

Doświadczalne sprawdzenie pewnych zabezpieczeń projektowych dotyczących trwałości betonu w nawiązaniu do indyjskich zaleceń praktycznych

Experimental revalidation of certain durability design provisions for concrete with reference to the indian code of practice

Part 4. Use in geothermal wells

1. Wprowadzenie

Zapewnienie trwałości konstrukcji betonowych należy do złożonego zagadnienia, w którym projektowanie materiałowe uwzględniające warunki ekspozycji ma podstawowe znaczenie. Napisano na ten temat całe tomy, których skrótowe omówienie można znaleźć w publikacjach (1-4). Zalecenia praktyczne dla betonu i żelbetu zostały również opracowane w różnych krajach, które definiują warunki ekspozycji w stopniach agresywności, z jednej strony i zalecają odpowiednie właściwości betonu, który byłby odporny na te warunki, z drugiej.

Podstawy do klasyfikacji warunków ekspozycji są bardzo różne w różnych zaleceniach. Rodzaj i mechanizm zniszczenia, transport agresywnych jonów w wodnym środowisku, odległość od otoczenia morskiego, mikroklimat w otoczeniu betonu etc. stanowią podstawę definiowania agresywności warunków ekspozycji. Dalej ilość klas i ich podział na podklasy zmienia się w tych zaleceniach (5-11).

W celu uodpornienia betonu na agresywne warunki ekspozycji wprowadza się parametry projektowe w formie minimalnej zawartości cementu maksymalnego wskaźnika wodno-cementowego i minimalnej grubości warstwy ochronnej, aczkolwiek pewność osiągnięcia pożądanego zachowania betonu w agresywnym środowisku jest kwestionowana (12). Klasyfikacje warunków ekspozycji i odpowiadające im parametry projektowania materiałowego podane w indyjskich zaleceniach praktycznych są podane w tablicy 1 (a i b) (8). Zalecenia obejmują potencjalne zastosowanie cementów z dodatkami w betonie lub bezpośrednie wykorzystanie dodatków mineralnych w betonie dla odpowiednich ekspozycji. Korzyści ze stosowania takich materiałów, a szczególnie popiołów lotnych w celu otrzymania trwałego betonu zostały omówione wyczerpująco w pracy (13). W związku z szeroko przyjętą praktyką precyzowania właściwości betonu w formie minimalnej zawartości cementu (spoiwa i maksymalnego wskaźnika wodno-spoiwowego w celu zapewnienia odporności w różnych warunkach ekspozycji i ich opisanej zmienności, o czym wspomniano wcześniej, podjęte

1. Introduction

Achieving durability of concrete structures is a multifaceted phenomenon in which the material design to match the environmental exposure conditions is of prime importance. Volumes have been written on this subject, some glimpses of which can be had in (1-4). Codes of practices for plain and reinforced concrete have also been drawn up in various countries by defining the exposure conditions in terms of their degree of severity on one hand, and prescribing the corresponding concreting parameters to withstand such environments on the other.

The bases of classifying the exposure conditions are quite different in different codes. The nature and mechanism of degradation, transport of aggressive ions in aqueous media, distance from the marine environment, microclimate around the concrete, etc. have formed the bases to define the severity of exposure conditions. Further, the number of classes and sub-classes vary from one code to another (5-11).

In order to combat the severity of the above exposure conditions the concrete mix design parameters have generally been prescribed in terms of minimum cement content, maximum water-cement ratio and minimum cover thickness, although the certainty of achieving the desired performance of concrete in aggressive environments has been questioned in (12). The classification of environmental exposure conditions and the corresponding material design parameters as provided in the Indian Code of practice are reproduced in Table 1 (a&b) (8). The recommendation includes the potential use of blended cements in concrete as well as the direct use of blending materials in concrete for appropriate exposure conditions. The benefits of using such materials, and more specifically of fly ash to produce durable concrete have been extensively dealt with in (13).

Because of the widely adopted practice of specifying the concreting parameters in terms of minimum cement/cementitious materials

zostały doświadczenia w celu zbadania właściwości betonu posiadającego minimalną zawartość cementu i maksymalny wskaźnik wodno-cementowy, jak to przewidziano w normie 456:2000 dla trzech warunków ekspozycji (umiarkowanej, ostrej i ekstremalnej) przy wykorzystaniu cementu portlandzkiego OPC i przemysłowego cementu pucolanowego z dodatkiem popiołu (PPC). Szczegóły doświadczeń i właściwości świeżego i stwardniałego betonu opisano w tym artykule w odniesieniu do ważnych warunków zawartych w zaleceniach praktycznych. Otrzymane wyniki wykorzystano także w celu sprawdzenia czy wyniki otrzymane dla betonu otrzymanego z OPC mogą objąć także beton z PPC.

2. Charakterystyka materiałów

2.1. Cementy

Skład chemiczny próbek OPC i PPC stosowanych w tych badaniach jest podany w tablicy 2. Oba elementy są otrzymane z tego samego klinkieru, a PPC zawiera około 20% popiołu lotnego. Zawartość alkaliów w obu cementach była na podobnym poziomie.

Tablica 1 (a) / Table 1 (a)

WARUNKI EKSPOZYCJI

ENVIRONMENTAL EXPOSURE CONDITIONS

Sl. No.	Środowisko Environmental	Warunki ekspozycji Exposure Conditions
i	Łagodne Mild	Powierzchnia betonu zabezpieczona przed pogodowymi lub korozyjnymi warunkami, z wyjątkiem warunków nadbrzeżnych Concrete surface protected against weather or aggressive conditions, except those situated in coastal area
ii	Umiarkowane Moderate	Powierzchnie betonu osłonięte od silnych deszczów i od mrozu gdy są mokre Concrete surfaces sheltered from severe rain or freezing whilst wet
		Beton wystawiony na skraplanie wilgoci i deszcz Concrete exposed to condensation and rain
		Beton w sposób ciągły pod wodą Concrete continuously under water
		Beton w kontakcie lub częściowo pogrążony w nieagresywnym gruncie lub z wodą gruntową Concrete in contact or buried under non-aggressive soil/ground water
		Powierzchnie betonu osłonięte od powietrza nasyconego solą w obszarach nadbrzeżnych Concrete surfaces sheltered from saturated salt air in coastal area
iii	Agresywne Severe	Powierzchnie betonu wystawione na gwałtowne ulewy, sukcesywnie nawilżane i suszone lub zamrażane w stanie wilgotnym względnie w agresywnym środowisku Concrete surfaces exposed to severe rain, alternate wetting and drying or occasional freezing whilst wet or severe condition
		Beton całkowicie zanurzony w wodzie morskiej Concrete completely immersed in sea water
		Beton wystawiony na warunki nadbrzeżne Concrete exposed to coastal environment
iv	Bardzo agresywne Very severe	Powierzchnie betonu wystawione na strumienie wody morskiej, korozyjne dymy lub na duży mróz w stanie wilgotnym Concrete surfaces exposed to sea water spray, corrosive fumes or severe freezing conditions whilst wet
		Beton w kontakcie lub pogrążony w agresywnych wodach gruntowych Concrete in contact with or buried under aggressive sub-soil/ ground water
v	Ekstremalne Extreme	Powierzchnie elementów w strefie przypliwów Surface of members in tidal zone
		Elementy w bezpośredniej styczności z ciekłymi lub stałymi chemikaliami agresywnymi Members in direct contact with liquid/solid aggressive chemicals

content and maximum water-cementitious material ratio to withstand various exposure conditions and their reported fallibility as mentioned earlier, an experimental investigation was carried out to check the characteristics of concrete made with the minimum cement content and maximum water-cement ratio as provided in IS 456:2000 for three exposure conditions (mild, severe and extreme), using Ordinary Portland Cement (OPC) and factory-produced fly ash-based Portland Pozzolana Cement (PPC). The experimental details and the properties of the fresh and hardened concrete are presented in this paper with reference to relevant provisions in the code of practices. The data generated have also been used to check if the provisions made on the basis of OPC based concrete could be extended to PPC-based concrete as well.

2. Characterisation of materials

2.1. Cements

The chemical compositions of OPC and PPC samples used in this study are given in Table 2. Both the cements are of the same

Tablica 1 (b) / Table 1 (b)

Minimalna zawartość cementu, maksymalny wskaźnik wodno-cementowy minimalna klasa betonu przeznaczona do różnych warunków ekspozycji z kruszywem o wymiarach nie przekraczających 20 mm

Minimum Cement Content, Maximum Water-Cement Ratio and Minimum Grade of Concrete for Different Exposures with Normal Weight Aggregates of 20 mm Nominal Maximum Size

Sl. No.	Środowisko Exposure	Zwykły beton Plain Concrete			Żelbet Reinforced Concrete		
		Minimalna zawartość cementu kg/m ³ Minimum Cement Content kg/m ³	Maksymalny wskaźnik w/c Maximum Free Water-Cement Ratio	Minimalna masa betonu Minimum Grade of Concrete	Minimalna zawartość cementu Minimum Cement Content kg/m ³	Maksymalny wskaźnik w/c Maximum Free Water-Cement Ratio	Minimalna klasa betonu Minimum Grade of Concrete
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
i	Łagodne Mild	220	0.60	--	300	0.55	M 20
ii	Umiarkowane Moderate	240	0.60	M 15	300	0.50	M 25
iii	Agresywne Severe	250	0.50	M 20	320	0.45	M 30
iv	Bardzo agresywne Very severe	260	0.45	M 20	340	0.45	M 35
v	Ekstremalne Extreme	280	0.40	M 25	360	0.40	M 40

UWAGI:

1. Zawartość cementu podana w tej tablicy jest niezależna od klasy cementu i obejmuje dodatki zastępujące cement. Takie dodatki jak popiół lotny lub mielony granulowany żużel wielkopiecowy mogą być uwzględnione w składzie betonu w stosunku do zawartości cementu i wskaźnika wodno-cementowego, gdy ich przydatność jest ustalona i tak długo jak maksymalna ilość wzięta pod uwagę nie przekracza granicznej zawartości pucolony lub żużla odpowiednio podanych w normie 1489 (część I) i 455.

2. Minimalna klasa zwykłego betonu w przypadku łagodnej ekspozycji nie jest podana.

NOTES:

1. Cement content prescribed in this table is irrespective of the grades of cement and it is inclusive of additions of cement replacement materials. The additions such as fly ash or ground granulated blast furnace slag may be taken into account in the concrete composition with respect to the cement content and water-cement ratio if the suitability is established and as long as the maximum amounts taken into account do not exceed the limit of pozzolona and slag specified in IS 1489 (Part I) and IS 455 respectively.

2. Minimum grade for plain concrete under mild exposure condition is not specified.

mie, a wahania zawartości siarczanów pozostawały zgodnie z ich powierzchnią właściwą. Gęstość cementów zmierzono za pomocą piknomietru Quantachrome, a otrzymane wyniki pozostawały na spodziewanym poziomie.

Skład ziarnowy cementu oznaczono za pomocą urządzenia laserowego (CILAS model 520) i otrzymane krzywe pokazano na rysunku 1.

Wytrzymałość na ściskanie cementów oznaczono na kostkach zaprawy 1:3 zgodnie z indyjską normą i zebrano w tablicy 3. Badane zgodnie z normą ASTM spełniały odpowiednio warunki ASTM-150 rodzaj I i ASTM C-595 rodzaj P (14 i 15).

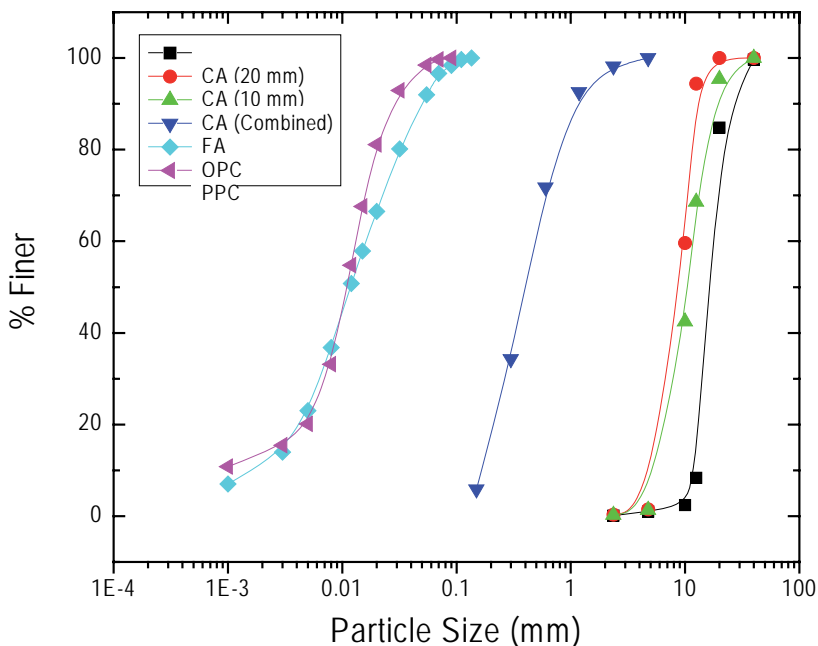
2.2. Kruszywo

Piasek rzeczny stosowany jako kruszywo drobne w tych doświadczeniach wykazywał punkt piaskowy 1,99 i z tego względu należał do III zakresu według normy indyjskiej (16).

clinker stock and the PPC had about 20 per cent fly ash. The alkali contents of both the cements were of the similar range and the variation in the sulphate content was in agreement with their specific surface areas. The density of the cements was measured with the help of an ultra-pycnometer of Quantachrome make and the values were obtained in the expected range.

The particle size distribution of the cements was determined with the help of a Laser Granulometer (CILAS Model 920) and the patterns obtained are shown in Figure 1.

The compressive strengths of both the cements in 1:3 mortar cubes as tested by the Indian Standard procedure are shown in Table 3. When tested as per ASTM standards, the cements complied with ASTM C-150 Type I and ASTM C-595 Type P (14 & 15) respectively.



Rys. 1. Składy ziarnowe materiałów stosowanych w badaniach

Fig. 1. Particle-size distribution patterns of the materials used in the study

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD CHEMICZNY I WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE STOSOWANYCH CEMENTÓW

CHEMICAL COMPOSITION AND PHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE CEMENTS USED

Tlenek/Oxide, %	OPC	PPC
LOI	2.26	1.40
SiO ₂	20.89	31.45
Al ₂ O ₃	5.55	9.57
Fe ₂ O ₃	4.98	3.54
CaO	60.46	46.07
MgO	1.27	1.22
Na ₂ O	0.232	0.331
K ₂ O	0.49	0.50
SO ₃	2.39	2.88
IR	2.88	20.06
Gęstość/Density	3.15	2.95
Powierzchnie właściwa Specific Surface Area, m ² /kg	294	356

W normalnych warunkach taki piasek nie powinien być zalecany do stosowania w produkcji betonu. Jednak w niniejszych doświadczeniach ten piasek używano w celu wyjaśnienia jego wpływu na właściwości betonu. Grube kruszywo stosowane w tych badaniach miało maksymalny wymiar 20 mm. Rozkład ziarnowy drobnego i grubego kruszywa pokazano na rysunku 1. Wolna wilgotność powierzchniowa i zawartość trakcji pylastych w drobnym kruszywie wynosiła odpowiednio 0,55% i 0,57%. Adsorpcja wody na drobnym i grubym kruszywie wynosiła odpowiednio 1,21% i 0,26%. Gęstość drobnego kruszywa, a także mniejszego od 10 mm i 20 mm była odpowiednio 2,21, 2,99 i 2,77.

2.2. Aggregates

The river sand used as fine aggregates in this study exhibited a fineness modulus of 1.99 and, thus, belonged to zone-III as per the Indian Standard Specification (16).

Under normal circumstances such sand is not preferred to be used in concrete making. However, in the present investigation, this sand was used to study its impact on concrete properties. The coarse aggregate used in this study had maximum size of 20 mm. The particle size distribution of fine and coarse aggregates is shown in Fig.1. The free surface moisture and the silt content of the fine aggregates were 0.55 per cent and 0.57 per cent respectively. The water absorption of the fine and coarse aggregates was determined to be 1.21 per cent and 0.26 per cent respectively. The specific gravity values of fine aggregates, 10 mm aggregates and 20 mm aggregates were 2.71, 2.99 and 2.77 respectively.

The details of the concrete mix proportions based on OPC and PPC for the three exposure conditions are given in Table 4.

3. Testing methodology

Cubes of size 150 mm, beams of size 100 x 100 x 500 mm and cylinders of size 100 mm diameter and 300 mm height were cast for three grades of concrete: M20, M30 and M40, designated as C1, C2, and C3 for OPC concretes and F1, F2 and F3 for the PPC concretes respectively. For the sake of uniformity of the concrete, mixing was done in a rotary mixer for 2 minutes. The desired compaction of the concrete was achieved with the help of a table vibrator. These samples were stored in a humidity chamber (at 95 ± 5% relative humidity and 27 ± 2°C). After 24 h of storage, the concrete specimens were demoulded and stored in a submerged condition in an automatic temperature controlled curing tank (temperature of the water maintained at 27±2°C). Six curing periods (1,3,7,28,56 and 90 day) were chosen for this study. At the end of each curing period, samples were tested in an automatic compression testing machine (ACTM, AIMIL India) for their compressive (f_{ck}), flexural (f_{cr}) and split tensile (f_{ct}) strength. Modulus of elasticity of concrete was determined by measuring the compression of the cubes with the help of a linear variable differential transformer (LVDT). All tests were conducted on three identical specimens for a specific grade of the mix and the average of the three results has been reported in this article.

Ultrasonic Pulse velocity test was performed as per ASTM C597 (17). A commercially available USPV tester of 54 KHz frequency was employed for this investigation.

Skład mieszanki betonowej wykonanej z OPC i PPC dla trzech warunków ekspozycji podano w tablicy 4.

Tablica 3 / Table 3

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE CEMENTÓW OZNACZONA NA KOSTKACH ZAPRAWY 1:3

COMPRESSIVE STRENGTH OF THE CEMENTS IN 1:3 MORTAR CUBES

Materiał Material	Wytrzymałość na ściskanie Compressive Strength, MPa			
	1 dzień 1 day	3 dni 3 days	7 dni 7 days	28 dni 28 days
Cement portlandzki Ordinary Portland Cement (OPC)	23.9	37.6	47.4	61.7
Portlandzki cement pucolanowy Portland Pozzolana Cement (PPC)	18.2	28.3	40.1	60.9

3. Metody badań

Sporządzono kostki o wymiarach 150 mm, beleczki o wymiarach 100 x 100 x 500 mm i walce o średnicy 100 mm i wysokości 300 mm dla betonu trzech klas: M20, M30 i M40 oznaczone C1, C2 i C3 dla betonów z OPC i F1, F2 i F3 w przypadku betonów wykonanych z PPC. W celu zapewnienia jednorodności betonu mieszanie prowadzono 2 minuty w mieszarce obrotowej. Natomiast pożądane zagęszczenie zapewniono stosując stół wibracyjny. Próbkę przechowywano w komorze klimatycznej (wilgotność względna $95 \pm 5\%$ w $27 \pm 2^\circ\text{C}$). Po 24 h przechowywania próbki wyjmowano z form i wkładano do wody w zbiorniku o automatycznie kontrolowanej temperaturze (temperatura wody $27 \pm 2^\circ\text{C}$). Wybrano w tych doświadczeniach sześć okresów dojrzewania (1, 3, 7, 28, 56 i 90 dni). Na końcu każdego okresu przechowywania oznaczono wytrzymałości próbek na ściskanie (f_{ck}), rozciąganie przy zginaniu (f_{cr}) i rozciąganie bezpośrednio (f_{ct}) wykorzystując automatyczne urządzenie badawcze (ACTM, A i M i L, Indie). Moduł sprężystości betonu oznaczano na podstawie pomiaru odkształcenia liniowego na kostkach za pomocą różnicowego aparatu do pomiaru zmian liniowych. Wszystkie pomiary przeprowadzono na trzech identycznych próbkach dla danej klasy mieszanki i jako wynik przyjmowano średnią z trzech pomiarów.

Przeprowadzono także pomiar szybkości rozchodzenia się (fali) ultradźwiękowej zgodnie z normą ASTM C 597 (17). Zastosowano dostępne w handlu urządzenie pracujące przy częstotliwości 54 KHz.

4. Wyniki i dyskusja

4.1. Urabialność

Urabialność różnych klas przygotowanych betonów oznaczano za pomocą stożka Abramsa. Jak to podano w tablicy 4 oba be-

Tablica 4 / Table 4

SKŁAD MIESZANKI DLA RÓŻNYCH KLAS BETONU

MIX PROPORTIONS FOR DIFFERENT GRADES OF CONCRETE

Oznaczenie mieszanki Mix designation	Rodzaj cementu Type of cement	Zawartość cementu Cement content, kg/m ³	w/c	Udziały składników mieszanki Mix proportion C:W: FA:CA	Rozplyw Slump, mm	Cel/Target	
						Klasa Grade	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, N/mm ²
C1	OPC	300	0.55	1:0.55:2.06:4.37	NIL	M 20	27.6
C2	OPC	320	0.45	1:0.48:1.98:4.60		M 30	39.9
C3	OPC	360	0.40	1:0.40:1.88:4.59		M 40	50.9
F1	PPC	300 +	0.55	1:0.55:2.06:4.37		M 20	27.6
F2	PPC	320 +	0.45	1:0.48:1.98:4.60		M 30	39.9
F3	PPC	360 +	0.40	1:0.40:1.88:4.59		M 40	50.9

+ z dodatkiem 20% popiołu

+ with 20% fly ash content.

4. Results and discussions

4.1. Workability

Workability of the different grades of concretes prepared was determined with the help of a slump cone. As indicated in Table 4, both the OPC and PPC concretes exhibited zero slump and were very stiff to work with. This could be attributed to inadequate proportion of cementitious materials present in the mix with correspondingly high aggregate-cement ratio (about 6.5 parts). Thus, for the given coarse and fine aggregates the stipulations of the minimum cement contents and maximum w/c ratios did not allow the required slump to be achieved, even when a finer than usual sand was used as the fine aggregate.

4.2. Attaining the target characteristic strengths

The compressive strength results of both OPC and PPC concretes are presented in Table 5. By comparing the 28-days compressive strength values in Table 5 with the corresponding compressive strengths indicated in Table 4, one could observe that all the concrete achieved more than the target compressive strengths and interestingly, the F series exceeded the compressive strengths by wider margin than the C series.

tony wykonane z OPC i PPC wykazywały rozpliw zerowy, były gęste bardzo trudno urabialne.

Mogło to być spowodowane niewłaściwymi udziałami spoiwa w mieszance o stosunkowo dużym stosunku kruszywo-cement (około 6,5 części) z tego względu dla danego grubego i drobnego kruszywa warunek minimalnej zawartości cementu i maksymalnego wskaźnika w/c nie pozwalał na uzyskanie wymaganego rozpliwu, nawet w przypadku zastosowania piasku drobniejszego niż normalnie stosowany jako drobne kruszywo.

4.2. Osiągnięcie zakładanej wytrzymałości

Wyniki oznaczonej wytrzymałości na ściskanie dla obu betonów wykonanych z OPC i PPC pokazano w tabelicy 5. Porównując wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach podaną w tabelicy 5 z odpowiednią wytrzymałością z tabelicy 4 można zauważyć, że wszystkie próbki betonu osiągnęły wyższą od założonej wytrzymałości na ściskanie i co jest interesujące, seria F wykazała większy przyrost wytrzymałości niż seria C.

4.3. Porównawczy przyrost wytrzymałości betonów wykonanych z OPC i PPC

Tendencje w różnicach przyrostu wytrzymałości w seriach betonów C i F pokazano na rysunku 2. Z tendencji wynika, że przy stałej zawartości popiołu lotnego w cemencie, co ma miejsce w tych badaniach, względny przyrost wytrzymałości serii F betonów w stosunku do serii C był bardzo zmienny. Jednak, dla wszystkich trzech klas to jest M 20, M 30 i M 40 wytrzymałość na ściskanie serii F jest taka sama lub większa od serii C w okresie bliskim 7 dniom. Później wzrost wytrzymałości jest szybszy dla serii F, jednak zróżnicowany. Po 28 dniach względny przyrost wytrzymałości betonów klasy M 20 i M 30 wynosił 28-29%, podczas gdy betonu M 40 był mniejszy o prawie 13%. Względny przyrost wytrzymałości po 90 dniach zamykał się w przydziale od 23,6% do 32,7% bez dostrzegalnej korelacji z klasą betonu. Ponieważ w tych badaniach tak składniki, jak i warunki przygotowania i dojrzewania betonu były stałe takie ilościowe zmiany we względnym przyroście wytrzymałości nie mogą być prosto (łatwo) wyjaśnione z wyjątkiem być może w oparciu o wpływ mikrostruktury betonu obejmujący pustki zaformowanych elementów. Stąd modele prognozujące nie mogą opierać się tylko na stałości składników betonu i procesach jego wytwarzania i warunkach dojrzewania.

Tablica 5 / Table 5

WYTRZYMAŁOŚĆ PRÓBEK BETONU RÓŻNYCH KLAS

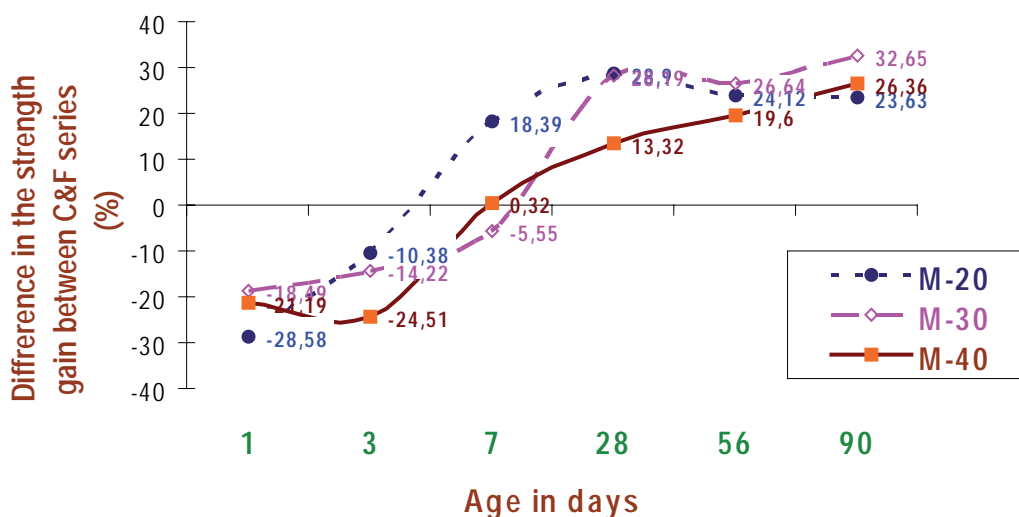
THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF DIFFERENT GRADES OF CONCRETE

Wiek, dni Age, day	C1	F1	% zmiany change	C2	F2	% zmiany change	C3	F3	% zmiany change
Wytrzymałość na ściskanie/Compressive strength (f_{ck})									
1	10.95	7.82	-28.58	14.28	11.64	-18.49	17.51	13.80	-21.19
3	15.42	13.82	-10.38	25.53	21.90	-14.22	31.38	23.69	-24.51
7	20.06	23.75	18.39	36.91	34.86	-5.55	40.60	40.73	0.32
28	31.76	40.94	28.90	42.81	54.88	28.19	51.20	58.02	13.32
56	38.06	47.24	24.12	46.14	58.43	26.64	53.82	64.37	19.60
90	39.44	48.76	23.63	46.25	61.35	32.65	54.13	68.40	26.36
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu/Flexural strength (f_{cr})									
1	1.80	1.60	-12.50	2.70	2.39	-11.48	3.32	2.75	-17.17
3	3.23	2.72	-15.79	3.80	3.36	-11.58	4.27	3.78	-11.48
7	3.61	3.95	9.42	4.85	4.08	-15.88	5.52	5.58	1.09
28	5.29	5.79	9.45	6.19	6.63	7.11	6.42	6.92	7.79
56	5.63	6.27	11.37	6.56	7.53	14.79	7.45	7.88	5.77
90	6.42	6.63	3.27	6.58	7.57	15.05	7.53	8.25	9.56
Wytrzymałość na rozciąganie bezpośrednio/Split tensile strength (f_{ct})									
1	0.88	0.28	-68.18	1.13	0.86	-23.89	1.47	1.09	-25.85
3	1.28	0.98	-23.44	2.15	1.35	-37.21	2.32	1.77	-23.71
7	1.91	1.5	-21.47	2.5	1.79	-28.40	2.64	2.34	-11.36
28	2.5	2.49	-0.40	2.77	3.04	9.75	3.24	3.34	3.09
56	2.57	3.42	33.07	2.96	3.65	23.31	3.54	3.95	11.58
90	2.74	3.54	29.20	3.14	3.75	19.43	3.8	4.12	8.42

4.3. Comparative strength gain characteristics of OPC and PPC concretes

The trend of difference in the strength gain of C and F series of concretes are presented in Fig.2. From the trends it is evident that with constant fly ash content in cement, which is the case in this study, the relative strength gain characteristics of the F series of concrete with respect to C series were quantitatively quite variable. However, for all the three grades, i.e., M20, M30 and M40, the compressive strengths of F series equalized or exceeded that of C series at ages close to 7 days. Thereafter the strength gains were faster for the F series, but with differing rates. At 28 days the relative strength gains for M20 and M30 concrete were around 28-29%, while for the M40 concrete it came down to almost 13% level. At 90 days the relative strength gains were seen in the range of 23.6% to 32.7% without any discernible correlation with the grade of concrete. Since in this study the ingredients and the concreting as well as curing parameters were constant, such quantitative variations in the relative strength gain characteristics could not be readily explained, except, perhaps, due to the effects of concrete microstructure including voids of the cast specimens. Hence, the predictive models cannot be too much reliant on the constancy of concreting materials and processes of concrete making and curing alone.

An attempt was made also to see the strength gain patterns of all the six concretes with respect to their 28-day strength which was assumed to be 100 per cent. The trend curves are given in Fig.3. From the data one may notice that for the PPC-based concretes (F-series) the early-age strength gains were systematically influ-



Rys. 2. Względny przyrost wytrzymałości różnych klas betonów jako % wytrzymałości po 28 dniach

Fig. 2. Differential strength gain patterns of different grades of concrete

Podjęto także próbę pokazania przyrostu wytrzymałości wszystkich sześciu betonów w stosunku do ich wytrzymałości po 28 dniach, którą przyjęto za 100%. Krzywa tendencji zmian pokazano na rysunku 3. Na podstawie tych wyników można stwierdzić, że dla betonów z PPC (seria F). Początkowy przyrost wytrzymałości zasadał się bez wyjątku na wpływie zawartości cementu w próbkach betonu. Innymi słowy wytrzymałość betonów z PPC po 1, 3 i 7 dniach jako procent wytrzymałości po 28 dniach wzrastał ze wzrostem zawartości cementu w próbce betonu. Taka prosta zależność nie występuje w betonach wykonanych z OPC (seria C).

4.4. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu i na rozciąganie bezpośrednie

Obie wytrzymałości na rozciąganie betonu pokazano w tabelicy 5. W przypadku obu serii stwierdzono, że wzrost zawartości cementu i zmniejszenie wskaźnika w/c powoduje zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu o przy rozciąganiu bezpośrednim z upływem czasu. Charakterystyczny względny przyrost wytrzymałości w przypadku serii F w stosunku do serii C był, mniej lub więcej, taki sam jak wytrzymałość na ściskanie omówiona wcześniej. Z oceny wyników podanych w tabelicy 5 jest oczywiste, że obie wytrzymałości na rozciąganie betonu z PPC były zawsze większe po wszystkich okresach pomiarowych dłuższych od 28 dni niż betonów z OPC. W indyjskich zaleceniach praktycznych (8) zalecono stosowanie następującej zależności łączącej wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu z wytrzymałością na ściskanie:

$$f_{cr} = 0.7 \sqrt{f_{ck}} \text{ N/mm}^2 \quad [1]$$

gdzie: f_{cr} wytrzymałość walców na ściskanie

W celu określenia tej zależności z pokazanego zbioru wyników obliczono stosunki $Y (f_{cr} / \sqrt{f_{ck}})$ i pokazano na rysunku 4. Można zauważyć, że dla obu betonów przygotowanych z OPC jak i z PPC, stosunki te w przypadku 28 dni i krótszych okresów leżą w przedziale od 0,9 do 1,0. W tym świetle przyjęcie współczynnika

ened by the cement content in the concrete specimens. In other words the strength values of PPC concretes at 1-day, 3-day and 7-day as percentage of 28-day strength increased with increasing cement content in concrete. Such a clear pattern could not be seen for the OPC-based concretes (C-series).

4.4. Flexural and splitting tensile strengths

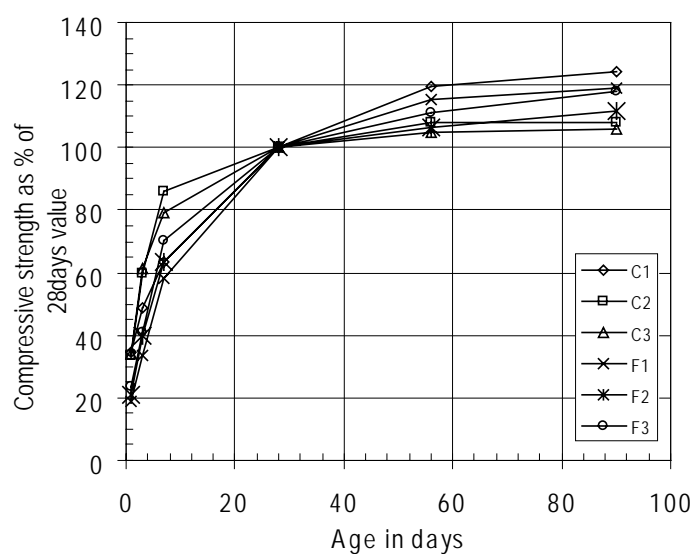
The flexural and splitting tensile strengths of the concretes are presented in Table 5. For both the series it was observed that with increase in cement contents and decrease in w/c ratios, the flexural and splitting tensile

strength increased with age. The relative strength gain characteristics of the F series with respect to C series followed, more or less, the same pattern as for the compressive strength discussed earlier. From the data in Table 5 it is evident that both the flexural and splitting tensile strength values of the PPC concrete were always higher at all ages after 28 days of curing than the OPC concretes.

In the Indian Code of Practice (8), the following relationship has been recommended between the flexural and compressive strength:

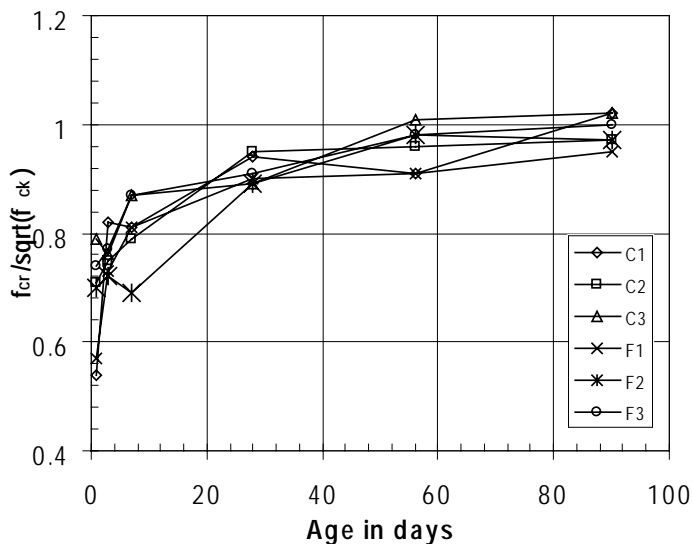
$$f_{cr} = 0.7 \sqrt{f_{ck}} \text{ N/mm}^2 \quad [1]$$

where f_{ck} is the characteristic cube compressive strength of concrete in N/mm^2 . In order to find out this relationship from the present



Rys. 3. Przyrost wytrzymałości na ściskanie różnych betonów w stosunku do wyników po 28 dniach

Fig. 3. Rate of compressive strength gain of different concretes with respect to the 28 day values



Rys. 4. Zależność $(f_{cr}/\sqrt{f_{ck}})$ wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i na ściskanie

Fig. 4. Relationship of flexural and compressive strengths

0,7 w wytycznych praktycznych jest zbyt ostrożne. Trzeba także podkreślić, że nie ma różnic pomiędzy betonami przygotowanymi z OPC i PPC w zakresie tej zależności.

Zależności pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu i na rozciąganie bezpośrednio pokazano na rysunku 5. W przypadku wszystkich próbek z betonu wykonanego z OPC i po wszystkich okresach badawczych od 1 do 90 dni stosunek tych wytrzymałości pozostawał w wąskim przedziale od 0,40 do 0,57 bez jakichkolwiek dostrzegalnych różnic. Jednak w przypadku betonów z PPC jest wyraźny wzrost tego stosunku z wiekiem dla wszystkich trzech klas.

4.5. Statyczny moduł sprężystości

W tabelicy 6 podano wyniki odnoszące się do statycznego modułu sprężystości, E_c – zmierzone i obliczone wartości dla betonów C1, C3, F1 i F3. Na moduł sprężystości wpływają przede wszystkim właściwości sprężyste kruszywa i w mniejszym stopniu warunki dojrzewania i wiek betonu, skład mieszanki oraz rodzaj stosowanego cementu. Zależność modułu sprężystości od wytrzymałości na ściskanie jest ujęta w zaleceniach praktycznych w formie

Tablica 6 Table 6

STATYCZNY MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI (E_c) RÓŻNYCH BETONÓW

STATIC MODULUS OF ELASTICITY (E_c) OF DIFFERENT CONCRETES

Rodzaj i klasa betonu Type and grade concrete	Wiek betonu, dni Age of concrete, days	Obliczony Computed E_c , GPa	Zmierzony Measured E_c , GPa	$E_c/\sqrt{f_{ck}}$
C1	28	28.2	28.9	5123.3
	90	31.4	31.9	5076.7
C3	28	35.8	37.8	5282.1
	90	36.8	40.6	5518.0
F1	28	31.9	33.6	5252.4
	90	34.9	36.6	5237.1
F3	28	38.1	40.2	5273.4
	90	41.4	43.9	5309.8

set of data, the ratios $Y (f_{cr}/\sqrt{f_{ck}})$ were calculated and plotted in Fig.4. One may observe that for both the OPC and PPC concretes the ratios for 28 days and beyond were in the range of 0.9 to 1.0. Thus, the present provision of the co-efficient of 0.7 in the code of practice turns out to be more conservative. It should also be noted that there is hardly any difference between the OPC and PPC concretes in this relationship.

The ratios between the flexural strengths and the splitting tensile strengths are plotted in Fig.5. For all the PPC-based concrete and for all their ages from 1 to 90 days the ratios remained within a narrow range of 0.40 to 0.57 without any discernible pattern. But for the OPC-based concretes there was visible increase in the ratios with age for all the three grades.

4.5. Static modulus of elasticity

Table 6 present the data pertaining to the static modulus of elasticity, E_c – both measured and computed for C1, C3, F1, and F3 concretes. The modulus of elasticity is primarily influenced by the elastic properties of the aggregate and to a lesser extent by the conditions of curing and age of the concrete, the mix proportions and the type of cement used. The relationship of the modulus of elasticity with the compressive strength as given in the code of practice is presented in equation 2.

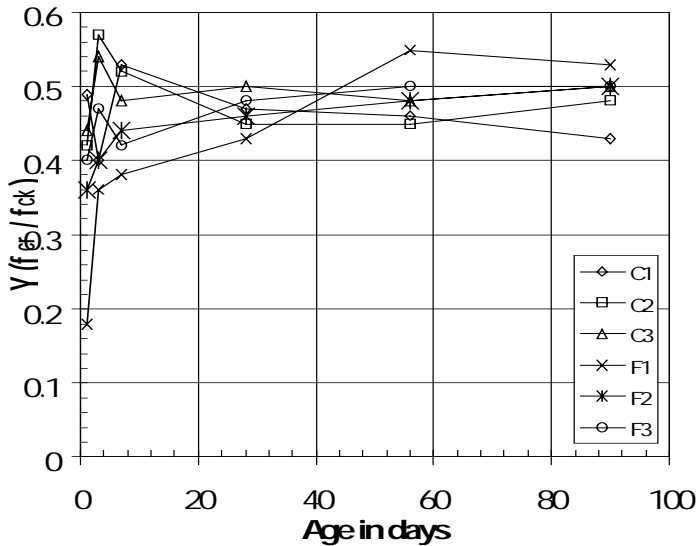
$$E_c = 5000 \sqrt{f_{ck}} \quad [2]$$

It is also stipulated that the actual measured values may differ by ± 20 per cent from the values obtained from the above expression.

From the data in Table 6 one may observe that the elasticity modulus of PPC concretes of both the grades were higher than the corresponding OPC concretes. Further for all the concretes the difference between the computed and measured values was much below 20%. Thus, the coefficient of 5000 in equation 2, is as applicable to OPC concretes as to the PPC specimens.

4.6. Ultrasonic properties

The ultrasonic pulse velocity, USP, was measured in a limited manner for both the OPC and PPC concretes of M20 and M40



Rys. 5. Stosunek wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednio i na rozciąganie przy zginaniu różnych betonów

Fig. 5. Ratio of splitting tensile strengths and flexural strengths of different concretes

$$E_c = 5000 \sqrt{f_{ck}} \quad [2]$$

Podano również, że zmierzone wartości mogą różnić się o $\pm 20\%$ od obliczonych z tego wzoru.

Z danych zamieszczonych w tabelicy 6 wynika, że moduł sprężystości w przypadku betonów z PPC obu klas jest wyższy od modułu odpowiednich betonów z OPC. Dalej, w przypadku wszystkich betonów różnica pomiędzy obliczonymi i zmierzonymi wartościami jest znacznie mniejsza od 20%. W związku z tym, współczynnik 5000 w równaniu 2 może być stosowany zarówno do betonów z OPC jak i wykonanych z PPC.

4.6. Rozchodzenie się fal ultradźwiękowych

Zmierzono szybkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej (SRFU), w ograniczonym zakresie, w betonach z cementów OPC i PPC klas M 20 i M 40 w próbkach przechowywanych 28 i 90 dni (tablica 7). W jednakowych warunkach pomiarowych otrzymane wyniki układają się zgodnie z wytrzymałościami na ściskanie,

Tablica 7 / Table 7

SZYBKOŚĆ ROZCHODZENIA SIĘ FALI ULTRADŹWIĘKOWEJ (SRFU)

USPV VALUES OF DIFFERENT CONCRETES

Rodzaj i klasa betonu Type and grade of concrete	Wiek betonu, dni Age of concrete, days	SRFU, m/s USPV, m/s
C1	28	4250
	90	4760
C3	28	4720
	90	4850
F1	28	4680
	90	5050
F3	28	4980
	90	5160

grades in the samples cured for 28 and 90 days (Table 7). Under identical conditions of measurements the USPV values followed the trends of the compressive strengths as tested and the velocities were always higher for PPC concretes as compared to OPC concretes of the same age. The differences, however, did not show any consistent pattern and they varied from 200 to 350 m/s.

5. Conclusions

The experimental studies on the validity of the existing stipulations of minimum contents of cementitious materials and maximum water-cement ratios in the Indian code of practice for plain and reinforced concrete revealed the following:

1. There could be problems of workability for both OPC and PPC concretes under the conditions of stipulated minimum cement content and maximum w/c ratio. However, this aspect requires further examination.
2. The target characteristic cube compressive strengths were easily achieved for both OPC and PPC concretes. The PPC concretes exceeded the target strengths by wide margins.
3. The compressive strengths of PPC concretes equalized those of OPC concretes at ages close to 7 days. Thereafter the strength gains were faster for the PPC concretes but with varying rates. The differing rates perhaps could be due to the microstructural differences of the concrete specimens studied, including their voids.
4. From the experimental data it was evident that the flexural and splitting tensile strengths of the PPC concretes were always higher than the OPC concretes at all ages after 28 days. It was also observed that for both concretes the ratio $f_{ct}/\sqrt{f_{ck}}$ ranged from 0.9 to 1.0 for all specimens aged 28 days and more. The ratio was higher than what is conservatively specified in the code. The ratio of flexural strength and the splitting tensile strength for all OPC concretes was within a band of 0.40 to 0.57 without any specific pattern. But for PPC concretes there was a relationship with age of curing.
5. The measured and actual static modulus of elasticity for all OPC and PPC concretes were within 10 per cent of each other, although the code provides for 20 per cent variation.
6. The ultrasonic pulse velocity values of all OPC and PPC concretes followed the trend of their compressive strengths and the values for PPC concretes were always marginally higher than those of OPC concretes.

Acknowledgement

The authors are thankful to Mr. S.K. Maheshwari, Group Executive President, and Mr. M.C. Agrawal, Joint Executive President, Grasim Industries Ltd (Cement Business) for their support to carry out the experimental work and also for their permission to publish the findings.

a szybkości były zawsze większe w przypadku betonów z PPC w porównaniu z betonami z OPC tego samego wieku. Różnice te nie wykazały jednak jakiejś tendencji i zmieniały się w przedziale od 200 do 350 m/s.

5. Wnioski

Badania sprawdzające zaleceń zawartych w indyjskich wytycznych praktycznych, dotyczących minimalnej zawartości spoiwa i maksymalnego stosunku w/c dla zwykłego betonu i żelbetu wykazały co następuje:

1. Mogą wystąpić trudności z urabialnością dla obu rodzajów betonów w warunkach zalecanej minimalnej zawartości cementu i maksymalnego stosunku w/c. Jednak, ten wniosek wymaga dalszych badań.
2. Zakładaną, charakterystyczną wytrzymałość na ściszenie walców można łatwo otrzymać tak w przypadku betonów z OPC jak i z PPC. Betony wykonane z PPC przekraczały zakładaną wytrzymałość bardzo znacznie.
3. Wytrzymałość na ściszenie betonów z PPC była analogiczna do wytrzymałości betonów z OPC w wieku bliskim do 7 dni. Po tym okresie przyrost wytrzymałości betonów z PPC był większy, jednak w zmiennym stopniu. Te różne wielkości przyrostu mogły wynikać z różnic w mikrostrukturze badanych kształtek, obejmujących także pustki.
4. Wyniki doświadczeń jasno dowodzą, że wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu i na rozciąganie bezpośrednie betonów z PPC była zawsze większa od betonów wykonanych z OPC, po okresie przekraczającym 28 dni. Stwierdzono także, że w przypadku obu rodzajów betonów stosunek $f_{ct}/\sqrt{f_{ck}}$ zawarty w przedziale od 0,9 do 1,0 dla wszystkich kształtek dojrzewających 28 dni lub dłużej. Ten stosunek był większy zalecanego w wytycznych. Stosunek wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu do wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednie miał wartości w zakresie od 0,40 do 0,57, nie wykazując żadnych tendencji zmian. Jednak, w przypadku betonów z PPC występowała ta tendencja związana z okresem dojrzewania.
5. Zmierzony i obliczony statystyczny moduł sprężystości wszystkich betonów wykonanych z OPC i PPC leżał w przedziale $\pm 10\%$ chociaż zalecenia podają wahania w przedziale $\pm 20\%$.
6. Szybkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej we wszystkich betonach z OPC i PPC wykazywały tendencje zmian zgodne z wytrzymałością na ściszenie, a wartości dla betonów z PPC były zawsze nieznacznie większe niż w przypadku betonów z OPC.

Podziękowanie

Autorzy wyrażają podziękowania dla Pana S. K. Maheshwari, Przewodniczącego Grupy Wykonawczej i dla Pana M. C. Agrawal, Towarzyszącego Przewodniczącego, Grasim Industries Ltd (Przemysł Cementowy) za ich pomoc w przeprowadzeniu badań, a także za pozwolenie na publikowanie ich wyników.

Literatura / References

1. J. R. Mackechine, M. G. Alexander, Exposure of concrete in different marine environments. *Journal of materials in civil engineering, ASCE*, February 1997, Vol.9(1), pp. 41-44.
2. V. Sirivivatnanon, E. Meck, H. T. Cao, Performance based specifications in harmonization of durability standards, 1st *Asia/Pacific Conference on Harmonisation of Durability Standards and Performance Tests for Components in Buildings and Infrastructure*, September 1999. Bangkok, Thailand.
3. S. Collepardi, L. Coppola, R. Troli, M. Collepardi, A critical review of the durability criteria in the new European standard (EN 206) for concrete structures. *Proceedings of the international conference on a vision for the next millennium*, edited by R. N. Swamy, Sheffield, July 1999, pp.1097-1106.
4. V. Sirivivatnanon, E. Meck, H. T. Cao, Build to Last with the Right Materials, *Proceedings CPAC Annual Seminar*, Bangkok, Thailand, September 1995.
5. ACI 318, Building code requirements for reinforced concrete with commentary, *American Concrete Institute*. Detroit, Michigan, USA 1999.
6. AS 3600, Standard Association of Australia, *Australian Standard for Concrete Structures*, Sydney, 1990.
7. BS 8110, Code of practice for design and construction, Structure use of concrete – Part 1. *British Standard*, 1985.
8. IS 456, Code of practice for plain and reinforced concrete, *Bureau of India Standard*. New Delhi, India 2000.
9. Eurocode 2, Design of concrete structures, *The Concrete Centre* Blackwater, Camberley.
10. CEB Design guide, *Durable concrete structures*, Second Edition, Thomas Telford, London, 1989.
11. EN 206, Guide to the selection of concrete quality and cover to reinforcement for normal concrete structures, *British Cement Association*, The Meadows Business Park, Camberley, Surrey GU179AB, 2002.
12. C. J. Lynsdale, J. G. Cabrera, "Parameters influencing the oxygen and chloride permeability of superplasticized normal Portland cement and fly ash-normal Portland cement mortar and concrete", 1994, *Proceedings of 4th CANMET/ACI Int. Conf. On Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, American Concrete Institute, Detroit 275-294.
13. P. K. Mehta, "Role of Pozzolanic and Cementitious Material in Sustainable Development of the Concrete Industry", *Proceedings of the 6th International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slat, and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-178, Bangkok, 1998, pp. 1-25.
14. ASTM C 150, *Standard Specification for Portland Cement*, Annual book of ASTM Standards, Vol.04-01, ASTM, West Conshohocken, PA, 2002.
15. ASTM c 595, *Specification for Blended Hydraulic Cements*, Annual book of ASTM Standards, Vol.04.01, ASTM, West Conshohocken, PA 2002.
16. IS 383, Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete, *Bureau of Indian Standards*, New Delhi, 1970.
17. ASTM C 597-83, "Test for Pulse Velocity Through Concrete," *American Society of Testing and Materials*, Philadelphia USA, 1991.