego popiołem lotnym w przypadku zastąpienia 12% pyłem krzemionkowym

Fig. 9. % increase in concrete compressive strength vs% of cement replaced by fly ash with 12% silica fume



Rys. 10. % wzrostu wytrzymałości na ściskanie betonu w zależności od ilości cement zastąpionego popiołem lotnym w przypadku zastąpienia 16% pyłem krzemionkowym

Fig. 10. % increase in concrete compressive strength vs% of cement replaced by fly ash with 16% silica fume

strength with percentage replacement of cement by silica fume and fly ash for 28 days and 56 days. Similarly figures 6 to 10 show the variation of the percentage increase in compressive strength (non dimensional parameter) with the percentage replacement of cement by fly ash at constant silica fume contents. Figures 11 and 12 show the variation of 28 day and 56 day compressive strengths for different replacements of fly ash, for different silica fume contents. A combined graph for different silica fume contents is also shown in Fig. 13.

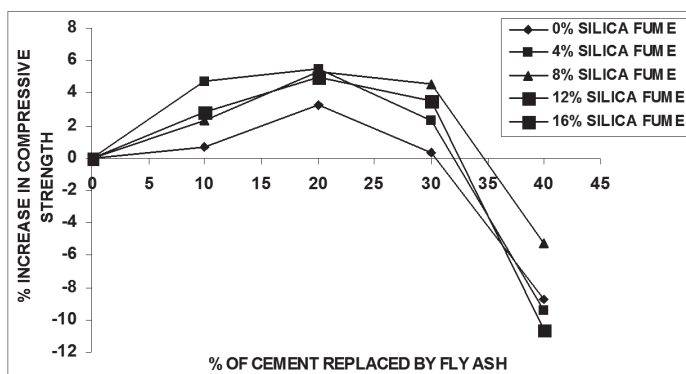
5.1. Effect of variation of fly ash content on compressive strength

It was noted that the requirement of superplasticizer to maintain a constant workability increased with increase in the silica fume content. The quantity of superplasticizer added ranged from 200 ml to 360 ml per each mix when the percentage replacement of cement with silica fume varied from 0 to 16%. From figures 1 to 5, it can be noted that at 20% replacement of cement with fly ash, concrete attains its maximum compressive strength at any percentage of silica fume. When the fly ash addition is beyond 20% the compressive strength is found to be decreasing. At 20% fly ash

niewątpliwie przy każdym jego dodatku, jednak nie wiadomo dlaczego 12% jest punktem nasycenia. Ilość ta nie zależy od zawartości popiołu lotnego, co wydaje się wskazywać, że ten wpływ dotyczy tylko cementu. Z rysunków 11 i 12 wynika, że zastąpienie 20% cementu popiołem lotnym odpowiada także maksymalnej ilości jeżeli chodzi o wytrzymałość, a wyjątek stanowi tylko beton zawierający 8% pyłu krzemionkowego. Po przekroczeniu 20% wytrzymałość ulega zmniejszeniu. Jednak wzrost wytrzymałości występuje do 20% w przypadku próbek betonowych, nawet bez dodatku pyłu krzemionkowego. Podsumowanie zmian wytrzymałości próbek z różną zawartością popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego pokazano na rysunku 13.

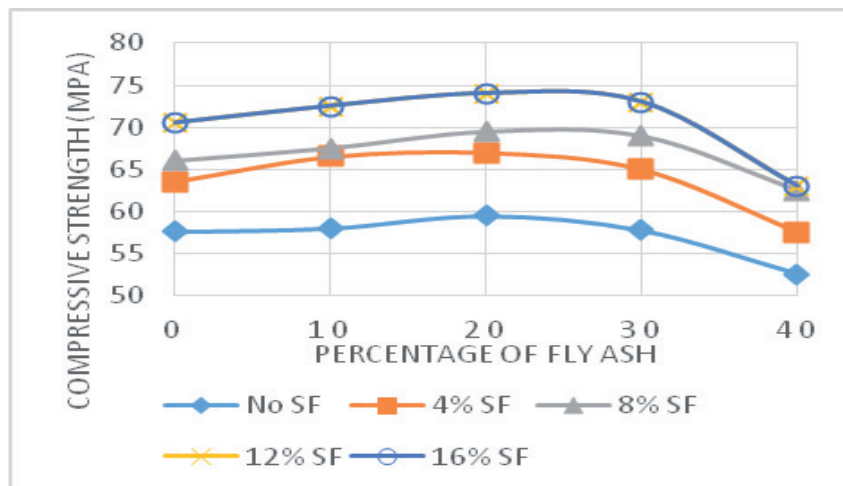
W celu przedstawienia najkorzystniejszej zawartości pyłu krzemionkowego zamieszczono rysunek 14. Można stwierdzić, że najkorzystniejszy wpływ zaznacza się przy zawartości 12-14%. Jednak biorąc pod uwagę zmienność wyników można przyjąć, że dodatek 8-12% będzie najlepszy z uwagi na względy ekonomiczne. Podobne wyniki uzyskali Johari i in. (10). Podczas gdy pył krzemionkowy poprawia wytrzymałość na ściskanie w przedziale 28-90 dni, to dodatek popiołu lotnego zmniejsza początkową wytrzymałość betonu. Zaznacza się to szczególnie wyraźnie przy większym dodatku. Nie wystąpiło to w naszych badaniach przypuszczalnie ze względu na dużą zawartość cementu co wpływało na niewielkie wahania wczesnej wytrzymałości. Z pracy Johari i in. (10) wynika, że korzystny dodatek wynosi około 15% pyłu krzemionkowego i 30% popiołu lotnego. Znaczny wzrost mezoporów w zakresie do 15 mm wystąpił w zaprawach z dodatkiem pyłów krzemionkowych (10).

Dodatek pyłu krzemionkowego polepsza trwałość betonu. Papadakis (11) podaje w pracy wskaźnik poprawy, który wynosi 6 w przy-



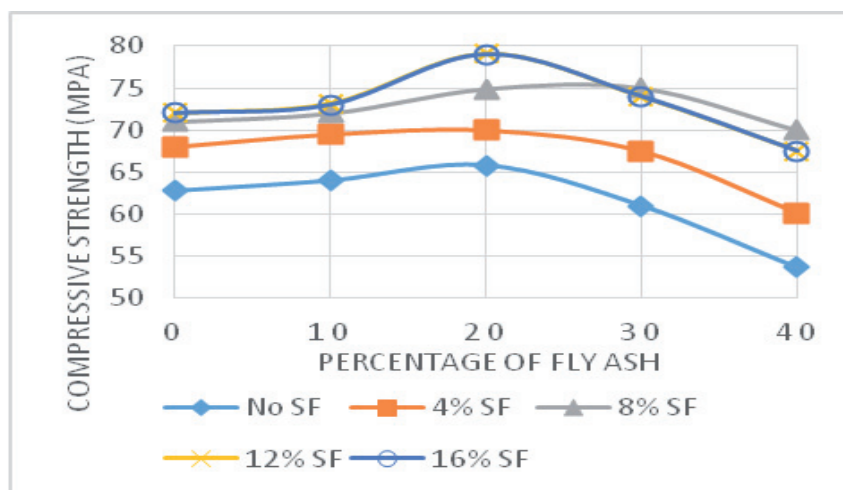
Rys. 13. % wzrostu wytrzymałości betonu na ściskanie w zależności od ilości cementu zastąpionego popiołem lotnym w przypadku różnego dodatku pyłu krzemionkowego również zastępującego cement

Fig. 13. % increase in concrete compressive strength vs% of cement replaced by fly ash for different silica fume contents



Rys. 11. Zbiorcze zestawienie wytrzymałości betonu po 28 dniach

Fig. 11. Summary of compressive strength of concrete after 28 days

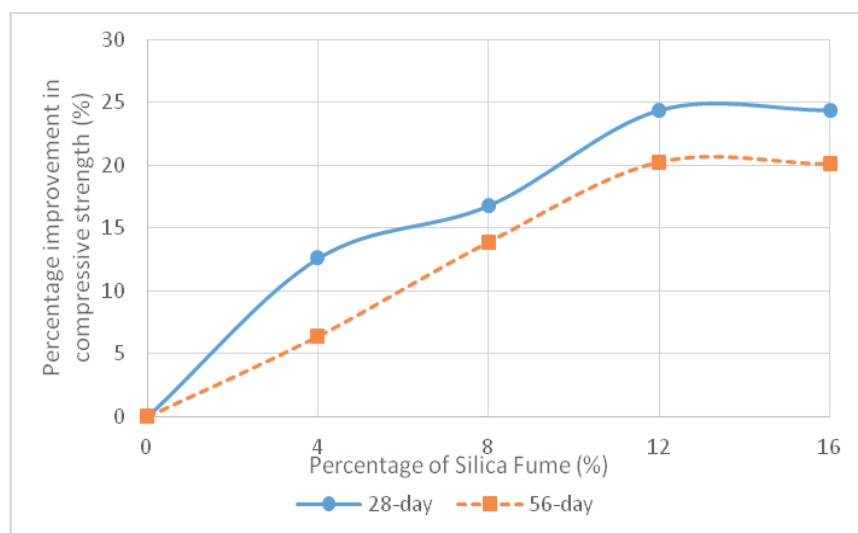


Rys. 12. Zbiorcze zestawienie wytrzymałości betonu po 56 dniach

Fig. 12. Summary of compressive strength of concrete after 56 days

content, as the percentage of silica fume content increases from 0-16%, the percentage increase in compressive strength varied from 3.3 to 5.5. It was noted that the increase of concrete samples compressive strength with FA addition is rising till 20% cement replacement irrespectively of SF content (Figs. 6-10).

Another important observation that can be made is that silica fume addition beyond 12% is not making any significant contribution to strength development. Silica fume's micro filler effect is the reason for its earlier contribution to development of strength but that doesn't explain why 12% is the saturation. And this being independent of fly ash percentage suggests that it acts only on cement content available as expected. From Figs. 11 and 12, it can be noted that at 20% replacement of cement with fly ash, concrete attains its maximum compressive strength except for 8% silica fume. Beyond 20%, the compressive strength is decreasing. Since even in concrete without silica fume there was an increase in strength at 20% replacement with FA. A summary of the percentage replacement increase in the compressive strength for different replacements of flyash for all the replacements of silica fume is shown in Fig. 13.



Rys. 14. Poprawa wytrzymałości betonu w zależności od dodatku pyłu krzemionkowego zastępującego cement w przypadku jego równoczesnego zastąpienia przez 20% popiołu lotnego

Fig. 14. Concrete compressive strength improvement by addition of silica fume of 20% replacement of fly ash

padku betonów z dodatkiem pyłów krzemionkowych. Natomiast popiół lotny krzemionkowy daje 3 a wapienny 2. Pokazuje to, że dodatek pyłu krzemionkowego jest bardzo korzystny także z punktu widzenia trwałości. Dodatek popiołów lotnych i pyłów krzemionkowych ma także duży wpływ na transport jonów chlorkowych oraz cząsteczek gazów w związku z ładunkiem na ścianach porów oraz elektryczną warstwą podwójną na tych ścianach. Wskazuje to na możliwość zwiększenia możliwości korozji wywołanej karbonatyzacją przez dodatek mineralny.

5.2. Analiza wzrostu wytrzymałości

Zmiany w przyroście wytrzymałości z zawartością popiołu lotnego są wyrażone równaniami 1 i 2, odpowiednio po 28 i 56 dniach.

$$y = -0,0103x^2 + 0,3101x + 57,082 \quad (R^2 = 0,9158) \quad [1]$$

$$y = -0,0169x^2 + 0,4661x + 62,264 \quad (R^2 = 0,968) \quad [2]$$

gdzie: y jest wytrzymałością na ściskanie w MPa, a x jest zastąpieniem cementu przez popiół lotny wyrażonym w %.

Udział cementu ($x = 0$) w późnej wytrzymałości jest wyrażony jako 9,07%, natomiast wzrost wytrzymałości w przypadku $x = 10$ wynosi 9,61%. Zakładając liniowy wpływ cementu w tej mieszance, to udział popiołu lotnego we wzroście wytrzymałości wyniesie $[9,07(0,9) + FA(0,1) = 9,61]$ to jest 14,47%. Świadczy to o aktywności pucolanowej popiołu lotnego.

6. Wnioski

Wyniki badań stanowią podstawę do wyciągnięcia następujących wniosków:

- Wytrzymałość na ściskanie betonu wzrasta gdy pył krzemionkowy zastępuje cement. Maksimum wytrzymałości występuje gdy zawartość pyłu wynosi 16%. Natomiast zastępowanie

In order to present the optimum cement replacement by SF, the plot shown in Fig. 14 is made. It can be observed that the highest improvement can be traced back to replacements at 12 – 14%. However, considering the variation in improvement, a replacement in the range of 8 – 12% is ideal, considering the economy of silica fume. Similar trend was observed in Johari et al. (10) work. While SF improved the compressive strength in the ages of 28-90 days, inclusion of fly ash enhanced strength at later ages (at 56 days as compared to 28 days). This was more dominant at higher replacements. This was not more predominant in our observations at lower replacements probably because of the high cement content, making the early age reduction insignificant. The work suggests optimum replacements in the range of 15% SF and 30% FA. A significant increase in the percentage of mesopores in the range of <15 nm was observed in mortars prepared with SF (10).

Addition of silica fume in known to improve the durability performance of concrete also. Papadakis (11) in his work assigns an efficiency factor of 6 against silica fume containing concretes whereas low calcium fly ash is given 3 and high calcium fly ash is given 2. This suggests that replacements of silica fume and fly ash is beneficial and therefore advisable even from durability point of view. The use of silica fume or fly ash has a significantly higher effect on the chloride transport than on a similarly sized neutral gas molecule because of the interactions with the charged pore walls, or by the electrical double layer at the pore walls-pore solution interface. Thereby, it also suggested that SCM used as a replacement for cement displayed reduced carbonation induced corrosion time and thereby increased the risk of such corrosion.

5.2. Analysis of strength development

The strength development variations with respect to the percentage of fly ash are given in Equations 1 and 2 for 28-days and 56-days respectively.

$$y = -0,0103x^2 + 0,3101x + 57,082 \quad (R^2 = 0,9158) \quad [1]$$

$$y = -0,0169x^2 + 0,4661x + 62,264 \quad (R^2 = 0,968) \quad [2]$$

where, y is the compressive strength developed in MPa and x is the percentage of cement replacement by fly ash.

The contribution of cement ($x=0$) to late strength development is observed as 9.07% whereas, the increase in strength observed in case of $x=10$ is 9.61%. Assuming a linear contribution from cement in this mix, the contribution of fly ash to latter strength development can be observed as $(9.07(0.9) + FA(0.1) = 9.61)$ 14.47%. This hints at the pozzolanic activity displayed by fly ash.

cementu popiołem lotnym powoduje wzrost wytrzymałości aż do 20% masowych, po czym wpływ ten maleje.

- Zastąpienie 20% cementu popiołem lotnym i 16% pyłem krzemionkowym to jest zastąpienie w sumie 36% cementu daje maksymalne zwiększenie wytrzymałości.
- Zastąpienie 40% cementu popiołem lotnym i 16% pyłem krzemionkowym, a więc sumaryczne zastąpienie 56% cementu, wytrzymałość na ściskanie odpowiada zwykłemu betonowi, lecz równocześnie łączy się ze znacznymi efektami ekonomicznymi.
- Biorąc pod uwagę czynniki ekonomiczne i zdrowotne w stosowaniu pyłu krzemionkowego proponuje się zastępowanie cementu na poziomie 8-10%.

Wpływ na karbonatyzację wywołującą korozję stali powinna także być brana pod uwagę. W związku z tym, że zastępowanie cementu popiołem lotnym nie wiąże się z tymi wpływami ilość popiołu może być rzędu 20-30%, co nie powinno mieć niekorzystnego wpływu na trwałość.

Literatura / References

1. V. G. Papadakis, S. Tsimas, 'Supplementary cementing materials in concrete - Part I: efficiency and design', *Cem. Concr. Res.*, 32, 1525–1532 (2002).
2. A. Elahi et al., 'Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials', *Constr. Build. Mat.*, 24, 292–299 (2010).
3. M. Mazloom et al., 'Effect of silica fume on mechanical properties of high strength concrete', *Cem. Concr. Comp.*, 26, 347–357 (2004).
4. M. J. Shannag, 'High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume', *Cem. Concr. Comp.*, 22, 399 – 406 (2000).
5. J. J. Brooks, M. A. Megat Johari, M. Mazloom, Effect of admixtures on setting times of high strength concrete. *Cem. Concr. Comp.*, 22, 293–301 (2000).
6. E. P. Mora, J. Paya, J. Monzo, Influence of different sized fraction of a fly ash on workability of mortars, *Cem. Concr. Res.*, 23, 917–24 (1993).
7. P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, T. Sinsiri, Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste, *Cem. Concr. Comp.*, 27, 425–8 (2005).
8. A. Bentur, 'Cementitious Materials—Nine Millennia and A New Century: Past, Present, and Future', *J. Mater. Civ. Eng.*, 14, 2-22 (2002).
9. IS 516 : Indian standard Methods of test for strength of concrete, 1959 (Reaffirmed 2004)
10. M. A. Megat Johari et al., 'Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete', *Constr. Build. Mat.*, 25, 2639–2648 (2011).
11. V.G. Papadakis, 'Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress', *Cem. Concr. Res.*, 30, 291–299 (2000).
12. R. P. Khatri et al., 'Effect of different Supplementary Cementitious Materials on mechanical properties of High Performance Concrete', *Cem. Concr. Res.*, 25, 1, 209-220 (1995).
13. T. C. Powers, 4th JSCC, 2, 577 (1962).

6. Conclusions

The following conclusions could be drawn from the analysis of experimental results.

- Compressive strength of concrete increases when silica fume replaces the cement. At 16% replacement, the concrete attains maximum compressive strength. Whereas the replacement with fly ash tend to increase up to 20% replacement (by mass) and there after it tends to decrease.
- At 20% replacement of cement by fly ash and 16% replacement of cement by silica fume i.e., at a total of 36% of cement replacement, the compressive strength of concrete is maximum.
- At 40% replacement of cement by fly ash and 16% replacement by silica fume i.e., at a total of 56% of cement replacement, the compressive strength is equal to that of the ordinary concrete which results in considerable economy.
- Considering the economic and health effects involved in handling silica fume, an optimum level of 8-10% replacement is suggested. The consequences on carbonation induced steel re-bars corrosion are also to be considered. Since no such effects are associated with fly ash, replacements of the order 20-30% can be made without significant consideration to durability.