

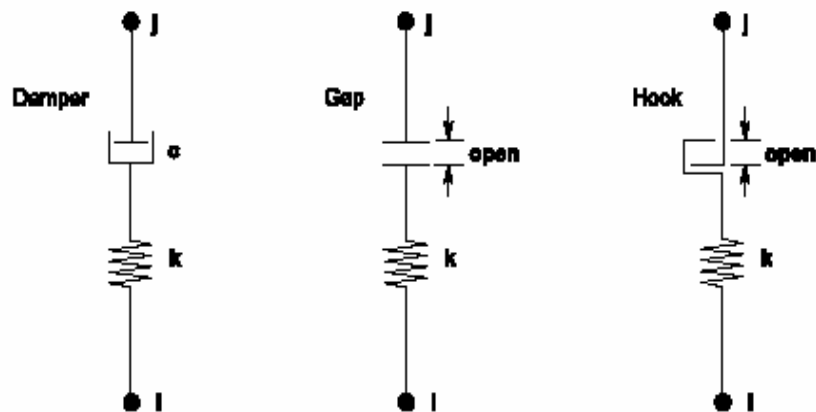
8. ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ "SAP 2000"

8.1 Γενικά

Το πρόγραμμα, "SAP 2000", έχει την δυνατότητα προσομοίωσης μόνο ορισμένων μη γραμμικών δομικών στοιχείων, και για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα "Nlink elements " (μη γραμμικά στοιχεία). Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά μόνο κατά την μη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας. Σε οποιαδήποτε άλλη ανάλυση το στοιχείο αυτό συμπεριφέρεται γραμμικά με τις ενεργές τιμές των ιδιοτήτων του.

Το μη γραμμικό στοιχείο μονωτήρα μπορεί να αποτελείται είτε από δύο κόμβους ή από έναν μόνο κόμβο, θεωρώντας το έδαφος ως τον δεύτερο. Κάθε στοιχείο θεωρείται ότι αποτελείται από έξι διαφορετικά "ελατήρια", ένα για κάθε βαθμό ελευθερίας. Η μη-γραμμική σχέση δύναμης-παραμόρφωσης, των ελατηρίων αυτών μπορεί να είναι ανεξάρτητη σε κάθε διεύθυνση ή εξαρτημένη, ανάλογα με το είδος της συμπεριφοράς που προσομοιώνεται. Τα είδη μη γραμμικής συμπεριφοράς που μπορούν να προσομοιωθούν από το "Nlink element " είναι τα εξής:

- Ιξωελαστική απόσβεση (damper)
- Μηχανισμός "Gap" (κενό), που ενεργοποιείται μόνο υπό θλίψη, και μηχανισμός "Hook" (άγκιστρο), που ενεργοποιείται μόνο στον εφελκυσμό.
- Μονοαξονική πλαστικότητα. (Uniaxial plasticity)
- Διαξονικός πλαστικός μονωτήρας (Biaxial-plasticity base isolator)
- Μονωτήρας εκκρεμούς τριβής (Friction-pendulum base isolator)



Σχήμα 8.1 Στοιχεία Dumper, Gap και Hook, για αξονική παραμόρφωση

Οι μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα "SAP 2000" για την προσομοίωση των μη-γραμμικών αυτών στοιχείων, παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

8.2 Στοιχείο "Damper" : Αποσβεστήρας

Οι ιδιότητες απόσβεσης σ' αυτά τα στοιχεία, βασίζονται στο ιξωελαστικό μοντέλο του Maxwell, έχοντας έναν μη-γραμμικό αποσβεστήρα σε σειρά με ένα ελατήριο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.1.

Η μη γραμμική σχέση δύναμης-παραμόρφωσης εκφράζεται με την εξίσωση:

$$f = k d_k = c \dot{d}_c^{\text{exp}} \quad (8.1)$$

όπου το k είναι η σταθερά του ελατηρίου, c είναι ο συντελεστής απόσβεσης, c_{exp} είναι ο εκθέτης απόσβεσης, d_k είναι η μετατόπιση του ελατηρίου, και \dot{d}_c είναι ο ρυθμός μεταβολής της μετατόπισης του αποσβεστήρα. Η συνολική παραμόρφωση του μη-γραμμικού στοιχείου είναι:

$$d = d_k + d_c \quad (8.2)$$

8.3 Στοιχείο "Gap" : Κενού

Στα στοιχεία αυτά όλες οι εσωτερικές μετατοπίσεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Το άνοιγμα ή το κλείσιμο ενός στοιχείου gap δεν επηρεάζει την συμπεριφορά των άλλων μετατοπίσεων.

Η μη-γραμμική σχέση δύναμης-μετατόπισης δίνεται από την εξίσωση:

$$f = \begin{cases} k \cdot (d + open) & \text{if } d + open < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8.3)$$

όπου k είναι η σταθερά του ελατηρίου, και $open$ το αρχικό κενό που πρέπει πάντα να είναι ίσο με μηδέν ή με έναν οποιοδήποτε θετικό αριθμό.

8.4 Στοιχείο "Hook" : Άγκιστρο

Στα στοιχεία αυτά όλες οι εσωτερικές μετατοπίσεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Το άνοιγμα ή το κλείσιμο ενός στοιχείου gap δεν επηρεάζει την συμπεριφορά των άλλων μετατοπίσεων.

Η μη-γραμμική σχέση δύναμης-μετατόπισης δίνεται από την εξίσωση:

$$f = \begin{cases} k \cdot (d - open) & \text{if } d - open < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8.4)$$

όπου k είναι η σταθερά του ελατηρίου, και $open$ το αρχικό κενό που πρέπει πάντα να είναι ίσο με μηδέν ή με έναν οποιοδήποτε θετικό αριθμό.

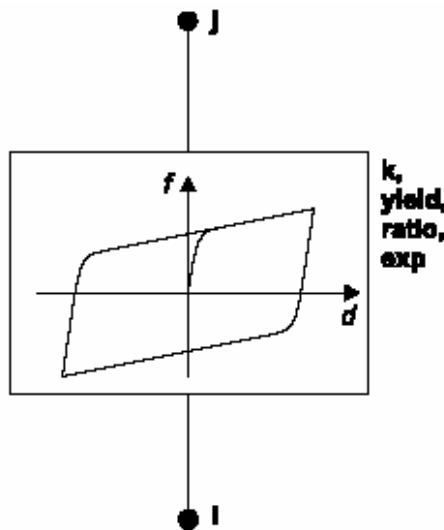
8.5 Στοιχείο "Plastic 1" : Πλαστικό Στοιχείο

Το πρόγραμμα "Sap 2000" χρησιμοποιεί για την προσομοίωση αυτών των στοιχείων, το μοντέλο με υστερητικής συμπεριφοράς, όπως αυτό διατυπώθηκε από τον Wen

(1976) και το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6. Η συμπεριφορά του μονοαξονικού αυτού υστερητικού προσομοιώματος, φαίνεται στο Σχήμα 8.2, και η εξίσωση που περιγράφει την μη-γραμμική σχέση δύναμης-παραμόρφωσης είναι η εξής:

$$f = \alpha k d + (1 - \alpha) F_y Z \quad (8.5)$$

όπου k είναι η σταθερά του ελατηρίου, F_y η δύναμη διαρροής, α είναι ο λόγος της μετελαστικής προς την ελαστική δυσκαμψία, και Z μια αδιάστατη υστερητική παράμετρος. Μελετώντας την σχέση αυτή, παρατηρούμε ότι είναι πανομοιότυπη με την εξίσωση του Wen, που διατυπώθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.



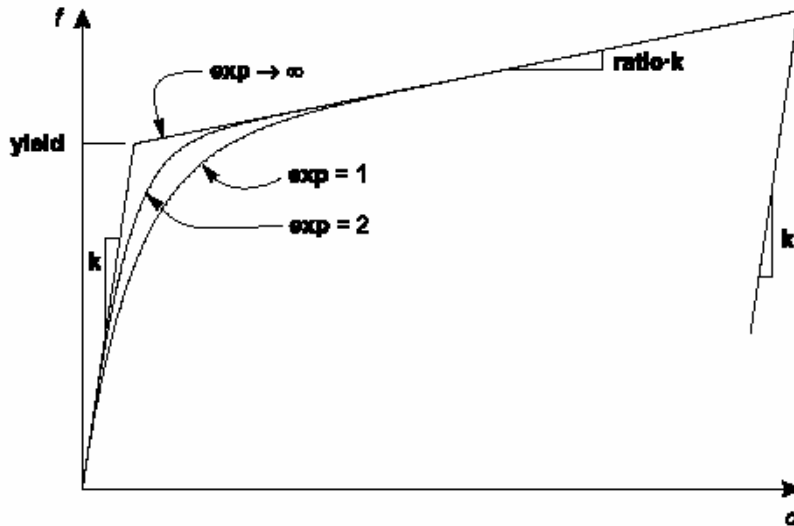
Σχήμα 8.2 Στοιχείο "Plastic 1" (Μονοδιαστατη υστερητική συμπεριφορά)

Η υστερητική μεταβλητή Z παίρνει τιμές που κυμαίνονται στο ± 1 (δηλ. $|Z| \leq 1$). Στη φάση διαρροής είναι $|Z| = 1$, ενώ η αρχική τιμή του Z είναι μηδέν και εξελίσσεται σύμφωνα με την διαφορική εξίσωση:

$$\dot{Z} = \frac{k}{F_y} \begin{cases} \dot{d}(1 - |Z|^{\text{exp}}) & \text{if } \dot{d} Z > 0 \\ \dot{d} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8.6)$$

όπου exp είναι ένας εκθέτης μεγαλύτερος ή ίσος της μονάδας. Μεγαλύτερες τιμές του εκθέτη αυτού, αυξάνουν απότομα την διαρροή όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.3.

Πρακτικά, η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο εκθέτης \exp είναι 20. Η εξίσωση του \dot{Z} είναι ισοδύναμη με εκείνη του Wen, υπό τον όρο ότι $A=1$ και $\alpha=\beta=0.5$.



Σχήμα 8.3 Καθορισμός των παραμέτρων του στοιχείου "Plastic 1"

8.6 Στοιχείο "Isolator 1" : Ελαστομεταλλικό εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου (L.R.B.)

Πρόκειται για ένα στοιχείο σεισμικής μόνωσης με διαξονική υστερητική συμπεριφορά. Δύο από τις έξι εσωτερικές παραμορφώσεις του, έχουν μη γραμμική συμπεριφορά, ενώ οι υπόλοιπες τέσσερις συμπεριφέρονται γραμμικά. Μη γραμμική συμπεριφορά παρουσιάζουν οι δυνάμεις επαναφοράς κατά τους τοπικούς άξονες 2 και 3 (Σχήμα 8.4), και η αλληλεπίδρασή τους φαίνεται από τις σχέσεις:

$$f_{u2} = \alpha_2 k_2 d_{u2} + (1 - \alpha_2) F_{y2} Z_2 \quad (8.7)$$

$$f_{u3} = \alpha_3 k_3 d_{u3} + (1 - \alpha_3) F_{y3} Z_3 \quad (8.8)$$

όπου k_2 και k_3 είναι οι ελαστικές δυσκαμψίες κατά τους τοπικούς άξονες 2 και 3 αντίστοιχως, F_{y2} και F_{y3} είναι οι αντίστοιχες δυνάμεις διαρροής, α_2 και α_3 είναι οι λόγοι της μετελαστικής προς την ελαστική δυσκαμψία αντίστοιχα για κάθε άξονα, και Z_2 και

Z_3 οι αντίστοιχες υστερητικές μεταβλητές. Η τιμή των μεταβλητών Z_2 και Z_3 κυμαίνεται σύμφωνα με την σχέση $\sqrt{Z_2^2 + Z_3^2} \leq 1$ και στην φάση διαρροής ισχύει $\sqrt{Z_2^2 + Z_3^2} = 1$. Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών αυτών είναι μηδενικές, ενώ εξελίσσονται σύμφωνα με τις διαφορικές εξισώσεις:

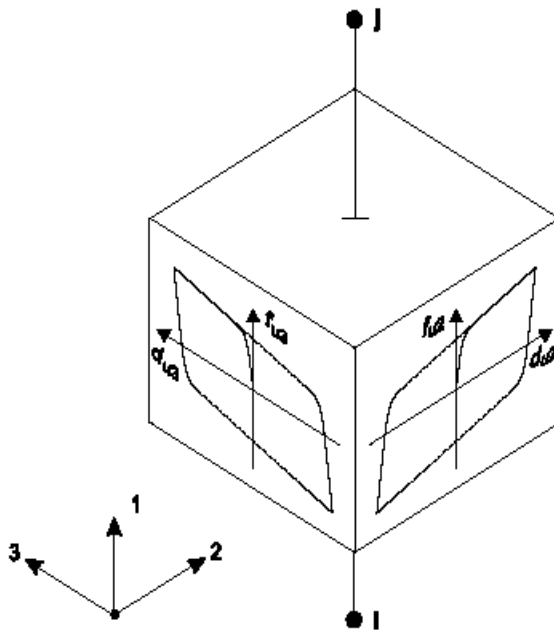
$$\begin{Bmatrix} \dot{Z}_2 \\ \dot{Z}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \alpha_2 Z_2^2 & -\alpha_3 Z_2 Z_3 \\ -\alpha_2 Z_2 Z_3 & 1 - \alpha_3 Z_3^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{k_2}{F_{y2}} \dot{d}_{u2} \\ \frac{k_3}{F_{y3}} \dot{d}_{u3} \end{Bmatrix} \quad (8.9)$$

όπου:

$$\alpha_2 = \begin{cases} 1 & \text{if } \dot{d}_{u2} Z_2 > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \alpha_3 = \begin{cases} 1 & \text{if } \dot{d}_{u3} Z_3 > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8.10)$$

οι εξισώσεις αυτές είναι ισοδύναμες με αυτές των *Park*, *Wen* και *Ang*, υπό την προϋπόθεση ότι $A=1$ και $\beta=\gamma=0.5$

Η αξονική παραμόρφωση καθώς και οι τρεις καμπτικές παραμορφώσεις, προσομοιάζονται με γραμμικά ελατήρια.



Σχήμα 8.4 "Isolator 1", LRB (Διαξονική παραμόρφωση)

8.7 Στοιχείο "Isolator 2" : Μονωτήρας Εκκρεμούς Τριβής (Friction Pendulum)

Πρόκειται για ένα διαξονικό στοιχείο σεισμικής μόνωσης, με συμπεριφορά τριβής. Αυτό το μοντέλο τριβής βασίζεται στο υστερητικό μοντέλο που πρότεινε ο Wen (1976), και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε από τους Nagarajaiah, Reinhorn και Constantinou (1986) για την ανάλυση της σεισμικής μόνωσης. Η συμπεριφορά του εκκρεμούς (Pendulum) προτάθηκε από τους Zayas και Low το 1990.

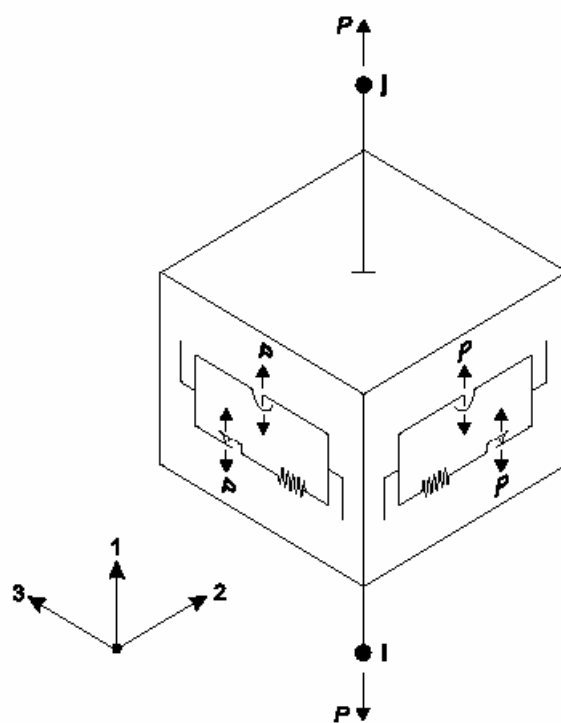
Οι δυνάμεις τριβής και οι δυνάμεις του εκκρεμούς είναι ευθέως ανάλογες της θλιπτικής αξονικής δύναμης που ασκείται στο στοιχείο. Το στοιχείο βέβαια δεν μπορεί να αναλάβει αξονικό εφελκυσμό και ανασηκώνεται. Η αξονική δύναμη, P , είναι πάντα μη γραμμική και δίνεται από την σχέση:

$$P \equiv f_{u1} = \begin{cases} k_1 d_{u1} & \text{if } d_{u1} < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8.11)$$

Αν και οι δύο διατμητικοί βαθμοί ελευθερίας είναι μη γραμμικοί, τότε η επίδραση της τριβής και του εκκρεμούς, για κάθε διατμητική παραμόρφωση (δηλ. και κατά τον τοπικό άξονα 2 και κατά τον τοπικό άξονα 3), δρα εν παραλλήλω:

$$f_{u2} = f_{u2f} + f_{u2p} \quad (8.12)$$

$$f_{u3} = f_{u3f} + f_{u3p} \quad (8.13)$$



Σχήμα 8.5 "Isolator 2", FPS (Friction Pendulum)