

Σκυρόδεμα υψηλής αντοχής με μεγάλη περιεκτικότητα τέφρας EIT2 των Ελληνικών προδιαγραφών

Ι. Παπαγιάννη, Ε. Αναστασίου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Λέξεις κλειδιά: σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, ιπτάμενη τέφρα EIT2, εμπορικό σκυρόδεμα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η εργασία αφορά την παραγωγή σκυροδέματος υψηλής αντοχής (>60 MPa) με τη χρησιμοποίηση μεγάλου ποσοστού επεξεργασμένης ασβεστούχου ιπτάμενης τέφρας. Το προτεινόμενο σκυρόδεμα μπορεί να παραχθεί με συμβατικά υλικά στις βιομηχανίες σκυροδέματος και για αυτό το λόγο επιλέγονται αντίστοιχα τα υλικά και οι αναλογίες ανάμιξης. Πιο συγκεκριμένα, στις δοκιμαστικές συνθέσεις χρησιμοποιήθηκαν περιεκτικότητες σε κονία 600 ή 700 kg/m^3 , στις οποίες το 30-50% του τσιμέντο αντικαταστάθηκε με επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας EIT2, σύμφωνα με την Εθνική Προδιαγραφή για την ιπτάμενη τέφρα. Επίσης, επιλέχθηκε χαμηλός λόγος N/K ($0,22 \sim 0,30$) και εργασιμότητα κατηγορίας S2, που επιτεύχθηκε με χρήση κατάλληλου ρευστοποιητή. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι είναι δυνατό να επιτευχθεί εμπορικό σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (>60 MPa) με χρήση ιπτάμενης τέφρας σε ποσοστό έως και 50% του συνόλου της κονιάς.

High strength concrete with high volume of EIT2 fly ash according to the Greek National Standards

I. Papayanni, E. Anastasiou

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki

Keywords: high-strength concrete, EIT2 high calcium fly ash, commercially produced concrete

ABSTRACT: The production of high-strength concrete (>60 MPa) containing high volume of processed high calcium fly ash is discussed in this paper. The proposed concrete can be produced commercially with conventional building materials at ready-mix concrete plants and, thus, materials and mixtures are designed accordingly. The test mixtures were produced using 600 or 700 kg/m^3 binder content, in which 30-50% of the cement was replaced with processed high calcium fly ash type EIT2, according to the Greek National Standard for Fly Ash. Furthermore, a low w/b ratio ($0.22 \sim 0.30$) and S2 workability were selected and achieved using a suitable plasticizer. From the results it seems that high-strength concrete (>60 MPa) can be produced commercially using fly ash up to 50% of the total binder content.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (HSC) θεωρείται σήμερα [1] το σκυρόδεμα με συμβατικά αδρανή χαρακτηριστικής αντοχής f_{ck} από 60 MPa έως 130MPa με λόγο νερού/τσιμέντου κάτω από 0.40. Υψηλότερες αντοχές της τάξεως των 200MPa αναφέρονται επίσης στη βιβλιογραφία [2]. Το ενδιαφέρον για υψηλής αντοχής σκυρόδεμα εμφανίζεται τις τελευταίες δεκαετίες του παρελθόντα αιώνα όπου συνέβη αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας σκυρ/τος με την εισαγωγή στη βιομηχανία του σκυροδέματος των ρευστοποιητών και των τεχνικών μεταφοράς και διάστρωσης. Τα υψηλά κτίρια, οι παρά τη θάλασσα κατασκευές απαιτούν οικονομικές διατομές και υψηλή ανθεκτικότητα με εγγυημένο ωφέλιμο χρόνο ζωής. Έτσι, το 1960, υψηλής αντοχής εθεωρείτο το σκυρόδεμα αντοχής 40-50MPa. Το 1970 το όριο που επιτεύχθηκε ήταν 60MPa. Σήμερα σκυρόδεμα πάνω από 100MPa προδιαγράφεται σε έργα γεφυροποιίας.

Η χρήση HSC επιτρέπει σημαντική μείωση των διαστάσεων των υποστυλωμάτων που αποδίδει μέχρι και 30% επιπλέον διαθέσιμο χώρο στα parking των υψηλών κτιρίων καθώς επίσης και τη μείωση του αριθμού των μεσαίων δοκών στην κατασκευή γεφυρών [3]. Στις παραθαλάσσιες κατασκευές το HSC εξασφαλίζει πάνω από 100 χρόνια ωφέλιμο χρόνο ζωής.

Χαρακτηριστικό είναι ότι για το υψηλής αντοχής σκυρόδεμα δεν απαιτούνται διαφορετικά από τα συμβατικά υλικά παρά μόνο καλύτερος ποιοτικός έλεγχος όλων των υλικών και όλων των σταδίων παραγωγής και εφαρμογής του σκυροδέματος. Τόσο στον Καναδά όσο και στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη τα σκυροδέματα αυτά παράγονται με τη χρήση συμπληρωματικών του τσιμέντου πουζολανικού χαρακτήρα υλικών όπως είναι οι ιπτάμενες τέφρες, οι σκωρίες, η πυριτική παιπάλη ή και συνδυασμοί αυτών [4]. Τη δεκαετία του 80 αναπτύσσεται από το ερευνητικό κέντρο CANMET [5] το υψηλής περιεκτικότητας σε τέφρα σκυρόδεμα με τουλάχιστον 50% αντικατάσταση τσιμέντου με μη ασβεστούχα τέφρα [5].

Οι πρώτοι κανονισμοί για το υψηλής αντοχής σκυρόδεμα θεσμοθετούνται στη Νορβηγία NS 3473-1989. Σήμερα η παραγωγή και ο έλεγχος καλύπτονται από οδηγίες και προδιαγραφές όπως είναι τα CSA Standard A23.3 1994 και οι οδηγίες της ACI Committee ACI 363 2R-98 [1].

Στόχος της πειραματικής αυτής εργασίας ήταν να επιτευχθεί υψηλής αντοχής εμπορικό σκυρόδεμα που να μπορεί να παραχθεί με συμβατικά υλικά στις βιομηχανίες σκυροδέματος με την προσθήκη υψηλού ποσοστού επεξεργασμένης ασβεστούχας τέφρας της ευρύτερης περιοχής της Πτολεμαΐδας. Επιλέχθηκε ένα επιθυμητό επίπεδο εργασιμότητας S2 (7-9cm) για όλες τις συνθέσεις που θα μπορούσε να εφαρμοσθεί σε βιομηχανία προκατασκευασμένων στοιχείων ή προϊόντων όπως είναι οι σωλήνες από σκυρόδεμα.

Στο πρώτο στάδιο της έρευνας μελετήθηκαν τα μηχανικά και ελαστικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος αυτού υψηλής αντοχής 150MPa με υψηλό ποσοστό τέφρας.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Σκυροδετήθηκαν 6 διαφορετικές συνθέσεις με συνολικό ποσό συνδετικών κονιών 600-700kg/m³. Για κάθε σύνθεση κατασκευάστηκαν 10 κύλινδροι 15x30cm, πέντε κύβοι

15x15x15cm και 5 πρισματικά δοκίμια 10x10x40cm προκειμένου να γίνει προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής σε διάφορες ηλικίες, εφελκυστικής αντοχής από διάρρηξη και κάμψη καθώς και προσδιορισμός του στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν η επιρροή του συνολικού ποσού κονιάς, το ποσοστό της τέφρας και ο λόγος νερού/τσιμέντο για το επιθυμητό επίπεδο εργασιμότητας.

Πίνακας 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών

Αδρανή Αθροιστικό διερχόμενο (%)	Μέγεθος κόκκων (mm)					
	0,25	1,0	2,0	4,0	8,0	16
Άμμος ποταμού	8,61	62,82	84,60	97,77	100	100
Ρύζι	2,25	2,50	3,00	25,75	100	100
Γαρμπίλι	1,61	1,81	2,47	3,46	32,08	100
Μίγμα						
40% άμμος	3,444	25,128	33,84	39,108	40,00	40,00
20% Ρύζι	0,450	0,500	0,600	5,150	20,00	20,00
40% Γαρμπίλι	0,660	0,724	0,988	1,384	12,832	40,00
Προκύπτουσα καμπύλη	4,55	26,352	35,42	45,642	72,83	100,00
Επιδωκόμενη καμπύλη	7,00	20,00	30,00	45,00	70,00	100,00

Χρησιμοποιήθηκαν αδρανή εγχώρια με κοκκομετρική διαβάθμιση που φαίνεται στον Πίνακα 1 και προέκυψε από την επιμέρους κοκκομετρική ανάλυση των κλασμάτων των αδρανών 0-4mm, 4-8mm και γαρμπίλι 4-12,5mm. Τα χαρακτηριστικά των αδρανών φαίνονται στον Πίνακα 2. Ως άμμος χρησιμοποιήθηκε πλυμένη άμμος από Στρυμόνα ποταμό. Ως χονδρόκοκκα θραυστά ασβεστολιθικά λατομείου Δρυμού. Το ποσοστό της υγρασίας των αδρανών ελέγχονταν αμέσως πριν τη σκυροδέτηση για να γίνεται η σχετική διόρθωση εφόσον ο σχεδιασμός βασίζονταν σε κεκορεσμένης στεγνής επιφάνειας αδρανή.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν

Αδρανή	Φαινόμενη ειδική πυκνότητα (kg/dm ³)	Απορροφητικότητα (%)	Υγρασία (%)
Άμμος	2,564	0,80	8-11
Ρύζι	2,675	0,50	1,4-3,6
Γαρμπίλι	2,680	0,33	1,05-2,6

Ως τσιμέντο χρησιμοποιήθηκε το CEM I 42.5.

Η τέφρα χαρακτηρίστηκε ως τύπου ΕΙΤ2 με χαρακτηριστικά: CaO=2.8<3.0%, SO₃=3.5<5.0%, φαινόμενο ειδικό βάρος 2.42, λεπτότητα άλεσης 328m²/kg, R_{45μm} ~ 20% < 30%.

Χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής πολυκαρβοξυλικής βάσης σε ποσοστό 1-2%κβ κονιών.

Οι συνθέσεις των σκυροδεμάτων που χυτεύθηκαν στα δοκίμια και οι ιδιότητες των νωπών σκυροδεμάτων φαίνονται στον Πίνακα 3. Τα μηχανικά και ελαστικά χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 4. Σύγκριση των μηχανικών χαρακτηριστικών και του ρυθμού ανάπτυξης της θλιπτικής αντοχής φαίνεται στα διαγράμματα 1 και 2.

Πίνακας 3. Συνθέσεις σκυροδεμάτων με ιπτάμενη τέφρα

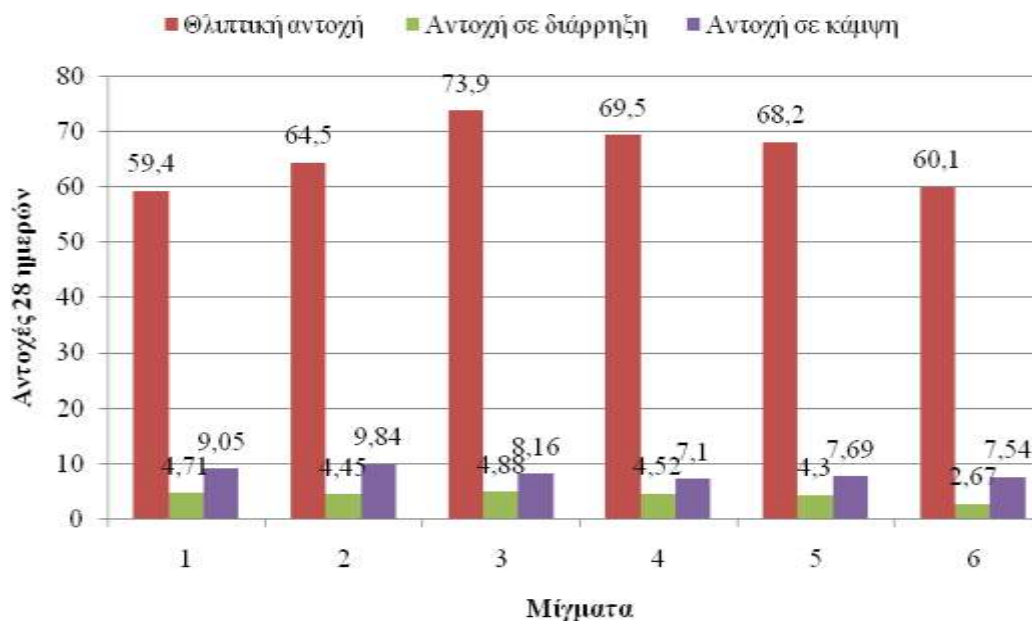
Υλικά (kg)	1	2	3	4	5	6
Γαρμπίλι	635,85	637,10	632,08	561,3	549,60	549,63
Ρύζι	324,38	323,10	319,67	283,92	274,44	274,21
Άμμος	683,90	676,50	689,83	598,14	565,20	565,24
CEM Ι42,5	450	450	300	350	350	350
Ιπτάμενη τέφρα	150 (33%)	150 (33%)	300 (50%)	350 (50%)	350 (50%)	350 (50%)
Νερό	182,2	145,8	132,78	167,02	213,40	214,00
Ρευστοποιητής	4,0	6,0	12,0	14,0	14,5	7,00
Λόγος Ν/Τ	0,30	0,25	0,22	0,238	0,30	0,30
Κάθιση (cm)	6,9	6,8	8,0	8,5	7,0	7,2
% ρευστοποιητή	0,5	0,65	1,2	1,4	1,0	1,0

Πίνακας 4. Μηχανικά χαρακτηριστικά σκυροδεμάτων με τέφρα

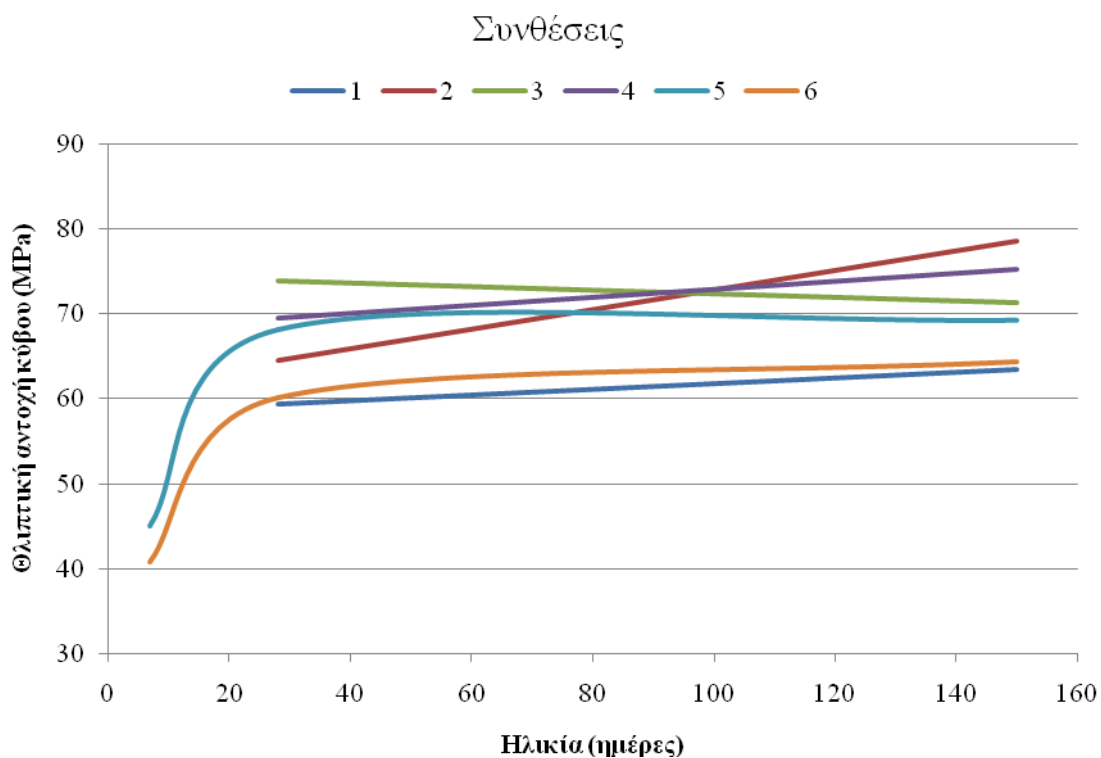
Μίγματα	1	2	3	4	5	6
Θλιπτική αντοχή (MPa)						
7 ημερών κυβ.	-	-	-	-	45,1	40,8
28 ημερών κυλ.	49,5	56,8	65,9	59,9	55,3	50,9
28 ημερών κυβ.	59,4	64,5	73,9	69,5	68,2	60,1
5 μηνών κυβ.	63,5	78,6	71,3	75,2	69,3	64,4
Εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη 28 ημ. (MPa)	4,71	4,45	4,88	4,52	4,30	2,67
Εφελκυστική αντοχή από κάμψη 28 ημ. (MPa)	9,05	9,84	8,16	7,10	7,69	7,54
Στατικό μέτρο ελαστικότητας 28 ημ. (GPa)	27,2	32,5	33,6	29,2	27,8	29,2
Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας 28 ημ. (GPa)	42,9	47,5	47,85	40,9	45,3	44,34
Λόγος $f_{c,κυβ,28}/f_{c,κυλ,28}$	1,20	1,13	1,12	1,17	1,23	1,18
Λόγος $f_{c,διάρρηξη}/f_{c,θλίψη}$ (%)	9,51	7,84	7,40	7,62	7,79	5,21
Λόγος $f_{c,θλίψη}/f_{c,κάμψη}$ (%)	15,2	15,2	11,02	10,2	11,2	12,5
Λόγος $E_{δυν}/E_{στατ}$	1,576	1,462	1,422	1,401	1,631	1,516

Τα δοκίμια συμπεκνώθηκαν με δονητική τράπεζα. Ο έλεγχος της συμπεκνωσιμότητας έγινε με προσδιορισμό του υπολογιστικού ειδικού βάρους του σκυρ/τος γ'' , του ειδικού βάρους του συμπεκνωμένου γ' και του ασυμπύκνωτου, γ . Οι λόγοι γ'/γ'' κυμαίνονταν από 0.88 έως 0.93 και κρίθηκε ικανοποιητικός. Όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν επί ένα μήνα σε θάλαμο συντήρησης με τις προδιαγραφόμενες από τους κανονισμούς συνθήκες και μετά παρέμειναν σε συνθήκες περιβάλλοντος.

Οι έλεγχοι των μηχανικών χαρακτηριστικών έγιναν σύμφωνα με τους κανονισμούς ASTM C496 για εφελκυσμό από διάρρηξη, ASTM C293 για εφελκυσμό από κάμψη και ASTM C469 για το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων απ' όπου υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας. Ο υπολογισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας έγινε με σονόμετρο κατά ASTM C586 σε πρισματικά δοκίμια.



Εικόνα 1. Μηχανικά χαρακτηριστικά σκυροδεμάτων με τέφρα



Εικόνα 2. Ρυθμός ανάπτυξης αντοχής κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος με τέφρα

3 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Κατ' αρχήν επιτεύχθηκαν επίπεδα 28 ημερών θλιπτικής αντοχής πάνω από 60MPa για κύβους με ένα συνολικό ποσό κονιών από 600 έως 700kg/m³. Συγκρίνοντας τα μίγματα 1-3 και 4-6 δεν φαίνεται να είναι εμφανής κάποια διαφοροποίηση λόγω του μεγαλύτερου

(700kg/m³) ποσοστού κονιών των 4-6 μιγμάτων. Μια τάση χαμηλότερων αντοχών εφελκυσμού και μέτρων ελαστικότητας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι καλύτερα συμπεριφέρονται ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά τα μίγματα με 600kg/m³ συνολικής κονιάς. Η παράμετρος που φαίνεται να επηρεάζει τις αντοχές είναι ο λόγος νερού/τσιμέντου. Σε λόγους νερού/τσιμέντου κάτω από 0.30 οι τιμές που επιτεύχθηκαν είναι υψηλότερες. Φαίνεται επίσης ότι αυξημένα ποσοστά της ασβεστούχας τέφρας οδηγούν σε υψηλότερες δόσεις ρευστοποιητή. Υπάρχει ένας καλός ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής και φαίνεται πως στις 7 ημέρες ένα επίπεδο αντοχής 40-50MPa είναι εφικτό.

Η εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη κυμαίνεται από 2.6 έως 4.8% της θλιπτικής ενώ η εφελκυστική αντοχή από κάμψη κυμαίνεται από 7 έως 9% της θλιπτικής. Το στατικό μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 27 έως 33.5GPa. Εάν συγκριθούν οι τιμές αυτές με τις υπολογιζόμενες (βάσει του τύπου $E_{cm}=9,5(f_{ck}+8)^{1/3}$) τιμές $E_{στατικού}$ συμβατικών σκυροδεμάτων φαίνεται ότι οι τιμές στα σκυροδέματα με τέφρα είναι λίγο χαμηλότερες (33,5 GPa αντί 37GPa).

Πρέπει επίσης να λεχθεί ότι παρ'όλο που τα μηχανικά και ελαστικά χαρακτηριστικά προιδεάζουν για τη συμπεριφορά του σκυροδέματος στο χρόνο απαιτείται περαιτέρω έλεγχος σε βασικές δοκιμασίες ανθεκτικότητας που να έχουν σχέση με τη χρήση του τελικού προϊόντος προκειμένου να αποφασισθεί ο σχεδιασμός υψηλής αντοχής σκυροδέματος με μεγάλη περιεκτικότητα σε τέφρα.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Είναι δυνατό να επιτευχθεί εμπορικό σκυρόδεμα υψηλής αντοχής με επεξεργασμένη τέφρα που εμπίπτει στην κατηγορία EIT2 σε υψηλό ποσοστό 30 έως 50% του συνόλου της συνδετικής κονιάς.

Προτείνεται το χαμηλότερο δυνατό ποσό συνολικής κονιάς στο ανάμιγμα, που στην έρευνα ήταν 600kg/m³. Περαιτέρω έρευνα ίσως ελαχιστοποιήσει ακόμα περισσότερο το ποσό αυτό. Η πιο σημαντική παράμετρος για την επίτευξη υψηλής αντοχής φαίνεται ότι είναι ο λόγος Ν/τσιμέντου+Ιπτ.Τέφρα. Τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής με μεγάλο ποσοστό τέφρας έχουν σχετικά χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας από τα συμβατικά σκυροδέματα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- 1 ACI Committee ACI 363 2R-98 Guide to Quality Control and Testing of High-Strength Concrete
2. S.I Keda et all, "Innovative Design and Construction of a 50m Span Footbridge using Reactive Powder Concrete", Proc. of G. C. Hoff, Symp. on High Performance Concrete and Concrete for Marine Environment", Las Vegas, May 2004 Editor T.C. Lin, pp.93-107.
3. H.G. Russel, "Applications of High Performance Concrete and Concrete for Marine Environment", Editor T.C Lin, pp.1-17, Las Vegas USA, 2004.
4. J.A.Bickley, "North American Trends in the Development of High Strength Concrete", 5th Int. Symp.on Utilization of High Strength and High Performance Concrete", Proc.Vol.1, pp1-14 Editor I Holand and E.Sellevold, Sandefjord, Norway, 1999.

5. V.M. Malhotra and P.K Mehta, "High Performance, High Volume Fly Ash Concrete", pp.33-35, Canada 2002.