

Corso di aggiornamento professionale

**Valutazione della vulnerabilità sismica  
di edifici esistenti in c.a.**

Parma

27-28 maggio 2016

Aurelio Ghersi

06 - Risposta sismica non lineare

# 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:

- 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:

- 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:

- 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:

- 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

- 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 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

### Fasi del procedimento

1. Analisi pushover (valutazione del comportamento sotto forze crescenti)
2. Associazione di una qualsiasi fase della pushover ad un valore dell'accelerazione sismica
3. 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

- Incertezze sulla modellazione della struttura (geometria e materiali)
- Incertezze sull'azione sismica

# 1. Analisi pushover

Impostazione più comune:

- Applicazione di due distribuzioni di forze

Primo gruppo - una tra:

- distribuzione proporzionale alle forze statiche
- distribuzione corrispondente alla forma del modo fondamentale di vibrare nella direzione considerata
- distribuzione corrispondente all'andamento delle forze di piano involuppo di un'analisi modale

Secondo gruppo - uno tra:

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



Vedere più avanti,  
impostazioni  
alternative

# 1. 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

## 2. Associazione tra pushover e accelerazione sismica

Impostazione suggerita dalle norme europee:

- Metodo N2, proposto da Fajfar

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

### 3. Giudizio sulla struttura

In termini di sollecitazioni:

- Riguarda le rotture fragili, come rottura a taglio di una sezione o rottura di un nodo

In termini di deformazioni:

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