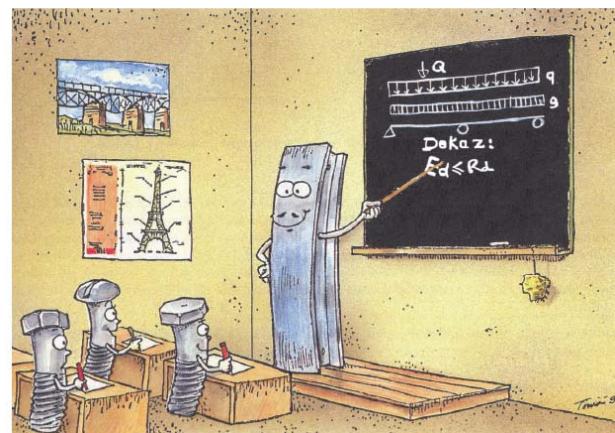


II. GRAĐEVINSKI ČELICI – PROIZVODNJA I SVOJSTVA



3

III. PROJEKTIRANJE ČELIČNIH KONSTRUKCIJA - OSNOVNI POJMOVI



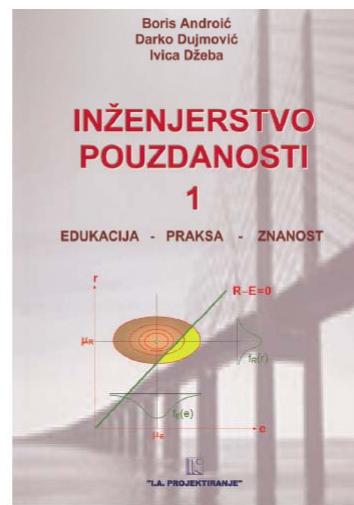
4

IV. UPRAVLJANJE PODACIMA OD PROJEKTA DO IZRADE I MONTAŽE



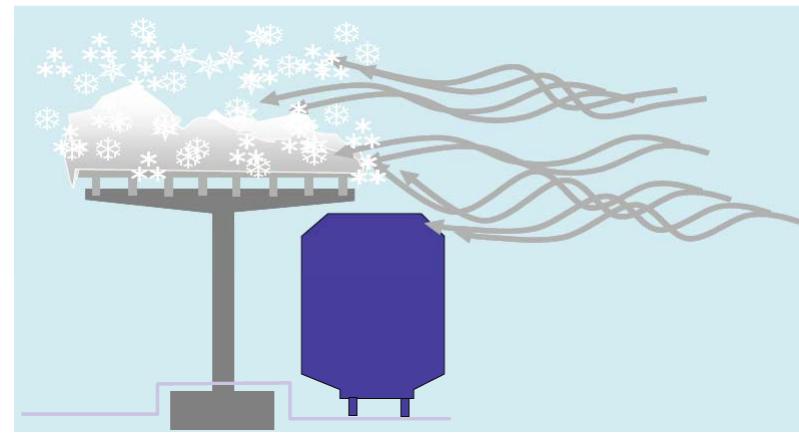
5

V. KONCEPT POUZDANOSTI



6

VI. DJELOVANJA NA KONSTRUKCIJE



7

VII. OTPORNOST POPREČNIH PRESJEKA, ELEMENATA I SUSTAVA

Boris Andrić
Darko Dujmović
Ivica Đežba

ČELIČNE KONSTRUKCIJE 2

NUMERIČKI PRIMJERI PREMA EC3

A technical diagram of a beam element. The beam has a length L and is subjected to an axial force $N_{y,ES}$ and a bending moment $M_{y,ES}$. The beam is shown in a deformed state with a lateral deflection u .

IA PROJEKTIRANJE

EUROCODE 3

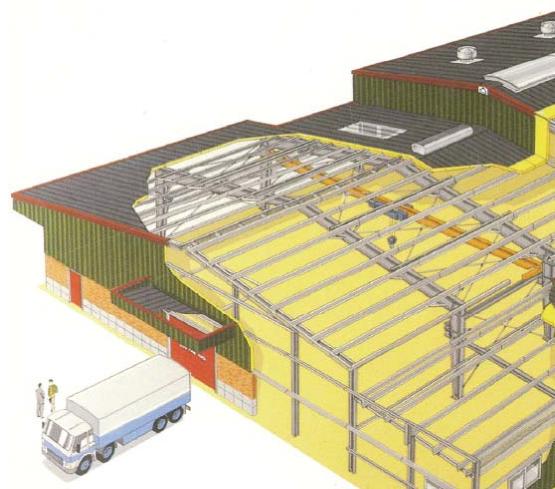
8

VIII. PROJEKTIRANJE PRIKLJUČAKA



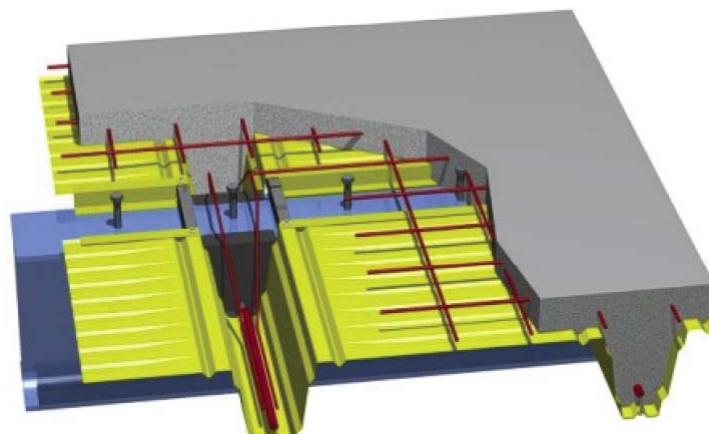
9

IX. PROJEKTIRANJE HALA



10

X. SPREGNUTE KONSTRUKCIJE



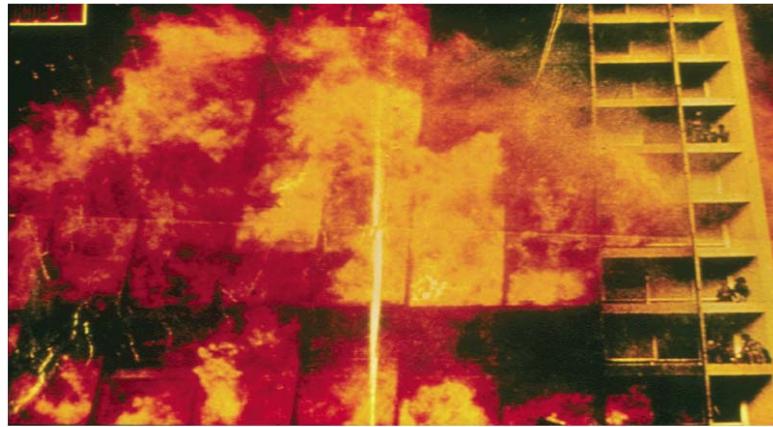
11

XI. ZAŠTITA OD KOROZIJE



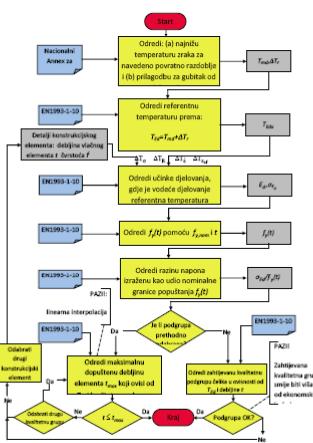
12

XII. PRORAČUN KONSTRUKCIJA ZA DJELOVANJE POŽARA



13

XIII. KONSTRUKCIJSKI ČELICI I IZBOR KVALITETNE PODGRUPE ČELIKA



14

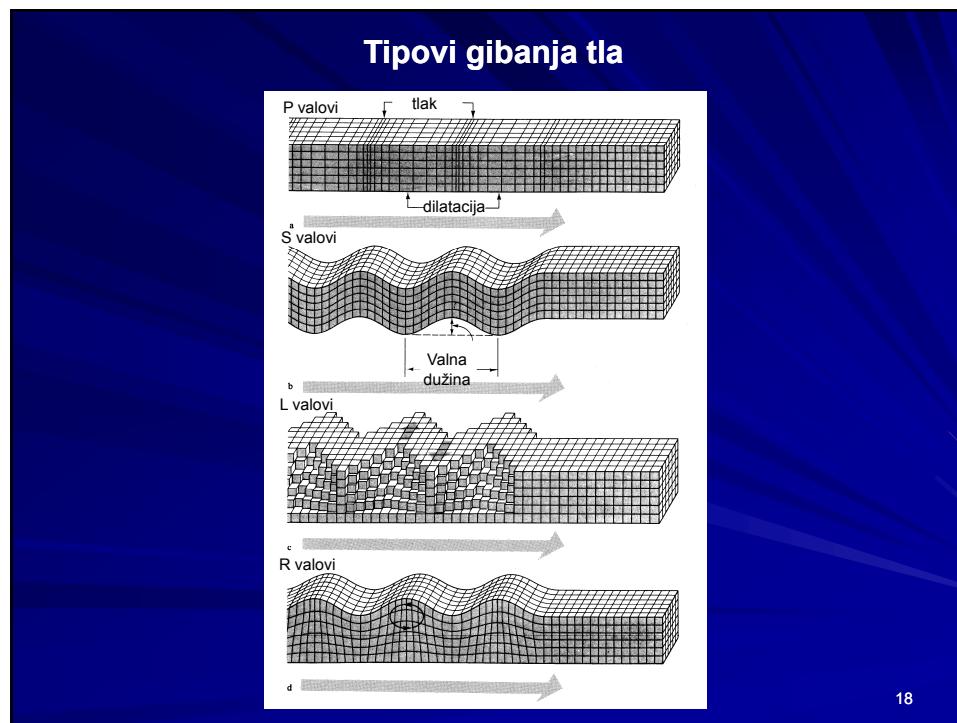
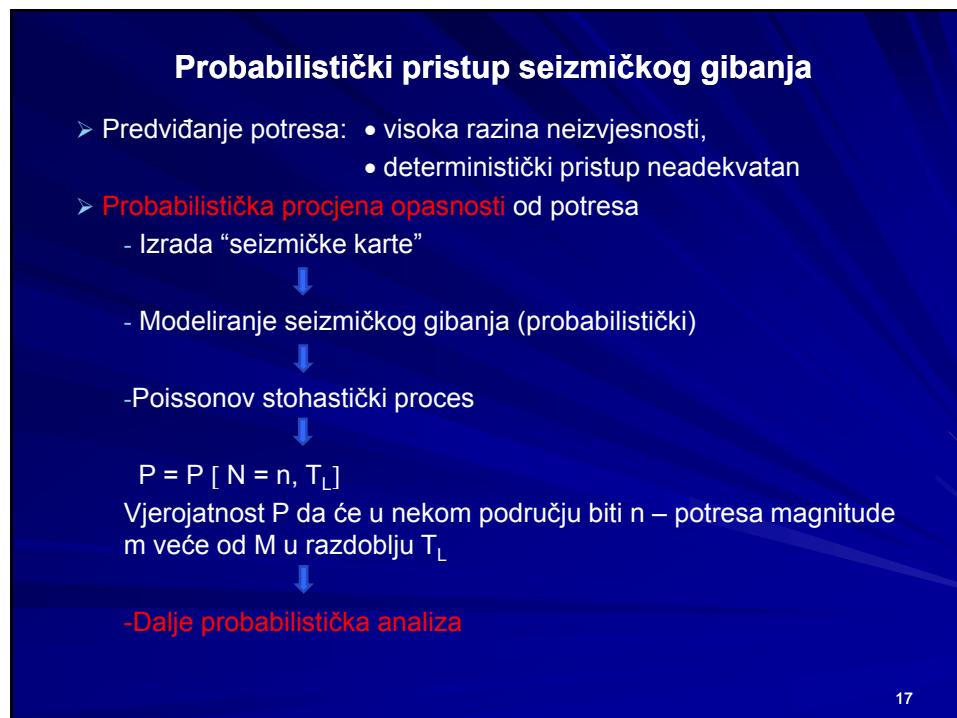
XIV. RJEČNIK POJMOVA

**European
Dictionary**

15

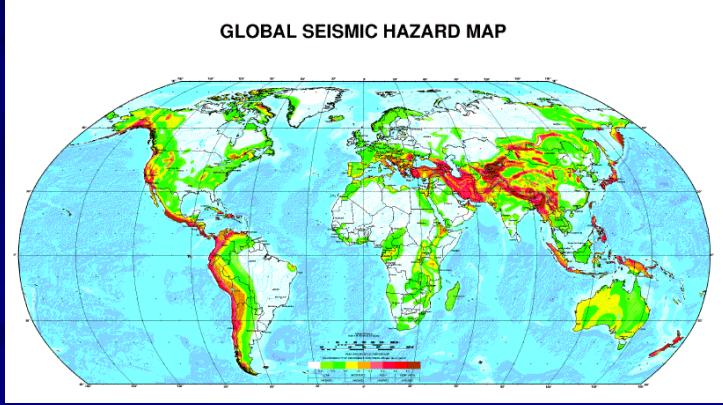
Seizmička analiza čeličnih konstrukcija

16



Probabilistički pristup seizmičkog gibanja

- Probabilistička procjena opasnosti – ovisi od dostupnosti "kataloga potresa".
- Probabilistička karta globalne seizmičke opasnosti
Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP)



Karta za 475 godina "vrhova ubrzanja tla" 19

Konceptualno projektiranje - općenito

- Pouzdanost kod potresa može biti skupa ukoliko se započinje s pogrešnim sustavom (arhitektonskim ili inženjerskim projektiranjem)
- Često zahtjevi za konstrukciju nisu usuglašeni s arhitekturom
- Projektiranje neusklađene konstrukcije i arhitekture je moguće – ali to treba platiti.
- EN 1998 preporučuje projektiranje pravilnih (regularnih) konstrukcija
- Linearna (elastična) analiza – skupe konstrukcije
- Filozofija EN 1998 – razgradnja seizmičke energije u pojedinim zonama konstrukcije, što je moguće nelinearnom analizom
- Razgradnja energije – pomoću duktilnosti
Duktilnost - sposobnost zadržavanja nosivosti u neelastičnom području. Mjera te sposobnosti je duktilnost.

Duktilnost

materijal (μ_e)	element ili priključak (μ_θ)	konstrukciju (μ_δ)
$\mu_e > \mu_\theta > \mu_\delta$		

20

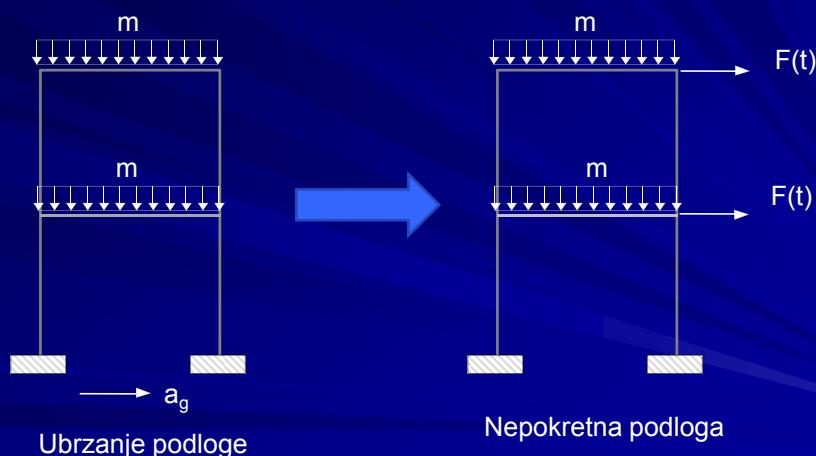
Potrebno je poznavati sljedeće pojmove vezane uz EN 1998

1. Potresno inženjerstvo (dinamika)
2. Inženjerstvo pouzdanosti
3. Eurocode 1990
4. Neke parametre
5. Konceptualno projektiranje za otpornost konstrukcija pri potresu
6. Razgradnja seizmičke energije
7. Ideja projektiranja u EN 1998

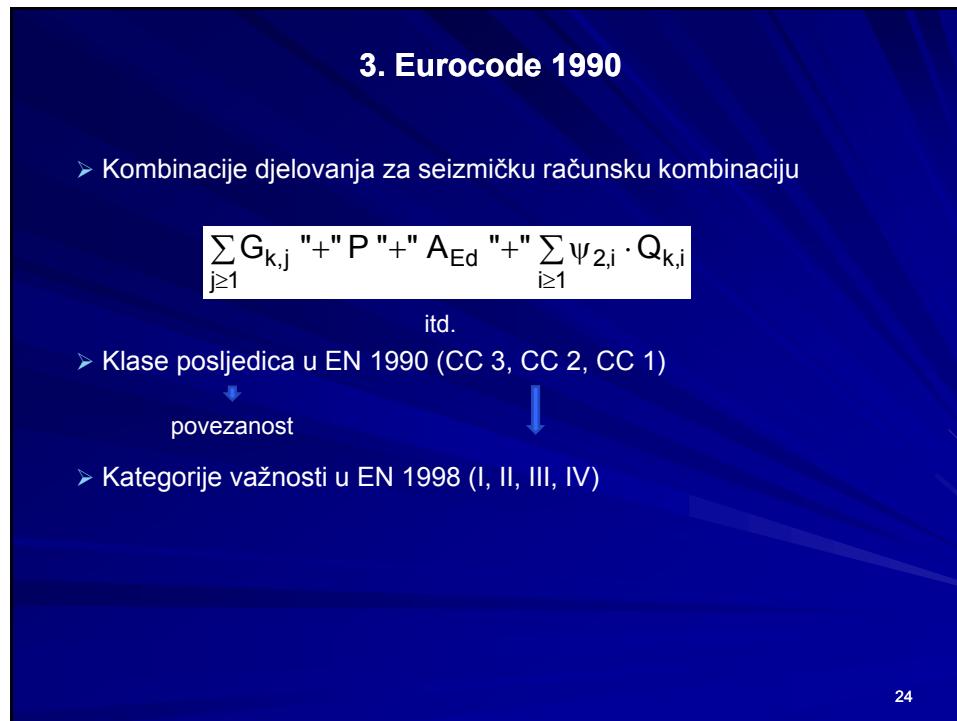
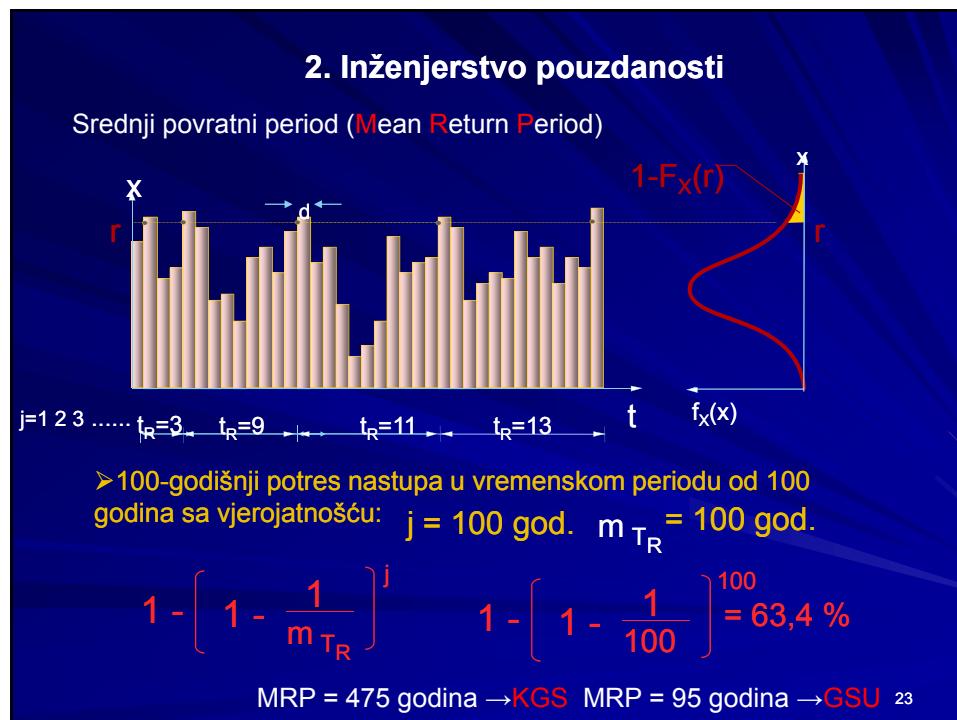
21

1. Potresno inženjerstvo (dinamika)

Djelovanje potresa



22



4. Poznavanje parametara

- Parametri koji se temelje na oštećenju konstrukcije (intenzitet potresa):
 - Modified-Mercalli-Intensity (MMI)
 - Medvedev-Sponheuer-Karnik scale (MSK) - Kod nas
 - Mercalli-Cancani-Seiberg scale (MCS)
- Seizmološki parametri:
 - Magnituda (M) - mjera za jačinu potresa
 - Hipocentar potresa (F)
 - Epicentral potresa (E)
itd.

25

4. Poznavanje parametara

- Inženjersko – seizmički parametri:
 - Ubrzanje “vrhova” tla (PGA) - Peak Ground Acceleration
 - Brzina “vrhova” tla (PGV)
 - Pomaci “vrhova” tla (PGD)
 - Efektivno ubrzanje vrhova tla (EPGA)
 - Spektralno ubrzanje S_a
- Seizmička opasnost
 - Odnos intenziteta potresa i MRP
 - Istraživanje: determinističko, statističko, probabilističko, metodom Monte Carlo.

26

5. Konceptualno projektiranje za otpornost konstrukcija zgrada pri potresu

➤ Aspekti iz EN 1998:

- Jednostavnost konstrukcije
- Jednolikost, simetričnost i redundantnost
- Otpornost i krutost u oba smjera
- Djelovanje dijafragme svakog kata
- Odgovarajuće temeljenje

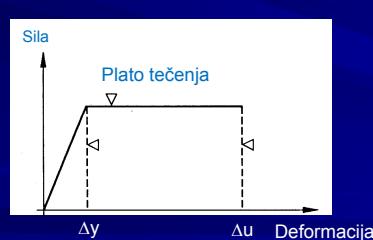
27

6. Razgradnja seizmičke energije

➤ Namjerno izvođenje "disipativnih" mesta u elementima konstrukcije



VAŽNO: Pojam duktilnosti



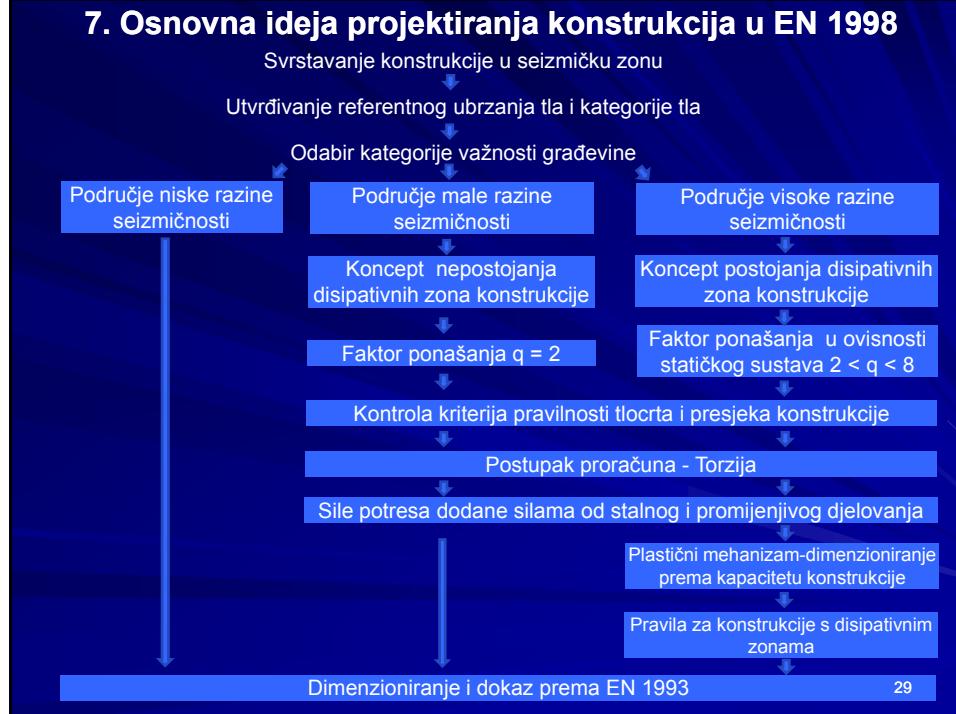
$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

Δ_u - ukupna deformacija elastično plastična

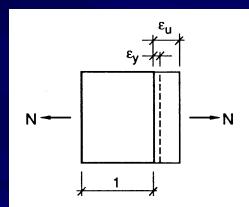
Δ_y - samo elastična deformacija

28

7. Osnovna ideja projektiranja konstrukcija u EN 1998

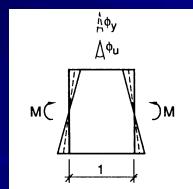


Četiri aspekta ductilnosti



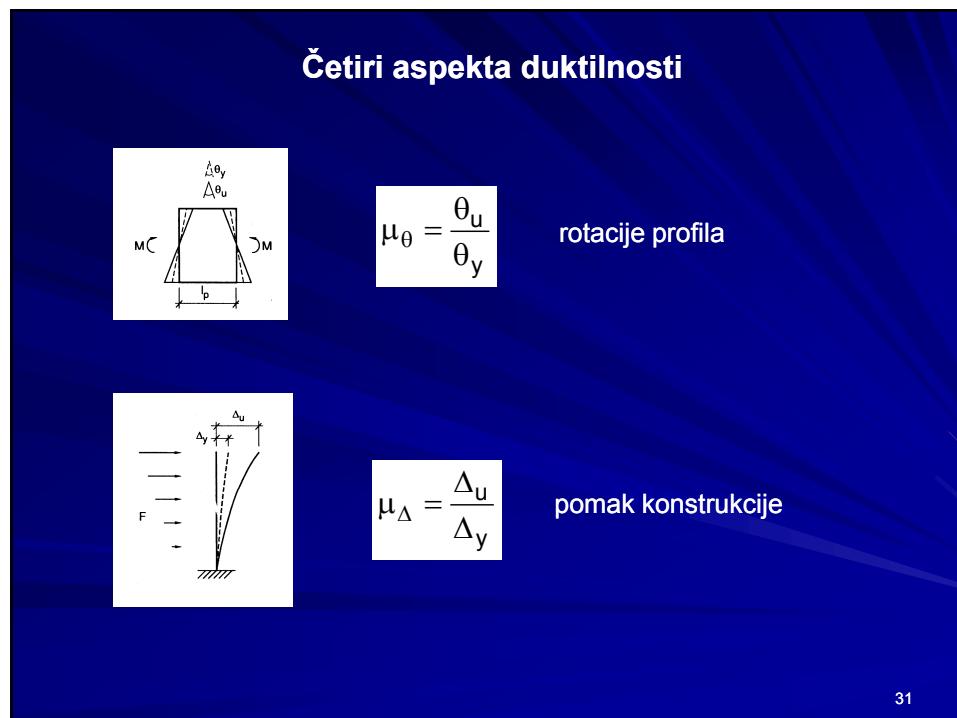
$$\mu_\varepsilon = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y}$$

izduženje elementa

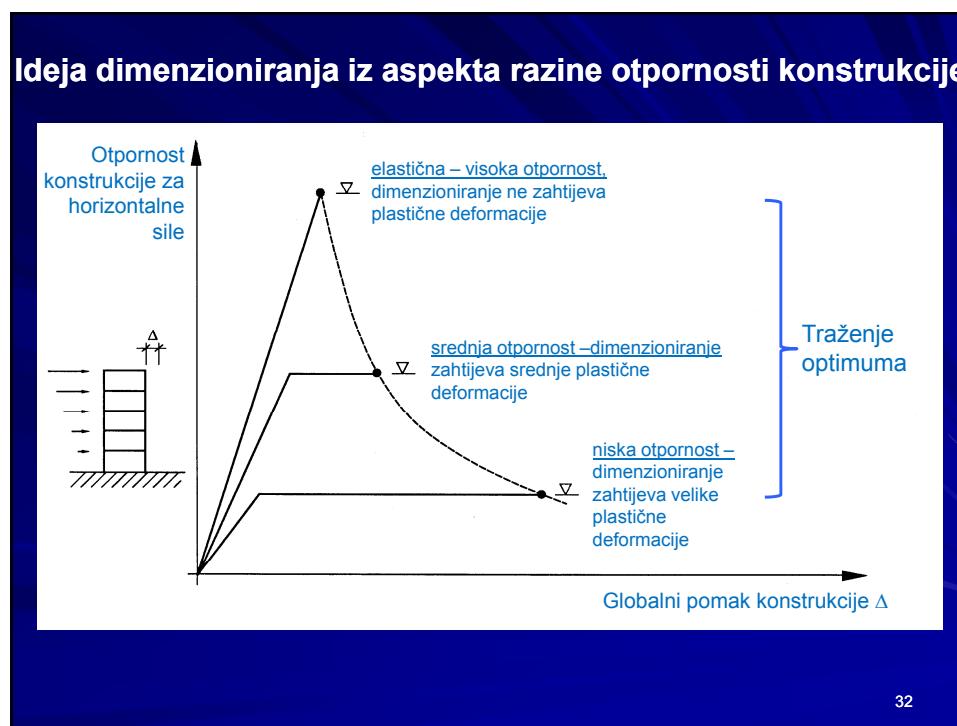


$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}$$

zakrivljenost elementa



31

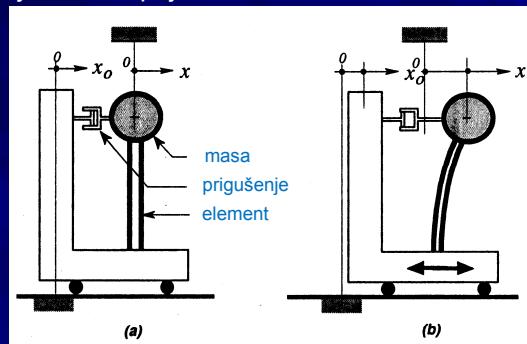


32

Ideja dimenzioniranja jednostavnih konstrukcija

- Single – degree – of – freedom (SDOF)

Sustav s jednim stupnjem slobode



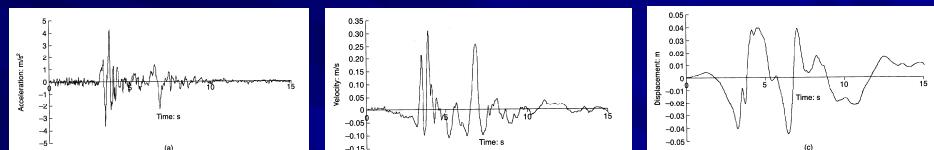
- Gibanje tla kod potresa opisano je spektrom odziva (linearno ili nelinearno područje)
- Mnoge konstrukcije mogu se idealizirano prikazati kao SDOF (dominantan prvi ton, potroši se 70% energije)

33

Predstavljanje gibanja tla kod potresa

- Inženjerski seizmički parametri za prikaz opasnosti kod potresa

- zapisi ovisnosti
 - a** (akceleracija) [m/s^2] - **t** (vrijeme)
 - v** (brzina) [m/s] - **t** (vrijeme)
 - d** (pomaci) [m] - **t** (vrijeme)



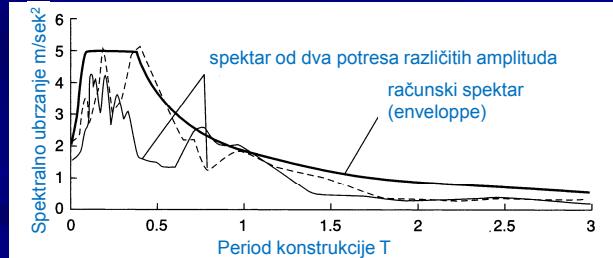
- nedostaci:

- fali frekvencija f , a time i oštećenje konstrukcije za različite periode osciliranja T
- specifični za dano vrijeme i mjesto (nemogućnost ponavljanja tj. standardiziranja)

34

Predstavljanje gibanja tla kod potresa

- Spektar odziva:
 - ima prednosti obzirom na navedene nedostatke
 - podloge za "krivulju opasnosti"
- Krivulja opasnosti (za spektar odziva):
 - grafički zapis maksimuma od a , v i d za SDOF s raznim T .
 - **PGA**, PGV i PGD
- Prednost spektra: predstavlja gibanje tla i daje informacije o odgovoru konstrukcije



- Nacionalne karte: Seizmičko zoniranje prema računskom ubrzanju podloge a_{gR} u stjenovitom tlu (referentna vrijednost)

35

Temeljni zahtjevi-dvije razine seizmičkog proračuna

- Zahtjev da ne dođe do rušenja (KGS)
 - bez lokalnog ili globalnog rušenja nakon potresa
 - računsko seizmičko djelovanje
(vjerojatnost prekoračenja 10% u 50 god. → MRP = 475 god.)
- Zahtjev ograničenja oštećenja (GSU)
 - oštećenja konstrukcijskih i nekonstrukcijskih elemenata ne smiju biti neproporcionalna cijeni konstrukcije
 - uporabno seizmičko djelovanje
(vjerojatnost prekoračenja 10% u 10 god. → MRP = 95 god.)

36

Temeljni zahtjevi

Spašavanje života i ograničenje oštećenja:

- Krajnje granično stanje (KGS)
 - povezano s rušenjem i drugim oblicima degradacije konstrukcije koje mogu ugroziti ljudske živote
 - dokaz KGS podrazumijeva izbalansirati čvrstoću i duktilnost

- Granično stanje uporabe (GSU)
 - povezano s degradacijom koja dovodi do ograničenja korištenja
 - ograničenje oštećenja nosivih i nenosivih dijelova
 - općenito, provjera GSU uključuje ograničenje relativnih pomaka između katova radi zaštite nenosivih elemenata, opreme itd.

37

Diferencijacija pouzdanosti

Različite **klase važnosti** konstrukcija



Faktor važnosti γ_i

Klasa važnosti građevine	Građevina	Faktor važnosti γ_i	CC (EN 1990)
I	Nakon potresa od vitalne važnosti (bolnice, vatrogasne postaje, energetska postrojenja)	1,4	CC3
II	Škole, dvorane, kulturne institucije	1,2	CC3
III	Obične građevine	1,0	CC2
IV	Građevine bez utjecaja na javnu sigurnost	0,8	CC1

38

Razlike u razinama opasnosti kod potresa

Parametar v određuje (NDP)

$$v = \frac{\text{uporabno seizmičko djelovanje (ograničenje oštećenja)}}{\text{računsko seizmičko djelovanje (nema lokalnog rušenja)}}$$

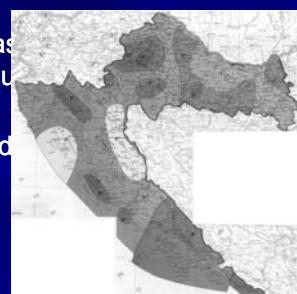
$v = 0,4$ – klase važnosti I i II

$v = 0,5$ – klase važnosti III i IV

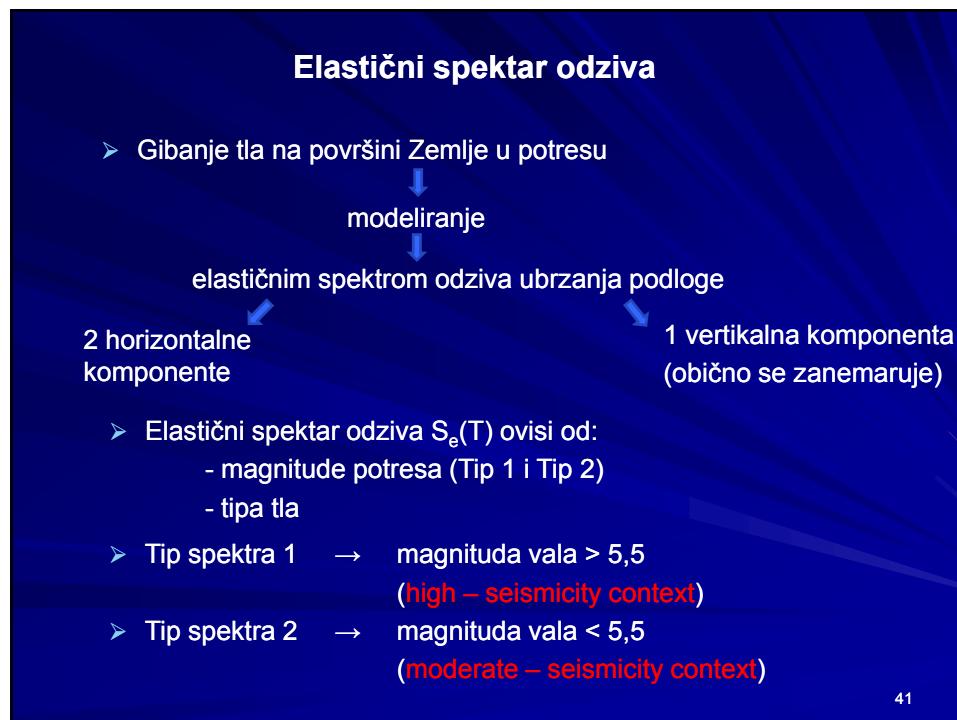
39

Seizmičko djelovanje → elastični spektar odziva

- Seismološka karta Hrvatske
 - različite zone konstantne seizmičke opasnosti
- Seizmička opasnost se može odrediti pomoću proračunskog unapredodređenog elastičnog spektara, kao gravitacijsko ubrzanje g
- Ubrzanje g odnosno seizmički odziv se može odrediti pomoću KGS



40



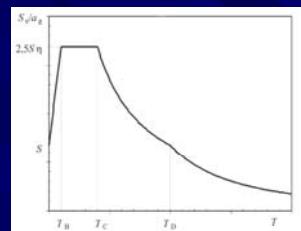
41

Tipovi tla (klasifikacija)

EC8 Tip tla	Litološka obilježja presjeka	Parametri		
		$V_{S,30}$ (m/s)	N _{SPT} (broj udara/ 30cm)	C _u (kPa)
A	Stijena ili stjenovita masa, uključujući manje od 5 m trošnog materijala na površini	> 800	-	-
B	Naslage gusto zbijenog pijeska, sljunka ili čvrstih glina, debele najmanje nekoliko desetaka metara, karakteriziraju postepenim porastom mehaničkih karakteristika sa dubinom	360 - 800	> 50	> 250
C	Debelje naslage vrlo zbijenog tla srednje zbijenih pijesaka, sljunka i poluvršnih glina, debeline od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara	180 - 360	15 - 50	70 - 250
D	Naslage vrlo zbijenog tla srednje zbijenih tala (sa nešto lako glijecivim koherencijama slojem, ili bez nje), ili od pretežito lako do teško glijecivog kohercitnog tla	< 180	< 15	< 70
E	Tip tla E sastoji se od površinskog aluvijalnog sloja sa $V_{S,30}$ vrijeđnostima klase C ili D i debljine koja se kreće od 5 do 20 metara, sa čvrstom podlogom brzine $V_{S,30} > 800$ m/s	-	-	-
S ₁	Naslage koje se sastoje od najmanje 10 m debelih slojeva lako glijecive gline (prava sa indeksom plastičnosti (PI > 40) i visokim sadržajem vode	< 100	-	10 - 20
S ₂	Naslage tala sklonih likvefakciji, glina osjetljivih na površinske, ili druga kategorije tla koje nije uključeno u kategorije A-E	-	-	-

42

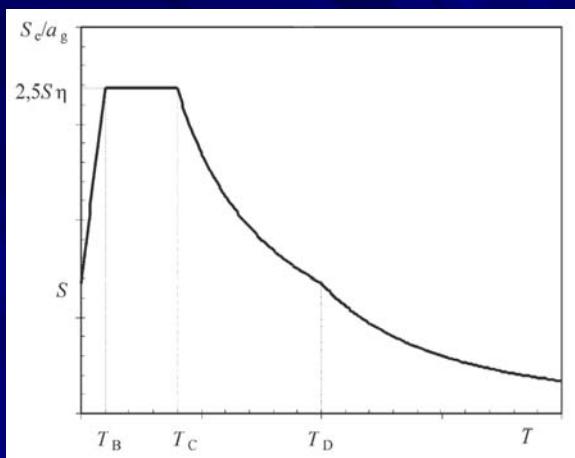
Oblik elastičnog spektra odziva $S_e(T)$



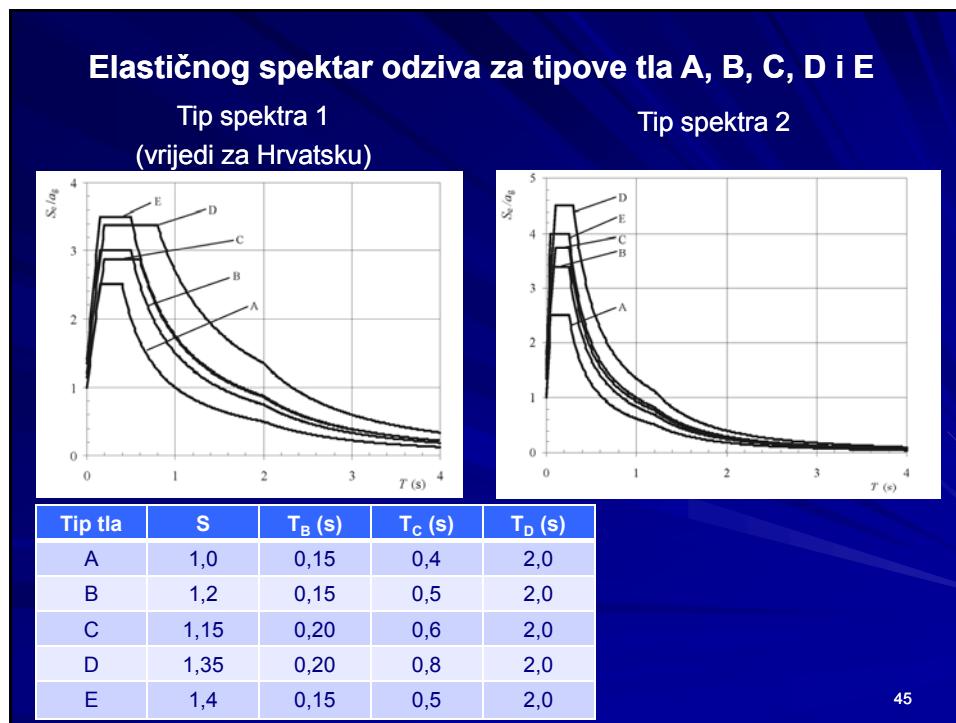
- T - period osciliranje sustava s jednim stupnjem slobode (SDOF)
- T_B i T_C - granične vrijednosti perioda za koje je spektralno ubrzanje konstantno
- T_D - početak dijela spektra velikih perioda
- a_g - projektno (računsko) ubrzanje tla za određeni povratni period potresa (na primjer $a_g = 0,2 \text{ g}$)

$$a_g = \gamma_1 \cdot a_{gR}$$
 - a_{gR} – referentno vršno ubrzanje tla tipa A
- S - faktor tla
- η - korekcijski faktor prigušenja ($\eta = 1$ za viskozno prigušenje 5%)

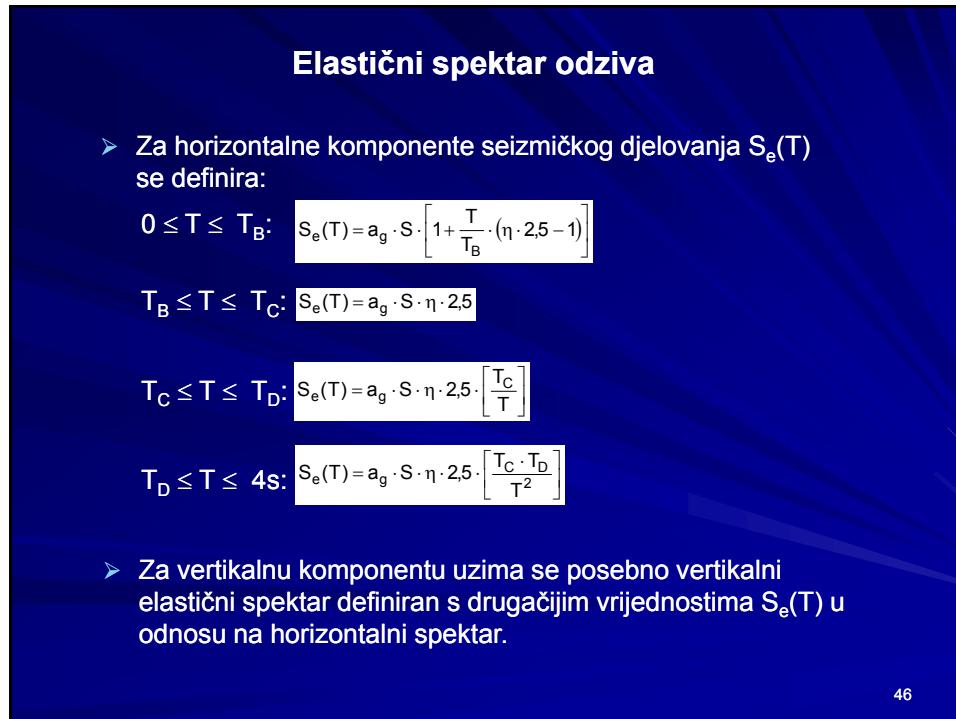
Oblik elastičnog spektra odziva $S_e(T)$



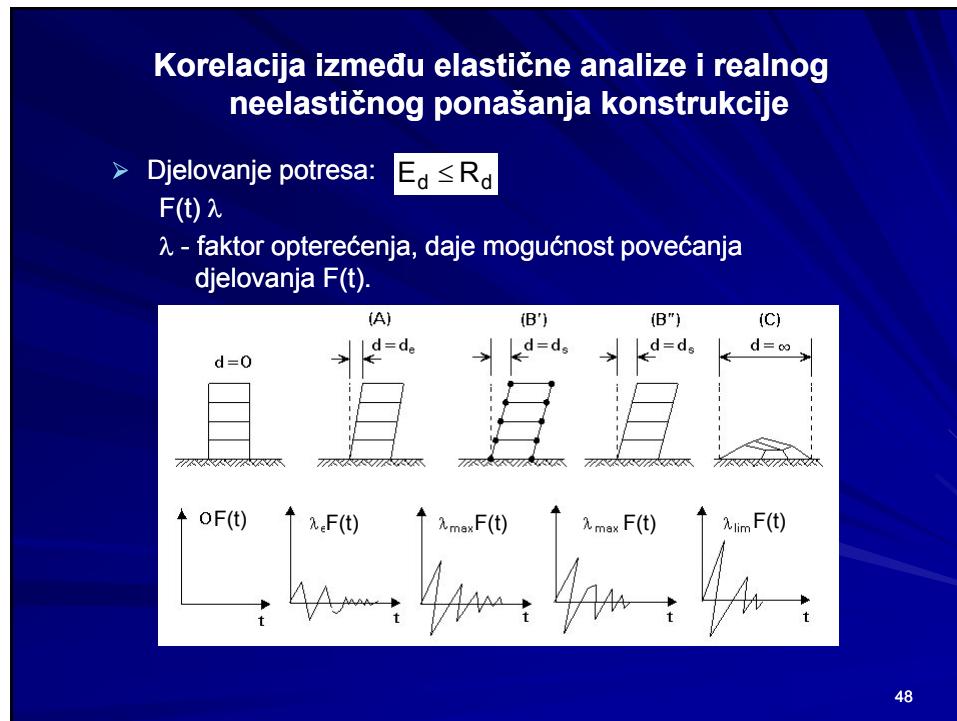
Važno: Za 20 do 30 sek. potresa i prigušenja od 5%, vrijednost 2,5 odgovara vjerojatnosti da potres neće biti prekoračen između 70% do 80 %.



45



46



Korelacija između elastične analize i realnog neelastičnog ponašanja konstrukcije

1. $\lambda \rightarrow$ konstrukcija ostaje elastična, pomak d je proporcionalan λ
2. $\lambda_e \rightarrow$ tečenje u jednom presjeku, pomak $d = d_e$
3. $\lambda_{max} \rightarrow$ tečenje i u drugim presjecima, realni pomak d_s manji od d_s proračunsku elastičnu analizu
4. $\lambda_{max} \rightarrow$ pomaci d_s dobiveni elastičnom i plastičnom analizom su jednaki (učinci P-Δ efekta)
5. $\lambda_{lim} \rightarrow$ djeluje $F(t) \lambda_{lim}$ dovodi do kolapsa

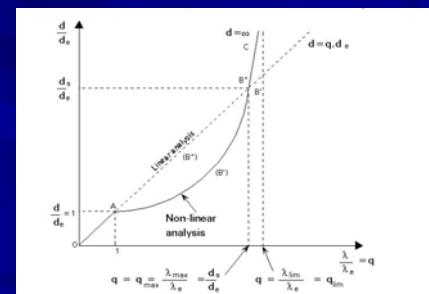
➤ Definicija faktora q:

$$q = \frac{\lambda_{max}}{\lambda_e} \quad \text{ili} \quad q = \frac{F_{el}}{F_y}$$

49

Faktor ponašanja q

- Definicija faktora q:
$$q = \frac{\lambda_{max}}{\lambda_e}$$
- Linearna analiza s $F(t)/q$ jednaka je u pogledu razine pouzdanosti nelinearnoj analizi s $F(t)$
 - Korelacija između linearne i nelinearne analize



➤ Stvarni pomak konstrukcije d_s :

$$d_s = q \cdot d_e$$

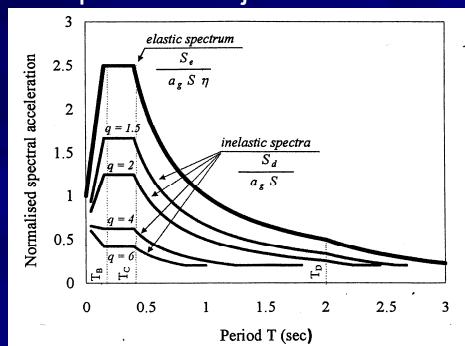
Faktor ponašanja

Elastični pomak uslijed
reduciranih sila

50

Oblici računskog spektra odziva u ovisnosti faktora ponašanja q

Referentni elastični spektar ubrzanja obično se naziva "elastični spektar odziva" $S_e(T)$



S_e - elastični spektar ubrzanja odziva; a_g - računsko ubrzanje tla
 S - faktor tla (ovisi od tipa); η - faktor korekcije radi prigušenja
 q - faktor ponašanja T_B , T_C i T_D - referentni periodi spektra (ovise od tipa tla i tipa spektra 1 ili 2)

51

Tipovi čeličnih konstrukcija i faktor ponašanja q

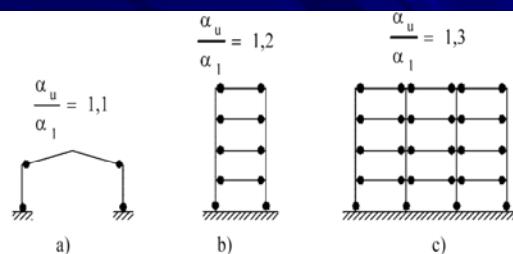


Figure 6.1: Moment resisting frames (dissipative zones in beams and at bottom of columns). Default values for α_u/α_l (see 6.3.2(3) and Table 6.2).

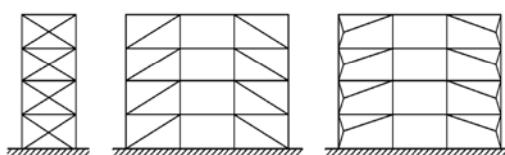


Figure 6.2: Frames with concentric diagonal bracings (dissipative zones in tension diagonals only).

52

Tipovi čeličnih konstrukcija i faktor ponašanja α

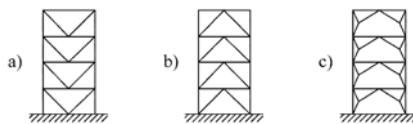


Figure 6.3: Frames with concentric V-bracings (dissipative zones in tension and compression diagonals).

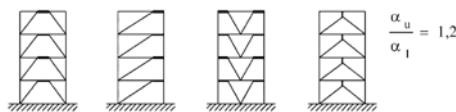


Figure 6.4: Frames with eccentric bracings (dissipative zones in bending or shear links). Default values for α_u/α_l (see 6.3.2(3) and Table 6.2).

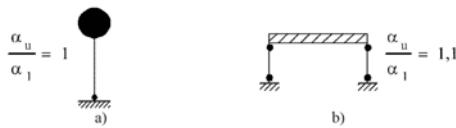


Figure 6.5: Inverted pendulum: a) dissipative zones at the column base; b) dissipative zones in columns ($N_{Ed}/N_{pl,Rd} < 0,3$). Default values for α_u/α_l (see 6.3.2(3) and Table 6.2).

53

Tipovi čeličnih konstrukcija i faktor ponašanja α

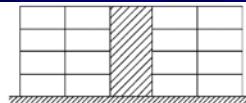


Figure 6.6: Structures with concrete cores or concrete walls.

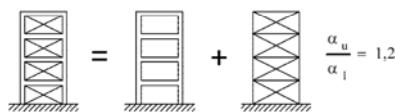


Figure 6.7: Moment resisting frame combined with concentric bracing (dissipative zones in moment frame and in tension diagonals). Default value for α_u/α_l (see 6.3.2(3) and Table 6.2).

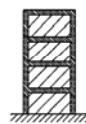


Figure 6.8: Moment resisting frame combined with infills.

α_l – množe se seizmičke sile kod stanja prvog plastičnog zglobo u sustavu
 α_u - množe se seizmičke sile kod stanja globalnog plastičnog mehanizma

54

Računski spektar odziva

- Za horizontalne komponente seizmičkog djelovanja $S_d(T)$ se definira:

$$0 \leq T \leq T_B: \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C: \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D: \quad S_d(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

$$T_D \leq T: \quad S_d(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

- Za vertikalnu komponentu vrijede isti izrazi s računskim ubrzanjem u vertikalnom smjeru a_{vg} umjesto a_g , dok se S uzima s vrijednošću 1,0, a ostali parametri se uzimaju kao i za vertikalnu komponentu eleastičnog spektar odziva.

55

Metode analize konstrukcija uslijed djelovanja potresa

- **Linearna statička analiza** ili "ekvivalentna statička" analiza (lateral force method)
- **Analiza modalnog odziva spektra** ili "linearna dinamička analiza" (modal response spectrum analysis)
- **Nelinearna statička analiza** ili "pushover" analysis
- **Nelinearna dinamička analiza** (non linear time history analysis)

Referentna analiza u EN 1998 → analiza modalnog odziva spektra

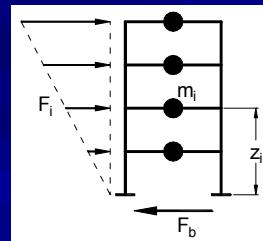
56

Linearna statička analiza

- Pojednostavljena spektralna analiza, koja razmatra samo doprinos osnovnog moda vibracija konstrukcije
- Oblik osnovnog moda može se aproksimirati horizontalnim pomacima koji se povećavaju linearno s visinom konstrukcije

$$F_i = F_b \frac{m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i z_i}$$

F_b – ukupna potresna poprečna sila



Primjena metode:

- $-T_1 \leq \begin{cases} 4 \cdot T_c \\ 2,0 \text{ sek} \end{cases} \quad T_1 - \text{osnovni period vibracija konstrukcije}$
- - Kriterije regularnosti konstrukcije u presjeku (pogledu)

57

Ukupna poprečna potresna sila u nivou gornjeg ruba temelja

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

$S_d(T_1)$ - vrijednost računskog spektra za osnovni period vibracija T_1

m - ukupna masa zgrade

λ - faktor korekcije

$\lambda \cdot m$ – efektivna modalna masa

→ $T_1 \leq 2T_c$ ako zgrada ima više od 2 kata $\lambda = 0,85$

→ u ostalim slučajevima $\lambda = 1,0$

Određivanje osnovnog perioda vibracija T_1

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{\sum m_i \cdot \delta_i^2}{\sum F_i \cdot \delta_i}}$$

58

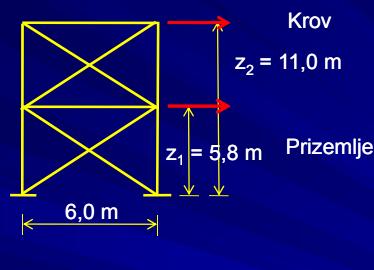
Parametri kod linearne statičke analize

- Geografski položaj konstrukcije (seizmičko zoniranje)
 $a_g = \gamma_1 a_{gR}$ – računsko (projektno) ubrzanje podloge tipa A
 a_{gR} – referentno vršno ubrzanje podloge A
- Faktor tla
- S
- Faktor važnosti konstrukcije
 γ_1
- Faktor ponašanja
 q
- Ukupna težina građevine
 $\Sigma G_{k,j} + \Sigma \psi Q_{k,i}$
- Prvi mod (ton) perioda vibracija konstrukcije
 T_1

59

Primjer: Određivanje potresnih sila metodom linearne statičke analize (lateral force method)

Zadani sustav vertikalne stabilizacije



Površina koju preuzima
jedan vezni sustav

$$A = 58 \cdot 80 = 4640 \text{ m}^2$$

60

Primjer: Određivanje potresnih sila metodom linearne statičke analize (lateral force method)

➤ Težina zgrade

a) prizemlje

- Stalno	$g_1 = 6,9 \text{ kN} / \text{m}^2$	$G_1 = 6,9 \cdot 4640 = 32016 \text{ kN}$
- Korisno	$q_1 = 5,0 \text{ kN} / \text{m}^2$	$Q_1 = 5,0 \cdot 4640 = 23200 \text{ kN}$
- Kombinacija	$W_1 = G_1 + \psi_{Ei} \cdot Q_1 = 32016 + 0,6 \cdot 23200 = 45936 \text{ kN}$	

$$\psi_{Ei} = \varphi \cdot \psi_{2,i} = 1,0 \cdot 0,6 = 0,6 \quad \psi \rightarrow \text{NA}$$

b) krov

- Stalno	$g_2 = 1,13 \text{ kN} / \text{m}^2$	$G_2 = 1,13 \cdot 4640 = 5243 \text{ kN}$
- Instalacije		$G_3 = 2987 \text{ kN}$
- Snijeg	$s = 1,0 \text{ kN} / \text{m}^2$	$Q_2 = 1,0 \cdot 4640 = 4640 \text{ kN}$
- Kombinacija	$W_2 = G_2 + G_3 + \psi_{Ei} \cdot Q_2 = 5243 + 2987 + 0 \cdot 4640 = 8230 \text{ kN}$	

$$\psi_{Ei} = \varphi \cdot \psi_{2,i} = 1,0 \cdot 0 = 0$$

61

Primjer: Određivanje potresnih sila metodom linearne statičke analize (lateral force method)

c) ukupna težina zgrade

$$W = W_1 + W_2 = 45936 + 8230 = 54166 \text{ kN}$$

d) osnovni period vibracija

- Izračunat višemodalnom analizom (Staad 2004)

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{\sum m_i \cdot \delta_i^2}{\sum F_i \cdot \delta_i}} = 0,589 \text{ sek}$$

62

Primjer: Određivanje potresnih sila metodom linearne statičke analize (lateral force method)

e) ordinata proračunskog spektra

- Spektar tipa 1
- Kategorija tla C (očitano iz tablice) $S = 1,15$, $T_B = 0,20$, $T_C = 0,60$
- Uvjet: $T_B \leq T_1 \leq T_C$ $0,20 < T_1 = 0,589 < 0,60$

$$S_d(T_1) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 / q$$

$$a_g = \gamma_I \cdot a_{gR} = 1,0 \cdot 0,1 = 0,1 \quad (\gamma_I = 1,0 - \text{kat .III} \quad a_g - \text{zonaVII})$$

$$\eta = 1,0$$

$$S = 1,15$$

$$q = 2,0$$

$$S_d(T_1) = 0,1 \cdot 1,15 \cdot 1,0 \cdot 2,5 / 2,0 = 0,144$$

f) ukupna potresna poprečna sila

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda \quad \lambda = 1,0$$

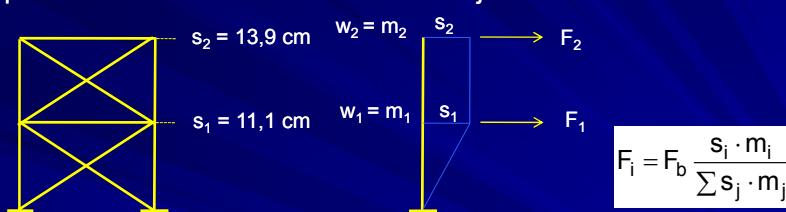
$$W = 54166 \text{ kN}$$

$$F_b = 0,144 \cdot 54166 = 7799 \text{ kN}$$

63

Primjer: Određivanje potresnih sila metodom linearne statičke analize (lateral force method)

g) pomaci masa u osnovnom obliku vibracije



Prizemlje

$$F_1 = 7799 \cdot \frac{11,1 \cdot 45936}{(11,1 \cdot 45936 + 13,9 \cdot 8230)} = 6370$$

$$F_2 = 7799 \cdot \frac{13,9 \cdot 8230}{(11,1 \cdot 45936 + 13,9 \cdot 8230)} = 1429$$

Kontrola:

$$F_1 + F_2 = F_b$$

$$6370 + 1429 = 7799$$

64

Primjer: Određivanje potresnih sila metodom linearne statičke analize (lateral force method)

h) Ova se metoda može primijeniti ako su zadovoljena dva kriterija:

- $T_1 \leq \begin{cases} 4T_c \\ 2,0 \text{ sek} \end{cases}$
- zadovoljava regularnost presjeka
- Oba su kriterija zadovoljena

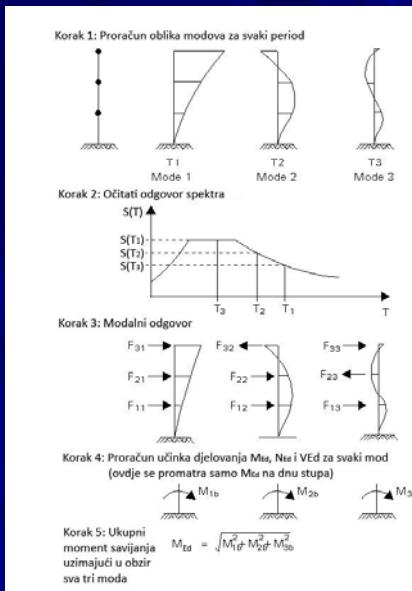
65

Analiza modalnog odziva spektra

- Primjena kada za konstrukciju nije moguće primijeniti "metodu lateralnih sila".
- Prednost: uzimaju se u obzir i ostali modovi (tonovi) vlastitih oblika vibracija.
- Kombiniraju se odgovori različitih modova vibracija.
- Pravilo kombinacija različitih modova SRSS (Square Root of Sum Squares).
- Pravilo kombinacija primjenjuje se za učinke djelovanja:
 - momente
 - poprečne sile
 - uzdužne sile
 - pomake

66

Prikaz analize modalnog odziva spektra



67

Broj modova koji se koriste kod analize

- Broj odgovora svih modova vibracija koji doprinose globalnom odgovoru konstrukcije moraju se uzeti u obzir i to:
 - zbroj efektivnih modalnih masa za razmatrane modove mora iznositi najmanje 90% od ukupne mase konstrukcije.
 - u obzir se uzimaju svi modovi s efektivnim modalnim masama veći od 5% ukupne mase konstrukcije
- Kombinacija modalnih odgovora
 - primjenjuje se pravilo SRSS ukoliko su modalni odgovori međusobno neovisni:

$$E_E = \sqrt{\sum_{i=1}^N E_{Ei}^2}$$

E_E - najvjerojatniji najveći učinak seizmičkog djelovanja

$\sum E_{Ei}$ - suma modalnih odgovora

N - broj modova

Odgovori dva moda k i k+1 mogu se smatrati neovisnim ukoliko vrijedi:

$$T_{k+1} \leq 0,9 T_k$$

68

Broj modova koji se koriste kod analize

- Pravilo CQC (Complete quadratic Combination)
 - primjenjuje se ukoliko su modovi vibracija i i j međusobno ovisni:

$$E_E = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r_{ij} \cdot E_{Ei} \cdot E_{Ej}}$$

r_{ij} – koeficijent korelacije modova i i j

69

Kombinacija učinka komponenti seizmičkog djelovanja

- Istovremeno djelovanje dvije međusobno okomite horizontalne komponente (lateral force ili spektralna analiza)
 - Seizmički odgovor se promatra odvojeno za svaki smjer
 - "Peak" vrijednost istovremenog djelovanja dvije horizontalne komponente dobiva se primjenom pravila SRSS:

$$E_{Ed} = \sqrt{E_{Edx}^2 + E_{Edy}^2}$$

$$E_{Ed} = \sqrt{E_{Edx}^2 + E_{Edy}^2 + E_{Edz}^2}$$

- Alternativna metoda za kombinaciju komponenti seizmičkog djelovanja

$$\begin{aligned} E_{Edx} &+ 0,3 E_{Edy} \\ 0,3 E_{Edx} &+ E_{Edy} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0,3 E_{Edx} &+ 0,3 E_{Edy} + E_{Edz} \\ E_{Edx} &+ 0,3 E_{Edy} + 0,3 E_{Edz} \\ 0,3 E_{Edx} &+ E_{Edy} + 0,3 E_{Edz} \end{aligned}$$

70

Kombinacija seizmičkog djelovanja s ostalim djelovanjima

- Povezanost s kombinacijama → EN1990
- Seizmička kombinacija (KGS):

$$\sum_{j=1}^N G_{k,j} + \gamma_l A_{Ek} + \sum_{j=1}^N \psi_{2,1} Q_{k,j}$$

- $G_{k,j}$ – karakteristična vrijednost stalnog djelovanja j
- $Q_{k,j}$ – karakteristična vrijednost promjenjivog djelovanja j
- A_{Ek} – karakteristično seizmičko djelovanje koje odgovara srednjem povratnom periodu (povezano s KGS)
- $\psi_{2,1}$ – koeficijent za kvazistalnu vrijednost od $Q_{k,j}$
- γ_l – faktor važnosti konstrukcije (tablica str. 22)

71

Kombinacija seizmičkog djelovanja s ostalim djelovanjima

- Određivanje **učinka seizmičkog djelovanja** pomoću masa povezanih s gravitacijskim opterećenjem koja se pojavljuju u sljedećoj kombinaciji:

Mase
$$\sum_{j=1}^N G_{k,j} + \sum_{j=1}^N \psi_{2,1} Q_{k,j}$$

- Koeficijenti $\psi_{2,1}$ (EN 1990, Aneks A1, NDP)
 - Vjetar i promjena temperature $\psi_{2,1} = 0$
 - Snijeg na krovu $\psi_{2,1} = 0$
 - Promjenjivo opterećenje u skladištu $\psi_{2,1} = 0,8$
 - Itd.

72

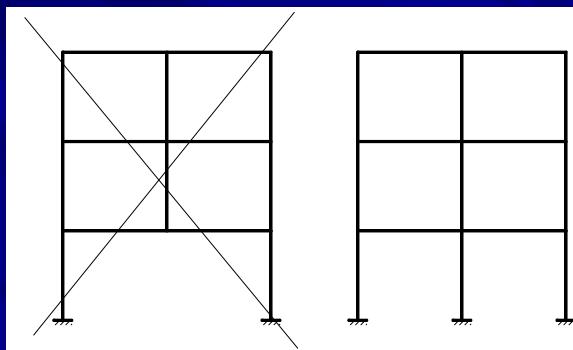
Konceptualni proračun zgrada

- Seizmički odgovor konstrukcije podložan je neizvjesnostima:
 - karakteristike budućih seizmičkih gibanja
 - razlikama između modela konstrukcije i realnog ponašanja
 - ⇒ elastični model ↔ neelastični odgovor
 - ⇒ staticka analiza ↔ dinamičko ponašanje
 - itd.
- Dobro konceptualno projektiranje:
 1. Jednostavnost konstrukcije
 2. Jednolikost, simetrija i redundantnost
 3. Otpornost i krutosti u dva smjera
 4. Torzijska otpornost i krutost
 5. Ponašanje stropne ploče kao dijafragme
 6. Odgovarajuće temeljenje

73

1 Jednostavnost konstrukcije

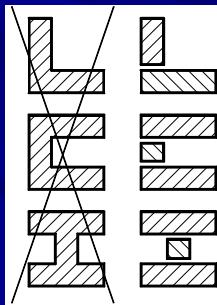
- Konstrukcija je jednostavna, kompaktna i simetrična
 - Jasan i direktni način prenos seizmičkih sila
- Male neizvjesnosti u pogledu:
 - modeliranja
 - analize
 - proračuna
 - izvedbe detalja
 - izvedbe



74

2 Jednolikost, simetrija i redundantnost

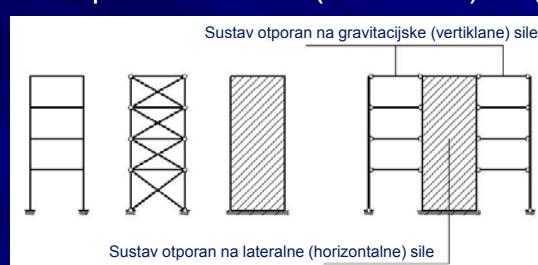
- Ovaj je zahtjev u korelaciji sa zahtjevom ①
- Konstrukcija mora biti što je moguće pravilnija:
 - jednoličan tlocrt zgrade
 - što omogućava kratki i jednostavan prijenos inercijalnih sila na vertikalni nosivi sustav
- Redundantnost:
 - otkazivanje pojedinog elementa ne dovodi do otkazivanja čitave konstrukcije



75

3 Otpornost i krutost konstrukcije u dva smjera

- Konstrukcija posjeduje dva sustava:
 - Sustav otporan na gravitacijske (vertiklane) sile (SOGS).
 - Sustav otporan na lateralne (horizontalne) sile (SOLS).

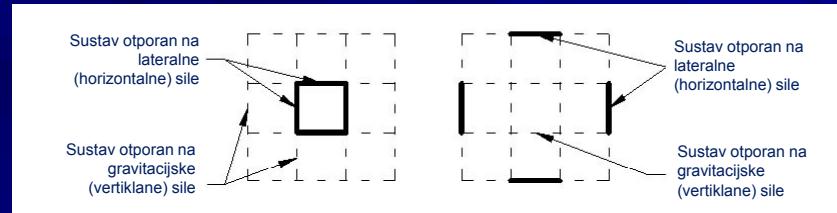


- Seizmičko gibanje ima komponente u oba horizontalna smjera
- Konstrukcija mora imati sličnu čvrstoću i krutost u oba smjera

76

4 Torzijska otpornost i krutost konstrukcije

- Seizmičke sile \Rightarrow centar masa (CM)
- Sile otpornosti \Rightarrow centar krutosti (CK)
- Torzijski fleksibilni konstrukcijski sustavi:
 - velike sile i deformacije u obodnim vertiklanim sustavima
 - stabilizacija konstrukcije

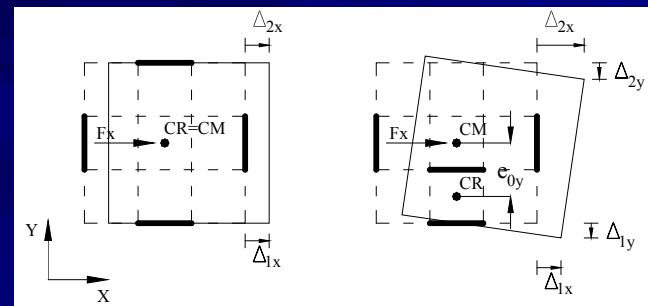


Prvi zaključak: Sustav otporan na lateralne sile učinkovitiji je što je dalje od centra krutosti (CK).

77

4 Torzijska otpornost i krutost konstrukcije

- Seizmičke sile \Rightarrow centar masa (CM)
- Sile otpornosti \Rightarrow centar krutosti (CK)
- Ekscentricitet \Rightarrow Torzija \Rightarrow Povećanje sile i pomaka



Drugi zaključak:

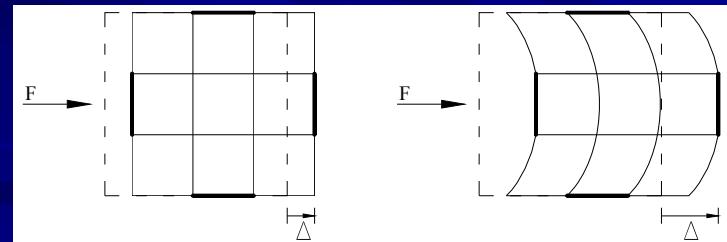
Sustav otporan na lateralne sile mora biti postavljen što je više moguće simetričnije.

78

5 Ponašanje stropne ploče kao dijafragme

➤ Funkcija stropnih ploča:

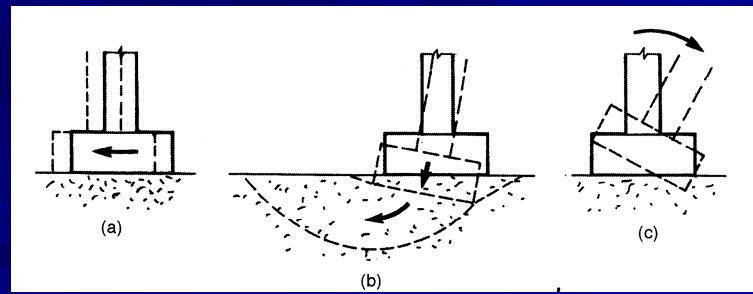
- preuzimanje horizontalnih sile i njihovo vođenje na sustav otporan na te sile (vertikalni sustav)
- sustav otporan na horizontalne sile djeluje kao cijelina
- posebno je važna kod složenih i nejednolikih horizontalnih dispozicija katova sustava za preuzimanje horizontalnih sile
- posebno je važno kod kombinacije sustava za preuzimanje horizontalnih sile različitih krutosti



79

6 Odgovarajuće temeljenje

- Proračun i izvedba temelja kao i priključak na konstrukciju moraju osigurati da je cijela zgrada izložena jednolikoj seizmičkoj pobudi.
- Oštećenje temelja:
 - popravak je vrlo težak
 - obično se konstrukcija mora demolirati
- Modovi otkazivanja



80

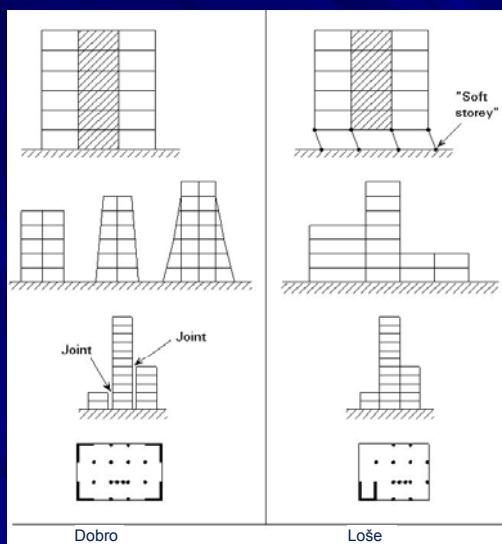
Kriterij za regularnost (pravilnost) konstrukcije

- Pravilnost konstrukcije:
 - u tlocrtu zgrade (horizontalna pravilnost)
 - u presjeku zgrade (vertikalna pravilnost)
- Pravilnost tlocrta zgrade – na temelju promjene pomaka po katovima
- Pravilnost u presjeku zgrade – na temelju promjene masa, krutosti i čvrstoće od kata do kata
- Glavni razlog za klasifikaciju pravilnosti:
 - određivanje linearne analize na modelu 2D ili 3D
 - primjena metode analize LFM ili MRSA
 - faktor ponašanja q uvodi redukcije nepravilnosti presjeka zgrade

81

Kriterij za regularnost (pravilnost) konstrukcije

- Pravilnost obzirom na kontinuitet i simetriju konstrukcije



82

Kriterij pravilnosti u tlocrtu zgrade

- Simetrična raspodjela krutosti i masa
- Kompaktni oblik tlocrta, blizak konveksnom (ispupčenom) poligonalnom obliku
- Stropovi u svakom katu djeluju kao posmično krute dijafragme
- Za svaki kat, u oba smjera x i y, ekscentritet e_0 mora zadovoljiti uvjete:

$$e_{0x} \leq 0,30 r_x \quad e_{0y} \leq 0,30 r_y$$

- e_{0x}, e_{0y} – razmak između centra krutosti i centra masa
- r_x, r_y – drugi korijen iz odnosa torzijske krutosti i lateralne krutosti za svaki smjer (“torsional radius”)

83

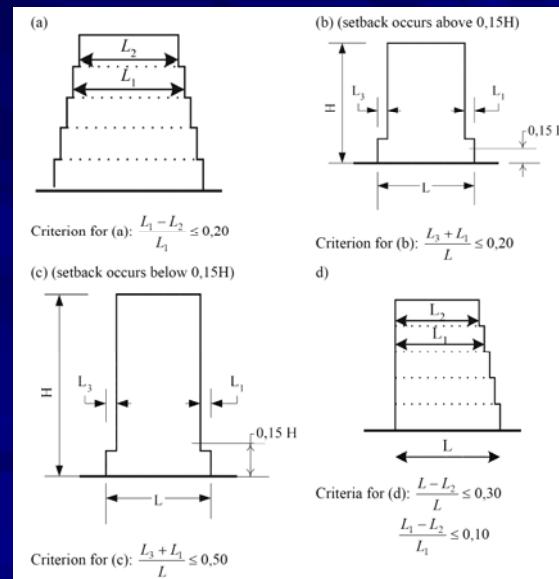
Kriterij u presjeku zgrade

- Sustav otporan na lateralne sile mora bez prekida ići od temelja do vrha zgrade
- Mase i lateralne krutosti moraju biti konstantne ili se postepeno smanjuju po visini zgrade.
- Kod skeletnih konstrukcija omjer između stvarne otpornosti i otpornosti koja se zahtijeva u analizi ne smije se mijenjati neproporcionalno između susjednih katova.
- Ograničenje kod zgrada promjenjivih presjeka (“setbacks”)

84

Kriterij u presjeku zgrade

- Ograničenje kod zgrada promjenjivih presjeka (“setbacks”)



85

Posljedice pravilnosti konstrukcije na seizmičku analizu i proračun

- U svrhu seizmičkog proračuna zgrada izvršena je podjela na:
 - pravilne konstrukcije
 - nepravilne konstrukcije
- EN 1998 dopušta proračun i izvedbu nepravilnih konstrukcija, ali se ipak preporuča projektiranje pravilnih.
- Posljedice pravilnosti konstrukcija na seizmičku analizu i proračun

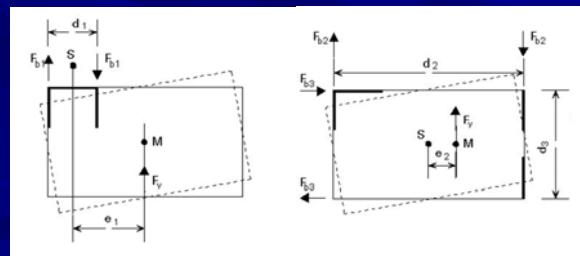
Pravilnost		Dopušteno pojednostavljenje		Faktor ponašanja(q)
Tlocrt	Presjek	Model	Linearna elastična analiza	
DA	DA	2D	* Metoda horizontalnih sila	Referentna vrijednost
DA	NE	2D	Modalna metoda	Smanjena vrijednost
NE	DA	2D	* Metoda horizontalnih sila	Referentna vrijednost
NE	NE	3D	Modalna metoda	Smanjena vrijednost

*Vrijedi ako je $T_1 < 2.0$ s i $T_1 < 4 T_C$

86

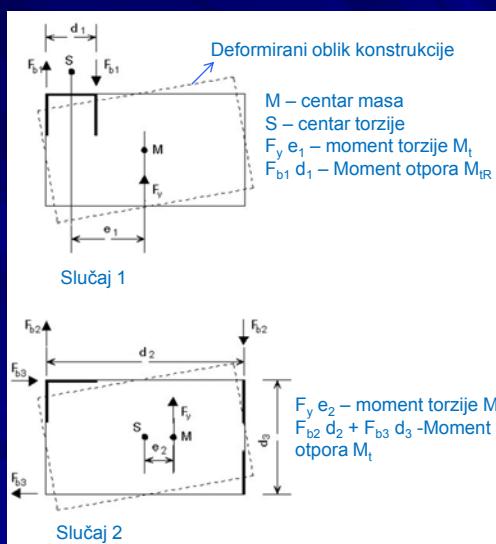
Posljedice pravilnosti konstrukcije na seizmičku analizu i proračun

- Nepravilnost tlocrta: veliki torzijski ekscentriciteti, primjena 3D modela
- Nepravilnost presjeka:
 - analiza spektra modalnog odziva
 - reducirane vrijednosti faktora ponašanja q



87

Posljedice pravilnosti konstrukcije na seizmičku analizu i proračun



88

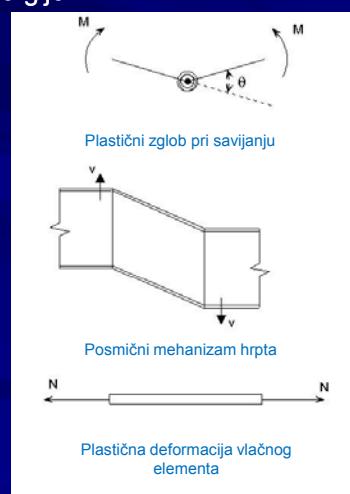
Zone razgradnje energije kod čeličnih konstrukcija

- Elastični proračun otpornosti na potres dovodi do vrlo skupe konstrukcije
- Filozofija projektiranja u EN 1998
 - uvođenje kontroliranih zona konstrukcije gdje se seizmička energija razgrađuje pomoću duktilnog (histerezinog) ponašanja
- Faktor ponašanja q :
 - uzima u obzir sposobnost konstrukcije da apsorbira i gubi energiju koja se potresom u nju unosi
 - umjesto nelinearne analize koristi se linearna elastična analiza zasnovana na projektnom spektru
 - ovisi od duktilnosti, redundantnosti i prekoračenju čvrstoće (overstrength)

89

Glavne zone razgradnje seizmičke energije

- Neelastične deformacije događaju se u određenim zonama razgradnje energije



90

Glavne zone razgradnje seizmičke energije

- Da se poluče duktilni elementi moraju se slijediti određena pravila:
 - klasa duktilnosti H (DCH)
 - klasa duktilnosti M (DCM)

91

Duktilni i krti elementi kod čeličnih konstrukcija

- Konstrukcija je sastavljena od konstrukcijskih elemenata
 - duktilni
 - krti

Krti elemente treba sprječiti da ne dosegnu elastični limit

proračun temeljen na principu kapaciteta

Jedna karika lanca dovoljna je da se dosegne duktilnost lanca

92

Proračunski koncepti za čelične zgrade

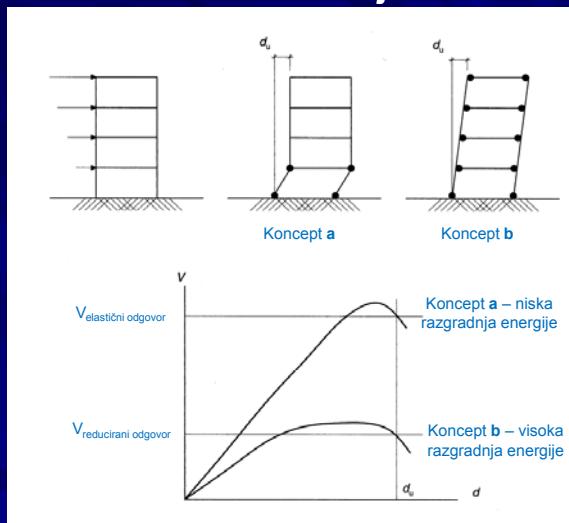
- Koncept a) → Ponašanje konstrukcije kod male razgradnje energije (Low dissipative structural behaviour)
- Koncept b) → Ponašanje konstrukcije kod značajnije razgradnje energije (Dissipative structural behaviour)
- Veza → Proračunski koncept → Klasa duktilnosti → Faktor q

Tablica 6.1 Proračun čeličnih konstrukcija otpornih na potres

Koncept proračuna	Klasa duktilnosti konstrukcije	Faktor ponašanja q
Koncept a) Ponašanje konstrukcije s niskom razgradnjom energije	DCL (Low)	$\leq 1,5 - 2$
Koncept b) Ponašanje konstrukcije s razgradnjom energije	DCM (Medium)	≤ 4 (limitirano s vrijednostima tablice 6.2)
	DCH (High)	Limitirano isključivo s vrijednostima iz tablice 6.2

93

Definicija i prikaz proračunskog koncepta za čelične konstrukcije



94

Analiza konstrukcije 2D ili 3D

- Zgrada pravilna u tlocrtu (horizontalna regularnost):
 - analiza s dvije horizontalne komponente seizmičke sile
 - dva neovisna modela za svaki smjer u 2D analizi
- Dva neovisna modela 2D mogu se koristiti:
 - (1) - visina manja od 10 m ili visina iznosi 40% od tlocrta zgrade
 - (2) - ako su CM i CK približno na (dvije) vertikalne linije
 - (3) - nenosivi dijelovi konstrukcije dobro raspoređeni (vertikalno i horizontalno) da ne remete pravilnost zgrade
 - (4) - da su "torzijski radijusi" u dva smjera barem iznose

$$r_x = \sqrt{l_s^2 + e_x^2} \quad \text{i} \quad r_y = \sqrt{l_s^2 + e_y^2}$$

Opaska: ako uvjet (4) nije ispunjen seizmički učinak treba povećati s 25%.

95

Dokaz za krajnje granično stanje (KGS)

- Glavni zahtjevi:
 - čvrstoća (otpornost)
 - duktilnost
 - otpornost temelja
 - seizmičke dilatacije

96

Dokaz za krajnje granično stanje (KGS)

➤ Čvrstoća

- $E_d \leq R_d$
- Učinak teorije drugog reda ne uzima se u obzir ukoliko je zadovoljeno:

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0,10$$

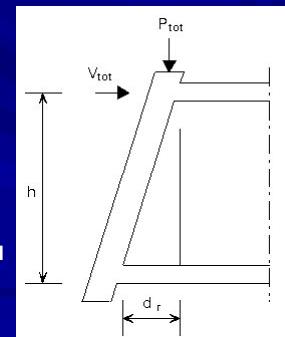
θ - koeficijent senzibilnosti za vrijednost d_r

P_{tot} – ukupno gravitacijsko opterećenje za promatrani kat i one između njega

V_{tot} – ukupna seizmička računska sila u promatranom katu

d_r – interstorey drift (razlika pomaka na vrhu i dnu promatranog kata)

h – visina kata



97

KGS – Dokaz globalne duktilnosti

➤ Duktilnost – glavni doprinos za faktor ponašanja q

➤ Duktilnost – f (materijal, poprečni presjek, element, konstrukcija)

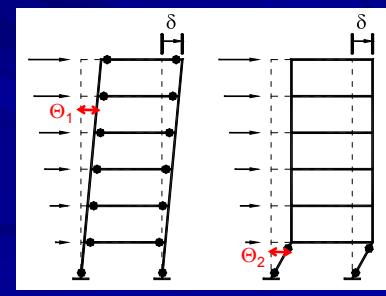
➤ Plastični globalni mehanizam:

- maksimalni mogući broj plastičnih zona
- jednolika raspodjela gubitka (razgradnje) seizmičke energije unutar konstrukcije

➤ Plastični mehanizam kata

(mora se sprječiti):

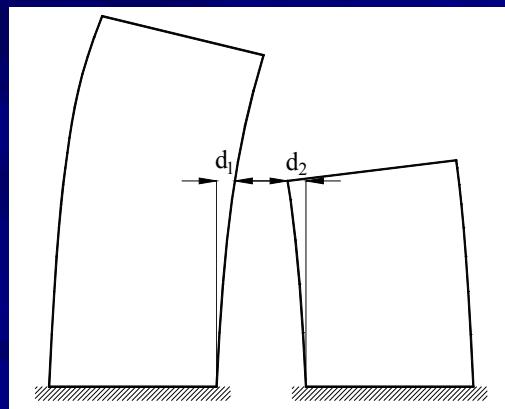
- seizmička energija razgrađena u reduciranim brojem plastičnih zona
- konstrukcijski elementi za koje se zahtijeva veća duktilnost pri istom globalnom pomaku

θ₁ << θ₂

98

KGS – Seizmičke dilatacije

- Odvajanje zgrada s različitim dinamičkim karakteristikama radi:
 - da se dopuste neovisne vibracije
 - ograniče učinci kolizije



99

Dokaz za granično stanje uporabe (GSU)

- Sačuvati (održati) funkcionalnost zgrade ograničenjem oštećenja nekonstrukcijskih elemenata i instalacija (postrojenja) u zgradama
- Analiza pomaka kod GSU:

$$d_s = v \cdot q \cdot d_e$$

d_s - horizontalni pomak kod GSU

d_e - horizontalni pomak izračunat iz računske vrijednosti djelovanja potresa

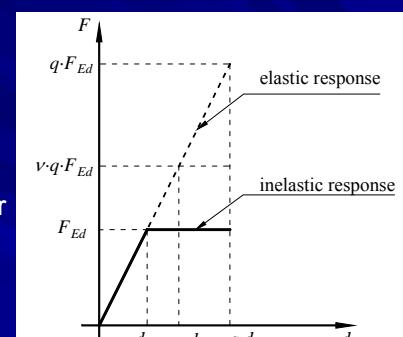
v - faktor redukcije koji uzima u obzir manji srednji povratni period u odnosu na KGS ($v = 0,4$ do $0,5$).

- Dokaz GSU

$$d_s = q_d \cdot d_e$$

- krti nekonstrukcijski elementi $d_r \leq 0,005 h$

- duktilni nekonstrukcijski elementi $d_r \leq 0,0075 h$



100

Tipovi konstrukcija: faktor ponašanja q

Tablica 6.2

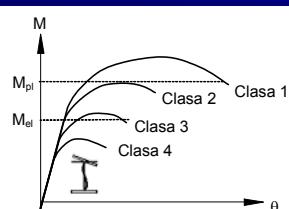
STRUCTURAL TYPE	Ductility Class	
	DCM	DCH
a) Moment resisting frames	4	$5\alpha_u/\alpha_l$
b) Frame with concentric bracings		
Diagonal bracings	4	4
V-bracings	2	2,5
c) Frame with eccentric bracings	4	$5\alpha_u/\alpha_l$
d) Inverted pendulum	2	$2\alpha_u/\alpha_l$
e) Structures with concrete cores or concrete walls	See section 5	
f) Moment resisting frame with concentric bracing	4	$4\alpha_u/\alpha_l$
g) Moment resisting frames with infills		
Unconnected concrete or masonry infills, in contact with the frame	2	2
Connected reinforced concrete infills	See section 7	
Infills isolated from moment frame (see moment frames)	4	$5\alpha_u/\alpha_l$

101

Duktilnost materijala i poprečnog presjeka

- Duktilnost materijala
 - $f_u/f_y > 1,2$
 - izduženje pri lomu $> 20\%$
 - izduženje na kraju platoa tečenja $> 1,5 \%$
- Duktilnost poprečnog presjeka
 - elementi u vlaku: duktilnost poprečnog presjeka \leftrightarrow duktilnost materijala
 - elementi u tlaku: lokalni instabilitet \rightarrow reducirane čvrstoće i duktilnosti
(tlak: uslijed uzdužne sile ili uslijed savijanja)
 - Eurocode 3: 4 klase poprečnih presjeka

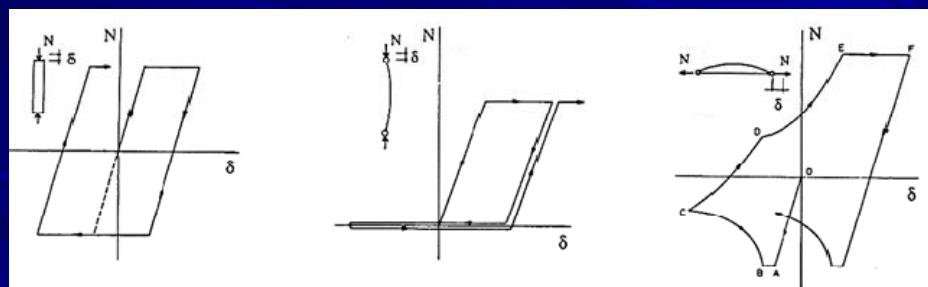
Tablica 6.3



Ductility class	Reference value of behaviour factor q	Required cross-sectional class
DCM	$1,5 < q \leq 2$	class 1, 2 or 3
	$2 < q \leq 4$	class 1 or 2
DCH	$q > 4$	class 1

Duktilnost elementa

- Izvijanje smanjuje čvrstoću i duktilnost
- Tlačni elementi: izvijanje izraženo savijanjem
- Elementi izloženi savijanju: bočno torzijsko izvijanje
- Izvijanje se mora spriječiti za "dissipativne" elemente (elementi koji su u stanju razgraditi energiju) tako da se ograniči njihova vitkost λ :
 - zdepasti elementi
 - bočno pridržanje



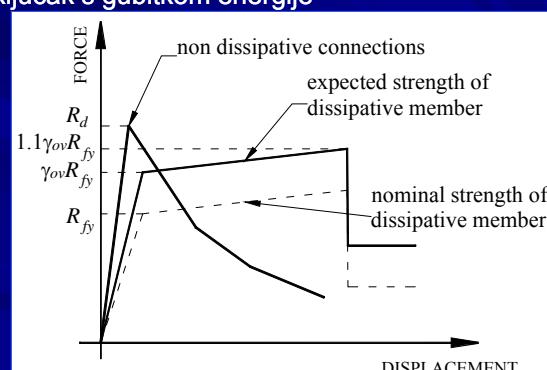
103

Priklučci

- Komplikirano ponašanje i proračun: vrednovanje pomoću ispitivanja u laboratoriju
- Priklučak u kojem je moguć gubitak energije: plastična deformacija u priključku
- Priklučak u kojem nije moguć gubitak energije: Proračunat s povećanjem čvrstoće u odnosu na priključak s gubitkom energije

$$R_d \geq 1,1 \gamma_{ov} R_{fy}$$

γ_{ov} - faktor prekoračenja
čvrstoće koji se
primjenjuje kod
proračuna



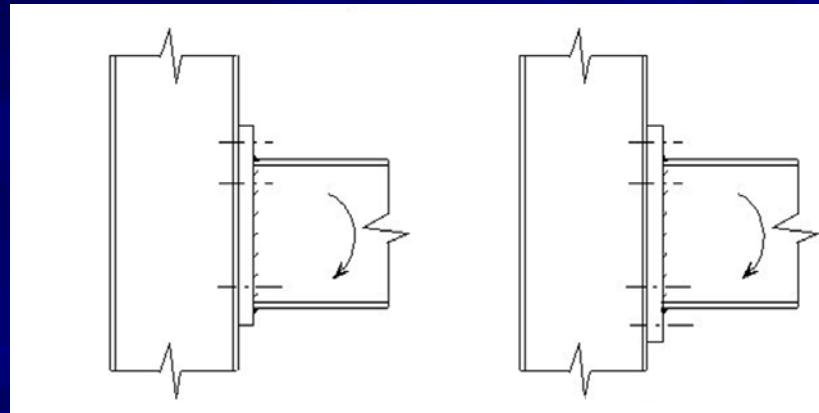
104

Priklučci

- Priklučak nosač-stup

a) uobičajena izvedba

b) izvedba kod potresa

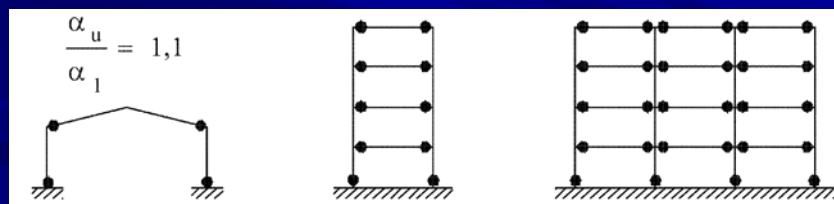


105

Okvirni sustavi

- Horizontalnim silama pružaju otpornost elementi koji imaju krutost na savijanje
- Zone gubitka energije bazirane su u području plastičnih zglobova nosača (prečke) ili u spoju nosač-stup
- Zone gubitka energije mogu također biti smještene u stupovima:
 - kod priključka stupa na temelj
 - na vrhu stupa gornjih katova okvira
 - na vrhu i dnu stupa portalnog okvira kod kojeg je:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} < 0,3$$



106

Proračun nosivosti (kapaciteta) konstrukcije za slučaj potresa (EN 1998)

- Capacity design (engleski)
- Kapazitätsbemessung (njemački)

Osnovni principi

- zone plastifikacije ne nastaju slučajno, planiraju se mesta gdje mogu nastati a gdje ne smiju.
- odabiru se podobni mehanizmi za razgradnju seizmičke energije
- postoji jasna "hijerarhija" otpornosti pojedinih elemenata
- Kapacitet nosivosti elemenata treba uskladiti
- Plastificirane zone se dimenzioniraju tako da "lokalna duktilnost" rezultira "duktilnosti pomaka" globalnog sustava.

107

Okvirni sustavi

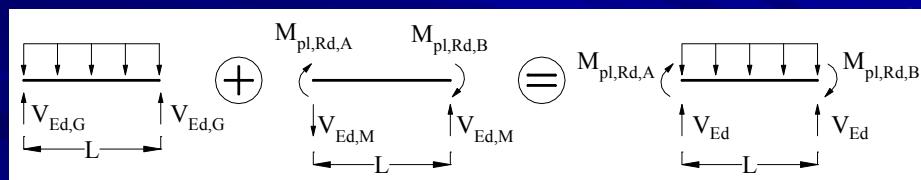
- Zone gubitka energije u nosačima (plastični zglobovi):

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1,0 \quad \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \leq 0,15 \quad \frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 0,5 \quad V_{Ed} = V_{Ed,G} + V_{Ed,M}$$

- Objašnjenje $V_{Ed,G}$ - poprečna sila uslijed vertikalnog (gravitacijskog) opterećenja (bez učinka potresa)

- $V_{Ed,M} = (M_{pl,Rd,A} + M_{pl,Rd,B}) / L$ (od potresa)

- Bočno pridržanje u zonama gubitka energije (na krajevima raspona L)



108

Povećanje čvrstoće kod elemenata bez razgradnje energije

- Presjeci povećavaju čvrstoću radi:

a) čvrstoća materijala veća od nominalne vrijednosti

$$\gamma_{ov} \geq 1,25$$

b) Povećana čvrstoća presjeka

$$\Omega = \frac{M_{pl,Rd}}{M_{Ed}} > 1,0$$

- Okviri
 - plastični zglobovi formiraju se u nosačima
 - stupovi u okvirima nemaju mogućnost razgradnje energije, tako da ukupni N_{Ed} glasi:

$$N_{Ed} = N_{Ed,G} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot N_{Ed,E}$$

faktor pouzdanosti povećanje čvrstoće presjeka
 vrijedi isto za M_{Ed} i V_{Ed} učinak potresa
 učinak gravitacijskog djelovanja povećanje čvrstoće materijala

109

Okvirni sustavi

- Stupovi:

$$N_{Ed} = N_{Ed,G} + 1,1 \gamma_{ov} \Omega N_{Ed,E}$$

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + 1,1 \gamma_{ov} \Omega M_{Ed,E}$$

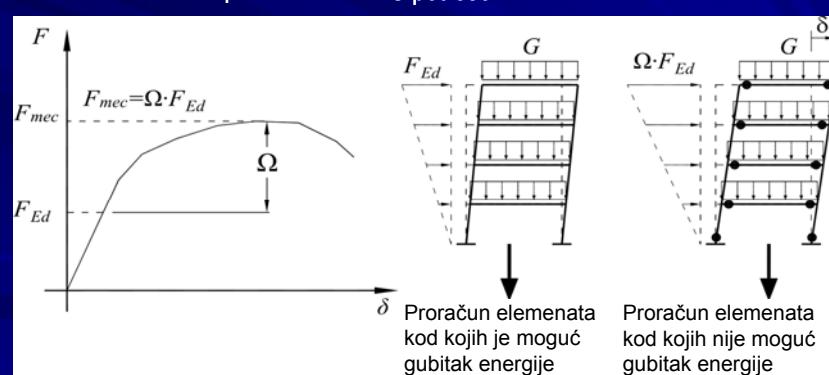
$$V_{Ed} = V_{Ed,G} + 1,1 \gamma_{ov} \Omega V_{Ed,E}$$

Bez potresa

S potresom

$$\Omega_j = M_{pl,Rd,i} / M_{Ed,i}$$

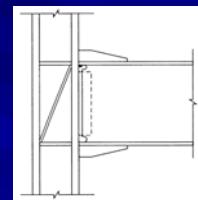
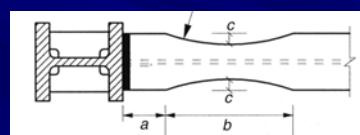
$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 0,5$$



110

Okvirni sustavi

- Priključci kod kojih je moguć gubitak energije:
 - eksperimentalni dokaz kapaciteta rotacije
 - fleksibilnost priključaka proračunata za analizu?
- Priključci kod kojih nije moguć gubitak energije: povećanje čvrstoće preko elemenata koji se priključuju
 - smanjenje čvrstoće nosača - povećanje čvrstoće priključka



- Sposobnost (kapacitet) rotacije priključka nosač-stup: ne manji od
 - 0.035 rad za DCH
 - 0.025 rad za DCM

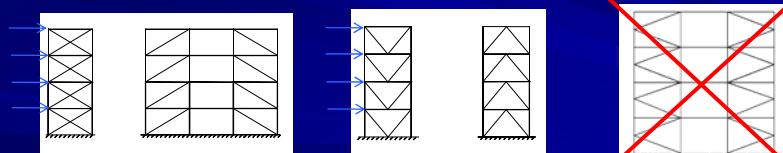
$$\theta_p = \frac{\delta}{0,5 L}$$

δ - progib nosača u sredini
L – raspon nosača

111

Okvir s centričnim vezovima

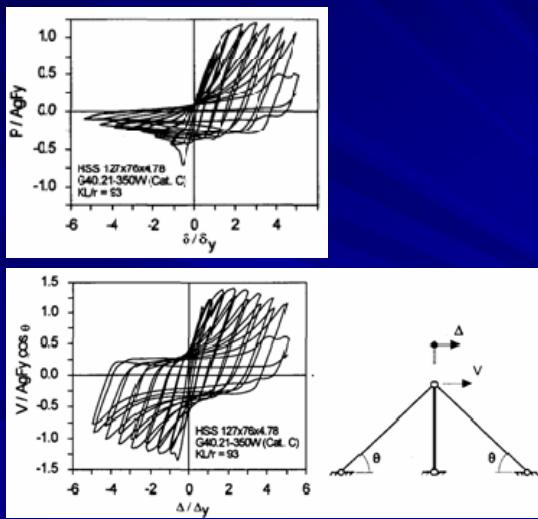
- Horizontalne se sile preuzimaju uglavnom elementima u kojima su uzdužne sile
- Zone gubitka energije moraju biti uglavnom smještene u vlačnim dijagonalama
- Tipovi vezova:
 - aktiviraju se samo vlačne dijagonale
 - V- vezovi kod kojih se uzimaju u obzir vlačne i tlačne dijagonale
 - K - vezovi kod kojih se dijagonale sijeku na stupovima ne smiju se primjeniti



112

Okvir s centričnim vezovima

- Vezovi moraju biti smješteni tako da konstrukcija polučuje slične krutosti i čvrstoće u suprotnim smjerovima.



113

Okvir s centričnim vezovima

- Analiza:

- u uvjetima gravitacijskog opterećenja, samo nosači i stupovi preuzimaju to opterećenje.
- kod okvira s dijagonalnim vezovima, uzimaju se u obzir samo vlačne dijagonale.
- kod okvira s V-vezovima, uzimaju se u obzir vlačne i tlačne dijagonale

- Dimenzioniranje vezova:

- ograničenje vitkosti kod X – vezova $1,3 < \bar{\lambda} \leq 2,0$
- ograničenje vitkosti kod V – vezova $\bar{\lambda} \leq 2,0$
- čvrstoća bruto presjeka dijagonale: $N_{pl,Rd} \geq N_{Ed}$

114

Okvir s centričnim vezovima

- Dimenzioniranje nosača i stupova

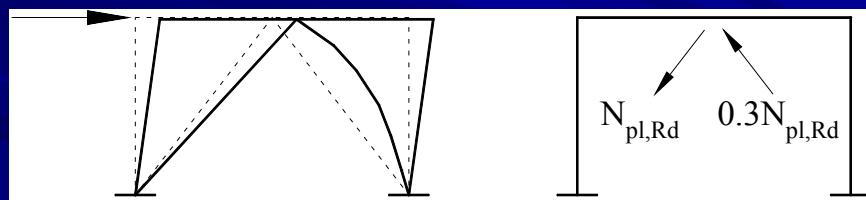
$$N_{Ed} = N_{Ed,G} + 1,1\gamma_{ov}\Omega^N N_{Ed,E}$$

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + 1,1\gamma_{ov}\Omega^N M_{Ed,E}$$

$$\Omega_i^N = N_{pl,Rd,i} / N_{Ed,i}$$

- Nosači u okvirima s V-vezom dimenzioniraju se:

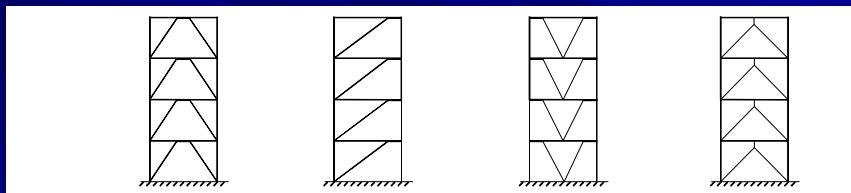
- sva neseizmička djelovanja bez uzimanja u obzir oslonca kojeg čine dijagonale
- pojednostavljeno dimenzioniranje



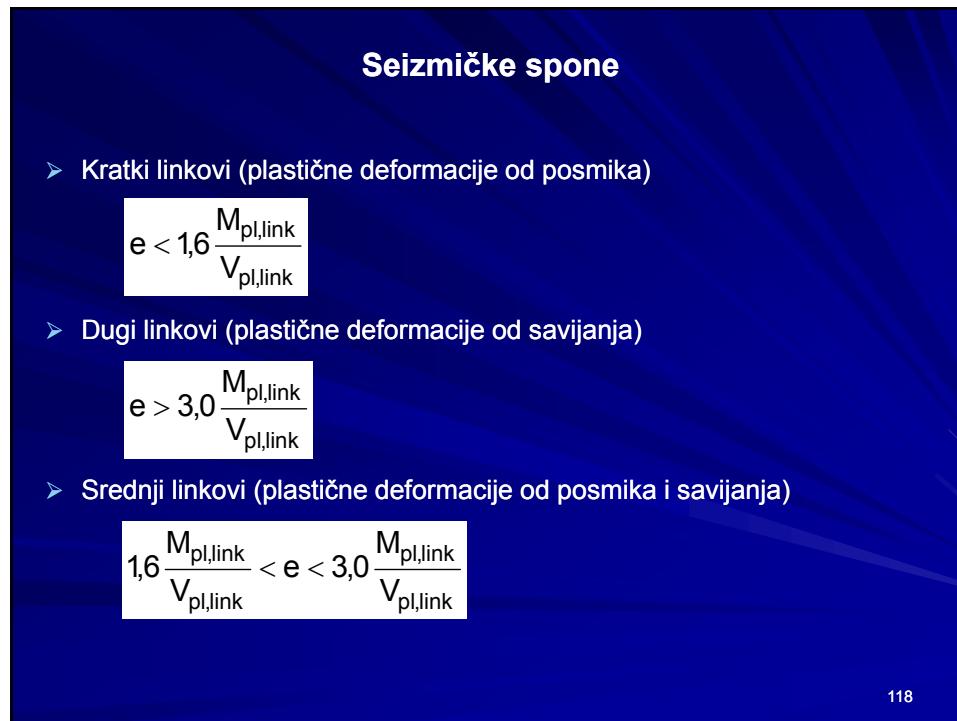
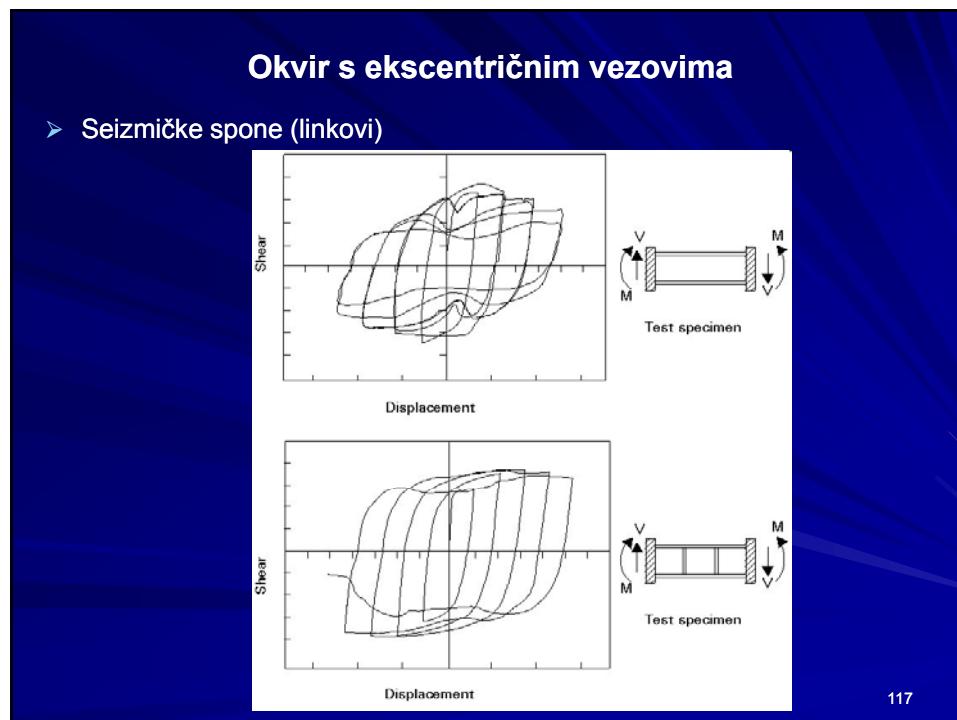
115

Okvir s ekscentričnim vezovima

- Horizontalne sile preuzimaju se pomoću elemenata s uzdužnim silama
- Ekscentričnost priključaka nosač-vez je takva da se energija gubi u "seizmičkoj sponi" pomoću cikličkog savijanja ili cikličkog posmika

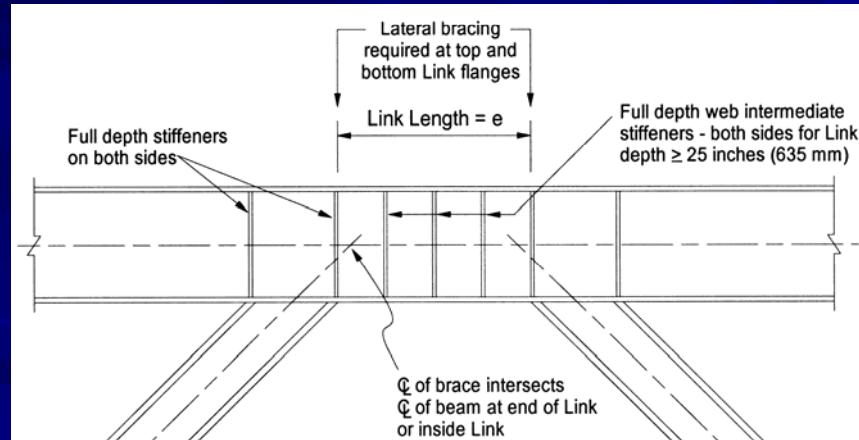


116



Okvir s ekscentričnim vezovima

- Detailing:
 - stiffeners
 - lateral supports



119

Okvir s ekscentričnim vezovima

- Elementi koji nemaju seizmičke spone (stupovi, vezovi, nosači):

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + 1,1\gamma_{ov}\Omega N_{Ed,E}$$

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + 1,1\gamma_{ov}\Omega M_{Ed,E}$$

$$V_{Ed} = V_{Ed,G} + 1,1\gamma_{ov}\Omega V_{Ed,E}$$

Kratke spone:

$$\Omega_i^V = 1,5V_{pl,link,i} / V_{Ed,i}$$

Srednje i duge spone:

$$\Omega_i^M = 1,5M_{pl,link,i} / M_{Ed,i}$$

120

Mjere za izbjegavanje plastičnih zglobova u stupovima

➤ Oslabljene nosače

$R = \text{Radius of Cut} = \frac{4c^2 + b^2}{8c}$

Reduced Beam Section

Protected Zone

➤ Ojačanje priključka

(a) Four-Bolt Unstiffened, 4E

(b) Four-Bolt Stiffened, 4ES

(c) Eight-Bolt Stiffened, 8ES

121

Suvremena daljnja istraživanja

➤ Performance-based design (PBD)

- SEAOC
- FEMA
- ATC

➤ Analysis and design methods

- Non-linear static
- Displacement-based design (N2)
- Capacity design

		EARTHQUAKE PERFORMANCE LEVEL			
		FULLY OPERATIONAL	OPERATIONAL	LIFE SAFE	NEAR COLLAPSE
EARTHQUAKE DESIGN LEVEL	FREQUENT (43 years)	●	○	○	○
	OCASIONAL (72 years)	●	●	●	UNACCEPTABLE PERFORMANCE (FOR NEW CONSTRUCTION)
	RARE (475 years)	●	●	●	○
	VERY RARE (970 years)	●	●	●	●

ESSENTIAL HAZARD OBJECTIVES

Critical Objectives

UNACCEPTABLE PERFORMANCE (FOR NEW CONSTRUCTION)

➤ Force-Displacement hysteresis loop graph:

FORCE

DISPLACEMENT

IO - Immediate Occupancy

LS - Life Safe

CP - Collapse Prevention

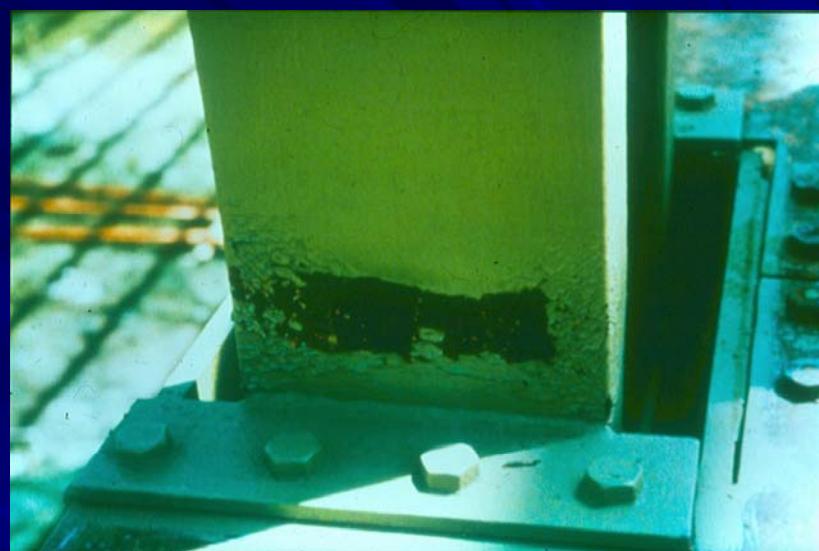
Primjeri iz prakse

123



➤ Oštećeni vezovi dok je konstrukcija sačuvana

124



- Razgradnja seizmičke energije na dnu stupa koji nije doživio lom

125



- Lom presjeka uslijed ekstremnih seizmičkih sila

126



- AB – stupovi otkazali u ravnini katova gdje su priključene krute dijafragme (stropovi)

127



- Zgrada u Mexico City s 21 katom. Djelomično urušena i velika oštećenja. K-stabilizacija bez duktilnosti.

128



- Zgrade spojene bez razmaka. Otkazivanje kata veće zgrade radi različitih visina i dinamičkih karakteristika zgrada

129



- Poprečna seizmička sila najveća je na dnu zgrade. Međutim različite čvrstoće, mase i krutosti mogu dovesti do otkazivanja viših katova ("top down failure").

130



- Za vrijeme gradnje potres nije oštetio čeličnu konstrukciju
(Los Angeles- visoka seizmičnost)

131



- Kolaps uslijed otkazivanja tla, zrnato zasićeno tlo.

132



- Prevrtanje temelja, najvjerojatnije započeto otkazivanjem nosivosti tla

133



- Usljed likvefakcije ili konsolidacije tla može doći do većeg slijeganja tla. Cijelo prizemlje zgrade je potonulo ispod razine cesta, zgrada nije doživjela kolaps.

134



- Neki stupovi prizemlja su otkazali uslijed "mekanog" prvog kata i horizontalnog torzijskog učinka.

135



- Ploča ne djeluje uvijek kao horizontalno kruta posmična dijafragma. To se dogodilo u zgradi škole u Anchorage (Alaska)

136



- Paneli fasade otpali su uslijed potresa i prouzročili su veliku štetu.
Priključci panela nisu bili "duktilni".

137



- Uređaji (baterije) koji upravljaju sustavom evakuacije bolnice nakon potresa su uništeni. Posljedica: mnogi pacijenti izgubili živote.

138



➤ Urušena fasada predstavlja veliku opasnost (Mexico City)

139



➤ Rezervoar s vodom kao "dodatak" zgradi ponaša se lože pri potresu. To pokazuje i analiza dinamičkog odgovora. Učinak diskontinuiteta priključka rezervoara na zgradu – velika koncentracija napona.

140



- Ovješena fasada (curtain wall) nije u stanju svladati različite pomake katova na koje je priključena

141



- Tipičan "X lom" zidane škole u Alaski pokazuje učinke promjene smjera horizontalnih posmičnih sila kod potresa.

142



- Priklučak zida na stup ima učinak koncentracije posmika po kratkoj dužini stupa. Otkazivanje u posmiku (krti lom) umjesto otkazivanja pri savijanju (duktilni lom). To je učinak "kratkog stupa".

143



- Način otkazivanja elementa veza izvedenog od 2L 80 x 8 ($\lambda = 145$). Element je podvrgnut naprezanju tlak-vlak. Nakon ispitivanja kutnici su odvojeni.

144



- Način otkazivanja elemenata veza pod učestalim promjenama napona. Oblik presjeka ukazuje na bočno torzijsko izvijanje i lokalni instabilitet (otpornost na tlak).

145

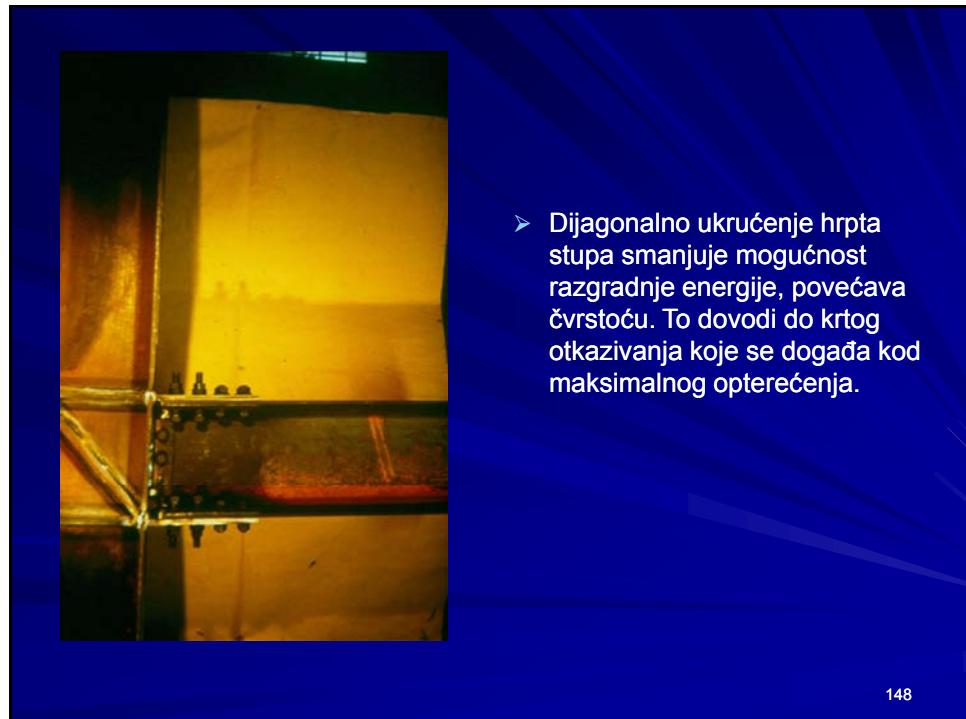


- Jako izobličenje pojaseva (H I I profili) izaziva (inducira) torzijsko zakretanje. Ono je povezano s malim opterećenjem koje se javlja pri čistom izvijanju savijanjem. Ovaj učinak vjerojatno doprinosi nešto slabijem ponašanju takvih torzijski slabih presjeka.

146



147

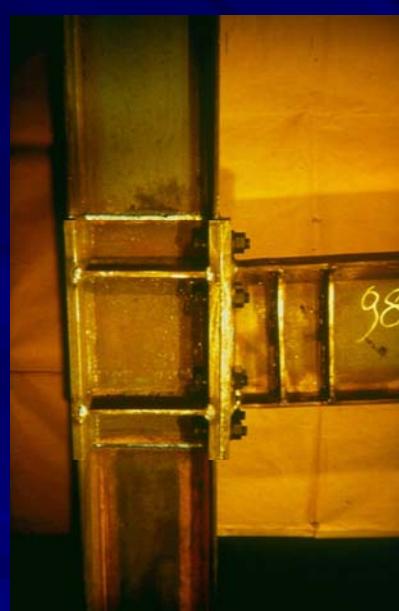


148



- Ukrćenja hrptova stupova kontrolira deformacije uslijed vlačne sile vijaka u kutniku, te se povećava otpornost priključka. Otpornost povećava i trokutasto ukrućenje kutnika.

149



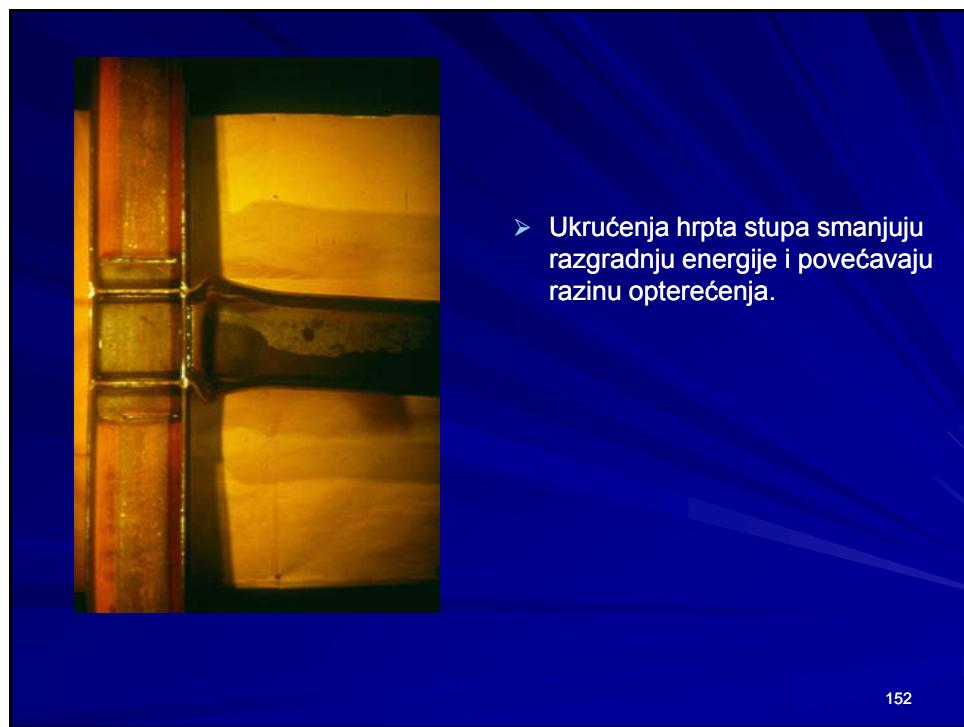
- Dodavanjem ukrućenja hrpta nosača smanjuje se gubitak energije i povećava se otpornost. Povećanjem debljine priključne ploče nosača poboljšava se razina opterećenja, ali ne dovoljno za razgradnju seizmičke energije.

150



- Deformacije bez ukrućenja nosača.

151



- Ukrućenja hrpta stupa smanjuju razgradnju energije i povećavaju razinu opterećenja.

152

Numerički primjer

153