



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ
ΣΕΙΣΜΟ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΔΙΩΡΟΦΗΣ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΚΑΝ.ΕΠΕ

ΙΩΑΝΝΑ ΣΚΕΝΤΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Α.Π.Θ.

skentoui@gmail.com, std151653@ac.eap.gr

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΓΕΝΗΚΟΜΣΟΥ

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Queen's, Καναδάς

genikomsou.aikaterini@ac.eap.gr

Εισαγωγή

Το αντικείμενο της εργασίας είναι η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς μίας υφιστάμενης διώροφης κατοικίας με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα, για την οποία η στατική μελέτη και η κατασκευή πραγματοποιήθηκε το έτος 1961. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η Ελλάδα αποτελεί μία ιδιαίτερα σεισμογενή χώρα, η ύπαρξη των αντισεισμικών κανονισμών θεωρείται αναγκαία. Πέραν την ύπαρξης, βασικό κομμάτι αποτελεί η εφαρμογή των αντισεισμικών κανονισμών σε νέες και παλαιές κατασκευές, καθώς πολλές φορές λόγω αστοχιών στην κατασκευή, μπορεί να επηρεαστεί η στατική επάρκεια της κατασκευής και κατ' επέκταση υπάρχει κίνδυνος απώλειας ανθρώπινων ζωών. Πολλά είναι τα προβλήματα που δυσχεραίνουν την εφαρμογή των αντισεισμικών κανονισμών, από την πλευρά της μελέτης και της εφαρμογής/κατασκευής σε υφιστάμενα κτίρια. Τα βασικότερα από αυτά είναι: η παλαιότητα των κτιρίων, η ελλιπής συντήρηση, η αυθαίρετη δόμηση και το κόστος ενίσχυσης. Χρησιμοποιούνται από την βιβλιογραφία οι κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 8, του Κανονισμού Επεμβάσεων και του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού, καθώς οι κανονισμοί αυτοί αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο για τις μελέτες αποτίμησης. Μελετήθηκαν από την βιβλιογραφία οι αποτιμήσεις και οι ανασχεδιασμοί υφιστάμενων κτιρίων, όπως η αποτίμηση συμπεριφοράς υφιστάμενου σχολείου, πεντάροφου κτιρίου και πολυκατοικίας. Σκοπός της εργασίας είναι η αποτίμηση υφιστάμενου κτιρίου με τις δύο μεθόδους ανάλυσης, την ελαστική και την ανελαστική και η σύγκριση των παραπάνω μεθόδων. Στόχος είναι να εξαχθούν συμπεράσματα για την γενική συμπεριφορά του υπό μελέτη κτιρίου έναντι σεισμικών δράσεων και στις δύο περιπτώσεις και στη συνέχεια να προταθούν οι κατάλληλοι τρόποι ενίσχυσης του και να πραγματοποιηθεί μία προκοστολόγηση των ενισχύσεων που προκύπτουν από την μέθοδο ανάλυσης. Εφαρμόζονται συγκεκριμένες μέθοδοι ενίσχυσης, αλλά και συνδυασμός μεθόδων. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μεθόδων, όσον αφορά την αποτελεσματικότητα τους στην κάθε ανάλυση, ώστε να αυξηθεί η αντοχή του κτιρίου, τα πλεονεκτήματά και τα μειονεκτήματά τους. Τελικός στόχος της εργασίας είναι να επιλεγεί η βέλτιστη μέθοδος ενίσχυσης, όσον αφορά την σεισμική συμπεριφορά του κτιρίου αλλά και το κόστος ενίσχυσης.

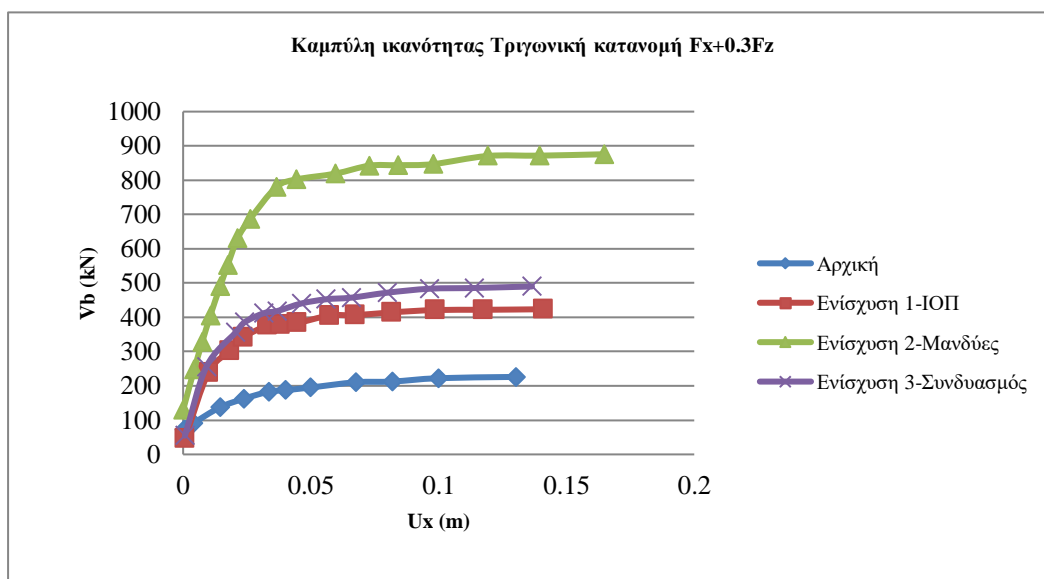
Μεθοδολογία

Για την αποτίμηση και τον ανασχεδιασμό της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Scada Pro της ACE Hellas. Αρχικά η διώροφη κατασκευή προσομοιώνεται στο πρόγραμμα, εισάγοντας τις διατομές, τα χαρακτηριστικά και τις ποιότητες των στοιχείων του φέροντος οργανισμού. Στη συνέχεια εισάγονται τα φορτία στον φορέα και ακολουθεί η ανάλυση της κατασκευής. Ο στόχος της σεισμικής αποτίμησης είναι B1 και η Στάθμη Αξιοπιστίας Δεδομένων είναι «ΙΚανοποιητική». Ακολουθεί η αρχική προδιαστασιολόγηση του οπλισμού με βάση τον Ευρωκώδικα 2 και στην συνέχεια τροποποιείται ο οπλισμός, εισάγοντας σε κάθε στοιχείο τον υφιστάμενο οπλισμό. Κατόπιν ολοκλήρωσης των παραπάνω βημάτων, επόμενο βήμα είναι ο προέλεγχος του κτιρίου ή αλλιώς μία προκαταρκτική ελαστική δυναμική ανάλυση με βάση την οποία ελέγχουμε την μορφολογική κανονικότητα, τις ανώτερες ιδιομορφές και με βάση τα παραπάνω επιλέγουμε την μέθοδο ανάλυσης που θα ακολουθηθεί. Για εκπαιδευτικούς λόγους πραγματοποιήθηκαν και η ελαστική και η ανελαστική μέθοδο ανάλυσης. Ακολουθεί η ελαστική δυναμική ανάλυση και η ανελαστική. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα και των δύο μεθόδων και οι αστοχίες που προκύπτουν στην κάθε μία περίπτωση σε κάθε στοιχείο, στα υποστυλώματα και στις δοκούς. Εφαρμόζονται συγκεκριμένες μέθοδοι ενίσχυσης, αλλά και συνδυασμός μεθόδων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο ανασχεδιασμός της κατασκευής και στις δύο αναλύσεις, με ενίσχυση από ΙΟΠ (ινοπλισμένα πολυμερή), μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος και συνδυασμό των δύο μεθόδων ενίσχυσης.

Αποτελέσματα

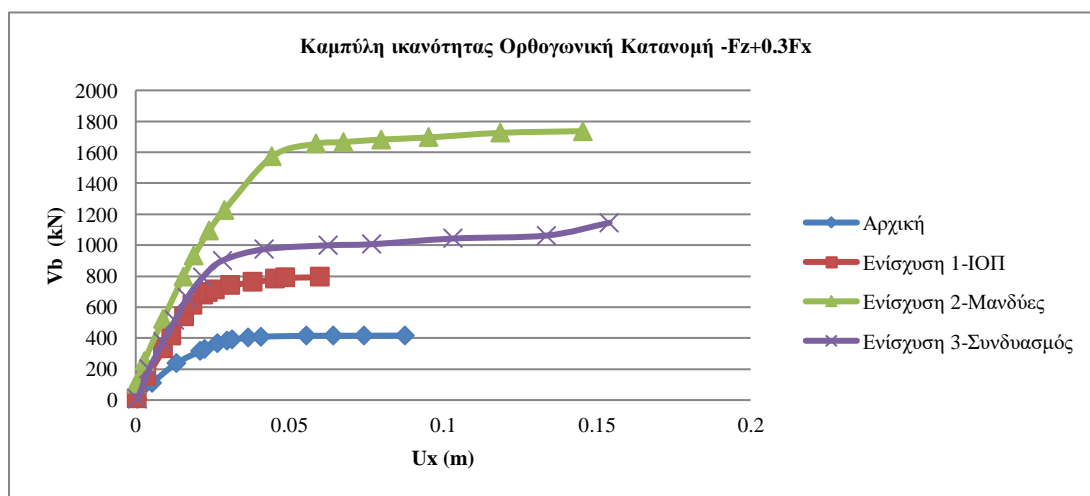
Όσον αφορά τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων ελαστικής και ανελαστικής διαφέρουν σημαντικά. Στην ελαστική μέθοδο αστοχεί το 63% των δοκών και το 69% των υποστυλώματων. Συνολικά αστοχεί το 65% των στοιχείων φέροντος οργανισμού. Στην ανελαστική στατική- pushover ανάλυση, στην ορθογωνική κατανομή $-F_x+0.3F_z$ στην δεύτερη στάθμη επιτελεστικότητας

αστοχεί το 92% των δοκών και το 37% των υποστλωμάτων. Όσον αφορά τις μεθόδους ενίσχυσης, με μανδύα, ΙΟΠ και συνδυασμό μεθόδων (ΙΟΠ και μανδύα) η αντοχή της κατασκευής αυξάνεται και στις τρεις εναλλακτικές ενίσχυσης. Η V_b είναι μεγαλύτερη της αρχικής κατασκευής σε όλες τις περιπτώσεις ενίσχυσης και σε όλες τις κατανομές τριγωνικές και ορθογωνικές. Συγκρίνοντας τις μεθόδους ενίσχυσης, παρατηρείται η μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής να συμβαίνει στην ενίσχυση με μανδύα σκυροδέματος και μάλιστα συντριπτικά μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες μεθόδους ενίσχυσης. Μικρότερη αύξηση της αντοχής παρατηρείται στον συνδυασμό μεθόδων, με μανδύα και Ινοπλισμένα πολυμερή, σε σχέση με τον μανδύα σκυροδέματος, ενώ ακόμα μικρότερη αύξηση παρατηρείται στην μέθοδο ενισχύσεων με Ινοπλισμένα Πολυμερή. Ενδεικτικά στην ορθογωνική διατομή $-F_z+0.3F_x$ στην αρχική $V_{bαρχική}$ η αντοχή ήταν 416kN, κατόπιν της ενίσχυσης με ΙΟΠ αυξήθηκε με $V_{bΙΟΠ}=792$ kN, στην περίπτωση της ενίσχυσης με συνδυασμό μεθόδων $V_{bσυνδ}=1145$ kN και τέλος στην περίπτωση ενίσχυσης με μανδύα η $V_{bμανδύα}$ έγινε 1737 kN. Άρα ενώ στην περίπτωση ενίσχυσης με ΙΟΠ η τέμνουσα διπλασιάστηκε, στην περίπτωση του μανδύα τετραπλασιάστηκε σε σχέση με την αρχική κατασκευή. Παρακάτω παρουσιάζεται η καμπύλη ικανότητας της ορθογωνικής κατανομής, όπου αποτυπώνονται τα παραπάνω.



Γράφημα 1: Σύγκριση καμπυλών ικανότητας – Τριγωνική κατανομή $F_x+0.3F_z$

Επίσης, παρατηρείται ότι οι συνολικές μετακινήσεις είναι αρκετά μικρότερες στην περίπτωση των ΙΟΠ σε σχέση με τις συνολικές μετακινήσεις των άλλων μεθόδων ενίσχυσης. Συνεπώς παρατηρούμε ότι ενώ η ενίσχυση με ΙΟΠ γενικά δεν επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της διατομής, μπορεί να επηρεάσει την ικανότητα της κατασκευής να αναπτύξει μετακινήσεις.



Γράφημα 2: Σύγκριση καμπυλών ικανότητας – Ορθογωνική κατανομή $-F_z+0.3F_x$

Σχετικά με το κόστος των ενισχύσεων, οι μέθοδοι ενισχύσεων που έχουν επιλεγεί για το συγκεκριμένο οικοδομήμα έχουν αρκετές διαφορές. Το ενδεικτικό κόστος ενισχύσεων για την υπό μελέτη κατασκευή με βάση τα αποτελέσματα των ανελαστικών αναλύσεων είναι: α) Μανδύας εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 66.000 € β) Ινοπλισμένα πολυμερή: 43.500 € γ) Συνδυασμός μεθόδων: 53.500 €. Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους δεν είναι απολύτως σαφές εάν υπάρχει οικονομικότερη λύση. Οι παράγοντες που καθορίζουν το κόστος είναι αρκετοί. Σε κάθε περίπτωση χρειάζεται να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή σε κάθε κτίριο ξεχωριστά, εντοπίζοντας τις ιδιαιτερότητές του. Στο κόστος αυτό μάλιστα δεν συνυπολογίζονται άλλες επεμβάσεις ή αποκαταστάσεις που πιθανόν θα χρειαστούν στο κτίριο, όπως η αποκατάσταση του σκυροδέματος στις περιπτώσεις αποσάθρωσης και οξείδωσης των οπλισμών, κάτι που είναι σύνηθες σε κατασκευές αυτής της παλαιότητας.

Συμπεράσματα

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για την ελαστική και ανελαστική ανάλυση, παρατηρούμε τα παρακάτω:

- Συμπερασματικά, η ανεπάρκεια στις δοκούς είναι μεγαλύτερη κατά την εκτέλεση της ανελαστικής ανάλυσης και μικρότερη στα υποστυλώματα σε σχέση με την ελαστική μέθοδο.
- Σχετικά με τα αποτελέσματα της pushover ανάλυσης, οι περισσότερες πλαστικές αρθρώσεις δημιουργούνται στα άκρα των δοκών. Άρα πρώτα αστοχούν οι δοκοί και στη συνέχεια τα υποστυλώματα κάτι το οποίο θέλουμε καθώς ικανοποιείται η απαίτηση του ικανοτικού σχεδιασμού.
- Τόσο στην ελαστική όσο και στην ανελαστική ανάλυση είναι προφανές ότι απαιτείται η ενίσχυση πολλών δομικών στοιχείων. Υπάρχει μεγάλη πιθανότητα τέτοιες κατασκευές όπως το κτίριο που μελετάμε, οι οποίες έχουν μελετηθεί και κατασκευαστεί με τον πρώτο Αντισεισμικό του 1959 να παρουσιάζουν μεγάλες ανεπάρκειες. Κάτι που οδηγεί σε συνολική ενίσχυση του κτιρίου. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη και η προσθήκη τοιχείων ή νέων στοιχείων. Όπως είναι φυσικό ενισχύσεις τέτοιας κλίμακας τείνουν να γίνουν οικονομικά ασύμφορες για τον ιδιοκτήτη και έτσι πολλές φορές επιλέγεται η κατεδάφιση του κτιρίου, στις περιπτώσεις που γίνεται, αντί για την ενίσχυσή του.
- Συγκρίνοντας τις μεθόδους ενίσχυσης, είναι προφανές ότι η μέθοδος του μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος ενίσχυσης αυξάνει σε συντριπτικά μεγαλύτερο βαθμό την αντοχή της κατασκευής σε σχέση με τις άλλες μεθόδους. Βέβαια αποτελεί μία ακριβή λύση. Αντίθετα, η μέθοδος ενίσχυσης με ΙΟΠ προσφέρει μικρότερη αύξηση της αντοχής, αλλά είναι οικονομικότερη λύση.
- Η ενίσχυση με ΙΟΠ γενικά δεν επηρεάζει τα χαρακτηριστικά των διατομών. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι πιθανό η ενίσχυση κυρίως υποστυλωμάτων με ινοπλισμένα πολυμερή να επηρεάσει την ικανότητα της κατασκευής να αναπτύξει μετακινήσεις.
- Υπό συγκεκριμένες συνθήκες είναι πιθανό ο συνδυασμός των μεθόδων ενίσχυσης να αποτελεί την βέλτιστη λύση. Ο λόγος είναι ότι υπάρχει η δυνατότητα αύξησης της αντοχής στα στοιχεία που υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη μέσω της ενίσχυσης με μανδύα σκυροδέματος, και στα υπόλοιπα στοιχεία μέσω των ΙΟΠ. Έτσι, μπορεί να συνδυαστεί η ικανοποιητική αύξηση της αντοχής με την οικονομική λύση.

Η αποτίμηση και ο ανασχεδιασμός υφιστάμενων κτιρίων αποτελεί ένα πρόβλημα το οποίο έχει πολλές ιδιαιτερότητες και παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να μπορέσει να επιλυθεί. Για να μπορέσουμε να εξάγουμε την βέλτιστη λύση ενίσχυσης απαιτείται η ενδελεχής διερεύνηση του οικοδομήματος αλλά και η ύπαρξη μελετητή μηχανικού με εμπειρία στην αποτίμηση υφιστάμενων κατασκευών.

Introduction

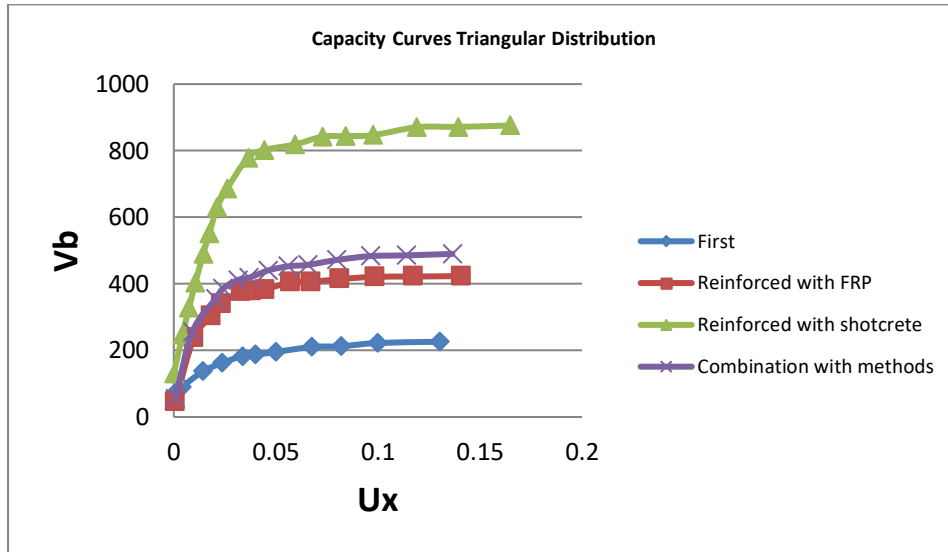
The thesis deals with the assessment of the seismic behavior of an existing two-storey reinforced concrete building, for which the static study and construction was carried out in the year 1961. Taking into account the fact that Greece is a particularly seismic country, the existence of the anti-earthquake regulations is considered necessary. In addition to the existence, a key part is the application of the anti-seismic regulations to new and old constructions, as many times due to failures in the construction, the static adequacy of the construction can be affected and by extension there is a risk of loss of human life. There are many problems that make it difficult to apply the anti-seismic regulations, in terms of design and application/construction in existing buildings. The most basic of these are: the age of the buildings, insufficient maintenance, arbitrary construction and the cost of reinforcement. The normative provisions of Eurocode 8, the Intervention Regulation and the Greek Anti-Seismic Regulation are used from the literature, as these regulations form the theoretical background for the valuation studies. The valuations and redesigns of existing buildings were studied from the literature, such as the behavior valuation of an existing school, a five-story building and an apartment building. The purpose of the work is the valuation of an existing building with the two methods of analysis, elastic and inelastic, and the comparison of the above methods. The aim is to draw conclusions about the general behavior of the building under study against seismic actions in both cases and then to propose the appropriate ways of strengthening it and to carry out a pre-quotations of the reinforcements resulting from the analysis method. Specific reinforcement methods are applied, but also a combination of methods. The results of the methods are compared, regarding their effectiveness in each analysis, in order to increase the strength of the building, their advantages and disadvantages. The final goal of the work is to choose the best reinforcement method, regarding the seismic behavior of the building and the cost of reinforcement.

Methodology

Scada Pro software from ACE Hellas was used for the assessment and redesign of the construction. Initially the two-story structure is simulated in the program, entering the cross-sections, characteristics and qualities of the elements of the load-bearing body. Then the loads are introduced into the carrier and the analysis of the structure follows. The objective of the seismic assessment is B1 and the Data Confidence Level is 'Satisfactory'. This is followed by the initial pre-dimensioning of the reinforcement based on Eurocode 2 and then the reinforcement is modified, introducing the existing reinforcement in each element. After completing the above steps, the next step is the pre-check of the building or otherwise a preliminary elastic dynamic analysis based on which we check the morphological regularity, the higher singularities and based on the above we choose the analysis method to be followed. For educational reasons, both elastic and inelastic analysis methods were performed. Next comes the elastic dynamic analysis and the inelastic. The results of both methods and the failures that occur in each case in each element, in the columns and in the beams, are presented in detail. Specific reinforcement methods are applied, but also a combination of methods. Specifically, the redesign of the structure is presented in both analyses, with FRP (fiber reinforced polymers) reinforcement, shotcrete jacket and a combination of the two reinforcement methods Selected Results.

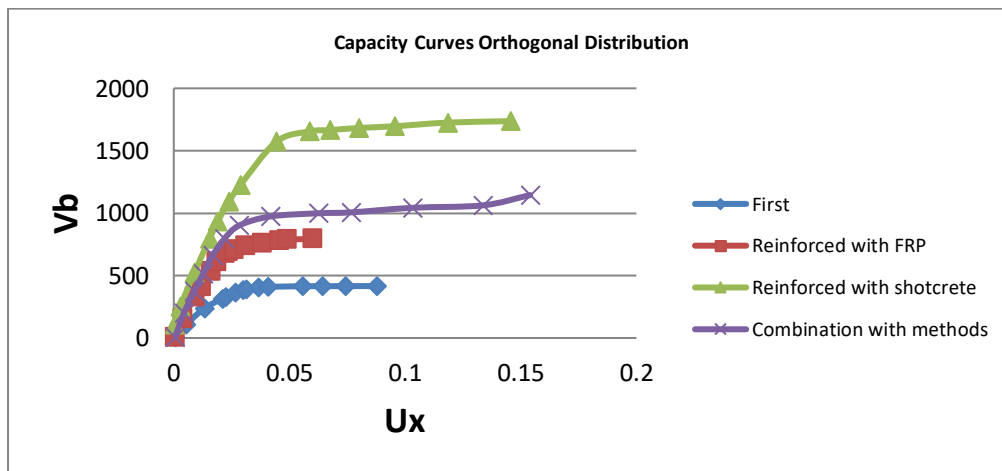
Regarding the results of the two elastic and inelastic methods, they differ significantly. In the elastic method, 63% of beams and 69% of columns fail. In total, 65% of the elements of a carrier organization fail. In the inelastic static-pushover analysis, in the orthogonal distribution $-F_x+0.3F_z$ in the second performance level 92% of the beams and 37% of the columns fail. Regarding the reinforcement methods, with jacket, FRP and a combination of methods (FRP and jacket) the strength of the structure increases in all three reinforcement alternatives. V_b is greater than the original construction in all reinforcement cases and in all triangular and rectangular distributions. Comparing the strengthening methods, it is observed that the greatest increase in strength occurs in concrete jacket strengthening and in fact overwhelmingly greater than the other strengthening methods. A smaller increase in strength is observed in the combination of methods, with mantle and fiber-reinforced polymers, in relation to the concrete mantle, while an even smaller increase is observed in the reinforcement method with fiber-reinforced polymers. Indicatively in the rectangular cross-section $-F_z+0.3F_x$ in the initial V_b the initial strength was 416kN, after the reinforcement

with FRP it increased with $V_{bFRP}=792$ kN, in the case of reinforcement with a combination of methods $V_{bsyn}=1145$ kN and finally in the case of reinforcement with a mantle V_b became the mantle 1737 kN. So while in the case of reinforcement with IOP the intersection doubled, in the case of the mantle it quadrupled compared to the original construction. Below is the Capacity curve of the orthogonal distribution, where the above is captured.



Graph 1: Comparison of Capacity Curves – Triangular Distribution $F_x+0.3F_z$

It is also observed that the total movements are considerably smaller in the case of FRPs compared to the total movements of the other reinforcement methods. We therefore observe that while FRP reinforcement generally does not affect the cross-sectional characteristics, it can affect the ability of the structure to develop displacements



Graph 2: Comparison of Capacity Curves – Orthogonal Distribution $-F_z+0.3F_x$

Regarding the cost of the reinforcements, the methods of reinforcements chosen for the specific building have several differences. The indicative support costs for the construction under study based on the results of the inelastic analyzes are: a) Shotcrete mantle: €66,000 b) Fiber reinforced polymers: €43,500 c) Combination of methods: €53,500. Comparing the two methods it is not entirely clear whether there is a more economical solution. The factors that determine the cost are several. In any case, special attention needs to be paid to each building separately, identifying its peculiarities. In fact, this cost does not include other interventions or restorations that may be needed in the building, such as the restoration of the concrete in cases of crumbling and oxidation of the reinforcements, which is common in constructions of this age.

Conclusions

Comparing the results for the elastic and inelastic analysis, we observe the following:

- In conclusion, the failure in the beams is greater when performing the inelastic analysis and less in the columns compared to the elastic method. - Regarding the pushover analysis results, most plastic joints are created at the ends of the beams. So the beams fail first and then the columns which is what we want as the capacity design requirement is met. - In both elastic and inelastic analysis it is obvious that reinforcement of many structural elements is required. There is a high probability that such constructions as the building we are studying, which have been designed and built with the first Antiseismic of 1959, present major deficiencies. Which leads to an overall strengthening of the building. In some cases it is also necessary to add walls or new elements. Naturally, reinforcements of such a scale tend to become financially unprofitable for the owner, and so the demolition of the building is often chosen, in cases where it is done, instead of its reinforcement. - Comparing the reinforcement methods, it is evident that the reinforced shotcrete jacket method overwhelmingly increases the strength of the structure compared to the other methods. Of course, it is an expensive solution. In contrast, the FRP reinforcement method offers a smaller increase in strength, but is a more economical solution. - Reinforcement with FRP generally does not affect the characteristics of the cross-sections. In some cases it is possible that the reinforcement of mainly columns with fiber-reinforced polymers affects the ability of the structure to develop movements. - Under specific conditions, it is possible that the combination of reinforcement methods is the optimal solution. The reason is that there is the possibility of increasing the strength of the elements that are most needed through reinforcement with a concrete jacket, and of the remaining elements through FRPs. Thus, the satisfactory increase in strength can be combined with the economical solution. The valuation and redesign of existing buildings is a problem that has many peculiarities and parameters that must be taken into account in order to be able to solve it. In order to be able to extract the optimal reinforcement solution, a thorough investigation of the building is required, as well as the existence of an engineer with experience in the assessment of existing structures.