VERIFICA DI EDIFICI ESISTENTI IN CEMENTO ARMATO

Catania, 25 giugno – 2 luglio 2019

10 – Risposta sismica: analisi non lineare

Docente del corso

AURELIO GHERSI

Corso organizzato da: FONDAZIONE DELL'ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI CATANIA

Verifica di strutture esistenti

con analisi non lineare

- Valutazione della risposta dinamica non lineare, cioè integrazione delle equazioni del moto:
  - È troppo complicata e di difficile interpretazione (almeno con conoscenze e mezzi odierni)

    - Occorrono programmi specifici, diffusi in ambito di ricerca ma non orientati all'attività professionale
    - Occorre fornire come input degli accelerogrammi, e non è facile scegliere quanti e quali
    - La modellazione è complessa ed influenza in maniera rilevante i risultati
    - La quantità di risultati fornita è molto elevata (si ottiene la risposta istante per istante) e ciò rende difficile la loro interpretazione

Verifica di strutture esistenti

con analisi non lineare

- Valutazione della risposta dinamica non lineare, cioè integrazione delle equazioni del moto:
  - È troppo complicata e di difficile interpretazione (almeno con conoscenze e mezzi odierni)

- È possibile sostituirla con una analisi statica non lineare (cioè applicare forze statiche e farle crescere, fino al collasso)?
  - In che modo si può fare?
  - Con quale affidabilità?

Verifica di strutture esistenti

con analisi statica non lineare

Problemi (specifici):

- I risultati dell'analisi non lineare dipendono dalla storia di carico
  - Anche se conoscessi l'entità delle forze in un determinato istante non potrei essere certo del loro effetto, che dipende da come sono variate le forze in istanti precedenti

  – Questo problema non è risolubile
  – Comunque si ritiene che l'errore sia accettabile, almeno rispetto alle altre approssimazioni.
  … sarà vero?

Verifica di strutture esistenti

con analisi statica non lineare

Problemi (specifici):

- Quale accelerazione sismica corrisponde ad un dato valore delle forze?
  - Nelle analisi lineari il valore delle forze è proporzionale all'accelerazione sismica
  - Nelle analisi non lineari questo non è vero

  – Sono stati proposti numerosi criteri per mettere in relazione le forze (o meglio gli spostamenti) all'accelerazione sismica

  … ma criteri diversi portano a risultati abbastanza diversi

Verifica di strutture esistenti

con analisi statica non lineare

Problemi (specifici):

- Quale distribuzione di forze utilizzare per simulare l'effetto del sisma?
  - Nelle analisi lineari si fa riferimento al primo modo (o ad una distribuzione che si avvicina) oppure si considerano più insiemi di forze

    – È stato proposto di usare almeno due insiemi di forze, ma sono stati proposti anche altri criteri per tener conto del contributo dei diversi modi

    … ma tutto questo complica operativamente e confonde le idee, senza dare certezze

Verifica di strutture esistenti

con analisi statica non lineare

Problemi (specifici):

- In che modo esaminare strutture non simmetriche, con rilevante comportamento rotazionale?
  - L'analisi statica non lineare è stata proposta sostanzialmente con riferimento a schemi piani
  - Il comportamento dinamico lineare esalta gli effetti rotazionali. E quello non lineare?

  – Sono stati proposti criteri per cogliere il comportamento rotazionale non lineare

  … ma ancora non vi sono certezze

Verifica di strutture esistenti

con analisi statica non lineare

Problemi (generali):

- Che influenza hanno sul risultato le varie incertezze citate?
  - Incertezze sulla resistenza
  - Incertezze sulla rigidezza
  - Incertezze sulla capacità deformativa
  - Incertezze sul modello (influenza degli elementi non strutturali, modellazione della scala, ecc.)

  – Alcuni aspetti possono essere trattati con approccio probabilistico, ma altri richiedono una valutazione basata sull'esperienza, molto soggettiva

Verifica di strutture esistenti

con analisi statica non lineare

- L'analisi statica non lineare può essere usata per avere una risposta "secca":
  la struttura ce la fa oppure no?

  – Si valuta la risposta non lineare fino al collasso (capacità della struttura)
  – Si confronta la capacità con la domanda che corrisponde ad un assegnato evento sismico

Tipico risultato: la struttura può sopportare solo il xx% dell'azione sismica richiesta

⬇

Tanto lavoro per una risposta banale e molto opinabile

Verifica di strutture esistenti

con analisi statica non lineare

- L'analisi statica non lineare potrebbe essere usata per avere una risposta probabilistica, seguendo le istruzioni CNR-DT 212/2013:
  - Che probabilità ha la struttura di sopportare un qualsiasi valore di a_g?

Si ottiene in sostanza la curva di fragilità della struttura

Unendola alla curva di pericolosità si può determinare la frequenza media annua di superamento dello SL

⬇

Tanto lavoro per una risposta ancora meno comprensibile

Verifica di strutture esistenti

con analisi statica non lineare

- L'analisi statica non lineare può essere usata per capire come varia la risposta della struttura al crescere dell'azione sismica

  - Si valuta la risposta non lineare fino al collasso
  - Si individua cosa succede nella struttura per ciascun valore dell'azione sismica

⬇

In questo modo si possono individuare i punti deboli della struttura e si può cercare di capire quanto influiscono le inevitabili incertezze nella conoscenza

Verifica di strutture esistenti

con analisi statica non lineare

- L'analisi può essere ripetuta più volte facendo variare i parametri incerti o la modellazione per quantizzare numericamente l'effetto di queste scelte

  - Ogni analisi fornisce indicazioni sul comportamento ed un valore numerico dell'accelerazione che porta al raggiungimento del limite SLV (o SLC)
  - Si può dare un "peso" numerico che indica quanto riteniamo plausibile il modello

⬇

La valutazione numerica finale deve rappresentare una media pesata del giudizio ottenuto con le varie analisi

Verifica di strutture esistenti

con analisi statica non lineare

- Analisi ripetuta più volte
- Peso numerico assegnato a ciascuna analisi
- Valutazione complessiva come media pesata
  - Quanto è soggettivo?
  - Come procedere per garantire maggiore oggettività (e possibilità di controllo)?

⬇

In assenza di indicazioni normative, cercare di creare un protocollo applicativo, discutendone tra professionisti esperti (anche in questa occasione)

Indicare chiaramente nella relazione le scelte fatte in modo da consentirne la valutazione e la replicabilità

Verifica di strutture esistenti

con analisi statica non lineare

Fasi del procedimento

1. Definizione del modello della struttura
2. Analisi pushover (valutazione del comportamento sotto forze crescenti)
3. Associazione di una qualsiasi fase della pushover ad un valore dell'accelerazione sismica
4. Giudizio sul comportamento della struttura in una qualsiasi fase della pushover (e quindi per un valore dell'accelerazione sismica)

Ma, insieme e al di sopra di questo

- Tutte le incertezze citate

Fasi del procedimento

1. Definizione del modello della struttura

Modellazione strutturale

per tener conto del comportamento non lineare

Si possono usare due modelli differenti:

- Modelli a plasticità concentrata
  - Sono i modelli usati normalmente nell'attività professionale
  - Relativamente semplici, l'uso richiede comunque una certa esperienza
- Modelli a plasticità diffusa
  - Sono i modelli più usati a livello di ricerca
  - Molto potenti ma molto pesanti nel calcolo, possono presentare problemi

Modellazione strutturale

in analisi non lineari – plasticità concentrata

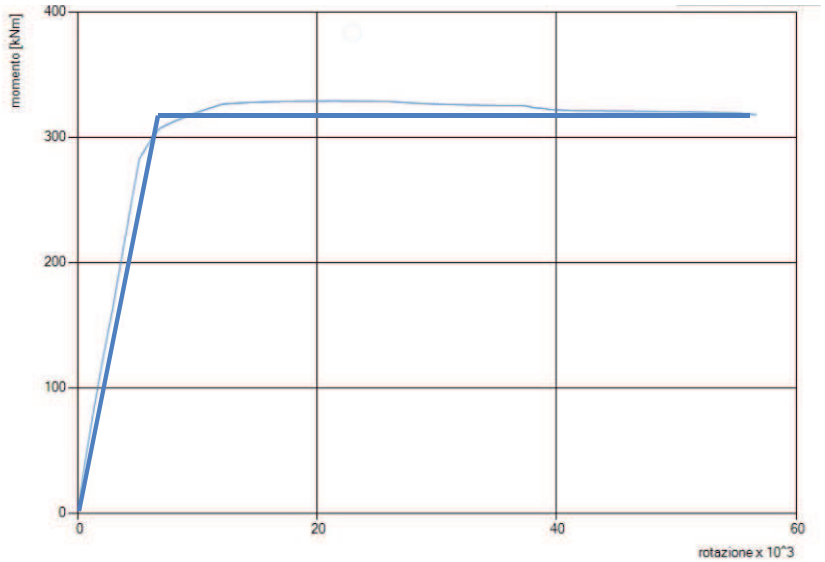
- Modelli a plasticità concentrata
  - Si valuta il comportamento della sezione (legame momento-curvatura)
  - Si schematizza il legame con un andamento elastico-perfettamente plastico
  - Quando si raggiunge il momento di plasticizzazione la sezione può ruotare liberamente, come se ci fosse una cerniera
    Quindi si incrementa progressivamente il carico, variando via via lo schema con formazione di cerniere
- Programmi che usano modelli a plasticità concentrata
  - La maggior parte dei programmi commerciali
  - È possibile usare il programma Tel 2016 (www.aghersi.it)

Modellazione strutturale

in analisi non lineari – plasticità concentrata

- Si può schematizzare il legame forza-spostamento (o momento-rotazione) con una bilatera
  - La pendenza del primo tratto fornisce la rigidezza
  - Il valore finale di questo tratto è il momento di plasticizzazione, per cui si forma la cerniera

- Per una trave la rigidezza è quasi indipendente dalla deformazione

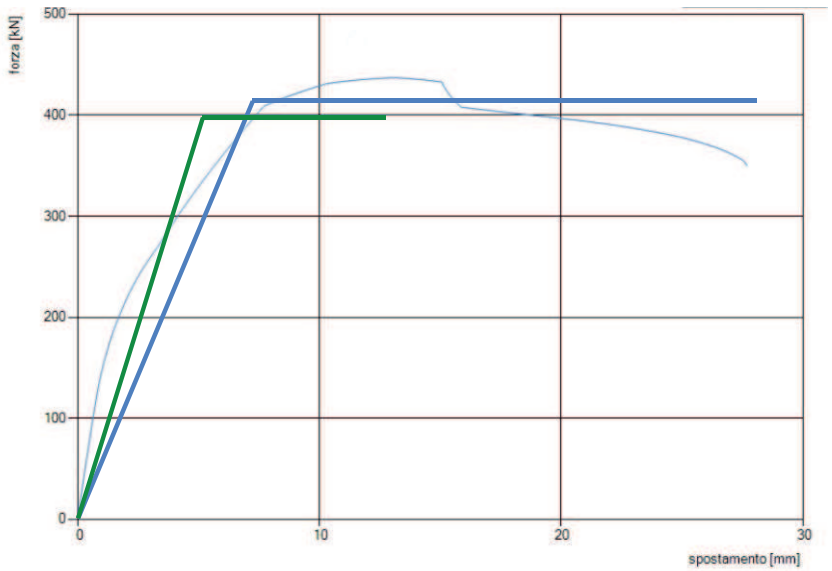


Modellazione strutturale

in analisi non lineari – plasticità concentrata

- Si può schematizzare il legame forza-spostamento (o momento-rotazione) con una bilatera
  - La pendenza del primo tratto fornisce la rigidezza
  - Il valore finale di questo tratto è il momento di plasticizzazione, per cui si forma la cerniera

- Per un pilastro la rigidezza dipende molto dall'entità dello spostamento



Modellazione strutturale

in analisi non lineari – plasticità diffusa

- Modelli a plasticità diffusa
  - Ogni asta è divisa in conci
  - Ciascun concio è descritto con un modello a fibre, con comportamento non lineare (analogo a quanto visto come legame momento-curvatura)
  - Nel progredire dell'analisi al crescere della deformazione varia la rigidezza e variano in maniera non lineare caratteristiche di sollecitazione e deformazioni

- Programmi che usano modelli a plasticità diffusa
  - A livello di ricerca si usa principalmente OpenSees
  - Ora presente anche in qualche programma commerciale

Modellazione strutturale

in analisi non lineari – plasticità diffusa

- Il modello tiene automaticamente conto della variazione progressiva della rigidezza al variare dei carichi
- È necessario che tutta l'asta sia modellata come elemento a plasticità diffusa
  - A volte per ridurre l'onere computazionale si considera a plasticità diffusa solo i tratti di estremità, ma questo vanifica in parte l'esattezza (rimane l'incertezza della rigidezza del tratto centrale)
- È necessario tener conto della maggior rigidezza dei tratti nodali
  - Non inserire tratti rigidi in corrispondenza dei nodi falsa il risultato

Modellazione strutturale

Quale resistenza?

- Sia nei modelli a plasticità concentrata che in quelli a plasticità diffusa occorre indicare quale resistenza usare rispettivamente negli estremi di aste o nei conci che si devono plasticizzare

Eurocodice 8-3
Prospetto 4.3

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
	Fragile	Verifiche (se LM è accettato):			In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.	In conformità alla sezione pertinente della EN 1998-1:2004.	
		Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.					
		Se $\rho_i > 1$: dall'equilibrio con la resistenza di e/m duttili. Si usano i valori medi delle proprietà moltiplicati per CF.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.				

EC8-3
Si devono usare i valori medi

Modellazione strutturale

Quale resistenza?

- Sia nei modelli a plasticità concentrata che in quelli a plasticità diffusa occorre indicare quale resistenza usare rispettivamente negli estremi di aste o nei conci che si devono plasticizzare

Eurocodice 8-3
Prospetto 4.3

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
		Verifiche (se LM è accettato): Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.			In termini di resistenza. Si usano i valori	In conformità alla	
			In termini di				

Ribadito da Circolare 2019, punto C8.7.2.2.3

Le sollecitazioni indotte dall'azione sismica sugli elementi/meccanismi sia duttili sia fragili, da utilizzare ai fini delle verifiche, sono quelle derivanti dall'analisi strutturale eseguita utilizzando i valori medi delle proprietà dei materiali.

Modellazione strutturale

Altri problemi

Oltre alle problematiche su come tenere conto del comportamento non lineare esistono altri problemi:

a. Tridimensionalità dello schema
b. Incertezze sulla posizione del centro di massa
c. Direzione dell'azione sismica

Modellazione strutturale

a. Tridimensionalità dello schema

- L'analisi statica non lineare è nata (ed è stata testata) per schemi piani
- A livello scientifico è ancora aperta la discussione su come tener conto della tridimensionalità dello schema in analisi statiche non lineari

- La normativa attuale non fornisce indicazioni
  - Nelle NTC08 veniva posto un limite alla applicabilità, legato alla massa partecipante, che è uno strattagemma per evitarne l'uso in casi con rilevante comportamento rotazionale
  - Le attuali NTC (punto 7.3.4.2) non citano più questi limiti

Modellazione strutturale

a. Tridimensionalità dello schema

- L'analisi statica non lineare è nata (ed è stata testata) per schemi piani
- A livello scientifico è ancora aperta la discussione su come tener conto della tridimensionalità dello schema in analisi statiche non lineari

- A livello scientifico esistono (almeno) due proposte
  - Fajfar:
    analisi pushover non rotazionale
    correzione in funzione dell'inviluppo modale
  - Ghersi et al:
    due analisi pushover, con eccentricità "correttiva"

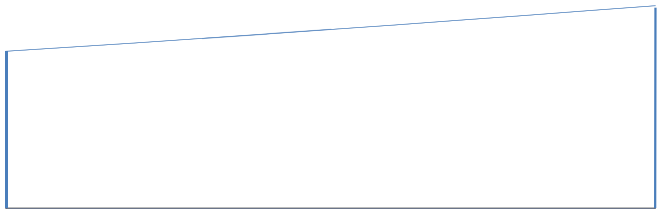
Più semplice operativamente

Modellazione strutturale

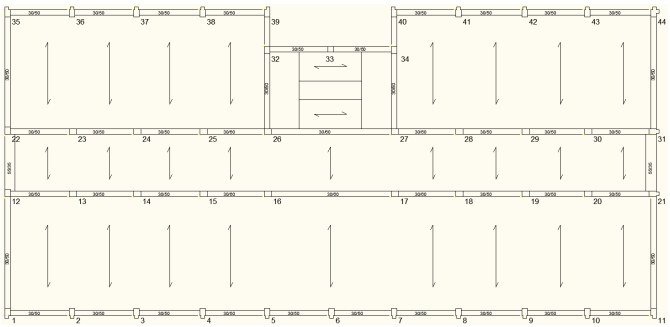
a. Tridimensionalità dello schema

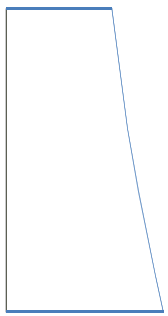
Proposta di Fajfar – indicazioni operative

- Effettuare l'analisi modale della struttura e valutare l'inviluppo di spostamenti all'ultimo impalcato



per sisma y





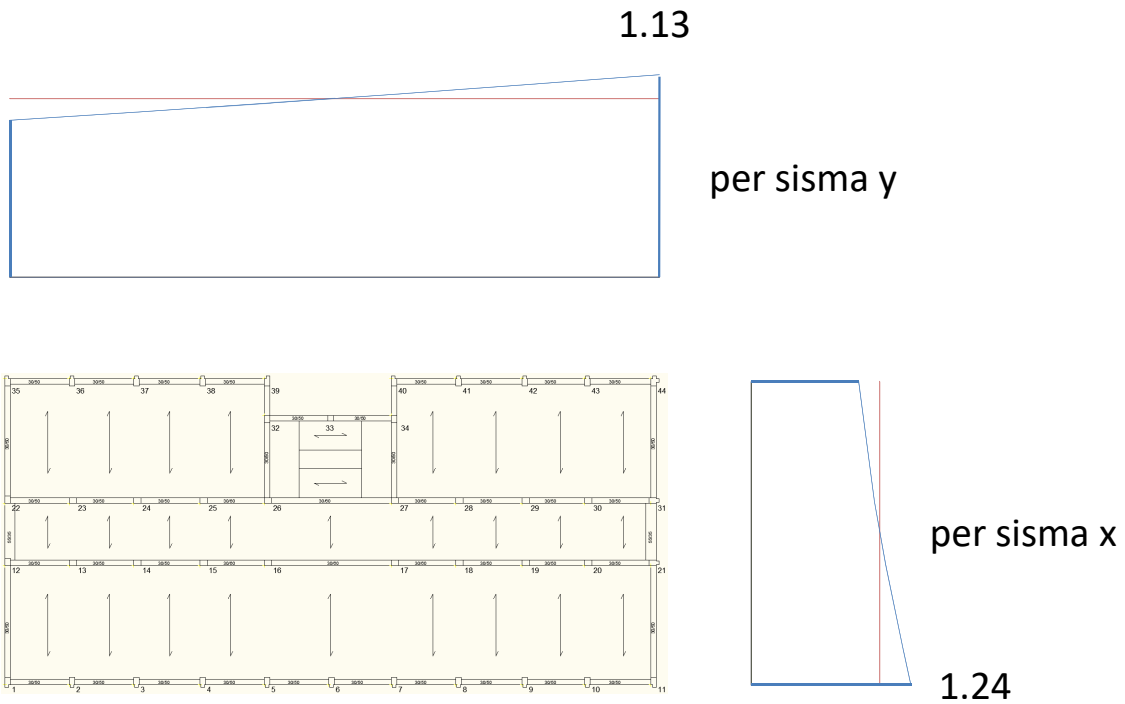
per sisma x

Modellazione strutturale

a. Tridimensionalità dello schema

Proposta di Fajfar – indicazioni operative

- Indicare lo spostamento del centro di massa e calcolare il rapporto rispetto a questo



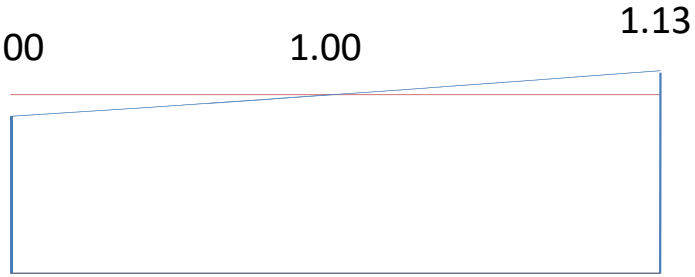
Modellazione strutturale

a. Tridimensionalità dello schema

Proposta di Fajfar – indicazioni operative

- Si usa questo rapporto c, telaio per telaio, come coefficiente correttivo dell'analisi statica non lineare applicata a schema traslazionale

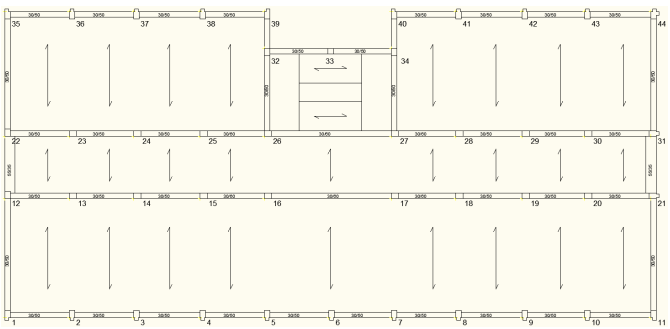
c =



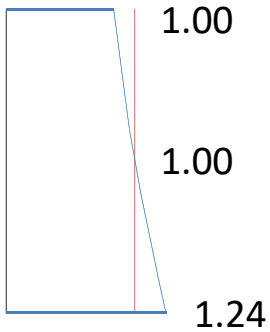
per sisma y

Nota: se il rapporto è minore di 1 si usa il valore 1

Il valore c cambia da telaio a telaio; uso il simbolo c_j per riferirmi al telaio j



c =



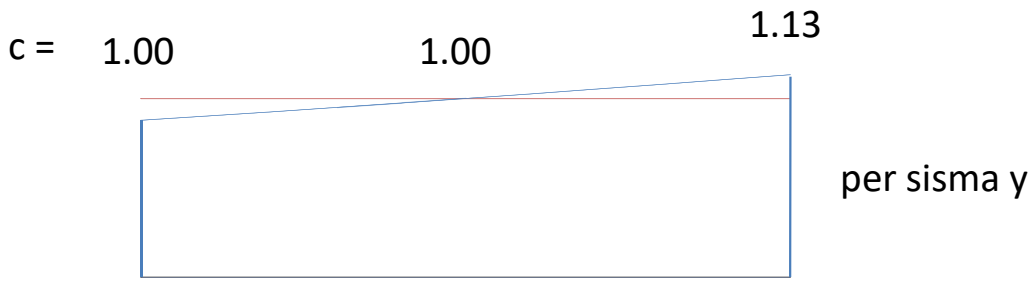
per sisma x

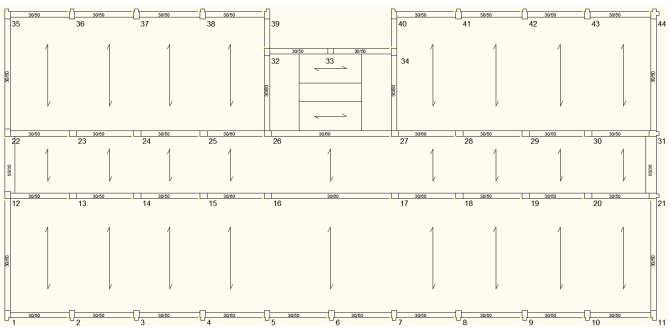
Modellazione strutturale

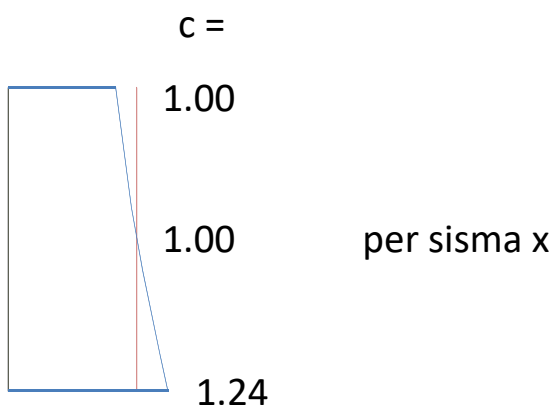
a. Tridimensionalità dello schema

Proposta di Fajfar – indicazioni operative

- Se l'analisi traslazionale indica che un certo evento si verifica per un'accelerazione a_g, per un'asta che appartiene al telaio j, si assume che avvenga per a_g/c_j







Modellazione strutturale

b. Incertezze sulla posizione del centro di massa

- Seguendo l'approccio di Fajfar, l'analisi statica non lineare viene fatta con modello traslazionale
- Si può tener conto dell'eccentricità accidentale effettuando l'analisi modale (di riferimento per il calcolo del coefficiente c) spostando il centro di massa dalla posizione nominale
  - Si ricorda che il valore convenzionale dell'eccentricità (5%) tiene già conto dell'amplificazione dovuta all'analisi modale

    È opportuno valutare con più precisione il valore effettivo dell'eccentricità accidentale (che sarà nettamente minore del 5%)

Modellazione strutturale

c. Direzione dell'azione sismica

- Non ha molto senso combinare l'effetto del sisma x con quello del sisma y
- In genere si considera solo l'azione applicata (separatamente) secondo la direzione x e secondo la direzione y

- Se si ritiene che questo possa essere rilevante, si può ripetere l'analisi applicando l'azione sismica secondo una (qualsiasi) direzione inclinata

Fasi del procedimento

2. Analisi pushover

Analisi pushover

Distribuzioni di forze

- La normativa richiede di applicare almeno due distribuzioni di forze d'inerzia, ricadenti l'una nelle distribuzioni principali (Gruppo 1) e l'altra nelle distribuzioni secondarie (Gruppo 2)

Gruppo 1 - distribuzioni principali

Una tra:

- Distribuzione proporzionale alle forze statiche (solo se $M^* \geq 75\%$)
- Distribuzione corrispondente alla forma del modo fondamentale di vibrare nella direzione considerata (solo se $M^* \geq 75\%$)
- Distribuzione corrispondente all'andamento delle forze di piano inviluppo di un'analisi modale (sempre possibile, obbligatoria se $T_1 > 1.3\ T_C$)

NTC, punto 7.3.4.2

Analisi pushover

Distribuzioni di forze

- La normativa richiede di applicare almeno due distribuzioni di forze d'inerzia, ricadenti l'una nelle distribuzioni principali (Gruppo 1) e l'altra nelle distribuzioni secondarie (Gruppo 2)

Gruppo 2 - distribuzioni secondarie

Una tra:

- Distribuzione di forze proporzionale ad un andamento uniforme di accelerazioni lungo l'altezza (obbligatoria se si usa la distribuzione proporzionale alle forze statiche)
- Distribuzione adattiva
- Distribuzione multimodale

NTC, punto 7.3.4.2

Analisi pushover

Alternative:

- Analisi adattive

  La distribuzione di forze varia durante la pushover (ad esempio in funzione dei modi di oscillazione libera)

  – Possono essere applicate le forze del modo principale, oppure gli spostamenti inviluppo modale

- Analisi multimodali

  Effettuare contemporaneamente più pushover, ciascuna con forze corrispondenti a un modo, e poi combinarne gli effetti

Analisi pushover

Nota:

- Ciascuna distribuzione deve essere definita ed applicata sia nella direzione x che nella direzione y
  - Potrebbe essere interessante applicare le distribuzioni anche in direzioni inclinate (ma in genere non lo si fa)
- Se la struttura non è simmetrica, ciascuna distribuzione deve essere applicata sia con valori positivi che valori negativi
  - In caso di simmetria questo è inutile, perché cambiando il segno delle forze si ottengono risultati specchiati

Fasi del procedimento

3. Associazione tra pushover e accelerazione sismica

Associazione tra pushover
e accelerazione sismica

- La pushover mostra in che modo il comportamento della struttura cambia al crescere delle azioni applicate ma non fornisce indicazioni su quale accelerazione sismica corrisponda a ciascuno stato strutturale
- Tipicamente si procede determinando un oscillatore semplice equivalente e valutando per questo il valore dell'accelerazione corrispondente ad un certo stato
  - Il reale andamento curvilineo del legame forza-spostamento viene di solito sostituito da un andamento bilineare

Associazione tra pushover
e accelerazione sismica

Impostazione suggerita dalle norme europee:

- Metodo N2, proposto da Fajfar

  Fa riferimento allo spettro di un oscillatore elasto-plastico

Alternativa, sostanzialmente equivalente:

- Metodo N1, di Ghersi et al.

  Evita il passaggio, avanti e indietro, tra schema reale e schema a un grado di libertà

Procedimento preferito negli Stati Uniti

- Metodo di Freeman o dello spettro di capacità

  Tiene conto in maniera differente (con variazione dello smorzamento) della variazione di dissipazione dovuta al progressivo danneggiamento della struttura

Associazione tra pushover
e accelerazione sismica

- Tutti i criteri innanzi citati si basano sulla bilinearizzazione del legame forza-spostamento (della struttura reale o dell'oscillatore semplice equivalente)
  - Esistono diversi criteri di bilinearizzazione, dei quali si parlerà più avanti
  - Purtroppo criteri di bilinearizzazione differenti portano a valori dell'accelerazione corrispondente ad un punto differenti

Fasi del procedimento

4. Giudizio sul comportamento della struttura

4. Giudizio sulla struttura

In termini di sollecitazioni:

- Riguarda le rotture fragili, come rottura a taglio di una sezione o rottura di un nodo
  - In tal caso valutare anche l'influenza dello spostamento sulla perdita di capacità portante verticale

In termini di deformazioni:

- Riguarda la rottura per esaurimento della capacità deformativa plastica di un concio
  - Si basa sul controllo della “rotazione alla corda” (o della rotazione plastica)
  - Esistono varie formulazioni per il valore di collasso della rotazione alla corda (due in normativa, molte altre in bibliografia) che forniscono risultati diversi