

Χρήση ποζολανικών τσιμέντων σε σκυροδέματα υψηλής επίδοσης

Utilization of pozzolanic cements in high performance concrete

Δημήτρης ΤΣΑΜΑΤΣΟΥΛΗΣ¹, Δημήτρης ΤΣΙΦΤΣΟΓΛΟΥ², Γιώργος ΜΠΑΜΠΑΚΑΣ³

Λέξεις κλειδιά: Ποζολανικό τσιμέντο, σκυρόδεμα υψηλής επίδοσης, θερμοκρασία, θλιπτική αντοχή

Keywords: Pozolanic cement, high performance concrete, temperature, compressive strength

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός σκυροδέματος κατηγορίας C40/50, το οποίο παράλληλα να περιέχει αερακτικό. Επιλέγεται τσιμέντο CEM IV B (P-W) 42.5 N, αρκετά χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης. Το παραγόμενο σκυρόδεμα, καλύπτει με ασφάλεια τα όρια αντοχής 28 ημερών για περιεκτικότητα αέρα 5-6% και παράλληλα εμφανίζει μέγιστη άνοδο και βαθμίδες θερμοκρασίας χαμηλότερες από τις μέγιστες επιτρεπτές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

ABSTRACT: The target of the present study is the design of a concrete C40/50 containing air entrainer agent. CEM IV B (P-W) 42.5 N is selected with heat of hydration adequately low. The concrete produced covers safely the 28 days strength limit for an air content of 5-6%. In parallel shows a maximum temperature increase and gradient lower than the maximum permitted values referred in literature.

Συντονιστής Ποιότητας, ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε. email: d.tsamatsoulis@halyps.gr

Προϊστάμενος Ποιότητας, ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε. email: d.tsifsoglou@halyps.gr

Υπεύθυνος Παραγωγής και Ποιότητας Σκυροδέματος, ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε. email: g.mpampakas@halyps.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

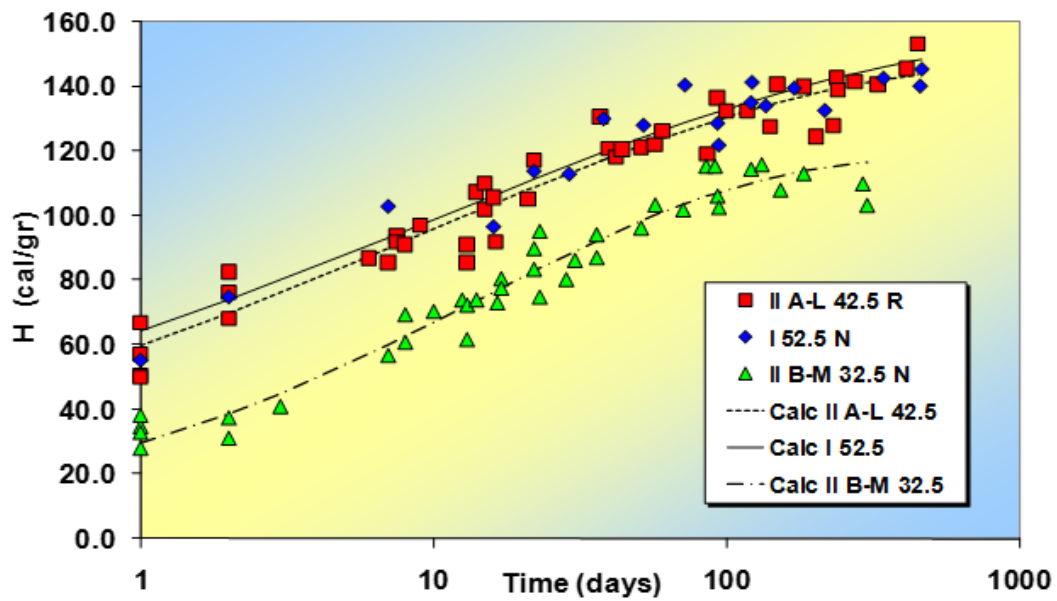
Ως σκυροδέματα υψηλής επίδοσης μπορούν να θεωρηθούν αυτά που παρουσιάζουν υψηλή θλιπτική αντοχή και παράλληλα υψηλή ανθεκτικότητα. Ως χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας μπορούν να θεωρηθούν εκτός άλλων η σταθερότητα σε ψύξη – απόψυξη και η έλλειψη μικρο-ρωγμών. Όσον αφορά τις ρωγμές ειδικά των πρώιμων ηλικιών ωρίμανσης του σκυροδέματος, μια αιτία μπορεί να είναι οι αλλαγές όγκου που οφείλονται στις μεταβολές θερμοκρασίας και υγρασίας. Για αυτό ακριβώς συχνά τίθενται περιορισμοί όσον αφορά τη μέγιστη θερμοκρασία του εσωτερικού του σκυροδέματος, καθώς και την μέγιστη διαφορά της θερμοκρασίας αυτής με τη θερμοκρασία των πλευρικών τοιχωμάτων (Jeon, 2008, Klemczak et al., 2011).

Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι η επιλογή κατάλληλου τσιμέντου για την παραγωγή ενός σκυροδέματος C40/50, που να περιέχει αερακτικό, ώστε να εξασφαλίζεται η ανθεκτικότητα σε ψύξη – απόψυξη. Επιπλέον να εμφανίζει χαμηλές βαθμίδες θερμοκρασίας μεταξύ του πυρήνα και των εξωτερικών τοιχωμάτων.

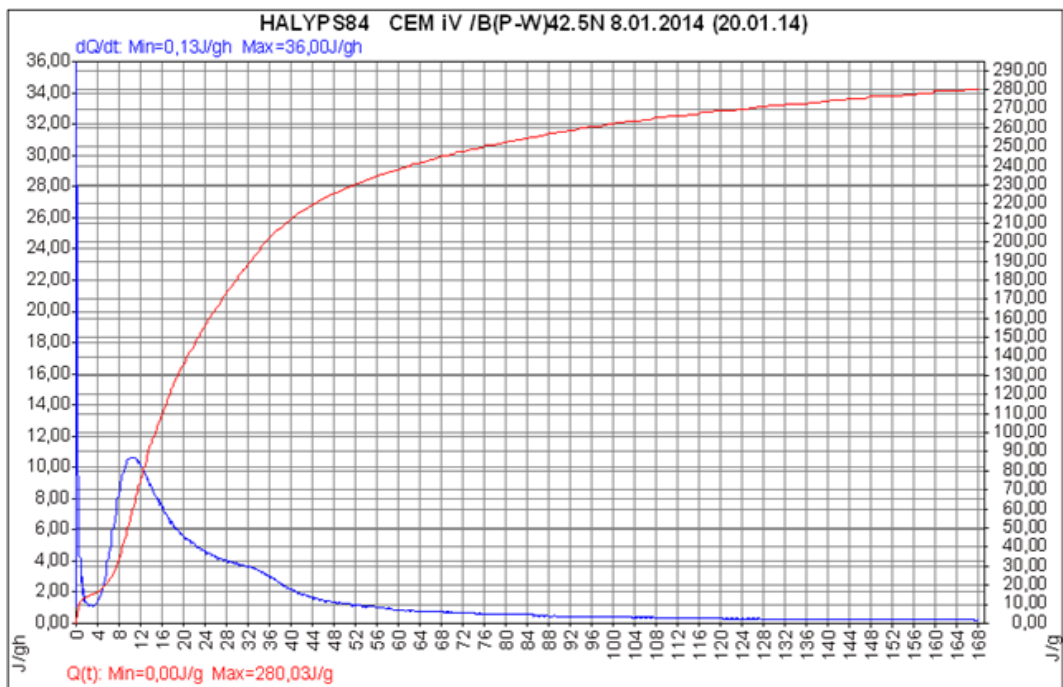
ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Επειδή το σκυρόδεμα είναι ιδιαίτερα υψηλής κατηγορίας αντοχής, το τσιμέντο θα πρέπει να είναι τουλάχιστον κλάσης 42.5. Από την άλλη μεριά για να εξασφαλίζεται χαμηλή έκλυση θερμότητας, θα πρέπει να είναι κατά το δυνατό χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης (low heat of hydration). Ένα τσιμέντο χαρακτηρίζεται ως τέτοιο όταν μετά από επτά ημέρες ενυδάτωσης (Μέθοδος διάλυσης, EN 196-8), για όλα τα στιγμιαία δείγματα έχει θερμότητα ενυδάτωσης $H < 300 \text{ J/gr}$ και με χρήση στατιστικών κριτηρίων το άνω όριο της θερμότητας $H < 270 \text{ J/gr}$.

Οι θερμότητες ενυδάτωσης για διάφορα Πόρτλαντ τσιμέντα δίνονται στο Σχήμα 1 (Τσαματσούλης et al., 2005), από το οποίο προκύπτει ότι οι θερμότητες ενυδάτωσης για όλα τα τσιμέντα, μετά από 7 ημέρες είναι μεταξύ 85 και 103 Cal/gr ή 355 έως 430 J/gr. Επομένως όλοι αυτοί οι τύποι απέχουν σημαντικά από τα τσιμέντα χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης.



Σχήμα 1. Θερμότητες ενυδάτωσης πόρτλαντ τσιμέντων συν. του χρόνου



Σχήμα 2. Θερμότητα ενυδάτωσης CEM IV B (P-W) 42.5 N

Στο Σχήμα 2 δίνεται η θερμότητα ενυδάτωσης ενός τσιμέντου CEM IV B (P-W) 42.5 N, παραγωγής του εργοστασίου ΧΑΛΥΨ το οποίο σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1 έχει μέγιστο ποσοστό κλίνκερ 64%. Παρά το ότι το τσιμέντο αυτό είναι κλάσης 42.5, παρουσιάζει θερμότητα ενυδάτωσης 280 J/gr και δεν απέχει σημαντικά από τα low heat τσιμέντα. Το τσιμέντο λοιπόν αυτό επιλέγεται για παραπέρα μελέτη.

ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

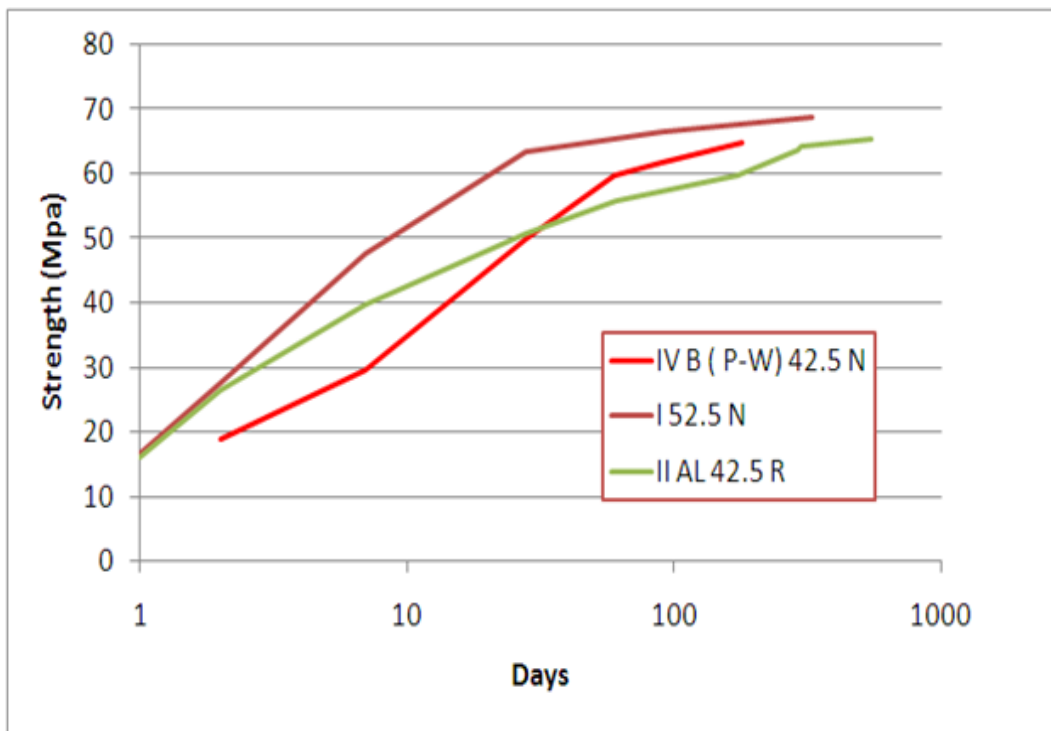
Οι θλιπτικές αντοχές του CEM IV B (P-W) 42.5 N αξιολογήθηκαν σε βάθος χρόνου για να υπάρξει πληρέστερη εκτίμηση και σύγκριση με άλλους τύπους τσιμέντου. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα αντοχών τσιμέντου

Χρόνος (Ημέρες)	Αντοχή (MPa)
2	18.9
7	29.7
28	49.9
60	59.7
90	61.7
180	64.9

Η επί μακρόν χρονικό διάστημα σύγκριση των αντοχών του υπό εξέταση τσιμέντου με άλλα τσιμέντα υψηλής και υπερ-υψηλής αντοχής δίνεται στο Σχήμα 3 από το οποίο συμπεραίνονται τα εξής:

- Οι πρώιμες αντοχές του CEM IV B (P-W) 42.5 N είναι χαμηλότερες των δύο Πόρτλαντ, γεγονός αναμενόμενο αφού το τσιμέντο είναι ποζολανικό
- Μετά από 60 ημέρες το αναφερθέν τσιμέντο ξεπερνά σημαντικά την αντοχή του CEM II A-L 42.5 R
- Στις 180 ημέρες δεν διαφέρει ιδιαίτερα σημαντικά από την αντοχή του I 52.5 N και πρακτικά ανήκει στην κατηγορία αυτή.



Σχήμα 3. Μακροπρόθεσμες αντοχές τσιμέντων Πόρτλαντ και CEM IV 42.5

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σκυροδέματος δίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα δοκιμών σκυροδέματος

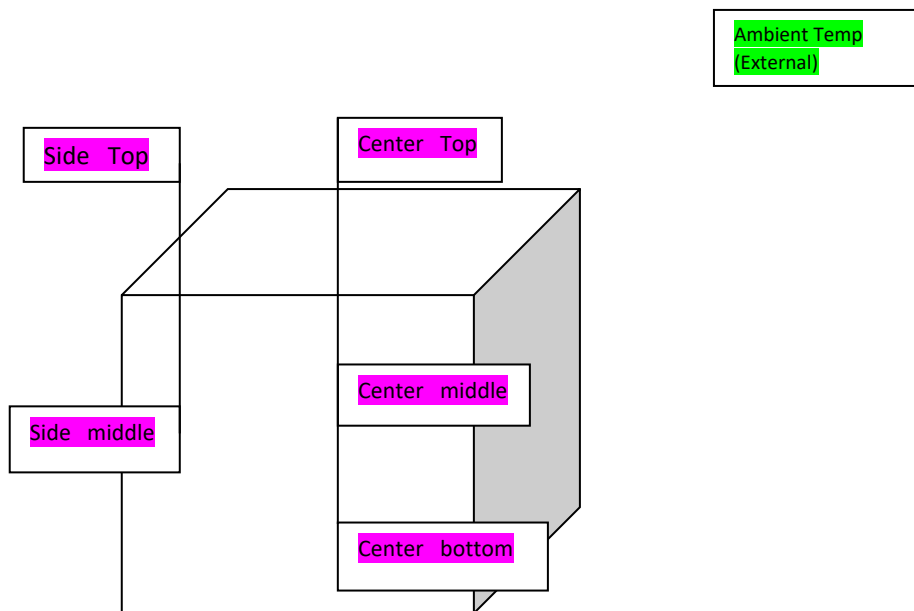
Ιδιότητα	Τιμή
Τσιμέντο (Kg/m^3)	465
% Αέρας	5.3
Κάθιση (cm)	23.5
Αντοχή 3 ημ. (MPa)	33.4
Αντοχή 7 ημ. (MPa)	46.3
Αντοχή 28 ημ. (MPa)	64.1

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 2 επαληθεύουν ότι το σκυρόδεμα είναι με επαρκή ασφάλεια C40/50 παρά την σημαντική ποσότητα αέρα που ωστόσο συνεισφέρει σε αντίσταση σε ψύξη – απόψυξη.

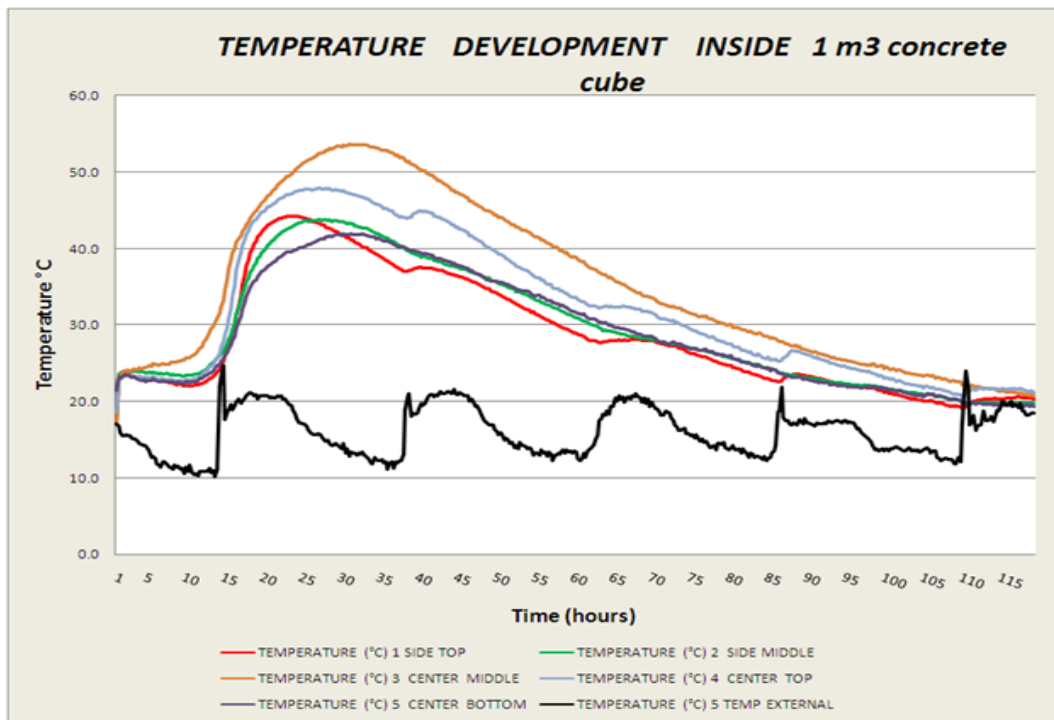
ΕΚΚΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Επειδή η έντονη έκλυση θερμότητας στο σκυρόδεμα μπορεί να αποτελέσει αιτία για ρωγμές στην πρώιμη ηλικία, συχνά μπαίνουν ως κριτήρια του κινδύνου δημιουργίας ρωγμών, η μέγιστη θερμοκρασία του εσωτερικού του σκυροδέματος - όχι ανώτερη των 65 °C - καθώς και η μέγιστη διαφορά της θερμοκρασίας αυτής με τη θερμοκρασία των πλευρικών τοιχωμάτων - όχι ανώτερη των 20 °C - όπως αναφέρουν οι Jeon (2008) και Klemczak et al. (2011) μετά από λεπτομερειακή μελέτη της βιβλιογραφίας και της τυποποίησης. Την μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας των 20 °C αναφέρουν επίσης και οι Chine et al. (2003) στην τεχνική τους μελέτη. Αυτά τα απλά κριτήρια, βασισμένα στην τεχνική εμπειρία, υποστηρίζουν ότι το σκυρόδεμα αντέχει σε αλλαγές όγκου που συνδέονται με τέτοιες αλλαγές θερμοκρασίας.

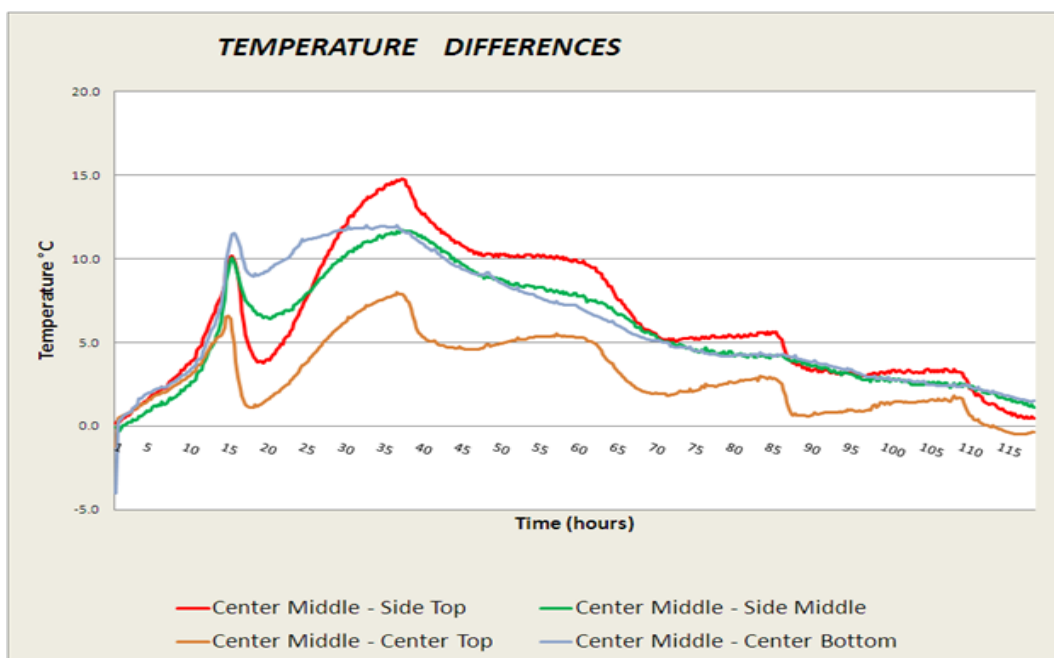
Η συμπεριφορά του σκυροδέματος C40/50 που περιέχει το συγκεκριμένο τσιμέντο CEM IV 42.5 και αερακτικό ώστε να επιτυγχάνεται 6% περιεκτικότητα αέρα, μελετήθηκε τοποθετώντας σε ένα κύβο σκυροδέματος 1 m³, θερμοστοιχεία, τόσο στο κέντρο όσο και κοντά στις επιφάνειες. Ένα διάγραμμα της τοποθέτησης των θερμοστοιχείων δίνεται στο Σχήμα 4. Οι θερμοκρασίες καταγράφονταν διαρκώς σε Η/Υ και ελήφθησαν σε αντίστοιχα αρχεία.



Σχήμα 4. Θέσεις θερμοστοιχείων στον κύβο σκυροδέματος



Σχήμα 5. Θερμοκρασιακά προφίλ, στο κέντρο και κοντά στις επιφάνειες του κύβου.



Σχήμα 6. Διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ κέντρου και πλευρών του κύβου.

Οι συνεχείς μετρήσεις των θερμοκρασιών δίνονται στο Σχήμα 5, ενώ στο Σχήμα 6 δίνεται η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του κέντρου του κύβου και των τεσσάρων άλλων σημείων.

Από το σχήμα 5 παρατηρείται ότι η μέγιστη θερμοκρασία στο κέντρο του κύβου παρατηρείται 30-34 ώρες από την έναρξη της σκλήρυνσης του σκυροδέματος και είναι ~ 53.5 °C, σημαντικά μικρότερη από το την τιμή των 65 °C που αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως οριακή.

Από το Σχήμα 6 παρατηρείται μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ κέντρου και πλευρών 15 °C, σημαντικά και πάλι μικρότερη από το αναφερόμενο όριο των 20 °C. Άρα το σκυρόδεμα C40/50 ικανοποιεί τα απλά τεχνικά κριτήρια της βιβλιογραφίας και μπορεί να χαρακτηριστεί ως υψηλής επίδοσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε σκυρόδεμα C40/50 με χρήση ποζολανικού τσιμέντου κλάσης 42.5 και αερακτικού ώστε να αυξηθεί η αντίσταση στην ψύξη - απόψυξη. Η αντοχή 28 ημερών του σκυροδέματος είναι υπερ-επαρκής, ~ 64 MPa- παρά το σημαντικό περιεχόμενο αέρα, 5-6%. Το χρησιμοποιούμενο τσιμέντο έχει μακροχρόνιες αντοχές έξι μηνών περίπου ισοδύναμες με αυτές του I 52.5, ~ 65 MPa.

Επειδή η έντονη έκλυση θερμότητας στο σκυρόδεμα μπορεί να αποτελέσει αιτία για ρωγμές στην πρώιμη ηλικία, συχνά μπαίνουν ως κριτήρια του κινδύνου δημιουργίας ρωγμών ή και ως τεχνικές προδιαγραφές, η μέγιστη θερμοκρασία του εσωτερικού του σκυροδέματος - όχι ανώτερη των 65 °C - καθώς και η μέγιστη διαφορά της θερμοκρασίας αυτής με τη θερμοκρασία των πλευρικών τοιχωμάτων - όχι ανώτερη των 20 °C. Με το παραχθέν σκυρόδεμα δημιουργήθηκε κύβος 1 m³, και έγινε συνεχής καταγραφή της ανόδου της θερμοκρασίας κατά την ενυδάτωση. Και οι δύο αναφερθέντες περιορισμοί ικανοποιούνται με ασφάλεια. Άρα η σύνθεση με το συγκεκριμένο τσιμέντο μπορεί αν υποστηριχθεί ότι αποτελεί σκυρόδεμα υψηλής επίδοσης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά

Jeon, S.J. “Advanced Assessment of Cracking due to Heat of Hydration and Internal Restraint”, ACI Mater. J., Vol. 105, No 4 (2008) 325-333

Klemczak, B. & Knoppik-Wrobel, A., “Early Age Thermal and Shrinkage Cracks in Concrete Structures – Description of the Problem”, Architecture Civil Engineering Environment, Vol. 4, No 2 (2011) 35-48

Tsamatsoulis, D.C., Stathouloupoulou & C.A., Preloretzos, L.A. “A Mathematical Model Correlating the Released Heat and the Time of Hydration of Cements Produced in Compliance with the Standard ELOT EN 197-1”, Tech. Chron. Sci. J. TCG, Vol. V, No 1-2 (2005), 57-71

Τεχνικές εκθέσεις

Chini, A.R, Muszynski, L.C., Ackuaye, L. & Tarkhan, S., “Determination of the Maximum Placement and Curing Temperatures in Mass Concrete to Avoid Durability Problems and DEF”, Florida Department of Transportation, Gainesvill, Technical Report (2003)