

Corso di aggiornamento

Progettazione delle strutture antisismiche secondo le
indicazioni del capitolo 10 delle NTC 2008: approfondimenti

Verifica sismica di edifici esistenti in c.a.

1 - Modalità di collasso, tipo di analisi e valori della resistenza

Bologna

14-15 febbraio 2013

Aurelio Gheresi

Collasso di un edificio

- Rottura fragile:
 - rottura a taglio delle sezioni di pilastri e travi
 - rotture a taglio dei nodi
 - scorrimento tra testa pilastro e trave in corrispondenza alle riprese di getto
- Rottura duttile (ovvero per esaurimento della duttilità):
 - estese plasticizzazioni agli estremi delle aste, fino al raggiungimento della rotazione ultima di una sezione

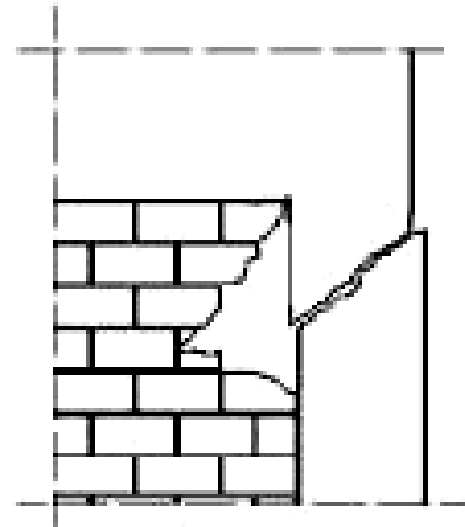
Rottura fragile rottura a taglio di un pilastro

Santa Venerina,
2002

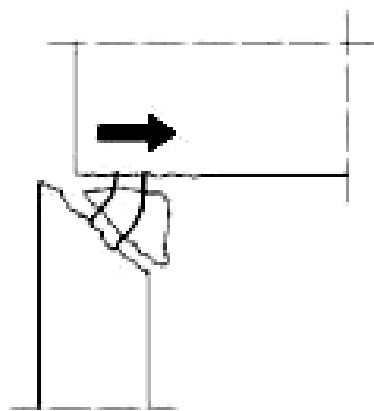
Foto G. Gaeta



Rottura diagonale
della muratura e
propagazione come
lesione a taglio nel
pilastro



Rottura fragile rottura a taglio di un pilastro



Rottura fragile rottura a taglio dei pilastri (e dei nodi)



1999 – Turchia



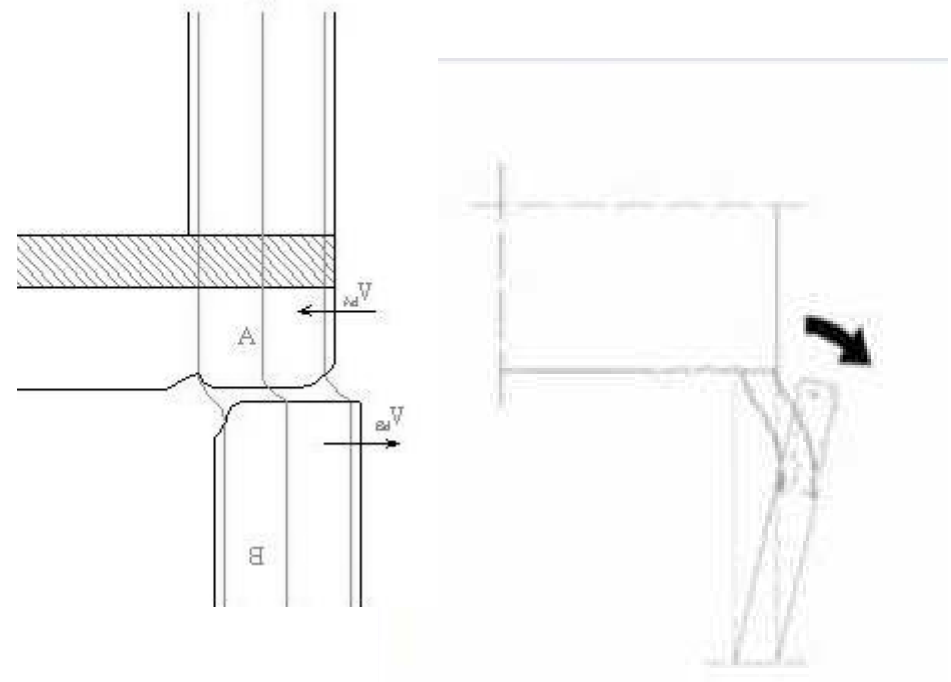
foto A. Gheresi

Rottura fragile scorrimento fra testa pilastro e trave



Irpinia 1980,
Lioni, Edificio del
Banco di Napoli

foto A. Gherzi



Scorrimento tra la sommità del pilastro
e la trave in corrispondenza
della ripresa di getto

Rottura fragile sconnessione dei collegamenti nodali



foto A. Gherzi

Danneggiamento dei nodi in testa ed al piede del pilastro:
non si ha formazione di cerniere plastiche sulla colonna
né tantomeno sulle travi

Rottura fragile sfilamento delle armature



foto A. Gherzi

23/11/1980 – Irpinia e Basilicata

S. Angelo dei Lombardi
edificio 2

Rottura fragile

- Edifici antisismici di nuova progettazione:
la rottura fragile viene evitata con il criterio di gerarchia delle resistenze (gerarchia taglio-flessione) e con l'attenzione ai dettagli costruttivi
- Edifici esistenti:
il rischio di rottura fragile è forte
la rottura spesso avviene già per bassi valori di a_g

Rottura fragile

- Edifici esistenti:
il rischio di rottura fragile è forte
la rottura spesso avviene già per bassi valori di a_g
- Si possono verificare in termini di resistenza,
con analisi lineare, senza fattore di struttura (o con
valore molto basso)
- La variabilità della resistenza dei materiali influisce
molto, perché il collasso è dovuto alla rottura di una
singola sezione

Rottura duttile plasticizzazione degli estremi dei pilastri



1999 – Turchia

Rottura duttile plasticizzazione degli estremi dei pilastri



1999 – Turchia

Rottura duttile

ovvero per esaurimento della duttilità

- Edifici antisismici di nuova progettazione:
 - la duttilità locale è garantita dai dettagli costruttivi
 - una richiesta eccessiva di duttilità viene evitata con il criterio di gerarchia delle resistenze (gerarchia pilastro-trave, per evitare meccanismi di piano)
- Edifici esistenti:
 - la duttilità locale potrebbe essere modesta
 - potrebbero esserci meccanismi di piano che fanno esaurire presto la duttilità

Rottura duttile

ovvero per esaurimento della duttilità

- Edifici esistenti:
 - la duttilità locale potrebbe essere modesta
 - potrebbero esserci meccanismi di piano che fanno esaurire presto la duttilità
- Si possono verificare in termini di resistenza, con analisi lineare, con basso fattore di struttura ...
... ma sarebbe meglio farlo in termini di deformazioni, con analisi lineare o non lineare
- La variabilità della resistenza dei materiali influisce poco, la maggior resistenza di una sezione può compensare la minor resistenza di un'altra

Collasso di edifici esistenti:

duttile o fragile?

- Duttile: estese plasticizzazioni agli estremi delle aste (in particolare delle travi), meccanismo di collasso globale e non di piano
- Poco duttile: plasticizzazioni agli estremi dei pilastri, con meccanismo di collasso di piano
- Fragile: rottura a taglio delle sezioni di pilastri e travi, rotture a taglio dei nodi, scorrimento tra testa pilastro e trave in corrispondenza alle riprese di getto

Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?

- Cosa mostra l'evidenza sperimentale ?
(danneggiamento e crollo di edifici in cemento armato in conseguenza ai terremoti)

Edifici progettati solo per carichi verticali
o progettati per sisma in maniera non corretta (con
rispetto solo formale della normativa)



In questi casi il collasso è quasi sempre fragile

Collasso di edifici esistenti: duttile o fragile?

- Cosa mostra l'evidenza sperimentale ?
(danneggiamento e crollo di edifici in cemento armato in conseguenza ai terremoti)

Edifici progettati correttamente per sisma
(indipendentemente dalle normative di riferimento)
o progettati solo per carichi verticali, ma con una
particolare cura di progetto e dettagli costruttivi
(buone sezioni dei pilastri, ben armate e molto ben staffate)



In questi casi il collasso è spesso duttile

Collasso di edifici esistenti:

in molti casi: fragile!

Quindi:

- Determinare innanzitutto il livello di azione sismica che porta a rottura fragile (resistenza a taglio dei pilastri, resistenza a taglio dei nodi, scorrimento travi-pilastro)
- Usare una modellazione che tenga conto in maniera corretta della rigidità degli elementi strutturali (commisurata al livello di sollecitazione che porta alle rotture fragili)
- Tenere conto anche degli elementi non strutturali, tramezzi e tamponature, che hanno un ruolo rilevante per basse azioni sismiche

Primi interventi, essenziali (o comunque prime verifiche)

Ridurre il rischio di rottura fragile, con:

- Staffatura efficace degli estremi dei pilastri
- Cerchiatura dei nodi
- Cucitura tra pilastri e travi

Miglioramento, **essenziale**

Solo dopo aver fatto questo:

- Valutazione del comportamento non lineare
- Controllo della duttilità delle sezioni

Adeguamento, quando occorre

Schema generale del procedimento di analisi

Procedimento da seguire

1. Valutazione delle caratteristiche di sollecitazione con procedimenti semplificati
2. Analisi lineare (modale con spettro di risposta):
fornisce caratteristiche di sollecitazione e spostamenti (che sono proporzionali ad a_g)
 - giudizio in termini di sollecitazioni e di spostamenti
3. Solo se necessario: analisi non lineare
 - giudizio in termini di spostamenti

Procedimento da seguire

1 - valutazione preliminare

1. Valutazione delle caratteristiche di sollecitazione con procedimenti semplificati

- È opportuno farla sempre, per cogliere l'ordine di grandezza delle sollecitazioni ed individuare quali possono essere i problemi principali
- È utile come validazione dei calcoli successivi (o almeno dei calcoli lineari), ai sensi del capitolo 10 delle NTC08
- Può fornire indicazioni anche per quanto riguarda le indagini da effettuare in sito e sui materiali

Procedimento da seguire

2 - analisi lineare

2. Valutazione delle caratteristiche di sollecitazione e degli spostamenti con analisi lineare (modale con spettro di risposta o eventualmente statica)

- I risultati variano linearmente con a_g , quindi si può determinare il valore di a_g che porta ad un qualsiasi valore di sollecitazioni

Prima fase: rotture fragili

- Confronto tra taglio sollecitante e resistente
- Individuazione di a_g che porta a rottura a taglio (se M_{Rd} è basso si potrebbe non avere mai rottura a taglio)
- Verifica di altre possibili rotture fragili

Procedimento da seguire

2 - analisi lineare

2. Valutazione delle caratteristiche di sollecitazione e degli spostamenti con analisi lineare (modale con spettro di risposta o eventualmente statica)

- I risultati variano linearmente con a_g , quindi si può determinare il valore di a_g che porta ad un qualsiasi valore di sollecitazioni

Seconda fase: plasticizzazione delle sezioni

- Confronto tra momento sollecitante e resistente
- Individuazione di a_g che porta a plasticizzazione a flessione
- Esame della distribuzione dei rapporti M_{Ed}/M_{Rd} che mostrano se il collasso è globale → indicazioni su q

Procedimento da seguire

2 - analisi lineare

2. Valutazione delle caratteristiche di sollecitazione e degli spostamenti con analisi lineare (modale con spettro di risposta o eventualmente statica)

- I risultati variano linearmente con a_g , quindi si può determinare il valore di a_g che porta ad un qualsiasi valore di sollecitazioni

Terza fase: controllo in termini di deformazioni

- Confronto tra spostamenti relativi di calcolo e valori limite dovuti alla rotazione alla corda
- Controllo dei limiti di applicabilità di questo procedimento (valori di ρ)

Procedimento da seguire

3 - analisi non lineare

3. Analisi pushover e individuazione di a_g corrispondente ai singoli punti della curva taglio-spostamento

- Confronto tra spostamenti relativi di calcolo e valori limite dovuti alla rotazione alla corda

Attenzione:

I risultati di questa analisi sono fortemente condizionati dalla modellazione e dai parametri scelti e potrebbero essere privi di significato.

Usarla solo se necessario e solo come passo finale del procedimento indicato

Quali valori per la resistenza
dei materiali?

Valori della resistenza

impostazione standard (nuove costruzioni)

- Valore di riferimento:
il valore caratteristico f_k (frattile 5%, cioè valore al di sotto del quale si scende solo nel 5% dei casi)
 - Si noti che, oltre alle incertezze sulla variabilità della resistenza intervengono quelle relative alla effettiva rispondenza tra progetto ed esecuzione
- Valore di calcolo:
per garantire con adeguata sicurezza che la sollecitazione non superi la resistenza di una sezione, si usa il valore corrispondente a un frattile più basso $f_d = f_k / \gamma_M$

Valori della resistenza per costruzioni esistenti

- Le incertezze dovute alla variabilità permangono, ma quelle dovute alla rispondenza tra progetto ed esecuzione possono essere eliminate se si raggiunge una conoscenza accurata dell'opera



È possibile usare un valore di riferimento più alto

- Le NTC08 (punto 8.7.2) dicono che "si impiegano le proprietà dei materiali esistenti"
- La Circolare indica come riferimento il valore medio f_m (tra i dati ottenuti sperimentalmente)
- Se la conoscenza non è "accurata" il riferimento è il valore medio f_m diviso un fattore di confidenza FC

Valori della resistenza per costruzioni esistenti

- Valore di riferimento:
il valore medio sperimentale f_m diviso per il fattore
di confidenza FC: $\frac{f_m}{FC}$

Nota: quando un valore alto della resistenza può
essere "peggiorativo" occorre usare il fattore di
confidenza all'incontrario, cioè usare come valore di
riferimento: $f_m \times FC$

Valori della resistenza per costruzioni esistenti

- Valore di riferimento:
il valore medio sperimentale f_m diviso per il fattore di confidenza FC: $\frac{f_m}{FC}$

- Valore di calcolo:
per garantire con adeguata sicurezza che la sollecitazione non superi la resistenza di una sezione, si usa un valore corrispondente a un frattile più basso: $\frac{f_m}{FC \gamma_M}$

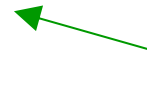
ma questo vale quando ci preoccupiamo del comportamento "fragile" di una singola sezione

Valori della resistenza per costruzioni esistenti

- Valore di riferimento:
il valore medio sperimentale f_m diviso per il fattore
di confidenza FC: $\frac{f_m}{FC}$

- Valore di calcolo:
per verifiche del comportamento "fragile" di una
singola sezione :

$$\frac{f_m}{FC \gamma_M}$$



- per verifiche del comportamento globale "duatile" di
una struttura :

$$\frac{f_m}{FC}$$



Nota: potrebbe aver senso
applicare questa distinzione
anche nel progetto di nuove
strutture

Valori della resistenza per costruzioni esistenti

- Esempio

Si è trovato, in base alle prove sperimentali:

- Per il calcestruzzo $f_{cm} = 19 \text{ MPa}$
- Per l'acciaio $f_{ym} = 420 \text{ MPa}$

e si deve usare $FC = 1.2$

Il valore di riferimento sarà:

- Per il calcestruzzo $f_{c,rif} = 19/1.2 = 15.83 \text{ MPa}$
- Per l'acciaio $f_{y,rif} = 420/1.2 = 350 \text{ MPa}$

Nota: dove la normativa per nuove costruzioni impone di usare $\alpha_{cc} f_{ck}$ si terrà conto di questo coefficiente (essendo $\alpha_{cc}=0.85$ si userà $f_c = 13.46 \text{ MPa}$)

Quando si usa la resistenza col valore di riferimento ?

- Nelle verifiche "duttili" o, più precisamente, in tutti i casi in cui si pensa alla contemporanea plasticizzazione di molte sezioni (quindi per i telai)

Tipicamente:

- Nelle verifiche a flessione (in condizioni sismiche)

Questo va bene purché la singola sezione non abbia un comportamento flessionale fragile. Attenti a:

- Sezioni con armatura tesa molto forte e armatura compressa scarsa
- Sezioni (di pilastri) con rilevante sforzo normale

Quando si usa la resistenza col valore di riferimento ?

- Nelle verifiche "duttili" o, più precisamente, in tutti i casi in cui si pensa alla contemporanea plasticizzazione di molte sezioni

Tipicamente:

- Nelle verifiche a flessione (in condizioni sismiche)

E in condizioni non sismiche?

Può andar bene purché la singola sezione non abbia un comportamento flessionale fragile e a condizione che la struttura non sia isostatica o poco iperstatica

Valori della resistenza per costruzioni esistenti

- Esempio

Si è trovato, in base alle prove sperimentali:

- Per il calcestruzzo $f_{cm} = 19 \text{ MPa}$
- Per l'acciaio $f_{ym} = 420 \text{ MPa}$

e si deve usare $FC = 1.2$

Nelle verifiche a comportamento "fragile" si userà:

- Per il calcestruzzo ($\gamma_c=1.5$) $f_{cd} = 15.83/1.5 = 10.56 \text{ MPa}$
- Per l'acciaio ($\gamma_s=1.15$) $f_{yd} = 350/1.15 = 304.3 \text{ MPa}$

Nota: dove la normativa per nuove costruzioni impone di usare $\alpha_{cc} f_{ck}$ si terrà conto di questo coefficiente (essendo $\alpha_{cc}=0.85$ si userà $f_{cd} = 8.97 \text{ MPa}$)

Quando si usa la resistenza ridotta con γ_M ?

- Nelle verifiche "fragili" o, più precisamente, in tutti i casi in cui il collasso di una singola sezione può portare a un crollo (senza grande preavviso)

Tipicamente:

- Nelle verifiche a taglio (anche per soli carichi verticali, in assenza di sisma)

Ma anche:

- Nelle determinazioni della capacità di rotazione delle sezioni dei pilastri (molto condizionata dal rapporto N_{Ed} / N_{Rd} e quindi dalla resistenza del materiale)

Valori della resistenza per costruzioni esistenti

- Esempio

Si è trovato, in base alle prove sperimentali:

- Per il calcestruzzo $f_{cm} = 19 \text{ MPa}$
- Per l'acciaio $f_{ym} = 420 \text{ MPa}$

e si deve usare $FC = 1.2$

Quando la maggiore resistenza è penalizzante si usa:

- Per il calcestruzzo $f_{c,rif} = 19 \times 1.2 = 22.8 \text{ MPa}$
- Per l'acciaio $f_{y,rif} = 420 \times 1.2 = 504 \text{ MPa}$

Nota: dove la normativa per nuove costruzioni impone di usare $\alpha_{cc} f_{ck}$ si terrà conto di questo coefficiente (essendo $\alpha_{cc}=0.85$ si userà $f_c = 19.38 \text{ MPa}$)

Quando si usa la resistenza incrementata ?

- Solo quando si vuole escludere la possibilità di rotture a taglio

Nei pilastri il taglio non può superare il valore:

$$V_{\max} = 2 M_{Rd} / l_p$$

Si può escludere rottura a taglio se $V_{Rd} > V_{\max}$ ma per farlo bisogna massimizzare M_{Rd} e quindi calcolarlo con le resistenze incrementate