

Corsi di aggiornamento
Progettazione strutturale
e Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni

9. Vulnerabilità e rischio sismico di edifici esistenti in c.a.

13 – Risposta sismica: analisi non lineare

Villa Redenta, Spoleto, 22-24 novembre 2018
Aurelio Ghersi

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 (generalmente):

- 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

1. Modello della struttura

Problemi:

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

1. Modello della struttura

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 eliminano questi limiti

1. Modello della struttura

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'involuppo modale
 - Gheresi et al:
due analisi pushover, con eccentricità "correttiva"

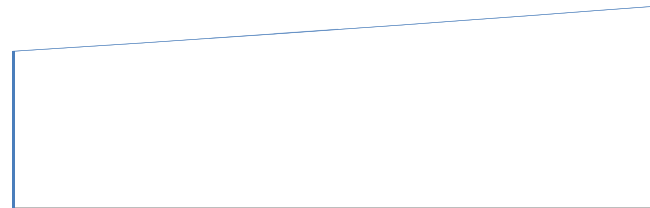
Più semplice
operativamente

1. Modello della struttura

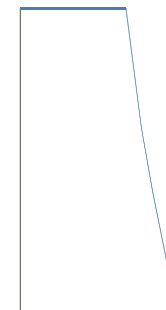
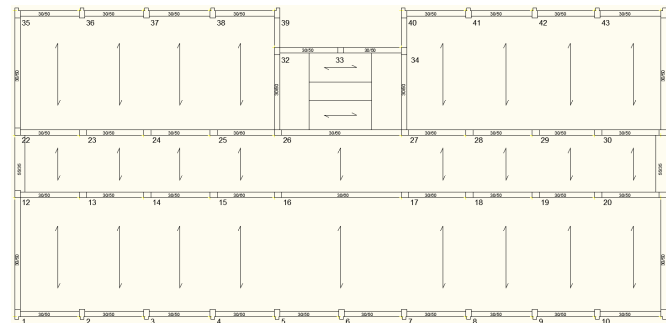
a. Tridimensionalità dello schema

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

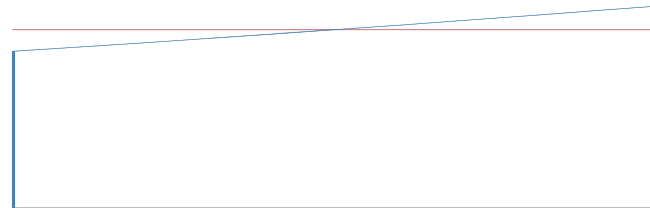
1. Modello della struttura

a. Tridimensionalità dello schema

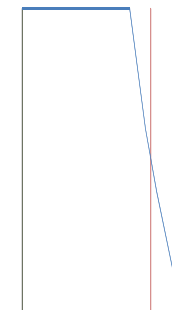
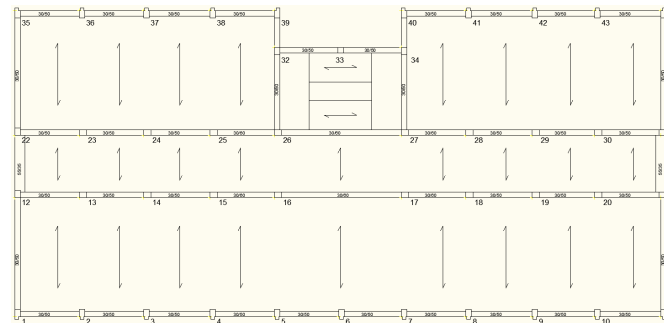
Proposta di Fajfar – indicazioni operative

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

1.13



per sisma y



per sisma x

1.24

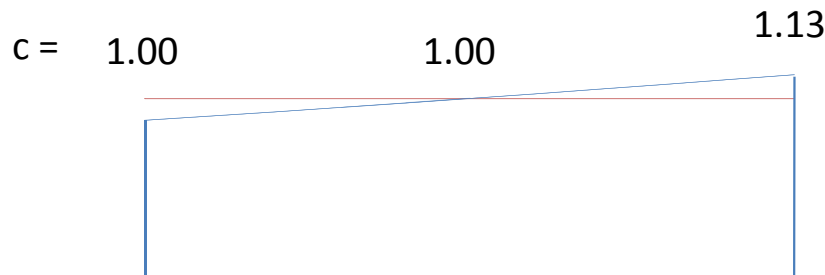
1. Modello della struttura

a. Tridimensionalità dello schema

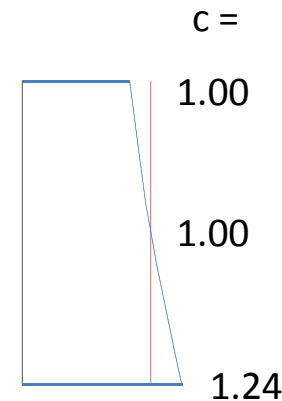
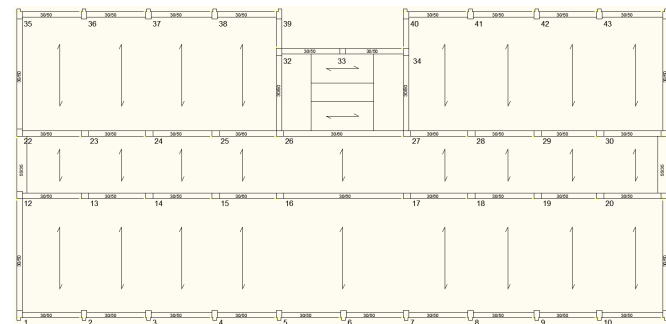
Proposta di Fajfar – indicazioni operative

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

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



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



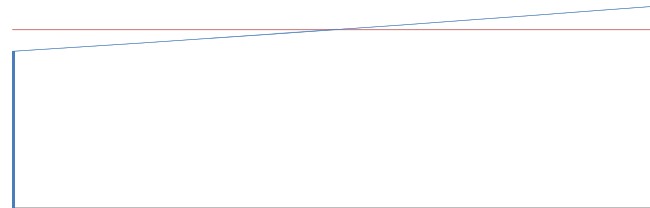
1. Modello della struttura

a. Tridimensionalità dello schema

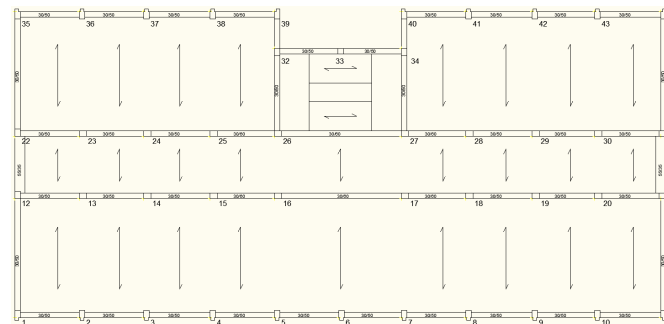
Proposta di Fajfar – indicazioni operative

- 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

$c =$ 1.00 1.00 1.13



per sisma y



$c =$

1.00

1.00

1.24

per sisma x

1. Modello della struttura

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%)

1. Modello della struttura

c. Direzione dell'azione sismica

- Non ha 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

2. Analisi pushover

Impostazione più comune:

- Applicazione di due distribuzioni di forze

Primo gruppo - una tra:

- distribuzione corrispondente all'andamento delle forze di piano iniluppo di un'analisi modale
- distribuzione proporzionale alle forze statiche (solo se $M^* \geq 75\%$)
- distribuzione corrispondente alla forma del modo fondamentale di vibrare nella direzione considerata (solo se $M^* \geq 75\%$)

Secondo gruppo – uno tra:

- Distribuzione di forze proporzionale ad un andamento uniforme di accelerazioni lungo l'altezza
- Distribuzione adattiva
- Distribuzione multimodale

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

3. Associazione tra pushover e accelerazione sismica

Impostazione suggerita dalle norme europee:

- Metodo N2, proposto da Fajfar

Alternativa, sostanzialmente equivalente:

- Metodo N1, di Gheresi 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

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