

Verifica sismica di edifici esistenti in c.a.

11 - Analisi non lineare: verifica in termini di deformazioni

Imola
16-18 maggio 2013
Aurelio Ghersi

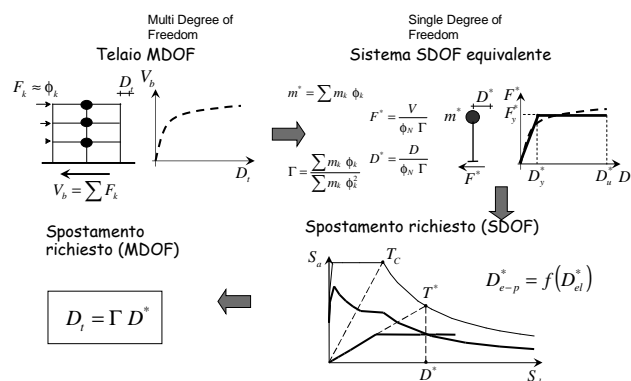
Analisi non lineare (pushover)

Ordinanza 3431 e Circolare 2/2/09

Analisi statica non lineare

- Si valuta il comportamento non lineare della struttura per forze statiche crescenti
- Si ipotizza che gli spostamenti così ottenuti siano uguali a quelli reali (calcolabili con l'analisi dinamica non lineare)
- È necessario individuare quale sia il valore di a_g che corrisponde ad un assegnato punto della pushover
- Si giudica la struttura confrontando gli spostamenti di calcolo con quelli limite

Analisi statica non lineare determinazione dello spostamento "richiesto"



Proposta alternativa

È veramente necessario passare al sistema SDOF?

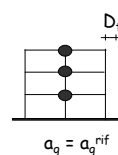
Proposta:
determinare lo spostamento richiesto (elasto-plastico) direttamente dallo spostamento (elastico) fornito dall'analisi modale con spettro di risposta del sistema MDOF

- corretto per tener conto della differenza $D_{e-p} - D_{el}$
- corretto per tener conto della pendenza iniziale della bilineare

Le stesse correzioni fatte nello SDOF

Analisi statica non lineare 1 - analisi modale

- Analisi modale con spettro di risposta (elastica)



$D_{t,el}^{rif}$ spostamento in testa
(el = elastico)

V_b^{rif} taglio al piede

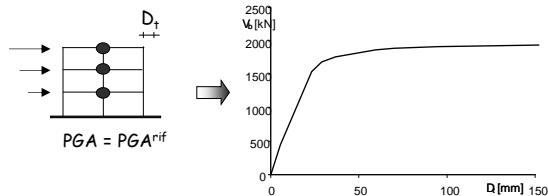
T^{rif} periodo del modo predominante

Nota: poiché il modello è elastico lineare, gli spostamenti variano linearmente con PGA

Analisi statica non lineare

2 - analisi incrementale (pushover)

- Applicazione di forze crescenti ad uno schema con possibilità di plasticizzazione

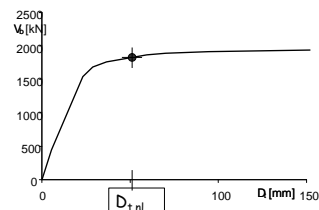


Nota: deve essere fatta due volte, con due distribuzioni di forze

Analisi statica non lineare

relazione $D_t - a_g$

Quale accelerazione a_g corrisponde ad un punto qualsiasi della curva?



$$a_g = a_g^{rif} \frac{D_{t,el}}{D_{t,nl}}$$

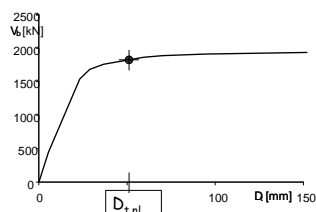


Idea base: uguaglianza di spostamenti $D_{t,el} = D_{t,nl}$

Analisi statica non lineare

relazione $D_t - a_g$

Quale accelerazione a_g corrisponde ad un punto qualsiasi della curva?



Ma in realtà questo non è esatto

Occorre effettuare due correzioni

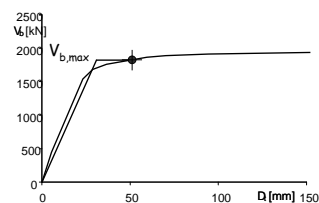
Idea base: uguaglianza di spostamenti $D_{t,el} = D_{t,nl}$

Analisi statica non lineare

3 - bilinearizzazione

Per ciascun punto della curva:

- Trasformazione della curva in una bilatera



Prima possibilità (Eurocodice, NTC08)

Uguaglianza del valore massimo

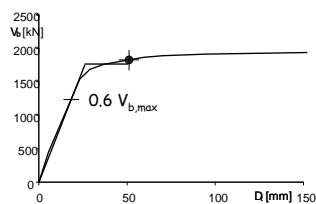
Criterio generale: area sottesa uguale

Analisi statica non lineare

3 - bilinearizzazione

Per ciascun punto della curva:

- Trasformazione della curva in una bilatera



Seconda possibilità (Fajfar)

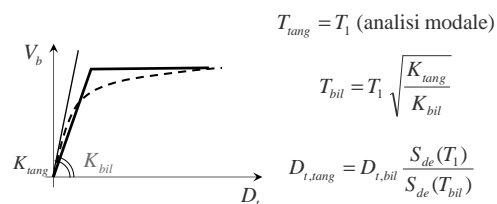
Il tratto lineare interseca la curva al 60% di $V_{b,max}$

Criterio generale: area sottesa uguale

Analisi statica non lineare

4 - correzione per variazione rigidezza

- La bilinearizzazione comporta una variazione di rigidezza e quindi di periodo



$$T_{iang} = T_1 \text{ (analisi modale)}$$

$$T_{bil} = T_1 \sqrt{\frac{K_{iang}}{K_{bil}}}$$

$$D_{t,iang} = D_{t,bil} \frac{S_{de}(T_1)}{S_{de}(T_{bil})}$$

- Gli spostamenti si modificano in funzione della variazione di periodo

$S_{de}(T)$ = spostamento spettrale

Spostamento richiesto

5 - correzione per spostamento elasto-plastico

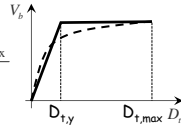
- Lo spostamento di una struttura che vada in campo plastico può essere uguale oppure maggiore di quello di una struttura che rimane in campo elastico
- Si assume:

$$D_{t,el} = D_{t,e-p} \quad T \geq T_c$$

$$D_{t,el} = D_{t,e-p} \frac{1}{\mu} \left[1 + (\mu - 1) \frac{T}{T_c} \right] \quad T < T_c$$

Nota: la duttilità μ è ricavata dalla bilineare

$$\mu = \frac{D_{t,max}}{D_{t,y}}$$



Passaggi matematici

(per mio ricordo)

- Dall'articolo di Bosco, Gherzi, Marino, "On the evaluation of seismic response of structures by nonlinear static methods"

$$R_\mu = \mu \quad \text{when } T^* \geq T_c \quad (8a)$$

$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T^*}{T_c} + 1 \quad \text{when } T^* < T_c \quad (8b)$$

$$a_g = \bar{a}_g \frac{D}{D_{el}} \frac{S_{de}(T_1)}{S_{de}(T_c)} \quad \text{if } T_c \geq T_c \text{ or } R_\mu \leq 1 \quad (20a)$$

$$a_g = \bar{a}_g \frac{D}{D_{el}} \frac{S_{de}(T_1)}{S_{de}(T_c)} \frac{R_\mu}{1 + (R_\mu - 1) T_c / T_c} \quad \text{if } T_c < T_c \text{ and } R_\mu > 1 \quad (20b)$$

$$\frac{1}{\mu} \left[1 + (\mu - 1) \frac{T}{T_c} \right]$$

Spostamento richiesto

6 - determinazione di a_g

- Riunendo le indicazioni precedenti

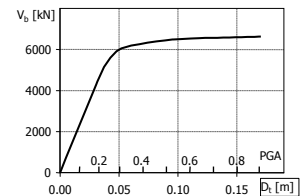
$$a_g = a_g^{rif} \frac{D_{t,nl}}{D_{t,el}^{rif}} \frac{S_{de}(T_1)}{S_{de}(T_{bil})} \quad T \geq T_c$$

$$a_g = a_g^{rif} \frac{D_{t,nl}}{D_{t,el}^{rif}} \frac{S_{de}(T_1)}{S_{de}(T_{bil})} \frac{1}{\mu} \left[1 + (\mu - 1) \frac{T}{T_c} \right] \quad T < T_c$$

Relazione spostamenti - PGA

- Con le relazioni precedenti, si può far corrispondere ad ogni spostamento un valore di PGA.

Si può quindi usare una doppia scala di riferimento per le ascisse



Applicazione alla struttura in esame

telai in direzione x

- Analisi lineare e pushover

analisi modale		
ag	Dt [mm]	Vb [kN]
0.25	119.28	2291.83

$$K_{avg} = \frac{2291.83}{119.28} = 19.21 \text{ kN/mm}$$

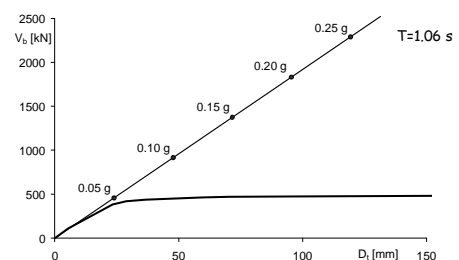
pushover		
passo	Dt [mm]	Vb [kN]
0	0.00	0.00
1	5.36	111.43
2	23.22	303.86
3	28.73	419.63
4	36.53	438.76
5	59.42	464.63
6	70.19	470.50
7	94.52	475.79
8	152.17	482.90
9	166.20	483.79
10	228.01	483.79
11	296.82	483.79
12	364.16	483.79
13	424.16	483.79
14	484.16	483.79
15	544.16	483.79
16	599.55	483.79

File Pushover-x.xls - foglio Dati

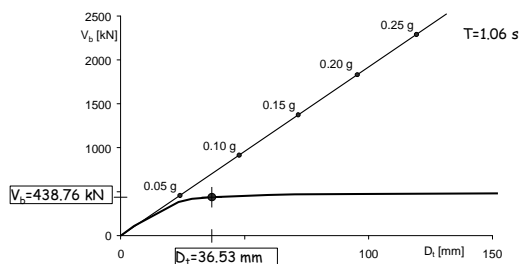
Applicazione alla struttura in esame

telai in direzione x

- Analisi lineare e pushover



- Determinazione dell'accelerazione corrispondente ad un punto della curva



V_b [kN]

500
 3.76 kN

0

0

D_y

$D_y = 36.53$ mm

50

A = area sottesa dalla curva
 = 10284 kN mm

$V_c = V_b$

$$D_y = \frac{2(D_t V_b - A)}{V_y} = 26.19$$
 mm

$V_b \text{ [kN]}$
 $T_{bil} = 1.06 \sqrt{\frac{19.21}{16.75}} = 1.14 \text{ s}$
 $S_{de}(1.06 \text{ s}) = 9.14 \text{ mm}$
 $S_{de}(1.14 \text{ s}) = 9.79 \text{ mm}$
 $V_c = 438.76 \text{ kN}$
 $D_v = 26.19 \text{ mm}$
 $D_t = 36.53 \text{ mm}$
 $K_{tang} = 19.21 \text{ kN/mm}$
 $K_{bil} = \frac{438.76}{26.19} = 16.75 \text{ kN/mm}$
 $D_{r,tang} = 36.53 \frac{9.14}{9.79} = 34.11 \text{ mm}$

Diagramma di un sistema di travi con un nodo di collegamento. La trave superiore è fissata a un muro a sinistra e ha una forza di taglio $V_b = 438.76 \text{ kN}$. La trave inferiore è fissata a un muro a sinistra e ha una forza di taglio $V_b = 438.76 \text{ kN}$. La trave superiore ha una lunghezza totale di 50 m, con un punto di interesse a $D_s = 26.19 \text{ m}$. La trave inferiore ha una lunghezza totale di 50 m, con un punto di interesse a $D_s = 36.53 \text{ m}$. La distanza tra i punti di interesse è $D_{s, \text{tang}} = 34.11 \text{ m}$. La temperatura T è maggiore di T_c , quindi la correzione non è necessaria.

Graph of bending moment V_b [kN] versus distance x [mm]. The curve shows a linear increase from 0 to a peak value of $V_b = 438.76$ kN at $x = 26.19$ mm, followed by a constant value of $V_b = 438.76$ kN for $x > 36.53$ mm. The total length of the beam is 50 mm. The distance from the peak to the end of the beam is 34.11 mm.

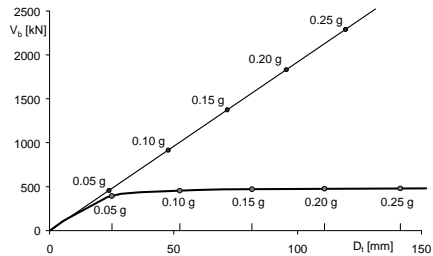
$$a_g = a_g^{rif} \frac{D_{t,tang}}{D_{t,el}^{rif}} = 0.25 \frac{34.11}{119.28} = 0.071 \text{ g}$$

- Accelerazione per tutti i punti della curva

analysis model											
ag	Dt [mm]	Vb [kN]	Kcal								
0.25	119.26	2291.83	19.21								
T	1.064	s			ag(T)		0.319		g mm		
		D(T)									
pushover											
pushover	Dt [mm]	Vb [kN]	Area	Vy	Dy	Kbil	T	Dep(T)	Dep(D)	Dt_el	ag
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.064	9.14	1.000	0.00	0.00	
1	5.32	111.43	299	111.43	5.36	20.77	1.064	9.14	1.000	5.36	0.01
2	23.22	383.86	4721	383.86	21.84	57.17	1.113	9.56	1.046	22.21	0.07
3	79.79	439.63	6936	439.63	24.41	71.29	1.135	9.67	1.067	72.19	0.067
4	36.53	418.76	10284	418.76	26.19	66.75	1.140	9.75	1.071	34.11	0.071
5	162.1	466.9	20650	466.9	30.45	60.45	1.163	10.03	1.106	162.1	0.106
6	79.19	470.50	26569	470.50	31.52	15.02	1.203	10.34	1.131	62.07	0.130
7	94.52	473.79	31710	475.79	32.80	14.51	1.225	10.52	1.151	82.13	0.172
8	162.1	463.79	64801	462.80	35.51	13.45	1.272	10.83	1.195	127.30	0.197
9	166.20	483.79	71582	483.79	36.48	13.26	1.281	11.01	1.204	136.08	0.289
10	229.01	483.79	101967	483.79	36.48	13.26	1.281	11.01	1.204	190.26	0.399
11	286.62	483.79	134713	483.79	36.48	13.26	1.281	11.01	1.204	246.69	0.517
12	384.16	483.79	167348	483.79	36.48	13.26	1.281	11.01	1.204	302.53	0.644
13	424.16	483.79	186376	483.79	36.48	13.26	1.281	11.01	1.204	352.37	0.739
14	484.16	483.79	225403	483.79	36.48	13.26	1.281	11.01	1.204	402.21	0.843
15	544.16	483.79	254430	483.79	36.48	13.26	1.281	11.01	1.204	452.05	0.947
16	544.16	483.79	254430	483.79	36.48	13.26	1.281	11.01	1.204	496.06	1.044

Applicazione alla struttura in esame telai in direzione x

- Analisi lineare e pushover
con corrispondenza tra punti e a_g



File Pushover-x.xls - foglio Graf Vb-Dt

Applicazione alla struttura in esame telai in direzione y

- I primi passi dell'analisi non lineare sono stati fatti in maniera parzialmente manuale, ovvero con l'utilizzo di una analisi lineare e facendo variare via via lo schema

Passo	1/p		Dt	Vb	cerniera piltra	pia				
0			0	0						
1	4.62%	4.62%	8.573	63.47	20-12	2	des			
2	0.82%	5.44%	10.192	74.72	9-1	3	des			
3	0.05%	5.49%	10.298	75.42	20-12	1	des			
4	0.30%	5.79%	10.947	79.55	9-1	2	des			
5	0.26%	6.05%	11.530	83.08	9-1	1	des	20-12	3	des
6	0.29%	6.34%	12.260	87.09	9-1	4	des			
7	3.17%	9.51%	20.483	130.65	17-9	2	des			

File TelY-2012-NL.xls

Applicazione alla struttura in esame telai in direzione y

- Curva di pushover (parte iniziale)

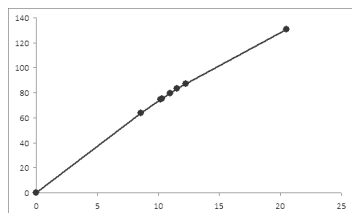


Diagramma del momento Involuppo analisi modale

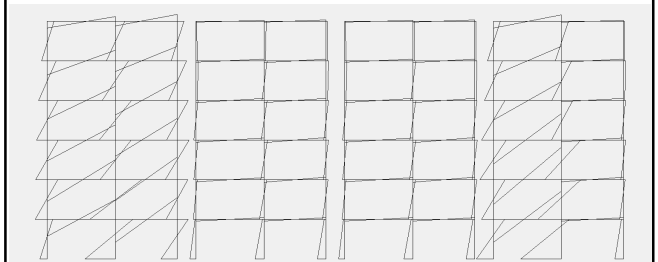


Diagramma del momento Forze modo 1 - passo 1

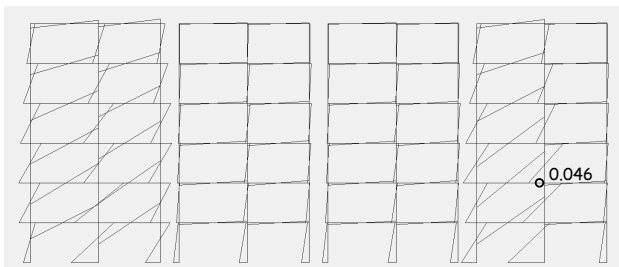
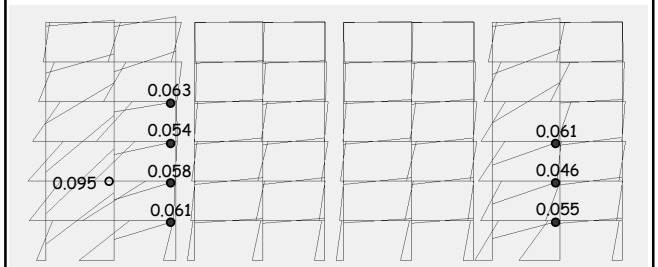
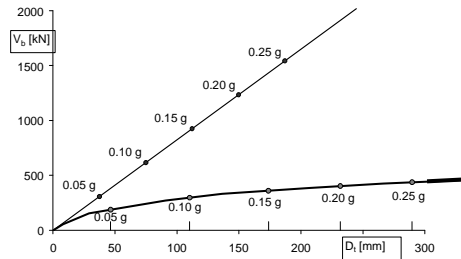


Diagramma del momento Forze modo 1 - passo 7

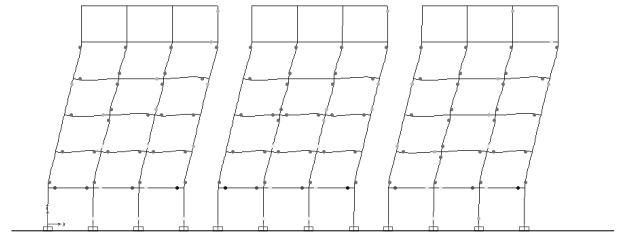


Applicazione alla struttura in esame telai in direzione y

- Analisi lineare e pushover
con corrispondenza tra punti e a_g

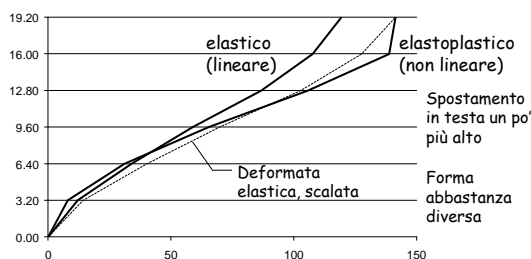


Direzione X travi plasticizzate



Il meccanismo di collasso è sostanzialmente globale

Deformata per $a_g=0.25\text{ g}$ - dir.x con comportamento elastico e plastico



Verifica per $a_g=0.25\text{ g}$ - dir.x

Per ciascun interpiano:

- Calcolare la rotazione alla corda θ_u e gli spostamenti limite corrispondenti
 - θ_u dipende anche dallo sforzo normale, che varia in maniera non lineare ed è diverso da quello fornito dall'analisi lineare (ma in genere il ΔN da sisma è minore con analisi non lineare)
- Determinare lo spostamento limite minimo
- Confrontarlo con il valore fornito dal calcolo

Verifica per $a_g=0.25\text{ g}$ - dir.x

spostamenti relativi			spostamenti disponibili		
ag =	0.25		ag =	0.25	
piano	Dr		piano	Dr	rapporto
6	2.67		6	50.37	18.884
5	32.95		5	42.09	1.277
4	40.35		4	33.38	0.827
3	34.35		3	26.28	0.765
2	23.06		2	23.67	1.026
1	7.99		1	21.68	2.713
				min	0.765
					verifica no

La verifica non è soddisfatta

Nota: per semplicità ho usato gli spostamenti limite calcolati con N da analisi lineare, ma questo non è corretto

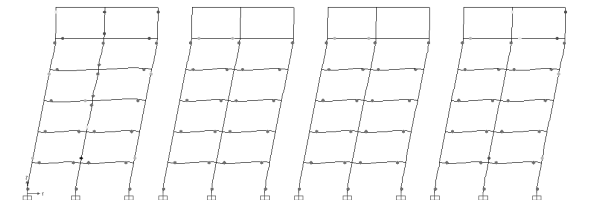
Verifica per $a_g=0.205\text{ g}$ - dir.x

spostamenti relativi			spostamenti disponibili		
ag =	0.205		ag =	0.205	
piano	Dr		piano	Dr	rapporto
6	2.65		6	50.52	19.066
5	25.03		5	42.94	1.716
4	32.97		4	34.78	1.055
3	28.07		3	28.10	1.001
2	18.52		2	25.84	1.395
1	6.51		1	23.30	3.581
				min	1.001
					verifica ok

La verifica è soddisfatta

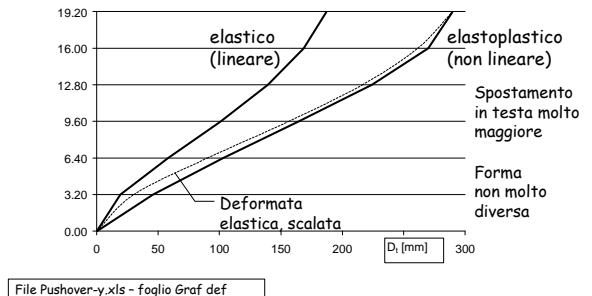
Nota: per semplicità ho usato gli spostamenti limite calcolati con N da analisi lineare, ma questo non è corretto

Direzione Y travi e travetti plasticizzati



Il meccanismo di collasso è sostanzialmente globale

Deformata per $a_g=0.25\text{ g}$ - dir.y con comportamento elastico e plastico



Verifica per $a_g=0.25\text{ g}$ - dir.y

spostamenti relativi		spostamenti disponibili		
ag =	0.25	ag =	0.25	
piano	Dr	piano	Dr	rapporto
6	19.65	6	49.20	2.504
5	45.85	5	39.66	0.865
4	59.97	4	31.20	0.520
3	61.30	3	26.61	0.434
2	57.17	2	20.32	0.355
1	45.68	1	19.77	0.433
				min 0.355
				verifica no

La verifica non è soddisfatta

Nota: per semplicità ho usato gli spostamenti limite calcolati con N da analisi lineare, ma questo non è corretto

Verifica per $a_g=0.116\text{ g}$ - dir.y

spostamenti relativi		spostamenti disponibili		
ag =	0.116	ag =	0.116	
piano	Dr	piano	Dr	rapporto
6	12.97	6	50.28	3.876
5	21.74	5	42.82	1.961
4	29.65	4	35.73	1.205
3	31.54	3	31.55	1.000
2	25.59	2	28.44	1.111
1	11.18	1	26.55	2.374
				min 1.000
				verifica ok

La verifica è soddisfatta

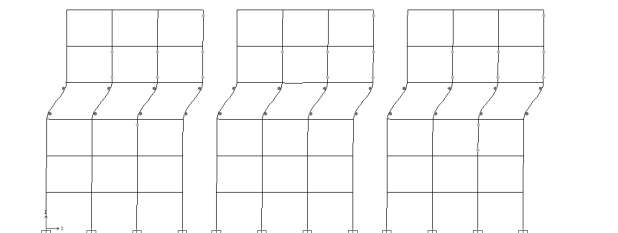
Nota: per semplicità ho usato gli spostamenti limite calcolati con N da analisi lineare, ma questo non è corretto

Conclusioni

- L'analisi statica non lineare mostra che lo spostamento limite è raggiunto
 - In direzione x: per $a_g = 0.205\text{ g}$
 - In direzione y: per $a_g = 0.116\text{ g}$
- Questi valori sono minori di quelli stimati con l'analisi lineare, pari rispettivamente a 0.256 g e 0.163 g
- In effetti gli spostamenti relativi valutati con analisi non lineare sono abbastanza maggiori di quelli stimati con analisi lineare, specie in direzione y

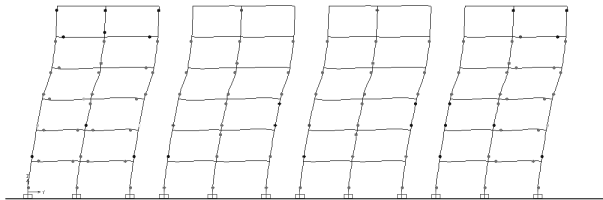
Direzione X travi infinitamente resistenti

E se il modello cambia ?



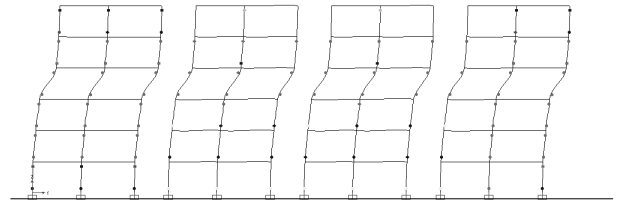
Meccanismo di piano

Direzione Y
travi plasticizzate, travetti no



Minime variazioni

Direzione Y
travi e travetti infinitamente resistenti



Meccanismo di piano

Validazione (considerazioni)

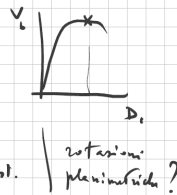
ANALISI NON LINEARE

massima $q_d = \infty$
CHIARIMENTI SU A.N.L.

1) confronto

sp. s. con ad q_d - capacità di

2) come si calcolate le capacità di sp. s.



VALIDAZ. con A.L.

3) sp. s. per q_d con A.L.

4) distribuzione corrente A.N.L. sp. s. in dist. corrente A.L.
($p > \dots$)