

VISOKE GRAĐEVINE



Dinamička djelovanja i osnove dinamike

Jednadžba gibanja

- ...koja definira dinamičko ponašanje konstrukcije je jednadžba ravnoteže između

- sile inercije,
- sile prigušenja i
- sile krutosti
- sa vanjskim primijenjenim opterećenjem:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = f(t)$$

- Svaki sustav ima određena svojstva prije nego počne vibrirati. Sustav mora imati **stabilan položaj ravnoteže** tako da, ako je on iz bilo kojeg razloga poremećen, sustav pokušava ponovno uspostaviti taj položaj.
- Sila kojom se pokušava ponovno uspostaviti ravnoteža zove se **sila krutosti**.
- Pri vibriranju konstrukcije, sila krutosti je proporcionalna **pomaku konstrukcije**, a koeficijent proporcionalnosti se zove **krutost konstrukcije**.
- Krutost čuva **potencijalnu energiju**, koja je za konstrukcijske sustave, obično **energija deformiranja** u sklopu konstrukcije, a značajan doprinos mogu imati i učinci **gravitacije** i **uzgona**.

Jednadžba gibanja

- ...koja definira dinamičko ponašanje konstrukcije je jednadžba ravnoteže između

- sile inercije,
- sile prigušenja i
- sile krutosti
- sa vanjskim primijenjenim opterećenjem:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = f(t)$$

- Kako bi se dogodile vibracije, konstrukcija mora imati i **masu** → **impuls mase** izaziva vibriranje konstrukcije čijim ponavljanjem se prekoračuje ravnotežni položaj.
- **Silu inercije**, koja djeluje na konstrukciju, može se smatrati jednakom umnošku **mase** i **ubrzanja** (ali suprotnog smjera).
- Pomicanje mase podrazumijeva i **kinetičku energiju**, a vibracije predstavljaju izmjenu potencijalnih i kinetičkih energija.

Jednadžba gibanja

- ...koja definira dinamičko ponašanje konstrukcije je jednadžba ravnoteže između

- sile inercije,
- sile prigušenja i
- sile krutosti
- sa vanjskim primijenjenim opterećenjem:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = f(t)$$

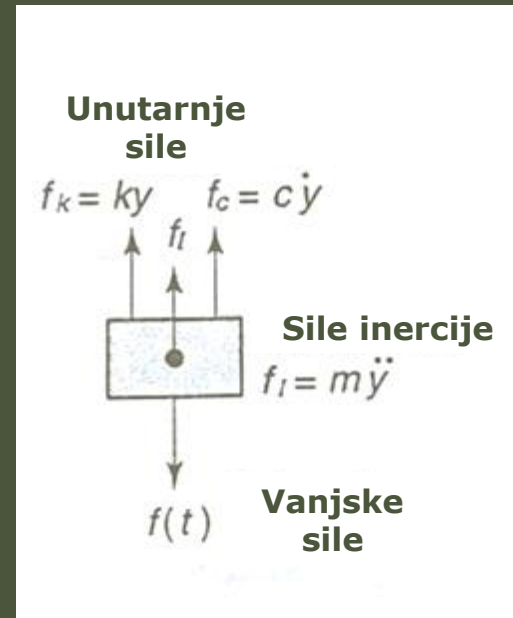
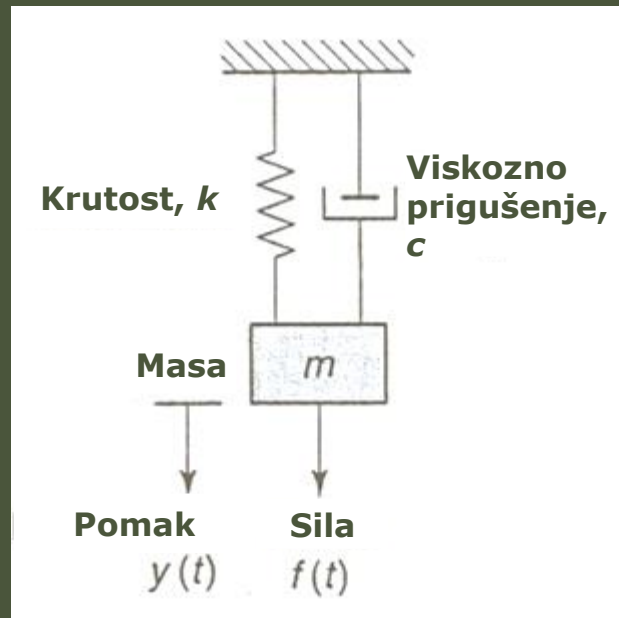
-
- Svi sustavi moraju sadržavati nekakav mehanizam za rasipanje energije – kaže se da je tada sustav **prigušen**.
 - Ako se ne primjenjuje vanjska sila kako bi uvela energiju u sustav, prigušenje će izazvati smanjenje i potpuni nestanak amplitude pomaka.
 - Uobičajena idealizacija prigušenja je pretpostavka da je **sila prigušenja** proporcionalna **brzini gibanja konstrukcije**.
 - U tom slučaju prigušenje je viskozno, a konstanta proporcionalnosti između **sile prigušenja** i brzine je **koeficijent viskoznog prigušenja**.

Jednadžba gibanja

- ...koja definira dinamičko ponašanje konstrukcije je jednadžba ravnoteže između

- sile inercije,
- sile prigušenja i
- sile krutosti
- sa vanjskim primijenjenim opterećenjem:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = f(t)$$



Jednadžba gibanja

- ...u formi matrice jednadžba prigušenog gibanja za bilo koji linearni problem:

- matrica mase,
- matrica prigušenja i
- matrica krutosti
- matrica vanjskog primijenjenog opterećenja:

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F$$

- Ako se isključi prigušenje i ne primjenjuje se vanjsko opterećenje jednadžba neprigušenog gibanja je:

$$M\ddot{y} + Ky = 0$$

- Rješenje jednadžbe dano je u obliku jednostavnog harmoničnog gibanja:

$$y = \tilde{y} \sin \omega t \quad \ddot{y} = -\omega^2 \tilde{y} \sin \omega t$$

- Kada ovo uvrstimo u jednadžbu gibanja dobije se:

$$K\tilde{y}_0 = \omega^2 M\tilde{y}_0$$

- Ovo je poznato kao **problem vlastitih vrijednosti**,

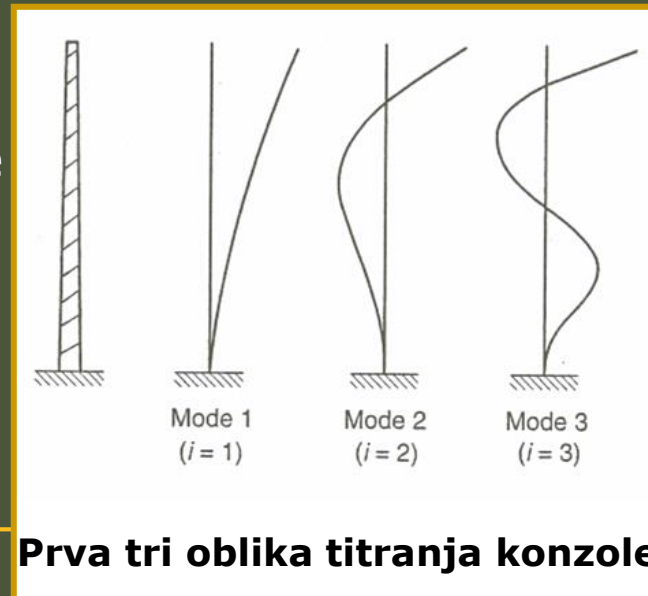
- y_0 je vlastiti faktor,
- ω je vlastita frekvencija u radijanima/sekundi
- $n = \omega/2\pi$ je odgovarajuća vlastita frekvencija u ciklusima/sekundi (Hz)

Oblici vibriranja

- Kada sustav ima r stupnjeva slobode, jednačina $K\tilde{y}_0 = \omega^2 M\tilde{y}_0$ ima r rješenja koji predstavljaju vlastite oblike titranja konstrukcije.
- U svakom obliku, slobodno titranje se sastoji od harmoničnog gibanja svih točaka u fazi, pri frekvenciji n_i (ili kružnoj frekvenciji ω_i) pri čemu je

$$y_j = Y_i \Phi_i \sin \omega_i t$$

- Y_i je opća amplituda oblika titranja
- Φ_i vlastiti vektor (koji sadrži elemente ϕ_{ij} za svaki stupanj slobode) predstavlja vektor oblika titranja



Oblici vibriranja

- ❑ Vlastiti oblici titranja su međusobno neovisni - vanjske ili unutrašnje sile vezane uz bilo koji oblik ne utječu na bilo koji drugi oblik.
- ❑ Za svaki oblik masa $\mathbf{M}_i$ i krutost $\mathbf{K}_i$ mogu se odrediti rješavanjem problema vlastitih vrijednosti kao:

$$\mathbf{M}_i = \Phi_i \mathbf{M} \Phi_i^T = \sum m_i \phi_{ji}^2 \quad \mathbf{K}_i = \omega_i^2 \mathbf{M}_i$$

- ❑ Svaki vektor vanjskog opterećenja $\mathbf{F}$ (koji sadrži elemente f_j) može se razdvojiti u modalne komponente kao skalarne veličine $\mathbf{F}_i$

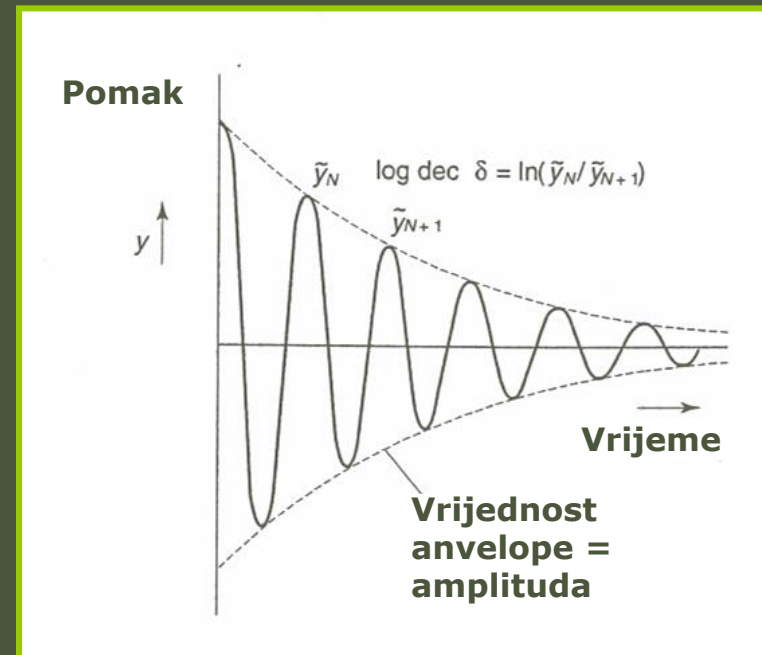
$$\mathbf{F}_i = \sum f_j \phi_{ji}$$

- ❑ Svojstvo neovisnosti oblika titranja znači da se cjelokupni problem može svesti na superpoziciju modalnih odgovora, od kojih je svaki dobiven rješavanjem sustava s jednim stupnjem slobode za dani $\mathbf{F}_i(t)$, $\mathbf{K}_i$ i ω_i .
- ❑ Krutost se povećava sa svakim sljedećim modalnim oblikom, kod mnogih konstrukcija mjerodavni su samo prvi ili nekoliko prvih oblika titranja.

Prigušenje

- ❑ Kako bi se svojstvo neovisnosti održalo kada je uključeno i prigušenje, potrebno je postaviti uvjete na relativne vrijednosti elemenata koji čine matricu prigušenja C.
- ❑ Za većinu konstrukcija, sila prigušenja je mala u odnosu na silu inercije ili krutosti.
- ❑ Stoga je često dovoljno modelirati djelovanje koje pomalo nestaje za različite oblike osciliranja.
- ❑ Pri slobodnom smanjenju (nestajanju, prigušenju), amplituda bilo kojeg ciklusa je konstanta pomnožena s amplitudom prethodnog ciklusa.
- ❑ Ovo se uobičajeno izražava **logaritamskim dekrementom prigušenja δ** .
- ❑ Za osnovne sustave s malim prigušenjem:

$$\delta = \ln(\tilde{y}_N / \tilde{y}_{N+1}) \doteq 1 - (\tilde{y}_{N+1} / \tilde{y}_N)$$



VISOKE GRAĐEVINE



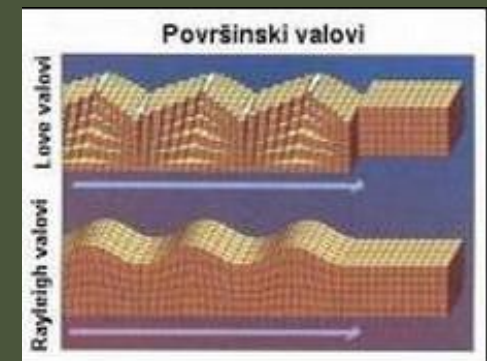
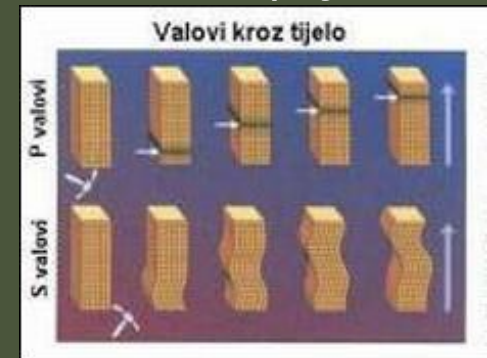
Općenito o potresu

OSNOVNI POJMOVI

- ❑ **SEIZMOLOGIJA**: znanstvena grana geofizike koja proučava potrese i širenje potresnih valova
- ❑ **POTRES**: iznenadno gibanje dijelova Zemljine kore kao rezultat dinamičkog otpuštanja elastične energije naprezanja koje emitira seizmičke valove (valovi koji putuju kroz zemlju kao rezultat potresa).
- ❑ Prema nastanku:
 - **TEKTONSKI** nastaju na rasjedima, u zonama gdje tektonske ploče kližu uz drugu ploču ili se podvlače jedna ispod druge. Uzrokovani su iznenadnim oslobađanjem energije nakupljene unutar stijene uzduž rasjeda. Energija je nakupljena zbog naprezanja u stijeni zbog pomicanja unutar zemlje. (95%)
 - **VULKANSKI** uzrokovani pomicanjem magme iz vulkana pa se stijena lokalno napreže. Kako se tekuća magma uzdiže ka površini vulkana, pomiče i raspucava stijensku masu i uzrokuje kontinuirano podrhtavanje
 - **URUŠNI** rijetki, u pravilu slabi
 - **UMJETNI** (NE, HE...)

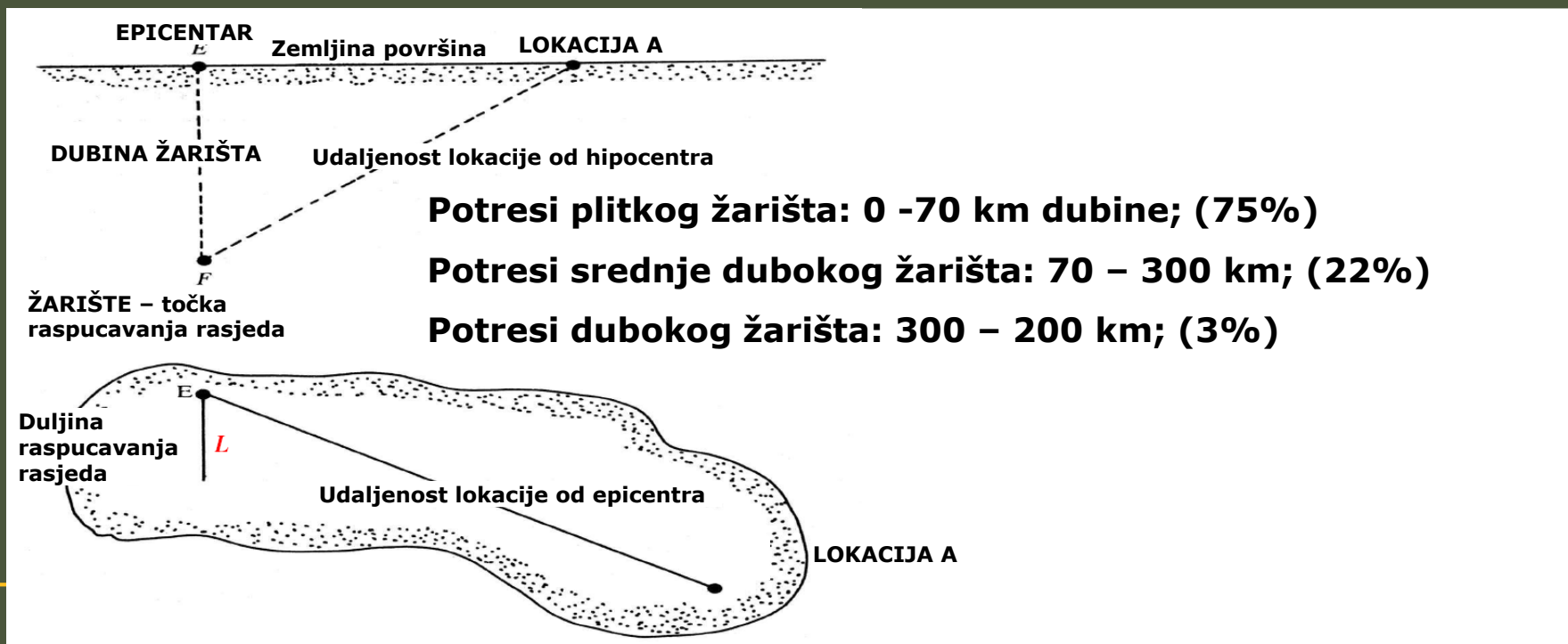
Seizmički valovi

- ❑ Valovi koji počinju svoj put u žarištu i šire se kroz Zemlju:
 - **P - tlačni valovi**, stjenovit materijal na njihovom putu miče se naprijed-natrag u istom smjeru u kojem putuje val što izaziva tlačenje i razvlačenje stijene (6-7 km/s),
 - **S – posmični valovi**, stjenovit materijal giba se postrance ili gore-dolje okomito na smjer valova (3,5 km/s)
- ❑ Valovi koji se šire preko površine, uvijek sporiji od P, najčešće i od S:
 - **Love-ovi valovi** uzrokuju horizontalno gibanje stijene ili postranično gibanje pod pravim kutovima u odnosu na smjer vala, no bez vertikalnih pomaka
 - **Rayleigh-ovi** valovi uzrokuju da se dijelovi stijene gibaju naprijed, gore, natrag i dolje u odnosu na pravac kojim val putuje (kružno gibanje)



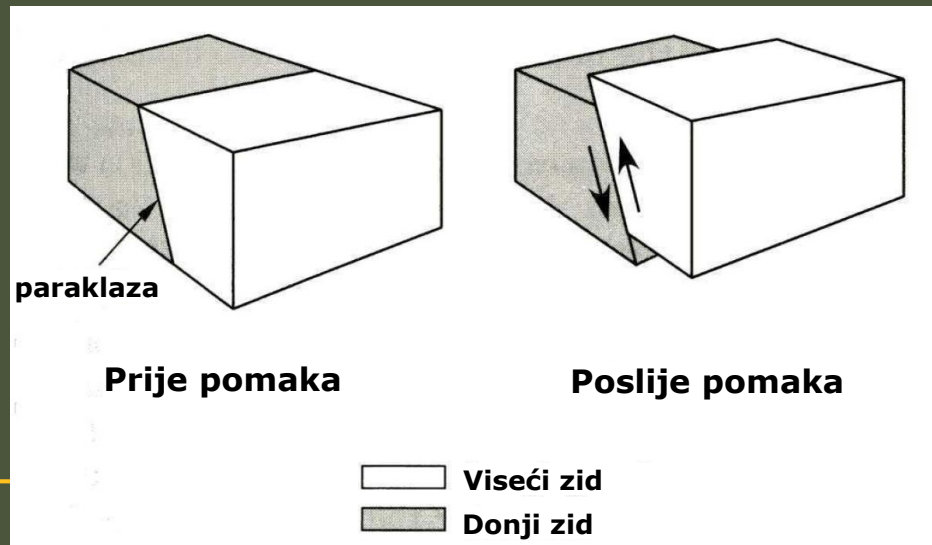
Hipocentar, epicentar

- ❑ **HIPOCENTAR** (fokus, žarište): točka unutar Zemlje uz raspucavajući geološki rasjed gdje nastaje potres
- ❑ **EPICENTAR**: točka na Zemljinoj površini direktno iznad hipocentra.
- ❑ Potresni valovi šire se iz hipocentra te se nadalje formiraju uzduž raspucavanja rasjeda



Rasjed

- ❑ Raspucavanje u stijeni Zemljine kore nastalo premještanjem slojeva što nastaje izdizanjem, spuštanjem ili uzdužnim pomicanjem stijenskih masa duž pukotine naziva se **paraklaza**.
- ❑ Nastaju kao posljedica ekspanzije, gravitacije i kompresije, ili kombinacijom.
- ❑ Rasjed obuhvaća paraklazu i dva krila.
- ❑ Veličine od nekoliko cm do nekoliko stotina km – pomaci uzduž površine rasjeda mogu varirati.
- ❑ Gornji blok stijena – **viseći zid**, a blok stijena ispod – **donji zid**.



Mercalli-jeva ljestvica (INTENZITET POTRESA)

PGA *Peak Ground Acceleration*
– vršno ubrzanje tla u %
gravitacije



I	Nezamjetljiv potres	Bilježe ga jedino seizmografi.
II	Jedva osjetan potres	Osjeti se samo u gornjim katovima visokih zgrada.
III	Lagan potres	Tlo podrhtava kao kad ulicom prođe automobil.
IV	Umjeren potres	Prozorska okna i staklenina zveče kao da je prošao težak teretni automobil.
V	Prilično jak potres	Njišu se slike na zidu. Samo pojedinci bježe na ulicu.
VI	Jak potres	Slike padaju sa zida, ormari se pomiču i prevrću. Ljudi bježe na ulicu.
VII	Vrlo jak potres	Ruše se dimnjaci, crijepovi padaju sa krova, kućni zidovi pucaju.
VIII	Razoran potres	Slabije građene kuće se ruše, a jače građene oštećuju. Tlo puca.
IX	Pustošni potres	Kuće se teško oštećuju i ruše. Nastaju velike pukotine, klizišta i odroni zemlje.
X	Uništavajući potres	Većina se kuća ruši do temelja, ruše se mostovi i brane. Izbija podzemna voda.
XI	Katastrofalan potres	Srušena je velika većina zgrada i drugih građevina. Kidaju se i ruše stijene.
XII	Veliki katastrofalan potres	Do temelja se ruši sve što je čovjek izgradio. Mijenja se izgled krajolika, rijeke mijenjaju korito, jezera nestaju ili nastaju.

1,5-2

3-4

6-7

10-15

25-30

50-55

>60

Usporedba Richterove i Mercalijeve ljestvice

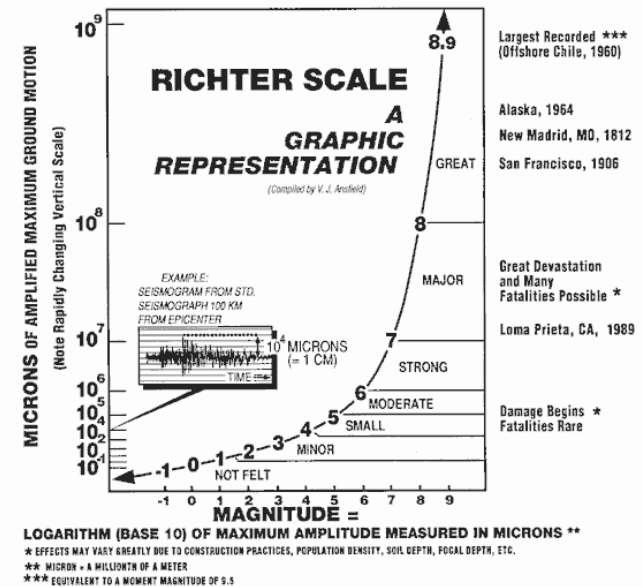
Richterova ljestvica Magnituda M potresa	Modificirana Mercalijeva ljestvica Maksimalni intenzitet potresa
1	-
2	I, II
3	III
4	IV, V
5	VI, VII
6	VIII
7	IX, X
8	XI

Proračun konstrukcija na potresno djelovanje

- Dinamika konstrukcija
- Fenomenologija potresa**
- Potresno djelovanje (Eurokod)
- Proračun (modeliranje) konstrukcija
- Dimenzioniranje konstruktivnih elemenata (detaljiranje)

Jačina (magnituda) i intenzitet potresa

- Jačina potresa ovisi o količini energije koja se oslobodi u potresu
- Mjera za **jačinu potresa** → **Magnituda (M)** – Richter 1935.
- Jačina potresa je proporcionalna maksimalnoj amplitudi vibracije tla, koja se smanjuje s udaljenošću od epicentra
- Ovisnost između energije seizmičkih valova i magnitude M, dana je empirijskom jednadžbom (Gutenberg, Richter): $\log E = 4,8 + 1,5M$
- Intenzitet potresa** → “mjera” efekta potresa na građevinama, prirodi i ljudima



Magnituda potresa - M	Modificirana Mercalijeva ljestvica Maksimalni intenzitet potresa
1	-
2	I, II
3	III
4	IV, V
5	VI, VII
6	VIII
7	IX, X
8	XI

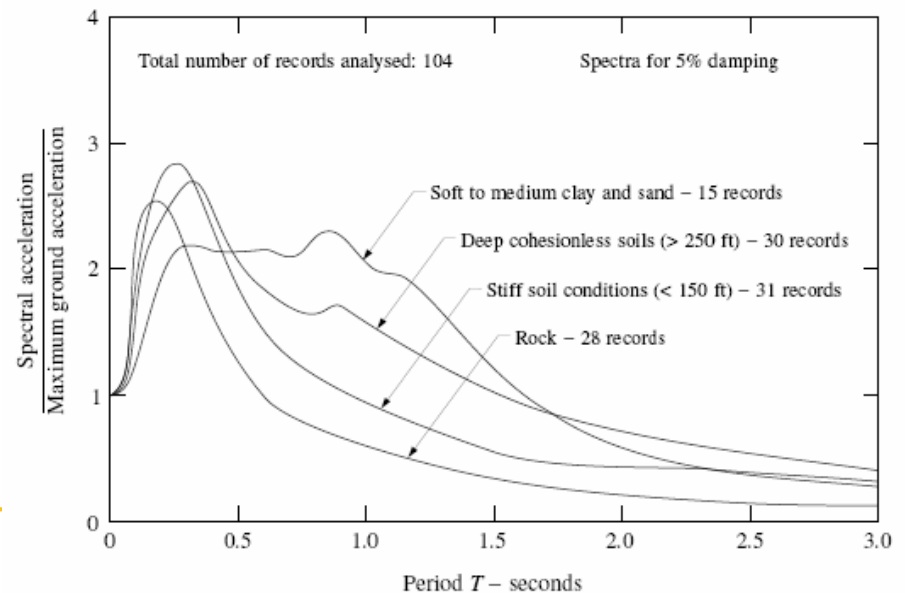
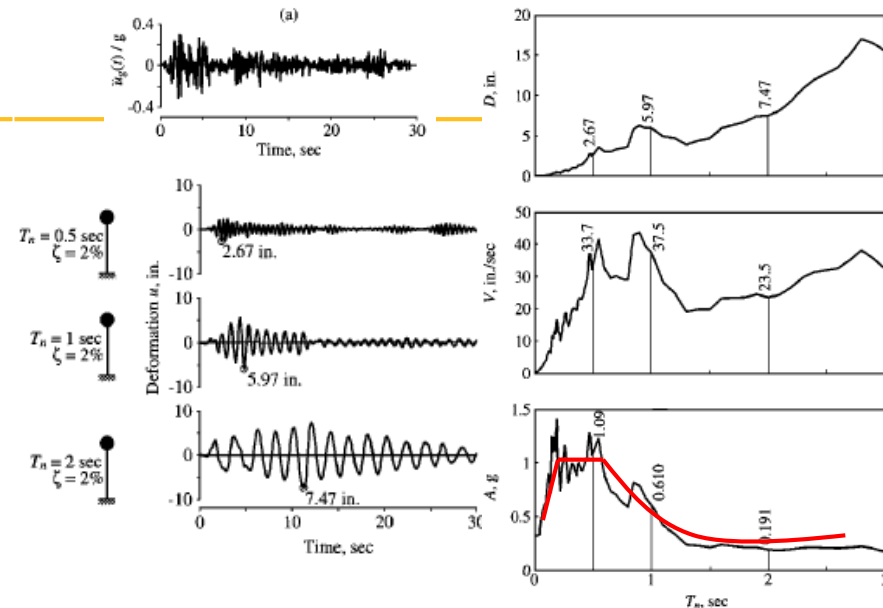
Proračun konstrukcija na potresno djelovanje

- Dinamika konstrukcija
- **Fenomenologija potresa**
- Potresno djelovanje (Eurokod)
- Proračun (modeliranje) konstrukcija
- Dimenzioniranje konstruktivnih elemenata (detaljiranje)

Karakteristike vibracija tla

→ spektralna analiza

- Karakteristike vibracija tla na određenoj lokaciji mogu se dobiti analizom akcelerograma → ubrzanje, brzina i pomaci tla
- Karakteristike vibracija tla ovise o nizu faktora: magnitudi, udaljenosti od žarišta, geol. karakt. stijenskih masa, lokalnim geomehaničkim karakt.
- Poznavanjem karakteristika vibracija tla (ubrzanje), definira se potresno opterećenje u obliku **projektnog spektra ubrzanja**



Razlikovanje osnovnih perioda T

□ **Period potresa**

- period seizmičkog vala

□ **Period lokacije**

- određuje se iz geotehničkih podataka – lokalna geologija i površinski slojevi tla

□ **Period konstrukcije**

- određuje se analizom same konstrukcije

Oštećenja konstrukcije

- ❑ Oštećenja konstrukcije uslijed potresa ovise o:
 - Ubrzanju tla
 - Trajanju pomaka
 - Sadržaju frekvencija
 - Lokalnim uvjetima tla
 - Periodu lokacije
 - Udaljenosti konstrukcije od žarišta
 - Geološkim formacijama,
 - Vlastitoj frekvenciji konstrukcije
 - Prigušenju



Rezonancija

- ❑ Rezultira pojačanjem odgovora
- ❑ Nastupa kada se poklope periodi potresa, lokacije i zgrade
- ❑ Primjer: potres u Mexico City-ju 1985.
 - Žarište je bilo 365 km od grada
 - Iako je amplituda ubrzanja bila malena, period potresa poklapao se s periodom tla na kojem se nalazi grad
 - Uz to, neke zgrade imale su vlastiti period blizak periodu seizmičkih valova i periodu tla na lokaciji
 - Posljedica je bila iznimno povećanje odziva i rušenje velikog broja zgrada



Primjeri katastrofalnih potresa

- ❑ **El Centro**, Kalifornija
 - 1940.; $M=6,4$; trajanje 16 s
- ❑ **San Fernando**, Kalifornija
 - 1971.; $M=6,6$; trajanje 7 s
- ❑ **Loma Prieta**, San Francisco, Kalifornija
 - 1989.; $M=7,1$; $PGA= 0,65\text{ g}$
- ❑ **Northridge**, Los Angeles, Kalifornija
 - 1994.; $M=6,7$; $PGA= 1,8\text{ g}$
- ❑ **Hyogoken-Nanbu**, Kobe, Japan
 - 1995.; $M=6,9$; $PGA\ 0,83\text{ g}$
- ❑ **Wenchuan**, Sichuan, Kina
 - 2008.; $M=8,0$



- ❑ **Magnituda potresa nije funkcija ubrzanja ili trajanja**

VISOKE GRAĐEVINE



Potres, EN 1998-1:2004

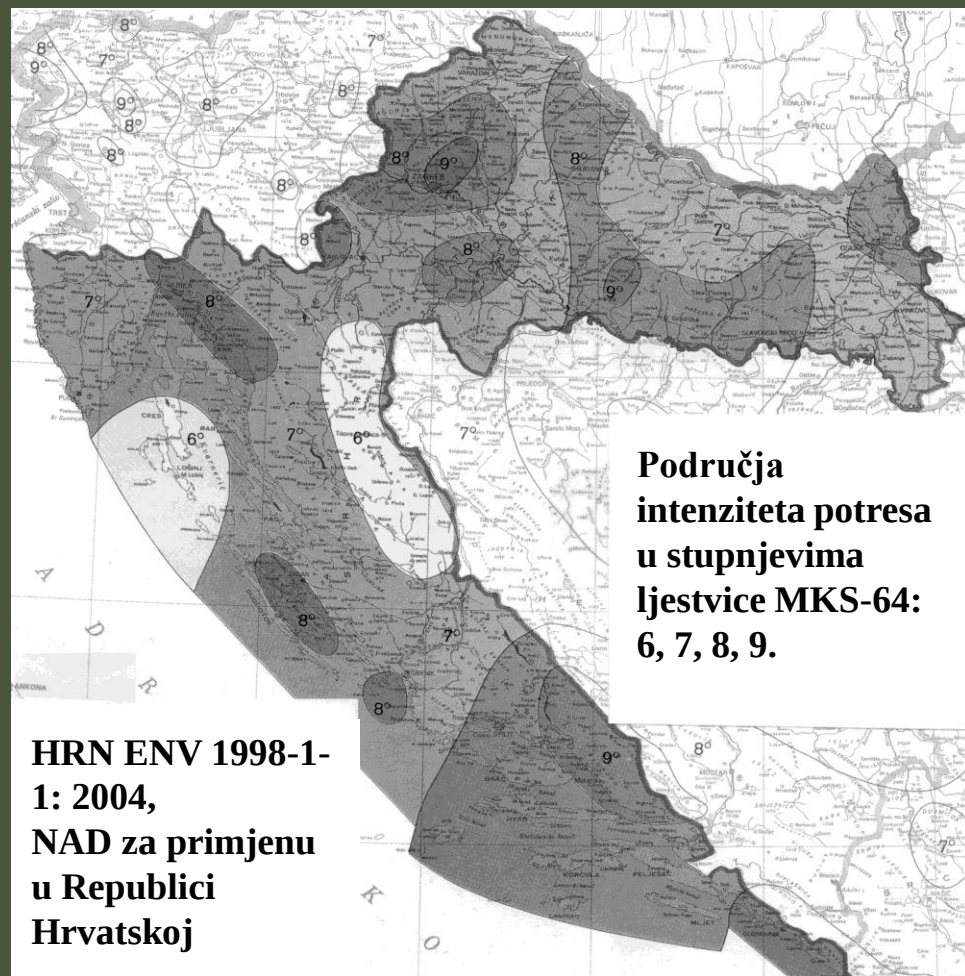
POTRES

- ❑ Jedna od općenito najopasnijih izvanrednih prirodnih pojava s velikim,
 - ponekad i katastrofalnim materijalnim i ljudskim žrtvama.

- ❑ U pravilu su područja pojedine zemlje podijeljena u potresne zone,
 - na temelju analiza prirodnih okolnosti te povijesnih i iskustvenih podataka,
 - i to s obzirom na maksimalni intenzitet očekivanog potresa u nekom povratnom periodu (npr. 500 godina),
 - na što se onda i proračunavaju građevine u toj potresnoj zoni.

SEIZMIČKA KARTA HRVATSKE, HRN-ENV 1998-1

Područje intenziteta potresa u stupnjevima ljestvice MKS-64	Proračunsko ubrzanje a_g
6	0,05g
7	0,1g
8	0,2g
9	0,3g



POTRES

- ❑ Veličina i učinak djelovanja potresa općenito će ovisiti o:
 - udaljenosti epicentra potresa od građevine,
 - položaju građevine u odnosu na smjer širenja potresnih valova,
 - vrsti tla te svojstvima temelja građevine,
 - težini građevine te razdiobi masa,
 - svojstvima prigušivanja uzбудnih djelovanja.

POTRES

- Normirane metode proračuna:

- LINEARNE:

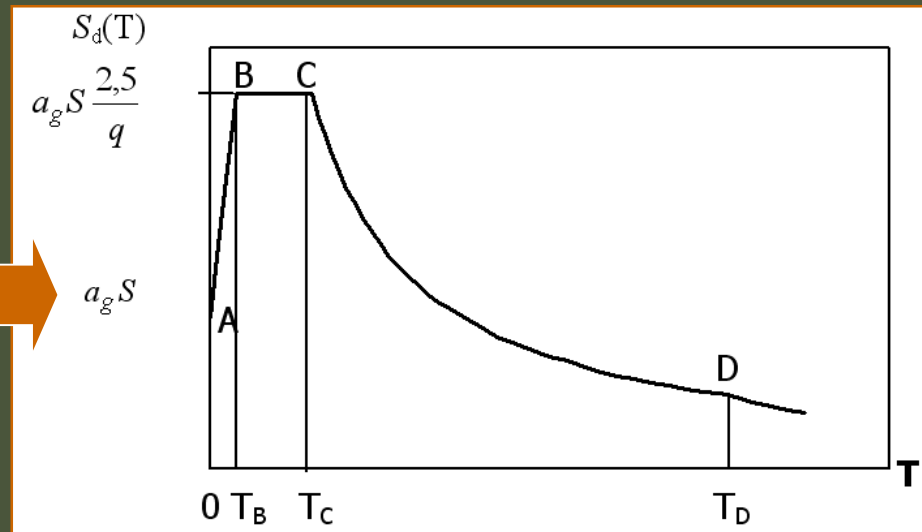
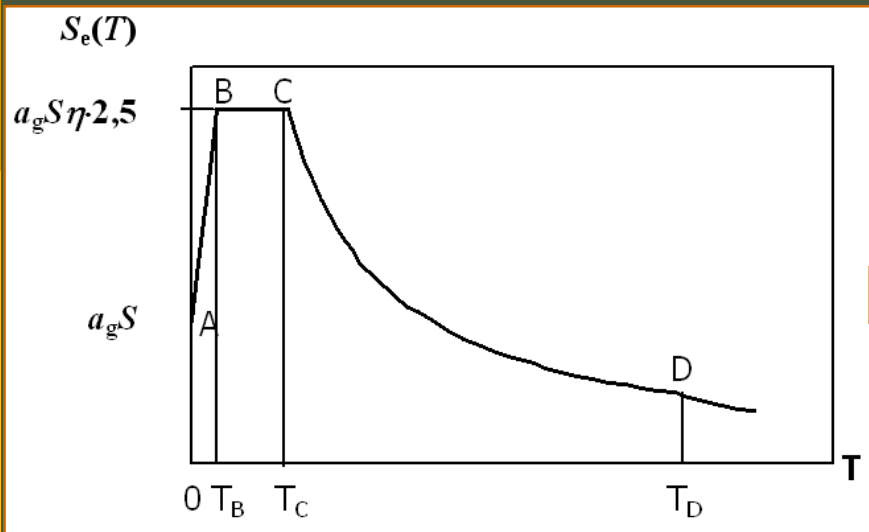
- višemodalni spektralni proračun
- metoda bočne sile

- NELINEARNE

- dinamička analiza vremenskog tijeka odgovora - time history
- statička metoda postupnog guranja – pushover

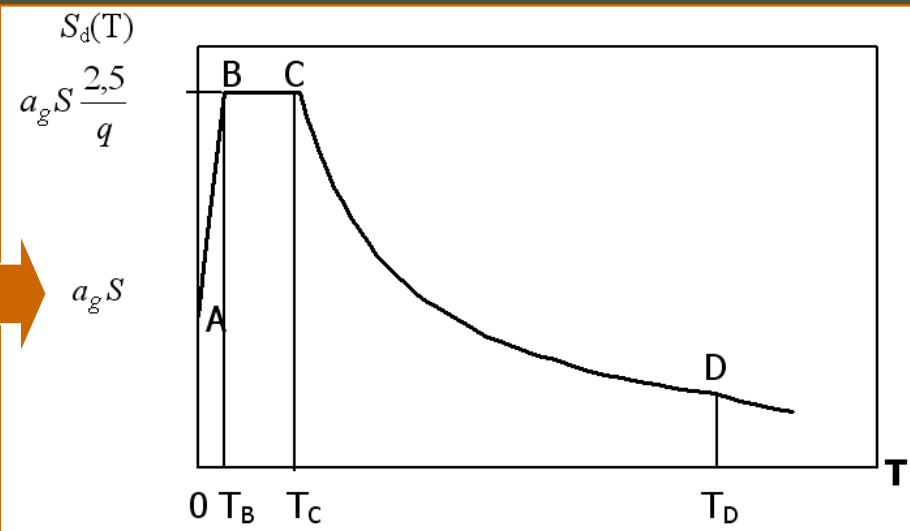
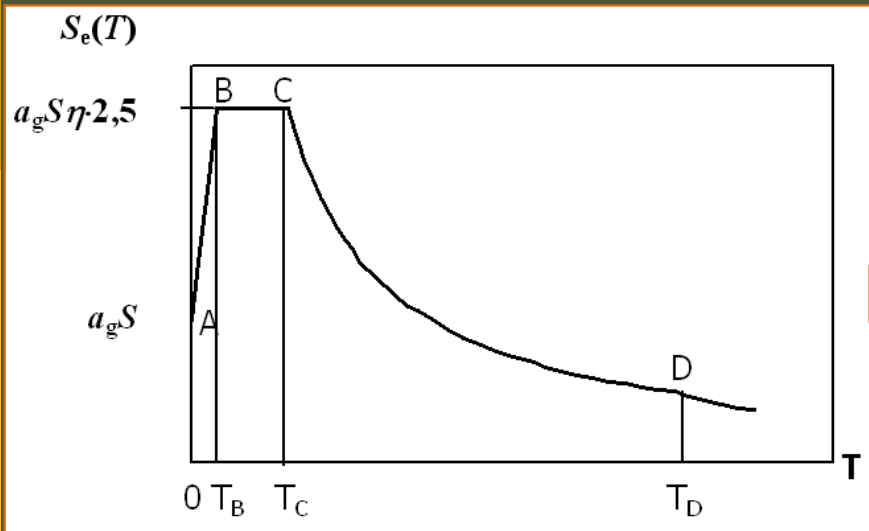
LINEARNI DINAMIČKI VIŠEMODALNI SPEKTRALNI PRORAČUN

- Obuhvaća ekstreme dinamičkih odgovora svih važnijih oblika vibriranja konstrukcije
- Ukupan odgovor se dobiva statističkom metodom kombinacije maksimalnih doprinosa vibriranja.
- Proračunski spektar odgovora dobiva se prilagodbom elastičnog spektra faktorom ponašanja.



LINEARNI DINAMIČKI VIŠEMODALNI SPEKTRALNI PRORAČUN

- Elastični spektar - temeljni pokazatelj seizmičkog djelovanja,
 - definira se ovisno o seizmičkoj zoni i modificira sukladno razredu tla
 - zadaje se za dva horizontalna i nešto drukčije za vertikalni smjer.
- Faktor ponašanja q odražava duktilnost konstrukcije te ovisi o
 - vrsti elementa,
 - gradiva i
 - razini duktilnosti (ograničeno ili potpuno duktilno ponašanje konstrukcije).



HORIZONTALNI ELASTIČNI SPEKTRI ODGOVORA

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]$$

- spektar odziva modificira se sukladno kategorijama tla za koje su dani svi potrebni parametri u tablici (TIP 1)

Ground type	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

EN 1998-1

Stjenovita tla s najviše 5 m slabijeg materijala pri površini brzinom i brzinom širenja poprečnih valova $v_s > 800$ m/s.

A

Naslage vrlo krutog pijeska, šljunka ili prekonsolidirane gline, debljine od nekoliko desetaka metara, s postupnim povećanjem mehaničkih svojstava s dubinom i brzinom širenja poprečnih valova $v_s = 360 - 800$ m/s.

B

Duboke naslage zbijenog ili srednje zbijenog pijeska, šljunka ili krutih glina, debljine od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara, s $v_s = 180 - 360$ m/s.

C

Naslage rastresitog tla s mekim koherentnim slojevima ili bez njih s $v_s \leq 180$ m/s u gornjih 20 m.

D

Naslage s mekim do srednje krutim koherentnim tlima s $v_s \leq 180$ m/s u gornjih 20 m.

Profil tla A s površinskim aluvijalnim slojem s brzinama širenja poprečnih valova v_s za tip C i D, i debljinom između 5 i 20 m, ispod kojeg je krući matrijal sa $v_s > 800$ m/s.

E

a_g ovisno o potresnom području
 $\eta = 1,0$

VERTIKALNI ELASTIČNI SPEKTAR ODGOVORA

$$0 \leq T \leq T_B : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 3,0 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]$$

Spectrum	a_{vg}/a_g	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
Type 1	0,90	0,05	0,15	1,0

a_g ovisno o potresnom području

$$\eta = 1,0$$

HORIZONTALNI PRORAČUNSKI SPEKTRI ODGOVORA

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

$$T_D \leq T : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

$$\beta = 0,2$$

a_g ovisno o potresnom području

q faktor ponašanja

Ground type	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

VERTIKALNI PRORAČUNSKI SPEKTAR ODGOVORA

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

$$T_D \leq T : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

$$\beta = 0,2$$

Spectrum	a_{vg}/a_g	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
Type 1	0,90	0,05	0,15	1,0

VERTIKALNI: $a_g \Rightarrow a_{vg}$; $S=1,0$

FAKTORI PONAŠANJA –

Neki primjeri za BETONSKE ZGRADE

$$q = q_0 k_w \geq 1,5$$

- q_0 osnovna vrijednost faktora ponašanja, ovisna o tipu konstrukcije i pravilnosti po visini
- Za zgrade koje nisu pravilne po visini q_0 reducira se za 20%.

q_0 za sustave pravilne po visini:

Tip konstrukcije	DCM razred srednje duktilnosti	DCH razred visoke duktilnosti
Okvirni sustav, dvojni sustav, sa povezanim zidovima	3,0 α_u/α_1	4,5 α_u/α_1
Zidni sustav s nepovezanim zidovima	3,0	4,0 α_u/α_1
Torzijski fleksibilan sustav	2,0	3,0
Sustav obrnutog klatna	1,5	2,0

- α_1 vrijednost s kojom se horizontalno seizmičko djelovanje množi kako bi se dosegla otpornost na savijanje u bilo kojem elementu konstrukcije, pri čemu sva ostala proračunska djelovanja ostaju konstantna
- α_u vrijednost s kojom se horizontalno seizmičko djelovanje množi za otvaranje plastičnih zglobova u dovoljnom broju presjeka za razvoj nestabilnosti cjelokupne konstrukcije, pri čemu sva ostala proračunska djelovanja ostaju konstantna (*pushover* metoda)

FAKTORI PONAŠANJA –

Neki primjeri za BETONSKE ZGRADE

- ▣ Približne vrijednosti odnosa α_u/α_1 za zgrade pravilne po visini:

Okvirni sustavi ili dvojni sustavi istovjetni okvirnim (a)		Zidni sustavi ili dvojni sustavi istovjetni zidnim (b)	
Zgrade s jednom etažom	1,1	Zidni sustavi sa samo dva nepovezana zida u jednom horizontalnom smjeru	1,0
Zgrade s više etaža i okvirom s jednim poljem	1,2	Drukčiji zidni sustavi s nepovezanim zidovima	1,1
Zgrade s više etaža i okvirima s više polja ili dvojni sustavi istovjetni okvirnim	1,3	Dvojni sustavi istovjetni zidnim ili povezani zidni sustavi	1,2

- ▣ Približne vrijednosti odnosa α_u/α_1 za zgrade nepravilne po visini uzimaju se kao srednja vrijednosti: $((a) + 1,0 + (b))/3$.

FAKTORI PONAŠANJA –

Neki primjeri za BETONSKE ZGRADE

$$q = q_0 k_w \geq 1,5$$

- k_w faktor koji odražava prevladavajući oblik sloma konstrukcijskog sustava sa zidovima

Tip konstrukcije	k_w
Okvirni sustav i dvojni sustav istovrijedan okvirnom	1,0
Za zidni sustav, sustav istovrijedan zidnom i torzijski fleksibilan sustav	$0,5 \leq (1,0 + \alpha_0)/3 \leq 1,0$

- α_0 prevladavajući koeficijent oblika zidova u konstrukciji. Ako se koeficijenti oblika h_{wi}/l_{wi} svih zidova i bitno ne razlikuje, prevladavajući koeficijent oblika α_0 može se odrediti

$$\alpha_0 = \Sigma h_{wi} / \Sigma l_{wi}$$

- h_{wi} visina zida i
- l_{wi} duljina dijela zida i

FAKTORI PONAŠANJA –

Neki primjeri za ČELIČNE ZGRADE

▣ Faktori ponašanja q za sustave pravilne po visini:

Tip konstrukcije	DCM razred srednje duktilnosti	DCH razred visoke duktilnosti
Okviri otporni na moment	4,0	5,0 α_u/α_1
Okviri s koncentričnom ispunom Dijagonalni spregovi V - spregovi	4,0 2,0	4,0 2,5
Okviri s ekscentričnom ispunom	4,0	5,0 α_u/α_1
Sustav obrnutog klatna	2,0	2,0 α_u/α_1
Okviri otporni na moment s koncentriranim spregovima	4,0	4,0 α_u/α_1

▣ Za zgrade koje nisu pravilne po visini, faktor ponašanja q reducira se za 20%.

FAKTORI PONAŠANJA –

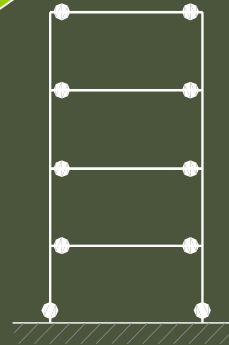
Neki primjeri za ČELIČNE ZGRADE

- ▣ Približne vrijednosti odnosa α_u/α_l za zgrade pravilne po visini:

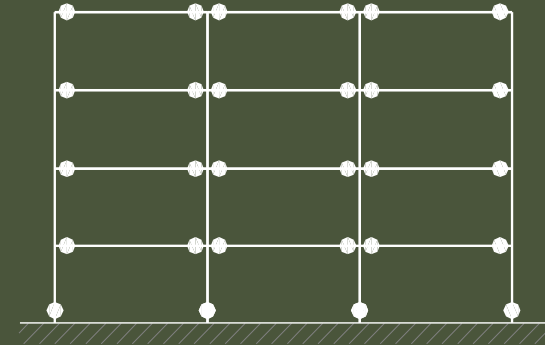
Tip konstrukcije
Okviri otporni na moment
Okviri s koncentričnom ispunom Dijagonalni spregovi V - spregovi
Okviri s ekscentričnom ispunom
Sustav obrnutog klatna
Okviri otporni na moment s koncentriranim spregovima



$$\frac{\alpha_u}{\alpha_l} = 1,2$$



$$\frac{\alpha_u}{\alpha_l} = 1,3$$



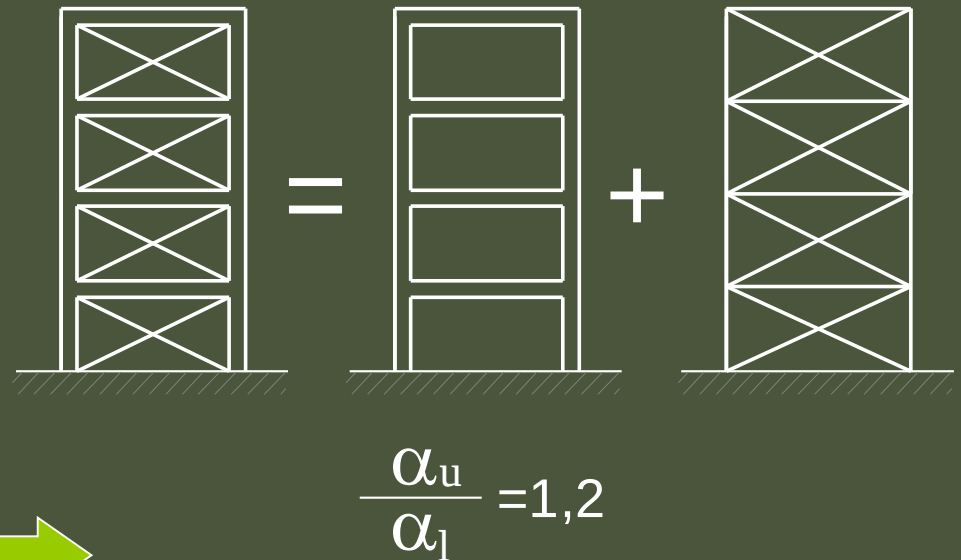
- ▣ Za zgrade koje nisu pravilne po visini, faktor ponašanja q reducira se za 20%.

FAKTORI PONAŠANJA –

Neki primjeri za ČELIČNE ZGRADE

- ▣ Približne vrijednosti odnosa α_u/α_1 za zgrade pravilne po visini:

Tip konstrukcije
Okviri otporni na moment
Okviri s koncentričnom ispunom Dijagonalni spregovi V - spregovi
Okviri s ekscentričnom ispunom
Sustav obrnutog klatna
Okviri otporni na moment s koncentriranim spregovima



- ▣ Približne vrijednosti odnosa α_u/α_1 za zgrade nepravilne po visini uzimaju se kao srednja vrijednosti: $((a) + 1,0 + (b))/3$.

LINEARNI DINAMIČKI VIŠEMODALNI SPEKTRALNI PRORAČUN

- Zbroj efektivnih modalnih masa, za razmatrane oblike vibracija, treba iznositi najmanje **90%** ukupne mase konstrukcije,
- s time da su uzeti u obzir svi oblici vibracija s efektivnim modalnim masama većim od **5%** ukupne mase.
- Kod prostornog modela gornji uvjeti provjeravaju se za svaki mjerodavni smjer.
- Ako se gore navedeno ne može zadovoljiti, najmanji broj oblika vibracija k , koji se razmatra u prostornome proračunu, mora zadovoljiti:

$$k \geq 3\sqrt{n}$$

i

$$T_k \leq 0,20 \text{ s}$$

gdje je:

- k broj promatranih oblika vibracija,
- n broj katova nad temeljima ili nad vrhom krutog podruma,
- T_k period vibracija k -tog oblika vibracija.

LINEARNI DINAMIČKI VIŠEMODALNI SPEKTRALNI PRORAČUN

- Odzivi konstrukcije u dva oblika vibracija i i j mogu se smatrati neovisnima ako njihovi periodi zadovoljavaju uvjet

$$T_j \leq 0,9 T_i$$

- Kada se svi mjerodavni odzivi mogu smatrati međusobno neovisnim, uzima se da je najveća vrijednost unutarnjih sila jednaka:

$$E_E = \sqrt{\sum E_{Ei}^2}$$

gdje je

- E_{Ei} vrijednost unutarnjih sila u obliku vibracija i .
- U suprotnom Complete Quadratic Combination

LINEARNI DINAMIČKI VIŠEMODALNI SPEKTRALNI PRORAČUN

- Pri primjeni prostornog modela, slučajni torzijski učinci mogu se odrediti kao ovojnica učinaka koji proizlaze iz statičkog proračuna, a sastoje se od torzijskih momenata M_{ai} oko vertikalne osi za svaki kat i .

$$M_{ai} = e_{ai} F_i$$

gdje je:

- M_{ai} torzijski moment kata i oko njegove vertikalne osi,
 - e_{ai} slučajna ekscentričnost katne mase i , za sve mjerodavne smjerove
- $$e_{ai} = \pm 0,05 L_i$$
- L_i dimenzija kata okomito na smjer seizmičkog djelovanja
 - F_i horizontalna sila koja djeluje na katu i za sve mjerodavne smjerove.

POTRES

□ Normirane metode proračuna:

■ LINEARNE:

- višemodalni spektralni proračun
- metoda bočne sile

■ NELINEARNE

- dinamička analiza vremenskog tijeka odgovora - time history
- statička metoda postupnog guranja – pushover

METODA BOČNE SILE

- Ova vrsta proračuna primjenjuje se za zgrade čiji odziv nije znatnije pod utjecajem doprinosa viših oblika vibracija.
- To su zgrade koje
 - imaju osnovni period vibracija
$$T_1 \leq 4T_c \text{ i } \leq 2,0 \text{ s}$$
 - zadovoljavaju kriterije pravilnosti po visini:
 - svi elementi konstrukcije koji se odupiru poprečnom opterećenju (jezgre, nosivi zidovi, okviri) moraju se protezati od temelja do vrha zgrade,
 - poprečna krutost i masa pojedinih katova treba biti konstantna po visini ili se smanjuje postupno, bez naglih skokova, od temelja do vrha,
 - kod zgrada s okvirima odnos stvarne otpornosti kata prema otpornosti potrebnoj proračunom ne smije biti neproporcionalan između susjednih katova
 - ... dodatna pravila za stepenasto oblikovane zgrade

METODA BOČNE SILE

- ▣ **Ukupna potresna sila** za svaki glavni smjer određuje se prema:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda$$

gdje je:

- $S_d(T_1)$ ordinata proračunskog spektra za period T_1 ,
- T_1 osnovni period vibracija zgrade za poprečno gibanje u promatranom smjeru,
- λ faktor korekcije; $=0,85$ za $T_1 \leq T_c$ i br. katova >2 ; u suprotnom $=1$
- m ukupna masa zgrade iznad temelja ili iznad vrha krutog podruma proračunana prema

$$\left[\sum (G_{k,j}) + \sum (\psi_{Ei} \cdot Q_{k,i}) \right]$$

- $\psi_{Ei} = \varphi \cdot \psi_{2i}$

Vrsta promjenljivoga djelovanja	Zauzetost katova	φ
Za opterećene površine A, B, C	Krov	1,0
	Katovi s povezanim stanovanjem	0,8
	Katovi s neovisnim stanovanjem	0,5
Za opterećene površine D, E, F; Arhivi		1,0

METODA BOČNE SILE

- Raspodjela horizontalnih potresnih sila po katovima određuje se prema:

$$F_i = \frac{F_b (s_i m_i)}{(\sum s_j m_j)}$$

gdje je:

- F_i horizontalna sila koja djeluje na i -tom katu,
- F_b ukupna temeljna poprečna sila,
- s_i, s_j pomaci masa m_i i m_j u osnovnom obliku vibracija,
- m_i, m_j mase katova

METODA BOČNE SILE

- Kada se osnovni oblik vibracija prikazuje pomoću horizontalnih pomaka koji se linearno povećavaju po visini, što vrijedi uz pretpostavku krutih stropova, horizontalne sile su dane izrazom:

$$F_i = \frac{F_b (z_i m_i)}{(\sum z_j m_j)}$$

- pri čemu su z_i i z_j visina masa m_i i m_j iznad razine temelja odnosno vrha krutog podruma.

METODA BOČNE SILE

- Kada postoji simetrična raspodjela horizontalne krutosti i mase, slučajni torzijski učinci mogu se uzeti u obzir povećanjem unutarnjih sila u pojedinim nosivim elementima s faktorom:

$$\delta = 1 + 0,6x / L_e$$

- gdje je:
 - x razmak između promatranog elementa i središta zgrade mjereno okomito na smjer promatranog potresnog djelovanja, a
 - L_e razmak između dva krajnja nosiva elementa mjereno kao gore.

VISOKE GRAĐEVINE



Preporuke za seizmički proračun i
oblikovanje visokih zgrada,
Council on Tall Buildings and Urban Habitat

PREPORUKE ZA SEIZMIČKI PRORAČUN I OBLIKOVANJE VISOKIH ZGRADA

- Visoka zgrada u sklopu ovih preporuka: $H > 50$ m
- Kako bi se prikladno prikazalo ponašanje visokih zgrada **u područjima srednjeg do visokog seizmičkog rizika**, gdje se značajan ne-elastični odgovor predviđa za potres sa vjerojatnošću većom od 2% u 50 godina, potreban je **nelinearni proračun vremenskog tijeka odgovora** (*time history*).
- U zonama **niskog seizmičkog rizika** može biti dovoljan i **višemodalni spektralni proračun**



ZAHTJEVI NA PONAŠANJE

- Očekivanja od zgrada projektiranih prema američkim, japanskim, kineskim, novo-zelandskim propisima te EC8:
 1. oduprijeti se manjim potresima, koji se očekuje više puta tijekom životnog vijeka konstrukcije, bez oštećenja na svim elementima,
 2. oduprijeti se rijetkim potresima, koji se mogu dogoditi jednom u životnom vijeku konstrukcije, s oštećenjima na nosivim i ostalim dijelovima konstrukcije, ali bez gubitka ljudskih života,
 3. oduprijeti se najjačem potresu koji se bilo kada može očekivati na lokaciji zgrade sa značajnom oštećenjima, ali vrlo niskom vjerojatnošću rušenja.



ZAHTJEVI NA PONAŠANJE

- ❑ Projektiranje zgrade kako bi se postiglo njeno izuzetno ponašanje je moguće, i može biti poželjno za zgrade u kojima se okuplja veliki broj ljudi ili se odvijaju državno važni poslovi.
- ❑ Ipak ekonomski i društveni pritisci zahtijevaju razumnu ravnotežu između troškova izgradnje jedne takve zgrade i rizika oštećenja.
- ❑ U propisima se uvode faktori važnosti – veća otpornost

Razr. važ.	Vrsta zgrade	γ
I	Zgrade manje važnosti za javnu sigurnost, poljoprivredne zgrade	0,8
II	Uobičajene zgrade koje ne spadaju u ostale razrede	1,0
III	Zgrade čija je seizmička otpornost od velike važnosti u pogledu posljedica rušenja; škole, za okupljanje, kulturne ustanove, ...	1,2
IV	Zgrade čija je cjelovitost tijekom potresa od iznimne važnosti za zaštitu ljudskih života; bolnice, vatrogasne postaje, elektrane,...	1,4

- ❑ Sličan pristup može se usvojiti **za visoke zgrade izuzetne društvene i ekonomske vrijednosti**, ali s time da se **faktor važnosti zamijeni provjeravanjem elemenata na strože zahtjeve ponašanja** (Japan)

MINIMALNE PREPORUKE

- Dok se proračunima danim u tradicionalnim propisima nastoje indirektno zadovoljiti sva tri zahtjeva, proračunom visokih zgrada prema odzivu treba se istražiti barem dva zahtjeva odziva i to direktno:

1. **Zanemariva oštećenja pri potresu s povratnim periodom od približno 50 godina.**

Ovaj se zahtjev ostvaruje:

- zahtijevanjem elastičnog odgovora konstrukcije,
- projektiranjem ne-nosivih dijelova kao što su obloge i pregradni zidovi tako da se ne oštećuju uslijed predviđenih deformacija i akceleracija,
- i projektiranjem sustava zgrade takvim da ostane funkcionalan i nakon očekivanih pomaka.

➤ **OCJENA RAZINE UPORABLJIVOSTI**

MINIMALNE PREPORUKE

- Dok se proračunima danim u tradicionalnim propisima nastoje indirektno zadovoljiti sva tri zahtjeva, proračunom visokih zgrada prema odzivu treba se istražiti barem dva zahtjeva odziva i to direktno:

2. Sprečavanje urušavanja pod najjačim potresom koji se očekuje na promatranoj lokaciji.

Ovaj zahtjev se odnosi na potres s povratnim periodom od 2500 god. Sprečavanje urušavanja postiže se utvrđivanjem:

- ...da su zahtjevi na ne-elastične deformacije u svim duktilnim elementima manji nego kapacitet deformiranja uzimajući u obzir gravitacijska opterećenja, učinke teorije II reda i smanjenje krutosti i čvrstoće uslijed cikličkog opterećenja
- ...da su zahtjevi na sile u dijelovima s ne-duktilnim oblicima sloma (zidovi kritični u pogledu posmika) manji nego nominalna čvrstoća. Posebnu pozornost valja posvetiti ograničenju oštećenja na elementima čije otkazivanje može potaknuti rušenje cijele zgrade.

➤ OCJENA RAZINE SLOMA

FILOZOFIJA PRORAČUNA TEMELJENA NA DEFORMACIJAMA

- ❑ **Deformacija** je kritični parametar u proračunu na potres prema ponašanju jer se ponašanje opisuje razinom oštećenja, a oštećenje je vezano uz stupanj deformacija u elementima i cijelom sustavu.
- ❑ Za **nosive (primarne) elemente**, oštećenje je vezano uz ostvareni stupanj ne-elastičnih deformacija. On je vezan uz njihovu čvrstoću pa valja osigurati prikladnu čvrstoću kako bi se spriječile izvanredne ne-elastične deformacije.
 - Elementi koji nemaju kapacitet deformiranja preko granice popuštanja ne smiju doživjeti ne-elastično deformiranje, pa za njih valja raditi provjere na razini sila.
- ❑ Ista pravila primjenjuju se i za unutarnje učinke u **ne-nosivim elementima**, s time da oni doživljavaju i pomake uslijed pomaka osnovnih dijelova.
 - Kod ovih je elemenata ponašanje vezano uz ukupne deformacije cijele konstrukcije na koju su vezani i kapacitet deformiranja spojnih elemenata.



FILOZOFIJA PRORAČUNA TEMELJENA NA DEFORMACIJAMA

□ Tri tipa deformacija:

1. Ukupni pomaci zgrade
2. Međukatni pomaci (*inter-story drift*)
3. Ne-elastične deformacije dijelova konstrukcije

FILOZOFIJA PRORAČUNA TEMELJENA NA DEFORMACIJAMA

1. Ukupni pomaci zgrade

- Omogućuju samo kvalitativnu ocjenu ponašanja zgrade.
- Iako ukupan pomak zgrade u sklopu $P - \Delta$ učinka predstavlja odgovor zgrade, on je ograničene važnosti jer je vršni pomak prolazan.

FILOZOFIJA PRORAČUNA TEMELJENA NA DEFORMACIJAMA

2. Međukatni pomaci (*inter-story drift*)

- Relativni horizontalni pomak dvaju susjednih stropova u određenom trenutku.
- Može predstavljati početnu točku za ocjenu oštećenja na nosivim dijelovima kao što su fasade ili unutarnje pregrade.

FILOZOFIJA PRORAČUNA TEMELJENA NA DEFORMACIJAMA

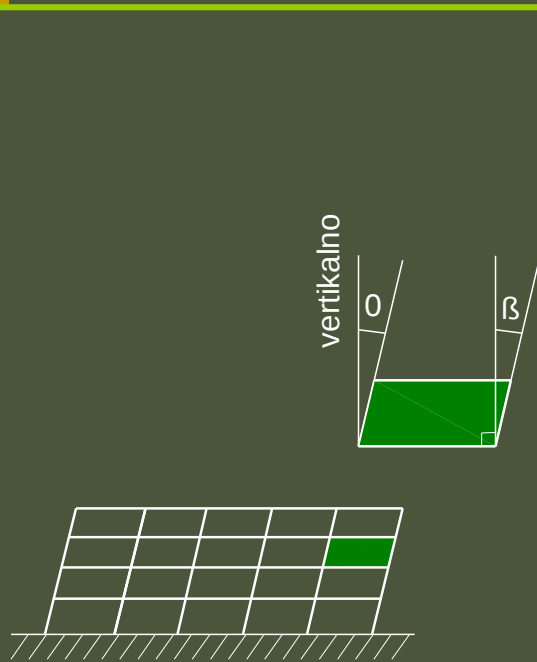
2. Međukatni pomaci (*inter-story drift*)

- U visokim zgradama trebalo bi utvrditi ove relativne pomake u svakom katu kao komponente od:
 - **POMAKA KRUTOG TIJELA**
 - ...je povezan s rotacijom cjelokupne zgrade na gornjim razinama uslijed vertikalnih deformacija u stupovima i/ili zidovima koji se nalaze ispod; ne izaziva oštećenja
 - **POSMIČNIH DEFORMACIJA β**
 - ...je mjera kutne ravninske deformacije zida ili fasadnog panela. Ove će deformacije biti drukčije na različitim mjestima stropa i na nekim mjestima može prekoračiti kut (odnos) međukatnih pomaka θ (paneli između jezgre i vanjskih stupova)

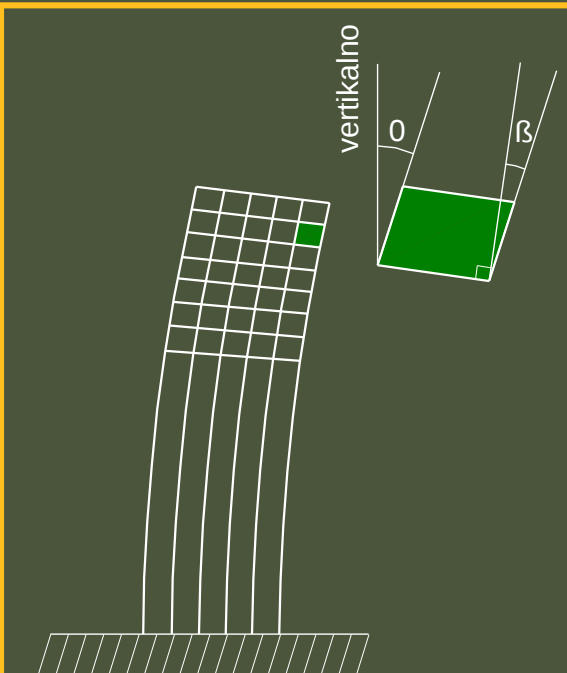
FILOZOFIJA PRORAČUNA TEMELJENA NA DEFORMACIJAMA

2. Međukatni pomaci (*inter-story drift*)

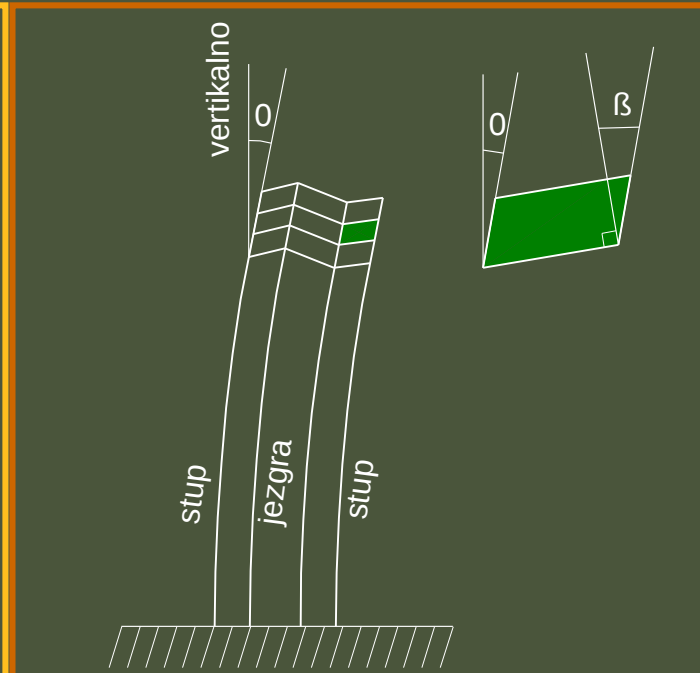
- Deformacijski parametri visokih zgrada



Niske zgrade: kut posmičnih deformiranja β jednak je kutu (odnosu) međukatnih pomaka θ



Cijevne visoke zgrade: kut posmičnih deformiranja β manji je od kuta međukatnih pomaka θ



Visoke zgrade s okvirnim zidovima: kut posmičnih deformiranja β može prekoračiti kut međukatnih pomaka θ

FILOZOFIJA PRORAČUNA TEMELJENA NA DEFORMACIJAMA

3. Ne-elastične deformacije dijelova konstrukcije

- Predstavljaju temelj za ocjenu oštećenja konstrukcije i mogućnost za konstrukcijsko otkazivanje duktilnih dijelova.
- Ocjenjivanje se općenito provodi za dio po dio
 - (iako će u otkazivanju sudjelovati više dijelova sa izvanrednim deformacijama)uspoređujući zahtijevana deformiranja sa dozvoljenim vrijednostima
 - (npr. maksimalna rotacija plastičnog zgloba)koje se temelje na ostvarenim detaljima konstrukcije
 - (npr. razmak čvorova u betonskim elementima)i postojećim unutrašnjim silama u elementima.
- Za ne-duktilna djelovanja (npr. posmik u AB zidu jezgre) dozvoljene su male ne-elastične deformacije (ili nisu uopće) i prihvatljivost određenog elementa temelji se na provjerama na razini sila kako bi se osiguralo da maksimalno potresno djelovanje (*earthquake demand*) ne prekoračuje nominalne nosivosti.

Kriteriji ponašanja

- Kako bi se uspostavili **kvantitativni kriteriji prihvatljivosti** za **proračun temeljen na odzivu** (*performance based design*), provode se mnoga istraživanja i studije.
- Jedan od izazova projektantima je utvrditi **ravnotežu između troškova izgradnje i rizika od oštećenja** (i direktnih i indirektnih troškova koji su s njima povezani) uzevši u obzir mnoge nesigurnosti neizbježne u projektiranju.



Kriteriji ponašanja

- Primjeri izvora nesigurnosti u potresnim proračunima su:
 - Koliki je interval između ponavljanja potresa na danoj lokaciji (povratni period)?
 - Kako simulirati seizmičko djelovanje uporabom snimljenih zapisa podrhtavanja tla?
 - Predviđanje globalnog i lokalnog odziva konstrukcije na snimljeno podrhtavanje tla uslijed:
 - nesavršenog numeričkog modeliranja ponašanja zgrade,
 - utjecaja nižih slojeva tla i temelja na podrhtavanje tla,
 - utjecaja ne-nosivih dijelova (obloga) na globalni odgovor,
 - netočnih modela pojedinih konstrukcijskih elemenata pod cikličkim opterećenjem,
 - promjenjivosti svojstava materijala,
 - Transformacija ne-elastičnih zahtjeva (posmične deformacije u zidovima) u kvantitativne opise oštećenja koji će biti prikladni za ocjenu ponašanja i predviđanje kumulacije oštećenja.



Kriteriji ponašanja

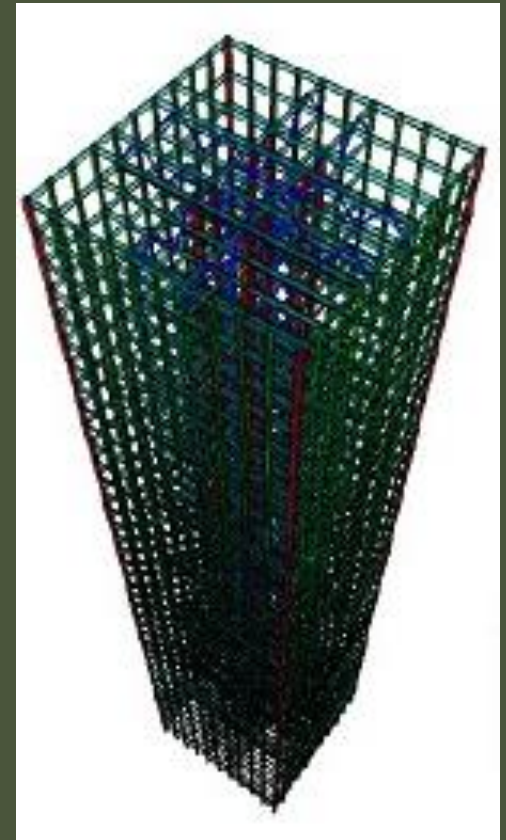
- ❑ U budućnosti, proračun na temelju ponašanja konstrukcije (*performance based design*) trebao bi uključiti:
 - Izbor **povratnog perioda** u kojem valja zadovoljiti jednu ili više razina ponašanja.
 - Proračun **očekivanog odgovora** konstrukcije na potres vezano uz utvrđene povratne periode.
 - **Ocjenjivanje deformacija** dijelova konstrukcije ili cjelokupne zgrade u odnosu na granične vrijednosti u skladu s odabranom razinom ponašanja.
 - **Ocjenjivanje čvrstoća** pojedinih sastavnih dijelova kako bi se spriječili oblici sloma bez duktilnog ponašanja, uz uporabu načela proračuna kapaciteta nosivosti.
- ❑ Proračun na temelju ponašanja daje projektantu i vlasniku zgrade jasan uvid u očekivano ponašanje zgrade prilikom događanja potresa.
- ❑ Ako se ovaj proračun provodi pažljivo i u potpunosti revidira, rezultat će biti visoka zgrada povećane sigurnosti i uporabljivosti.



Ispitivanje zgrade u laboratoriju, potres se simulira guranjem i povlačenjem zgrade pomoću hidraulike

Problematika proračuna

- ❑ Ekonomičan proračun visokih zgrada je veliki izazov.
- ❑ Valja zadovoljiti
 - zahtjeve na bočnu krutost
 - čvrstoću
 - granične deformacije uslijed vjetra i potresa
 - složenost
 - izvodljivost postupka izgradnje



Problematika proračuna

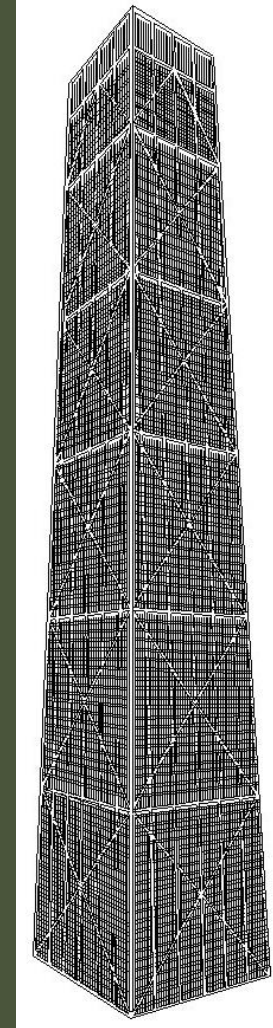
- ❑ Općenito vrijedi da što zgrada postaje viša i vitkija djelovanje vjetra postaje značajnije u odnosu na potresne učinke.
- ❑ Moment prevrtanja uslijed vjetra raste s kvadratom visine zgrade (H^2) dok
- ❑ elastični moment prevrtanja uslijed potresa najvjerojatnije neće porasti više od visine na potenciju $1,25 (H^{1,25})$.
- ❑ U zonama niskog do umjerenog potresnog rizika, za visoku zgradu koja je pravilno projektirana da izdrži vjetrovno opterećenje bit će potrebne samo manje prilagodbe (male ali važne) kako bi zadovoljila i u pogledu seizmičkog ponašanja.
- ❑ S druge strane za projektiranje niske zgrade za otpornost bočnom djelovanju, na istoj lokaciji, presudno će biti seizmičko djelovanje a djelovanje vjetra neće imati utjecaja.

Značajke proračuna visokih zgrada na područjima sa značajnim potresnim djelovanjem (i vjetrom)

1. Veliki moment preokretanja u podnožju i projektiranje temelja (W , E_q)
2. Zahtjev velike posmične otpornosti (*base shear*) blizu podnožja zgrade (E_q)
3. Velika naprezanja od težine u vertikalnim elementima i uporaba materijala s visokim čvrstoćama da se smanje izmjere konstrukcijskih elemenata dimenzije u cilju ekonomičnog projektiranja i povećanja iskoristive površine.
4. Različito osno skraćenje pod djelovanjem vlastite težine
5. Postizanje duktilnosti u elementima u podnožju konstrukcije pod djelovanjem velikih tlačnih naprezanja od vlastite težine (E_q)
6. Kontrola bočnih ubrzanja (W)
7. Kontrola međukatnih pomaka (W , E_q)
8. Kontrola oštećenja kako bi se omogućili popravci (E_q)
9. Osiguranje mehanizama za prihvaćanje energije (prigušivača) i sprečavanje krhkih slomova.

Osnovni seizmički projekt zgrade

- ... sastavlja projektant ovlašten i imenovan za projektiranje visoke zgrade. Projekt treba sadržavati najmanje:
 1. Tehnički opis zgrade
 2. Detaljni opis sustava koji se odupiru seizmičkom djelovanju i vjetru
 3. Dispozicijske nacрте zgrade
 4. Očekivano ponašanje zgrade uključujući i ne-nosive dijelove i sustave
 5. Pregled rezultata studije seizmičkog rizika
 6. Pregled rezultata studije o vjetrovnom opterećenju i odgovoru konstrukcije na djelovanje vjetra
 7. Metode proračuna
 8. Postupak modeliranja, svojstva materijala, objašnjenja svojstava prigušenja,...
 9. Modeli dijelova konstrukcije, kriteriji prihvatljivosti pojedinih sastavnih dijelova



**John Hancock Center,
Chicago,
1965.**

**100 katova
H=335 m**

Nosiva konstrukcija izvan osnovnog parametra – cijev sastavljena od okvira i dijagonala

Osnovni seizmički projekt zgrade

Konstruktivski sustavi visokih zgrada



Taipei 101,
Taiwan, 2004.,
101 kat, H= 509 m

Petronas Twin Towers,
Kuala Lumpur, 1998.,
88 katova, H= 452m

Bočna opterećenja od vjetra i potresa proizvode bočna ubrzanja.



Ljudi pri uporabi zgrade osjećaju odgovarajuće vibracije.



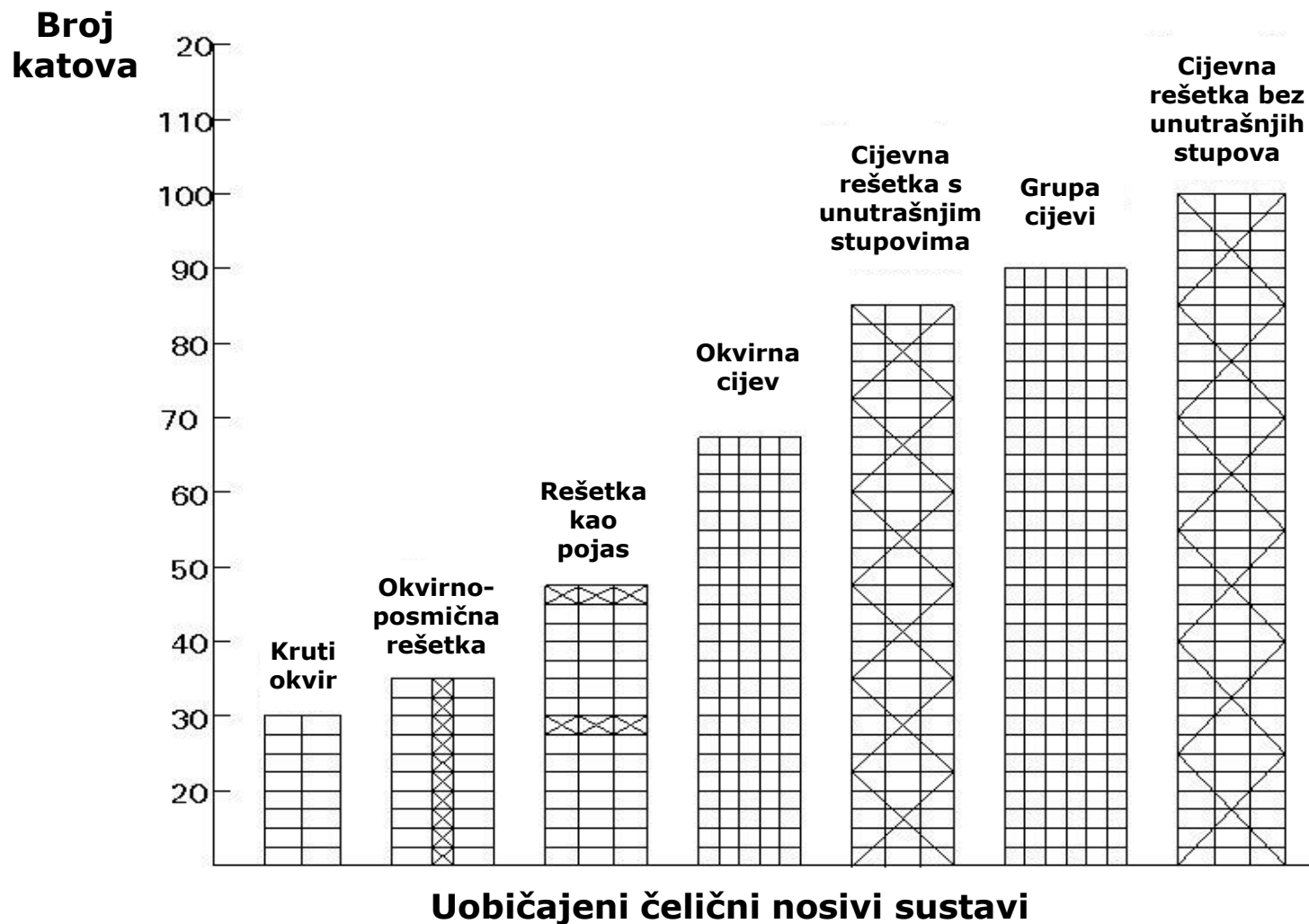
Krutost postaje dominantan faktor u odnosu na čvrstoću u projektiranju visokih zgrada.



GSU može postati mjerodavno u odnosu na GSN.

Osnovni seizmički projekt zgrade

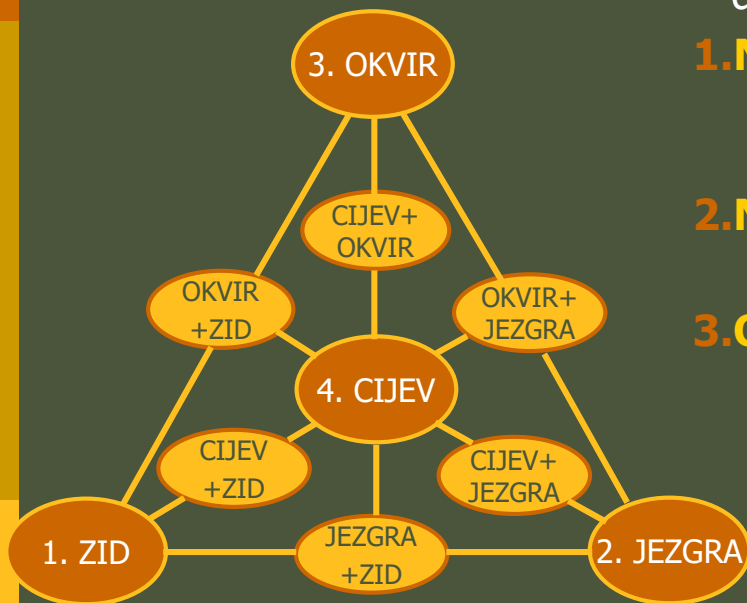
Konstruktivski sustavi visokih zgrada



Osnovni seizmički projekt zgrade

Konstruktivski sustavi visokih zgrada

- Četiri osnovna nosiva sustava s različitim svojstvima otpornosti na bočna opterećenja i ovisno o tome djelotvornosti za različite visine:



1. NOSIVI ZIDOVI

- uslijed vlastite težine (obično betona) postaju neprikladni za zgrade visine preko 30 katova

2. NOSIVA JEZGRA

- obično je od betona pa je vlastita težina i ovdje ograničavajuća

3. OKVIRNI SUSTAV

- djelotvornost ovisi o krutosti spojeva i količini spregova.
- Krutost može biti povećana uporabom jezgre, posmičnih zidova ili dijagonalnih spregova
- Više spregova uključenih u prostorni sustav značit će i povećanje ostvarive visine (do 60 katova)

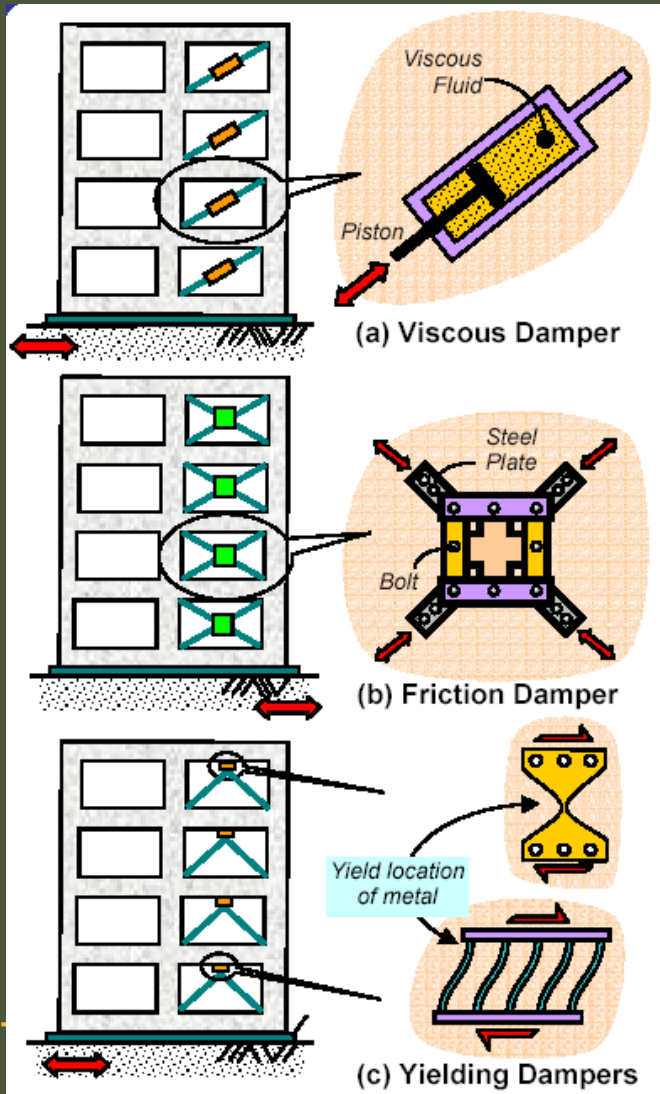
4. CIJEVNI SUSTAV

- to je prostorni okvir s vertikalnim elementima na vanjskom opsegu.
- Ostvariva visina ovisi o vrsti i količini spregova u cijevi.
- Najdjelotvorniji sustav za visine preko 60 katova.

- Kombiniranjem 4 osnovna sustava dobiva se 6 dodatnih.

Osnovni seizmički projekt zgrade

Prigušivači



■ VISKOZNI PRIGUŠIVAČI:

- Energija se apsorbira kontroliranjem stlačivanjem viskoznog fluida.
- Klip prenosi energiju proizvedenu u konstrukciji u fluid te izaziva njegovo pomicanje i pretvaranje energije u toplinu

■ PRIGUŠIVAČI NA BAZI TRENJA:

- energija se absorbira trenjem između čeličnih ploča koje rotiraju jedna u odnosu na drugu

■ PRIGUŠIVAČI NA BAZI POPUŠTANJA:

- Energija se absorbira u čeličnim dijelovima koji popuštaju.

Osnovni seizmički projekt zgrade

- ... sastavlja projektant ovlašten i imenovan za projektiranje visoke zgrade. Projekt treba sadržavati najmanje:
 - 10. Podaci o rezultatima ispitivanja novih modela dijelova konstrukcije, novih računalnih programa i novih kriterija prihvatljivosti
 - 11. Granični međukatni pomaci (*interstory drift*)
 - 12. Kriteriji seizmičkog projektiranja za ne-nosive dijelove i sustave:
 - Granične deformacije za projektiranje obloga i pregradnih zidova
 - Ubrzanje i vibracije podova za projektiranje stropova, sustava za održavanje, cijevi i dr. opreme
 - Pomaci i ubrzanja (i frekvencije titranja) za proračun dizala.
- Ovakav projekt daje se na uvid za reviziju i raspravu. Projekt se obnavlja kako se uvode promjene i konačno se na temelju njega priprema izvedbeni projekt.



Revizija projekta

- U uvjetima srednjeg do jakog seizmičkog rizika obavezna je neovisna i stručna revizija osnovnog seizmičkog projekta zgrade.
- Reviziju provode stručnjaci u području seizmičkog ponašanja i projektiranja visokih zgrada.
- Tim koji provodi reviziju uključuje stručnjake iz područja:
 - projektiranja visokih zgrada,
 - potresnog inženjerstva prema ponašanju,
 - nelinearnih dinamičkih proračuna,
 - neelastičnog ponašanja različitih materijala, dijelova i sustava,
 - geotehničkog inženjerstva i
 - analiza seizmičkog rizika.



Projektantski nadzor izgradnje

- ❑ Projektantski nadzor obavezan je!
- ❑ Projektant kontrolira da li se izvedba provodi u skladu s
 - postupcima izgradnje predviđenim u projektu, potkrijepljenih proračunima faza izgradnje
 - te dokumentacijom o izvedbi.
- ❑ Projektant redovito posjećuje gradilište i promatra napredovanje izgradnje kako bi sastavio detaljno izvješće
 - poglavito o postavljanju i izvedbi dijelova zgrade ključnih s obzirom na stabilnost zgrade



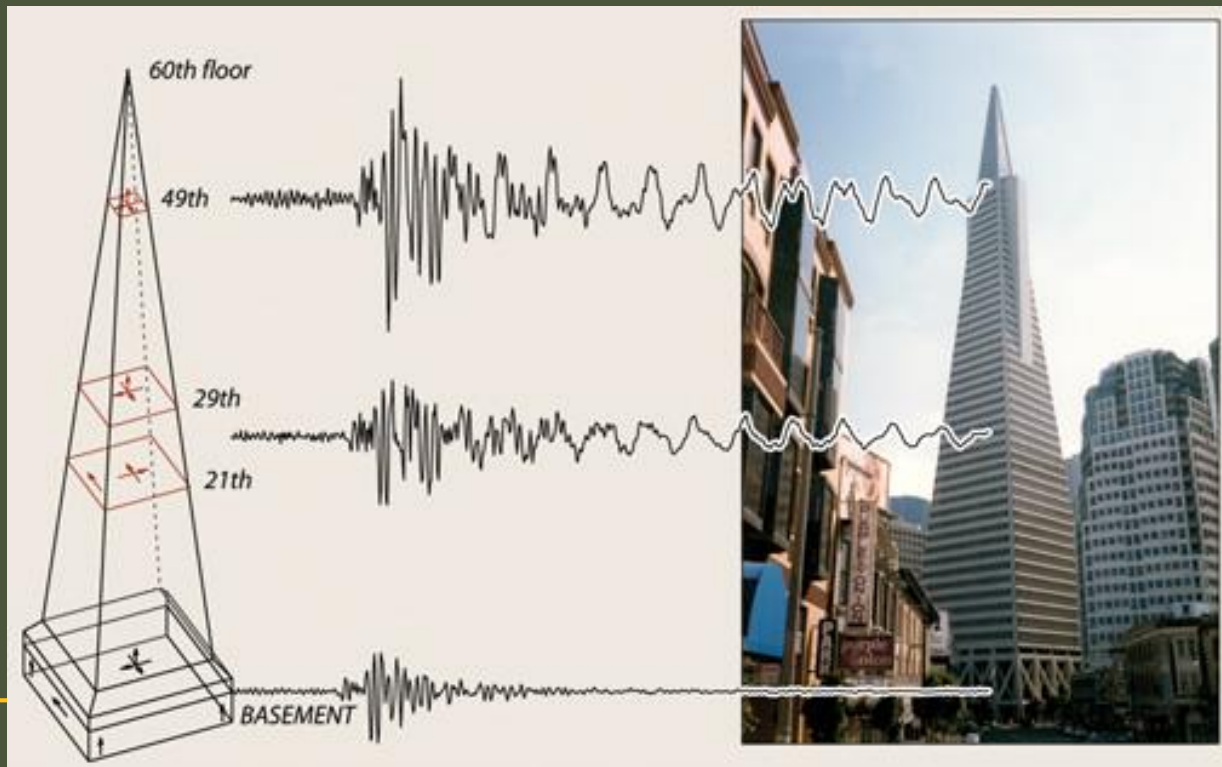
Monitoring ponašanja

- ❑ Postavljanje opreme za monitoring seizmičkog i vjetrovnog odgovora visoke zgrade je poželjno.
- ❑ Ovime se omogućuje prikupljanje podataka koji su bitni za:
 - vlasnika građevine odnosno njegove inženjere odgovorne za održavanje koji odmah po potresu uočavaju i ocjenjuju oštećenja kako bi ih prikladno popravili,
 - ali i za projektante budućih građevina kako bi unaprijedili proračune.



Monitoring ponašanja

- Primjer: postavljanje instrumenata za očitavanje dinamičkih učinaka na tornju San Francisco Trans-America
- Zapisi uslijed Loma Prieta potresa 1989. pokazuju povećane vibracije na višim katovima



KRAJ



**MJERODAVNA DJELOVANJA NA
VISOKE GRAĐEVINE**