ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Π. Α. ΚΑΚΑΒΑΣ[1] Β. ΧΑΧΟΥΛΗΣ[1] & Α. Π. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ[2]

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ

1. ΤΜΗΜΑ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

2. ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ 1, 26 334 ΚΟΥΚΟΥΛΙ-ΠΑΤΡΑ, ΕΛΛΑΣ

Email:kakavas@teipat.gr

Περίληψη:

Ο ποιοτικός έλεγχος του σκυροδέματος, λόγω της επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών, μελετήθηκε με μη-καταστροφικές πειραματικές μεθόδους π.χ. διάδοση υπερήχων και δυναμικών ταλαντώσεων μέσα σε δοκίμια κυλινδρικού σχήματος τα οποία εξήχθησαν από το βιομηχανικό συγκρότημα της πρώην χαροποιίας Γ. Λαδοπούλου στην Πάτρα. Η ηλικία του κτιρίου είναι πλέον των εβδομήντα ετών με σημαντικές καταστροφές λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών. Ο συνδυασμός των ανωτέρω μη-καταστροφικών μεθόδων δίδει πειραματικές τιμές της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων μέσα στο υλικό, το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας καθώς και την τιμή του δυναμικού συντελεστή Poisson. Με εφαρμογή κατάλληλων μαθηματικών εκφράσεων προσδιορίζεται το *στατικό* μέτρο ελαστικότητας και η *αντοχή* του σκυροδέματος. Η θλιπτική αντοχή των εξαγχθέντων δοκιμίων "καρότων ή πυρήνων" σκυροδέματος από το κτιριακό βιομηχανικό συγκρότημα έγινε με τη θράση των "καρότων" σε κατάλληλη θλιπτική μηχανή. Από τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης υπολογίστηκε το αρχικό στατικό μέτρο ελαστικότητας του υλικού και έγινε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν από τις μη-καταστροφικές μεθόδους. Η ενανθράκωση του σκυροδέματος μελετήθηκε με τις παραδοσιακές μεθόδους και εξήχθηκαν σημαντικά συμπεράσματα για την επίδραση του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας στη γήρανση του σκυροδέματος.. Η ανωτέρω ερευνητική εργασία είναι ουσιώδης για τη στατική μελέτη της υπό ανακαίνιση και αποκατάσταση κατασκευής.

Λέξεις-κλειδιά: *Αντοχή σκυροδέματος, ποιοτικός έλεγχος κατασκευών, μη-καταστροφικές δοκιμές, ενανθράκωση του σκυροδέματος.*

Ι. Εισαγωγή:

Το σκυρόδεμα κυριαρχεί στο χώρο των κατασκευών βασικά γιατί είναι φθηνό υλικό σε σχέση με την ικανότητα που παρέχει για μεταφορές φορτίων και στεγάνωσης με καλό οικολογικό προφίλ σχετικά με τα άλλα σύγχρονα δομικά υλικά. Η παραγωγή του σκυροδέματος παγκοσμίως ανέρχεται σε 10 δις.. τόνους το έτος με σύγχρονη κατανάλωση 8 δισ. τόνων αδρανών και 1.8 δισ. τόνων τσιμέντου. Σήμερα για έργα υποδομής ο αποδεκτός ωφέλιμος χρόνος ζωής είναι πάνω από 100 χρόνια. Από τους μηχανισμούς αποσταθεροποίησης του σκυροδέματος οι πιο συχνά απαιτούμενοι στην παθολογία των κατασκευών είναι:(1) Η διάβρωση του οπλισμού (λόγω ενανθράκωσης, διείσδυσης χλωριόντων ή συνέργιας διαβρωτικών παραγόντων) (σε σκυρόδεμα

με 300 Kg/m^3 τσιμέντο: CO_2 διείσδυση 1.3 mm/month με μείωση και κατά 50 Kg/m^3 του τσιμέντου: CO_2 διείσδυση 1.5m/month),(2) η θειική προσβολή (σχηματισμός προϊόντων μεγάλου όγκου), (3) αλκαλιοπυριτική αντίδραση(4) παγοπληξία.. Η αποσταθεροποίηση του σκυροδέματος μπορεί να οφείλεται σε εξωγενή αίτια (π.χ. υγρασία, ιόντα CI- SO^{-4}) και ενδογενή αίτια (π.χ. αλκαλιοπυριτική αντίδραση, SO^{-4}). Και στις δύο περιπτώσεις η *διαπερατότητα* και η κατάσταση *μικρορηγμάτωσης* του σκυροδέματος φαίνεται να καθορίζουν την εξέλιξη των διαβρωτικών μηχανισμών. Μακροσκοπικά παρατηρείται ρηγμάτωση κάθε φορά που η τάση που δημιουργείται από εξωτερικές δράσεις ή από εσωτερικές αυτογενείς εντάσεις ξεπερνά την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος . Σε μικροσκοπικό επίπεδο είναι γνωστό ότι στο σκυρόδεμα υπάρχει μικρο-ρηγμάτωση που δημιουργείται με τη σκλήρυνσή του και είναι εντοπισμένη κυρίως στην ενδοεπιφανειακή ζώνη. Με την επιβολή εξωτερικής ή εσωτερικής έντασης οι μικρορηγματώσεις συνενώνονται, προσανατολίζονται ανάλογα με την κύρια που υφίστανται. Αυτό συμβαίνει για ένταση που αντιστοιχεί περίπου στο όριο ελαστικότητας. Σε υψηλότερες τάσεις οι συνενώσεις των μικρορηγματώσεων προχωρούν και σε άλλα επίπεδα και δημιουργείται μια ζώνη χαλάρωσης που οδηγεί στην εμφανή ρηγμάτωση.

Η παθολογία του βιομηχανικού συγκροτήματος Λαδοπούλου, στην Πάτρα, πρόκειται να αναπλαστούν σε χώρους νέας χρήσης, π.χ. μεγάλη ξενοδοχειακή μονάδα πολλών κλινών, θέατρο και κατάλληλη διαμόρφωση των εξωτερικών χώρων. Το συγκρότημα Λαδοπούλου ήταν ένα από το μεγαλύτερα στην Ευρώπη παραγωγής και επεξεργασίας χάρτου το οποίο έκλεισε οριστικά την δεκαετία του 1980. Για την ανάπλαση των χώρων αυτών απαιτείται αρχικά η μελέτη της στατικής επάρκειας του βιομηχανικού συγκροτήματος. Προς τούτο πρέπει οπωσδήποτε να ελεγχθεί η αντοχή του σκυροδέματος και η διάβρωση του σιδηρού οπλισμού. Ο πειραματικός προσδιορισμός της αντοχής του οπλισμένου σκυροδέματος έγινε αρχικά με μη-καταστροφικές τεχνικές και κατόπιν με θραύση των δοκιμίων σε θλιπτική πρέσα.

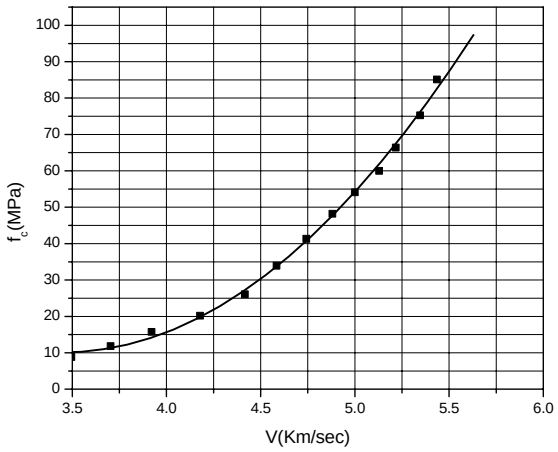
ΙΙ. **Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα:**

Ο έλεγχος της αντοχής του σκυροδέματος έγινε δι' εξαγωγής κυλινδρικών δοκιμίων, διαστάσεων 10 cm (διάμ.) x 10 cm (ύψος), δηλαδή ο λόγος διαμέτρος/ύψος είναι 1:1, από τα υποστυλώματα του υφιστάμενου κτιρίου. Καθ' όσον οι κανονισμοί απαιτούν ο λόγος της διάμετρος προς το ύψος να είναι 1:2 η μετρούμενη τιμή της αντοχής ανάγεται στην κανονική τιμή μέσω διαγραμμάτων [1]. Η αντοχή σε θλίψη του εξαγχθέντος σκυροδέματος μπορεί να μετρηθεί είτε με μη-καταστροφικές μεθόδους π.χ. (1) μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων δια μέσου του υλικού και αναγωγή στην αντοχή του σκυροδέματος με τη βοήθεια μαθηματικών εκφράσεων ή διαγραμμάτων (2) μέτρηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας και αναγωγή στην αντοχή ή με καταστροφικές μεθόδους π.χ. εφαρμογή θλίψης στο δοκίμιο μέχρι την ολική θραύση του .

➢ **Πείραμα Υπερήχων**

Η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων μέσα σε ένα στερεό σώμα σχετίζεται άμεσα με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητα του υλικού διέλευσης των ηχητικών κυμάτων το οποίο συσχετίζεται με την αντοχή του. Ένας πομπός ο οποίος παράγει υπερήχους ταχύτητας πάνω από 20 Km/sec, με τη βοήθεια ενός ηλεκτρο-ακουστικού κρυστάλλου, στέλνει στο υλικό τους υπερήχους οι οποίοι ανιχνεύονται με τον δέκτη ο οποίος βρίσκεται επίσης σε επαφή με το σκυρόδεμα, στο οποίο γίνεται το πείραμα. Ο χρόνος που απαιτείται να διέλθει το κύματα από το δοκίμιο μετράται με ειδική ηλεκτρονική συσκευή μα ακρίβεια δεκάτου του μικρο-δευτερολέπτου. Η σχέση αντοχής και ταχύτητας

υπερήχων είναι παραβολική, αλλά συνήθως χρησιμοποιούνται πίνακες για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της αντοχής. Η σχέση ταχύτητας-αντοχής στο σκυρόδεμα εξαρτάται από διαφορετικούς παράγοντες, π.χ. το μέγεθος τον τύπο και το ποσοστό των αδρανών, το λόγο N/T (νερό προς τσιμέντο), την ηλικία του σκυροδέματος κ.λ.π. Η σχέση ταχύτητας-αντοχής φαίνεται στο Σχ. 1.



Σχ. 1 Σχέση αντοχής (MPa) και ταχύτητας υπερήχων (Km/sec) στο σκυρόδεμα

Η πειραματική μέση ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων (έξη δοκιμίων) μετρήθηκε 3971$\pm$ 1.249 m/sec από την οποία προσδιορίζεται η τιμή της αντοχής του σκυροδέματος f=19.74 MPa [1,2]. Η συσκευή προσδιορισμού της ταχύτητας των υπερήχων μέσα στο σκυρόδεμα φαίνεται στην Εικόνα 1. Η προσδιοριζόμενη τιμή της αντοχής πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τον διορθωτικό παράγοντα 1.18 [1] για να αναχθεί στην πραγματική αντοχή του σκυροδέματος, η οποία προσδιορίστηκε ίση με 23.3 MPa (ή 233 kp/cm^2).

Εικόνα 1: Συσκευή υπερήχων

➢ Πείραμα Ταλαντώσεων

Η εναλλακτική μη-καταστροφική μέθοδος είναι η εφαρμογή μικρού πλάτους ταλαντώσεων κατά την αξονική διεύθυνση των δοκιμίων όπου από τη δυναμική ανάλυση προσδιορίζεται η συχνότητα συνήχησης f_0 (σε Hz). Η συσκευή εφαρμογής των

ταλαντώσεων στα δοκίμια του σκυροδέματος φαίνεται στην Εικόνα 2. Η μέση τιμή της συχνότητας συνήχησης τεσσάρων δοκιμίων βρέθηκε 16,3 ± 13.2 Hz και από την τιμή αυτή προσδιορίζεται το *δυναμικό* μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος [] από τον τύπο

$$E_d = 4L^2 \rho f_0^2 (10^{-15}) \quad GPa \tag{1}$$

όπου L, ρ συμβολίζουν το μήκος του δοκιμίου (σε mm) και την πυκνότητα του σκυροδέματος ($\approx 2400 \ Kg/m^3$) αντίστοιχα.

Εικόνα 2: Συσκευή ταλαντώσεων μικρού πλάτους

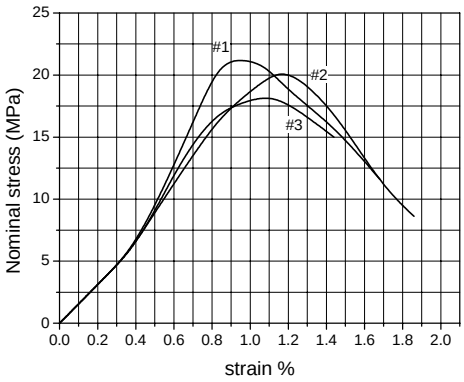
Από τις πειραματικές τιμές του μήκους L=100 mm και της συχνότητας f_0, το *δυναμικό* μέτρο ελαστικότητας (βλ. εξ. (1)), ισούται με E_D= 25.52 GPa, το οποίο ανάγεται στο *στατικό* μέτρο ελαστικότητας δια μέσου του τύπου $E_s = 0.83E_d$, δηλαδή E_s=21.18 GPa και η χρήση της μαθηματικής έκφρασης $E_s = 4.73\sqrt{f_c}$ [1] δίδει f_c=20.05 MPa. Πολλαπλασιάζοντας την προσδιορισθείσα τιμή με τον διορθωτικό παράγοντα 1.18 δίδει την τελική τιμή της αντοχής του σκυροδέματος f_c=23.7 MPa (237 Kg/cm^2) η οποία είναι συγκρίσιμη με την αντίστοιχη που προσδιορίζεται από τα πειράματα των υπερήχων.

- **Πείραμα Θλίψης**

Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων μη-καταστροφικού προσδιορισμού της αντοχής του σκυροδέματος από το κτιριακό συγκρότημα Λαδοπούλου, εφαρμόστηκαν θλιπτικά φορτία στα κυλινδρικά δοκίμια στη θλιπτική μηχανή, μέχρι της τελικής θραύσης τους. Η πρέσα εφαρμογής θλιπτικών φορτίων στα δοκίμια φαίνεται στην Εικόνα 3.

Εικόνα 3: Πρέσα θραύσης δοκιμίων σκυροδέματος

Οι καμπύλες τάσης/παραμόρφωσης τριών δοκιμίων φαίνονται στο Σχ. 2. Τα μέγιστα των τριών καμπυλών προσδιορίζουν την αντοχή του σκυροδέματος εκάστου δοκιμίου, των οποίων η μέση τιμή ισούται με 20 MPa, ή 24 MPa εάν πολλαπλασιαστεί με τον διορθωτικό παράγοντα 1.18. Η τιμή αυτή, της αντοχής του σκυροδέματος από την θραύση των δοκιμίων είναι περίπου ίση με την αντίστοιχη μέτρηση που προέκυψε από τα πειράματα μη καταστροφικού ελέγχου. Συμπερασματικά, μπορεί κανείς να προβλέψει την αντοχή δοκιμίων σκυροδέματος εξαγομένων από παλαιά κτιριακά έργα μη-καταστροφικά και τα αποτελέσματα είναι συμβατά με τα αντίστοιχα των πειραμάτων καταστροφικού ελέγχου τα οποία απαιτούν την χρήση πολύ ακριβών εργαστηριακών συσκευών. Όλες οι συσκευές μη-καταστροφικού ελέγχου χρησιμοποιούνται επί τόπου στο έργο και με μικρό



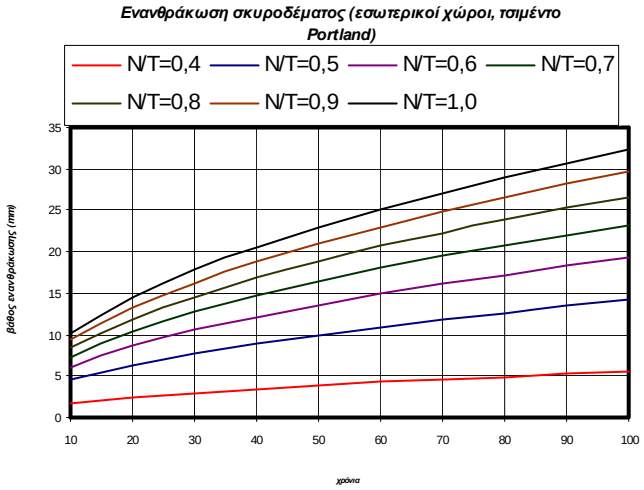
Σχήμα 2: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης τριών δοκιμίων σκυροδέματος

κόστος εφαρμογής.

- **Ενανθράκωση**

Για να υπολογισθεί τυχόν επίπτωση στην ποιότητα του σκυροδέματος από την επίδραση του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας μετρήθηκε η *ενανθράκωση* του σκυροδέματος. Το βάθος ενανθράκωσης μετράται μετά από ψεκασμό διαλύματος φαινολοφθαλεΐνης πάνω σε φρεσκοθραυσμένη επιφάνεια του σκυροδέματος. Η φαινολοφθαλεΐνη χρωματίζεται με έντονο κόκκινο χρώμα σε αλκαλικό περιβάλλον (για pH>9), δηλαδή σε μη ενανθρακωμένο σκυρόδεμα σε αντίθεση με το ενανθρακωμένο σκυρόδεμα στο οποίο παραμένει άχρωμο. Εάν το σκυρόδεμα είναι ενανθρακωμένο

σημαίνει ότι δεν προστατεύει πλέον τον σιδηροπλισμό από τη διάβρωση. Για την περαιτέρω μελέτη της επίδρασης του CO_2 επί του σκυροδέματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ενανθράκωσης, και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενανθράκωση έχει προσβάλει το σκυρόδεμα 2-3 mm. Με βάση την βιβλιογραφία [3] το βάθος ενανθράκωσης λόγω παρέλευσης εβδομήντα ετών από την κατασκευή του συγκροτήματος (έτος κατασκευής 1932) αναμενόταν να είναι περίπου 15-20 mm (βλ. Σχ.. 3). Το μικρό βάθος πραγματικής ενανθράκωσης οφείλεται στην άριστη ποιότητα του κονιάματος που προστατεύει την εξωτερική επιφάνεια των φερόντων στοιχείων του κτιρίου. Το μικρό βάθος ενανθράκωσης σημαίνει σχεδόν μηδενική οξείδωση του σιδηρο-οπλισμού, άρα καλή στατική επάρκεια του συγκροτήματος. Συνήθως ο λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T) λαμβάνεται 0.5-0.6. Το φαινόμενο της ενανθράκωσης του σκυροδέματος έχει μελετηθεί εκτενώς τα τελευταία έτη [4].



Σχ. 3: Μεταβολή του βάθους ενανθράκωσης σα συνάρτηση των ετών κατασκευής ενός κτιριακού έργου

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται τμήμα σκυροδέματος από το συγκρότημα Λαδοπούλου, που δεν έχει υποστεί ενανθράκωση.

Εικόνα 4: Μη ενανθρακούμενο τμήμα του σκυροδέματος από υποστύλωμα του υπό μελέτη βιομηχανικού συγκροτήματος

- **Μηχανισμοί Διάβρωσης**

Ο σιδηροπλισμός προστατεύεται από τη διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου που δημιουργείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος. Το προστατευτικό στρώμα του οξειδίου μπορεί να διατρηθεί τοπικά από ιόντα χλωρίου αν η συγκέντρωση των υπερβεί το 0.45% του τσιμέντου κατά βάρος όταν το χλωριούχο άλας προέρχεται από το θαλασσινό νερό. Πρέπει να σημειωθεί ότι το υπό μελέτη βιομηχανικό συγκρότημα είναι πλησίον της θάλασσας. Τα χλωριόντα που μπορεί να διατρήσουν το προστατευτικό στρώμα του οξειδίου όταν διεισδύσουν μέσω του νερού των πόρων μέχρι τον οπλισμό προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος, είτε από το φυσικό περιβάλλον πλησίον σε θαλάσσιες περιοχές. Όταν επέρχεται η απώλεια του επιφανειακού προστατευτικού στρώματος του οξειδίου αρχίζει να οξειδώνεται ο οπλισμός μέσα στο σκυρόδεμα, όπου η οξείδωση είναι μια ηλεκτροχημική αντίδραση με ηλεκτρολύτη το νερό. Στην περίπτωση όμως του υπό μελέτη κτιρίου, παρά το γεγονός ότι βρίσκεται πλησίον της θάλασσας η οξείδωση του σιδηροπλισμού είναι σχεδόν ανύπαρκτη καθ' όσον τα επιχρίσματα είναι σε αρίστη κατάσταση και δεν επιτρέπουν στα χλωριόντα και στο νερό να εισέλθουν εντός του σκυροδέματος. Η τυχών διάβρωση των ράβδων οπλισμού έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της διατομής των και επί πλέον την ολκιμότητα του χάλυβα με δυσμενείς επιπτώσεις στη σεισμική συμπεριφορά του κτιρίου. Η μελέτη αυτή έδειξε ότι η σεισμική επάρκεια του συγκροτήματος είναι μέσα στα όρια των Ευρωπαϊκών Αντισεισμικών

Κανονισμών ή του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ 2000). Σε ορισμένα όμως σημεία η διάβρωση του οπλισμού είναι σημαντική με αποτέλεσμα η οξειδωμένη ράβδος να ασκεί πίεση στο σκυρόδεμα προκαλώντας ρηγματώσεις με αποτέλεσμα να εξασθενεί η συνάφεια σκυροδέματος-χάλυβα που επηρεάζει σημαντικά την λειτουργικότητα και την αντοχή των μελών. Ο χάλυβας οπλισμού προσφέρει αντοχή και πλαστιμότητα στον φέροντα οργανισμό του κτιρίου μέσω του δεσμού και της αγκυρωσής του με το σκυρόδεμα [5,6,7]. .

Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη έδειξε ότι η αντοχή του σκυροδέματος είναι στα όρια που καθορίζουν οι κανονισμοί κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και η ανακαίνιση του υπό μελέτη κτιριακού έργου μπορεί να γίνει χωρίς μεγάλες επεμβάσεις στον φέροντα οργανισμό του βιομηχανικού συγκροτήματος. Τοπικές παρεμβάσεις μπορεί πιθανόν να γίνουν για την επιδιόρθωση αστοχιών σε τοπικά μέρη του κτιρίου. Λόγω ότι η Πάτρα έχει επιλεγεί ως η Πολιτιστική Πρωτεύουσα 2006, έχουν ήδη χρηματοδοτηθεί η μετατροπή των χώρων σε μεγάλο ξενοδοχείο και θεάτρου με όλους τους συναφείς χώρους.

Βιβλιογραφία

1. A. M. Neville, Properties of Concrete, Pitman Books Ltd, London (1981)
2. Α. Τριανταφύλλου, Δομικά Υλικά, Πάτρα (2004)
3. Θ.Π.Τάσιος και Κ.Αλιγιζάκη, Ανθεκτικότητα Ωπλισμενου Σκυροδέματος- -Αθήνα (1993)
4. Ε. Παπαδάκης 'Μελέτη των Φυσικοχημικών διεργασιών ενανθράκωσης του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού' Διδακτορική. Διατριβή Παν. Πατρών (1990)
5. Μ. Φαρδής, Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος ΙΙΙ, Πάτρα 2003.
6. Θ. Ν. Σκουλικίδης, Διάβρωση και Συντήρηση των Δομικών Υλικών των Μνημείων, Παν. Εκδόσεις Κρήτης, 2000.
7. Θ. Ν. Σκουλικίδης και Π. Βασιλείου, Διάβρωση και Προστασία Υλικών, Εκδ. Συμεών, Αθήνα 2000.