PROGETTO DI EDIFICI ANTISISMICI IN CEMENTO ARMATO

Ascoli Piceno, 17-18 maggio 2019

07b – Analisi strutturale

Docente del corso

AURELIO GHERSI

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

Modellazione della azioni
e combinazioni di carico

Modellazione della struttura

Azioni sulla struttura

Azione sismica:

- Modellata mediante analisi statica o analisi modale con spettro di risposta

Carichi verticali da accoppiare all'azione sismica:

- Differenze tra norme passate e norme attuali

Altri problemi relativi all'azione sismica:

- Eccentricità
- Combinazione delle componenti

Carichi verticali
da accoppiare all’azione sismica

Carichi verticali e masse

accoppiati al sisma

Già discusso in una presentazione precedente

Nel passato

- Carichi verticali massimi (g_k+q_k) per TA,
  (g_d+q_d) per SLU
- Masse ridotte (g_k+s q_k) [forze x 1.5 per SLU]

Norme attuali

- Carichi verticali e masse con valori quasi permanenti
  (g_k+ψ_2 q_k)

NTC 08, punto 3.2.4 NTC 18, punto 2.5.3

Altri problemi
nella modellazione delle azioni sismiche

Modellazione delle azioni

1. Occorre tener conto delle incertezze relative alla effettiva posizione del centro di massa (i carichi variabili possono essere distribuiti in maniera non uniforme)

   $\rightarrow$ eccentricità accidentale

2. Occorre tener conto dell'effetto contemporaneo delle diverse componenti dell'azione sismica

   $\rightarrow$ criteri di combinazione delle componenti

Problemi concettualmente giusti,
ma che complicano notevolmente il calcolo

Modellazione delle azioni

1. Eccentricità accidentale

"Per tenere conto della variabilità spaziale del moto sismico, nonché di eventuali incertezze ~~nella localizzazione delle masse~~, al centro di massa deve essere attribuita una eccentricità accidentale rispetto alla sua posizione quale deriva dal calcolo"

"Per i soli edifici ed in assenza di più accurate determinazioni l'eccentricità accidentale in ogni direzione non può essere considerata inferiore a 0,05 volte la dimensione dell'edificio misurata perpendicolarmente alla direzione di applicazione dell'azione sismica.
Detta eccentricità è assunta costante, per entità e direzione, su tutti gli orizzontamenti"

NTC08, punto 7.2.6

NTC 18, punto 7.2.6

Modellazione delle azioni

1. Eccentricità accidentale

Variabilità spaziale del moto sismico:

- Le onde sismiche si propagano con velocità elevata ma non infinita; quindi raggiungono punti diversi dell'edificio in istanti diversi (sfasamento delle accelerazioni)

La normativa nel capitolo 3 precisa:

- Degli effetti sopra indicati dovrà tenersi conto quando essi possono essere significativi e in ogni caso quando le condizioni di sottosuolo siano così variabili lungo lo sviluppo dell'opera da richiedere l'uso di accelerogrammi o di spettri di risposta diversi

Quindi problema importante solo per strutture di dimensioni elevate (ad esempio viadotti) o con sottosuolo fortemente variabile

NTC08, punto 3.2.5.1 NTC 18, punto 3.2.4.1

Modellazione delle azioni

1. Eccentricità accidentale

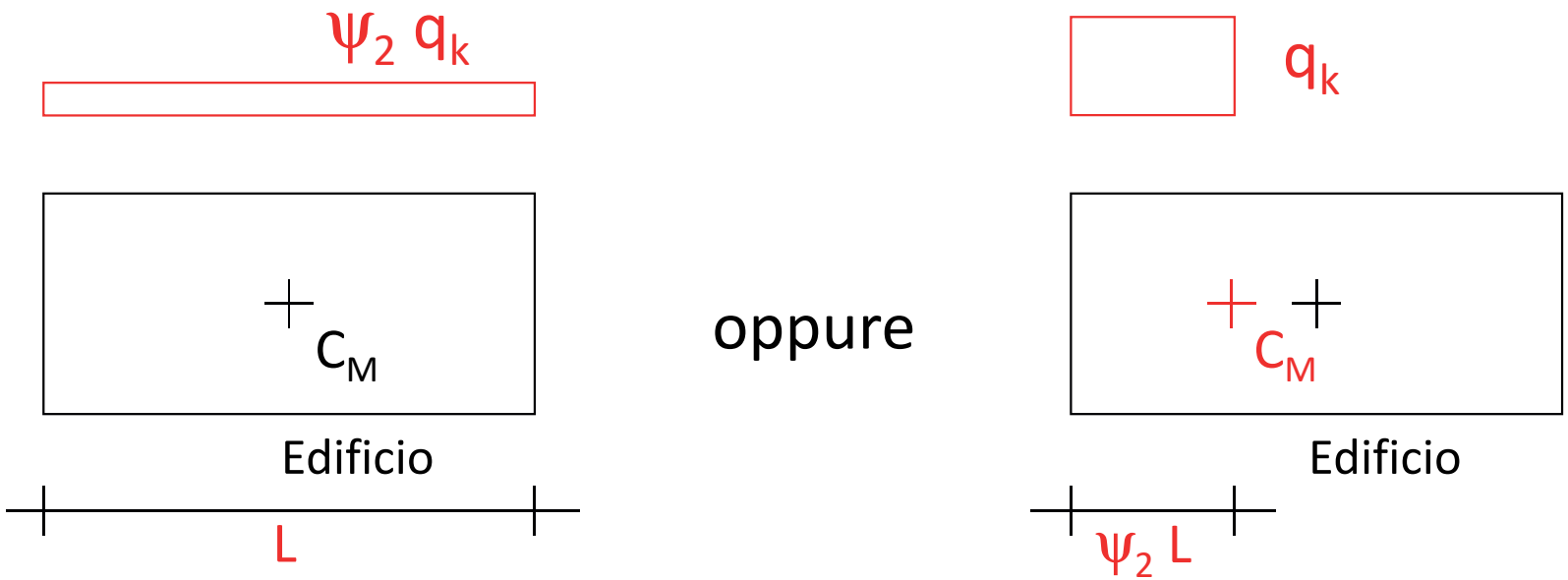
Incertezze:

- Incertezze nella localizzazione delle masse

- Incertezze relative ad altri possibili effetti usualmente trascurati
  - Ad esempio, variazione di rigidezza nei pilastri in c.a. per effetto dello sforzo normale, che può provocare dissimmetrie anche in strutture simmetriche a causa della contemporanea presenza di moto in due direzioni

Incertezze nella localizzazione delle masse

L'aliquota di carichi variabili presente in occasione del sisma potrebbe non essere uniformemente distribuita nell'edificio

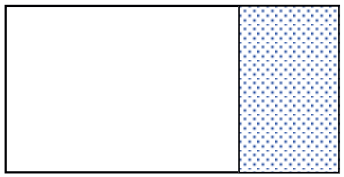


Il centro di massa deve quindi essere spostato di una quantità detta "eccentricità accidentale"

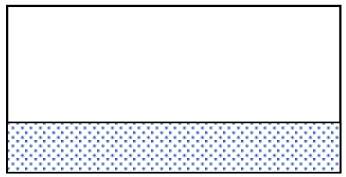
Eccentricità accidentale

Perché il 5% ?

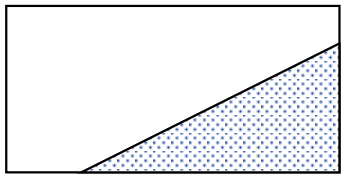
- Se si applica il carico variabile massimo su un'area pari a ψ_2 x area totale si ottiene un'eccentricità nettamente minore



$e_{a1} = 0.021\ L_1$



$e_{a2} = 0.021\ L_2$

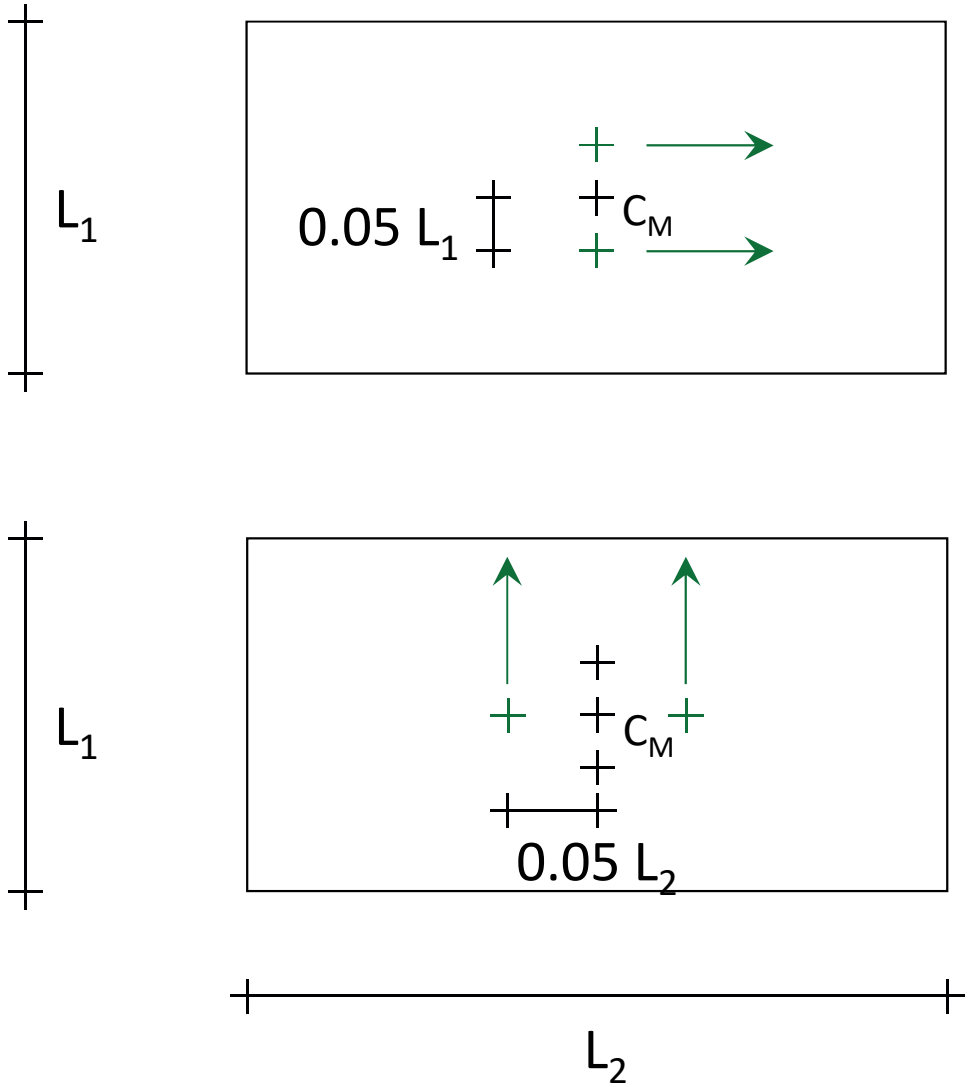


$e_{a1} = 0.015\ L_1$
$e_{a2} = 0.015\ L_2$

Il valore 0.05 è maggiore, per tener conto di:

- amplificazione della rotazione per effetti dinamici
- rotazione per lo sfasamento dell'onda sismica da un estremo all'altro dell'edificio

Eccentricità accidentale



Aumentano, di molto, le combinazioni di carico

NTC, punto 7.2.6

Eccentricità accidentale

Come tenerne conto?

Effettuando più volte l'analisi modale, considerando il centro di massa spostato di una quantità pari a e_a

oppure

Considerando le forze statiche applicate al centro di massa spostato di una quantità pari a e_a

ovvero

Considerando l'effetto di coppie pari alle forze statiche per l'eccentricità e_a

Eccentricità accidentale

Come tenerne conto?

Preferisco questa impostazione perché così:

- riduco il numero di schemi base di calcolo da controllare
- giudico più facilmente l'effetto della eccentricità accidentale
- evito di accentuarne l'effetto (l'eccentricità e_a è già amplificata per tener conto di effetti dinami

Considerando l'effetto di coppie pari alle forze statiche per l'eccentricità e_a

Modellazione delle azioni

2. Combinazione delle componenti

Le componenti orizzontali e verticali del sisma agiscono simultaneamente

Esse però non sono correlate
(i massimi si raggiungono in istanti diversi)

Come combinarle?

Criterio generale:

Sommare

- gli effetti massimi di una componente dell'azione
- il 30% dei massimi prodotti dalle altre componenti

Modellazione delle azioni

2. Combinazione delle componenti

Criterio generale:

Sommare

- gli effetti massimi di una componente dell'azione
- il 30% dei massimi prodotti dalle altre componenti

Esempio: sisma prevalente x $\Rightarrow$ $E_x + 0.3\,E_y + 0.3\,E_z$

L'EC8 considera questa come una possibile alternativa, ma suggerisce anche:

Combinare gli effetti come SRSS $\sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$

Può andar bene quando vi è una sola caratteristica di sollecitazione (travi)

Improponibile quando vi sono più caratteristiche di sollecitazione (pilastri)

NTC, punto 7.3.5

Componente verticale

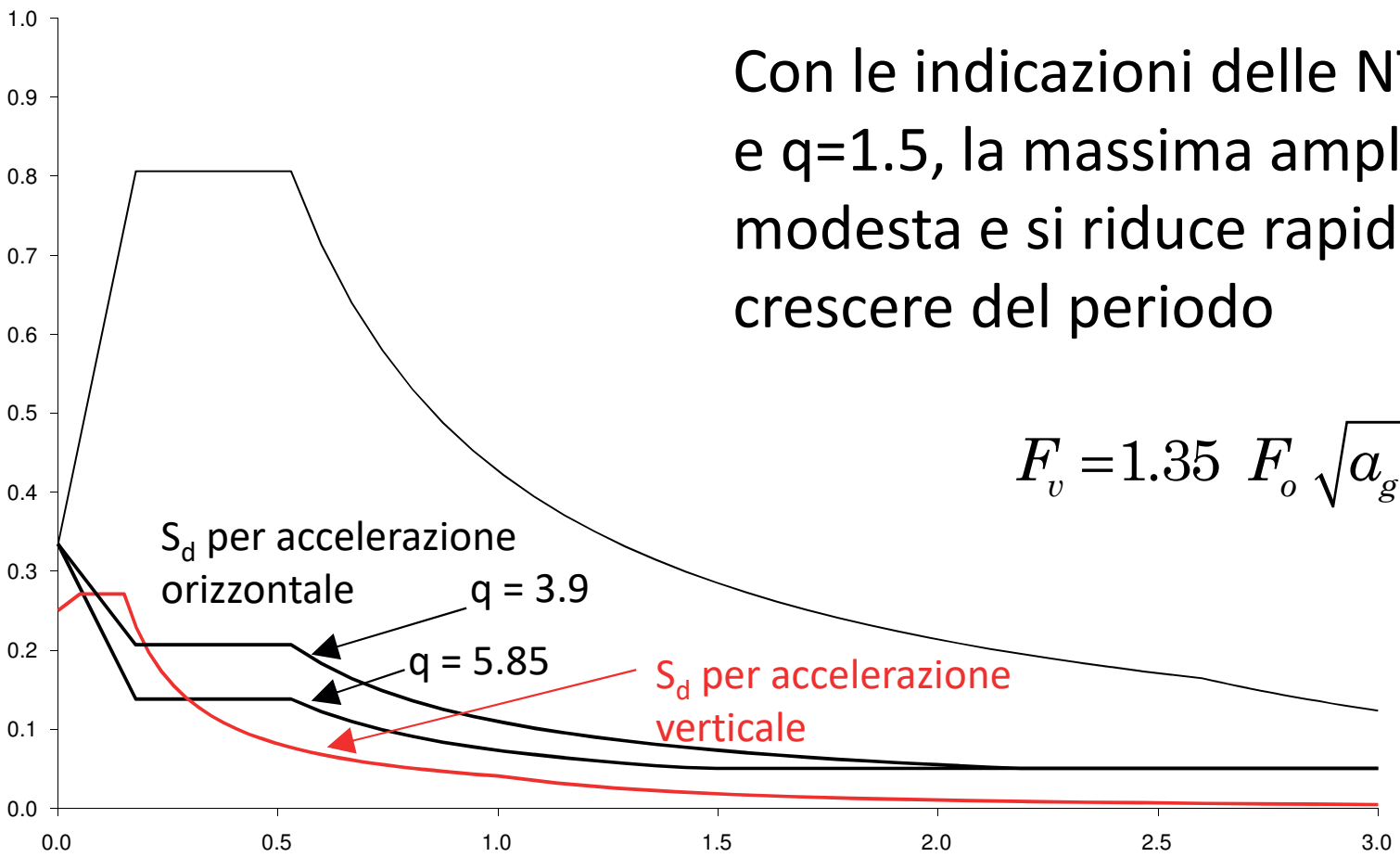
Se ne tiene conto solo per:

- Elementi con luce maggiore di 20 m
- Solai precompressi di luce superiore a 8 m
- Sbalzi di luce superiore a 4 m
- Elementi spingenti
- Pilastri in falso
- Edifici con piani sospesi

NTC 08, punto 7.2.1 NTC 18, punto 7.2.2

Componente verticale
considerazioni

- L'accelerazione spettrale dipende dal periodo e dalla zona sismica



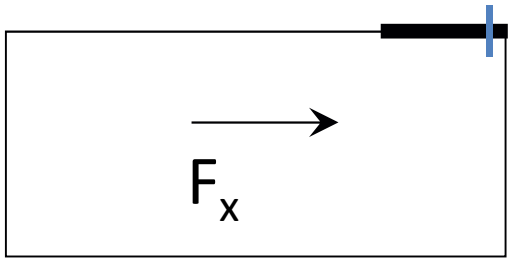
Con le indicazioni delle NTC, e q=1.5, la massima amplificazione è modesta e si riduce rapidamente al crescere del periodo

$$F_v = 1.35 \; F_o \sqrt{a_g / g}$$

Componenti orizzontali

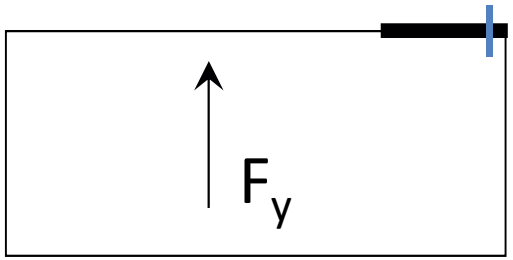
per le travi

- Azione in una direzione più 30% di azione nell'altra



edificio

M = 230 kNm



edificio

M = 50 kNm

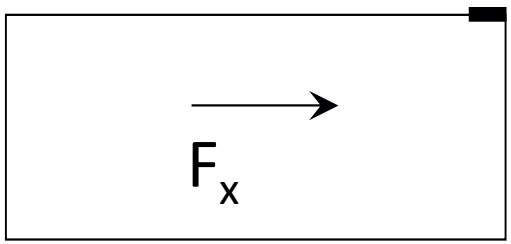
causato dalla rotazione

$$M_d = 230 + 0.3 \times 50 =$$
$$= 245 \text{ kNm}$$

Componenti orizzontali

per i pilastri

- Stesso criterio,
  ma occorre tener conto
  della direzione del sisma prevalente

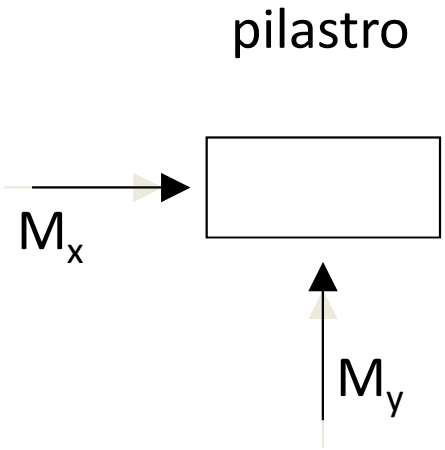


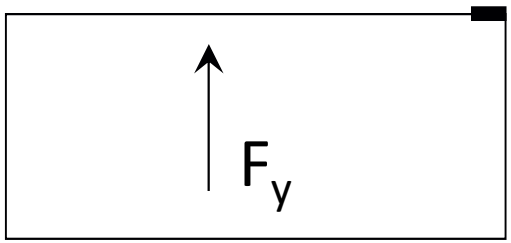
edificio

M_y = 280 kNm

M_x = 45 kNm

causato dalla rotazione





edificio

M_y = 50 kNm

causato dalla rotazione

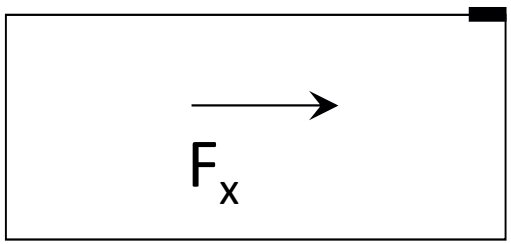
M_x = 105 kNm

Componenti orizzontali

per i pilastri

- Stesso criterio,
  ma occorre tener conto
  della direzione del sisma prevalente

Sisma prevalente in direzione x



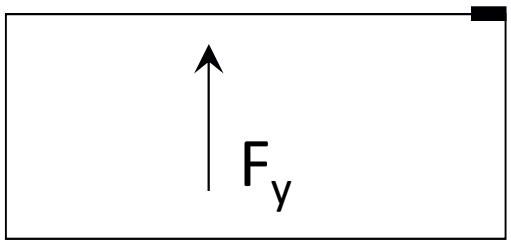
edificio

M_y = 280 kNm

M_x = 45 kNm
causato dalla rotazione

$$M_{d,y} = 280 + 0.3 \times 50 =$$
$$= 295 \text{ kNm}$$

$$M_{d,x} = 45 + 0.3 \times 105 =$$
$$= 77 \text{ kNm}$$



edificio

M_y = 50 kNm
causato dalla rotazione

M_x = 105 kNm

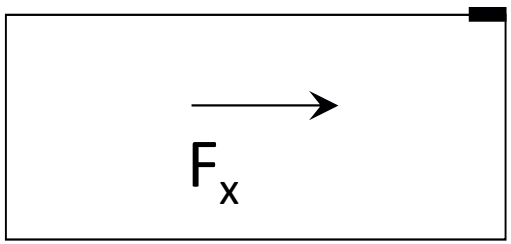
Verifica a presso-flessione deviata

Componenti orizzontali

per i pilastri

- Stesso criterio,
  ma occorre tener conto
  della direzione del sisma prevalente

Sisma prevalente in direzione y



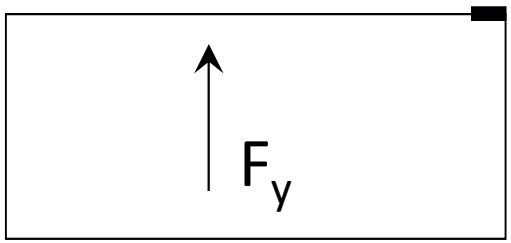
edificio

M_y = 280 kNm

M_x = 45 kNm
causato dalla rotazione

$$M_{d,y} = 50 + 0.3 \times 280 =$$
$$= 134 \text{ kNm}$$

$$M_{d,x} = 105 + 0.3 \times 45 =$$
$$= 119 \text{ kNm}$$



edificio

M_y = 50 kNm
causato dalla rotazione

M_x = 105 kNm

Verifica a presso-flessione deviata

Componenti orizzontali
per i pilastri

Nota:

- Allo SLU, la pressoflessione deviata è molto meno gravosa che alle TA

Se la struttura è ben dimensionata, cioè ha rotazioni non elevate, si può progettare a pressoflessione retta, separatamente per le due direzioni, mantenendosi appena in abbondanza

La verifica a pressoflessione deviata sarà abbastanza facilmente soddisfatta

Combinazioni di carico

Analisi strutturale

Necessità di:

- Distinguere tra carichi verticali in assenza di sisma (maggiori) e in presenza di sisma (minori)
- Tener conto dell'eccentricità accidentale
- Combinare l'effetto delle diverse componenti del sisma

Quindi:

- Un numero di schemi da calcolare molto più alto

Quanti?

Quante combinazioni di carico?

In assenza di sisma:

- schema base, col carico verticale massimo ($g_d + q_d$) su tutte le campate di trave
- eventuali altri schemi col carico variabile a scacchiera

Nota: l'effetto del carico variabile a scacchiera può essere stimato in maniera approssimata

Con le vecchie norme l'effetto dei soli carichi verticali era compreso tra i valori dovuti a $q \pm F$

Ora invece no, perché in presenza di sisma i carichi verticali sono ridotti

Quante combinazioni di carico?

In presenza di sisma:

1 • carico verticale con valore ridotto ($g_k + \psi_2 q_k$) su tutte le campate di trave

2 • forze sismiche (statiche o modali) in direzione x / y

4 • verso delle forze sismiche: positivo / negativo

8 • eccentricità accidentale: positiva / negativa

16 • forze in una direzione più 0.3 forze nell'altra direzione, prese col segno: positivo / negativo

32 • eccentricità nell'altra direzione: positiva / negativa

Azione sismica principale	segno	eccentricità	Azione sismica secondaria	eccentricità	N° comb.
E_x	+	$+ e_y$	$+ 0.3\ E_y$	$+ e_x$	1
				$- e_x$	2
			$- 0.3\ E_y$	$+ e_x$	3
				$- e_x$	4
		$- e_y$	$+ 0.3\ E_y$	$+ e_x$	5
				$- e_x$	6
			$- 0.3\ E_y$	$+ e_x$	7
				$- e_x$	8
	–	$+ e_y$	$+ 0.3\ E_y$	$+ e_x$	9
				$- e_x$	10
			$- 0.3\ E_y$	$+ e_x$	11
				$- e_x$	12
		$- e_y$	$+ 0.3\ E_y$	$+ e_x$	13
				$- e_x$	14
			$- 0.3\ E_y$	$+ e_x$	15
				$- e_x$	16
E_y	+	$+ e_x$	$+ 0.3\ E_x$	$+ e_y$	17
				$- e_y$	18
			$- 0.3\ E_x$	$+ e_y$	19
				$- e_y$	20
		$- e_x$	$+ 0.3\ E_x$	$+ e_y$	21
				$- e_y$	22
			$- 0.3\ E_x$	$+ e_y$	23
				$- e_y$	24
	–	$+ e_x$	$+ 0.3\ E_x$	$+ e_y$	25
				$- e_y$	26
			$- 0.3\ E_x$	$+ e_y$	27
				$- e_y$	28
		$- e_x$	$+ 0.3\ E_x$	$+ e_y$	29
				$- e_y$	30
			$- 0.3\ E_x$	$+ e_y$	31
				$- e_y$	32

Tante combinazioni di carico...
Come gestirle?

Risultati dettagliati per tutte le combinazioni di carico?

Una montagna di valori (e di carta) che nessuno avrà mai il coraggio di esaminare

(inoltre: che senso ha per me giudicare l'effetto di, ad esempio, $q - F_x + e_{ay} - 0.3\ F_y - e_{ax}$?)

Inviluppo dei risultati di tutte le combinazioni di carico?

Mi dice solo se la verifica è soddisfatta o no;
ma come capire il comportamento della struttura?

Tante combinazioni di carico...
Come gestirle?

Risultati dettagliati degli schemi base, più inviluppo dei risultati di tutte le combinazioni di carico?

Dai risultati di ciascuno schema base posso capire il comportamento della struttura

L'inviluppo mi fornisce il giudizio complessivo

Schemi base suggeriti:

1. carichi verticali max (senza sisma)
2. carichi verticali min (con sisma)
3. forze in direzione x (statiche o modali)
4. forze in direzione y (statiche o modali)
5. eccentricità accidentale per forze in dir. x
6. eccentricità accidentale per forze in dir. y

coppie (statiche) ⇐