

V. Odezva konstrukcí na seizmické zatížení

1. Zemětřesení
2. Výpočet seizmické odezvy
3. EC8 – Navrhování seizmicky odolných konstrukcí
4. Duktilita konstrukcí
5. Konstrukční zásady
6. Příklad
7. Ukázka výpočtu seizmické odezvy
8. Ukázky poškozených konstrukcí
9. Ukázky vhodných řešení
10. Experimenty



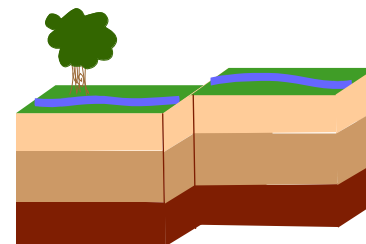
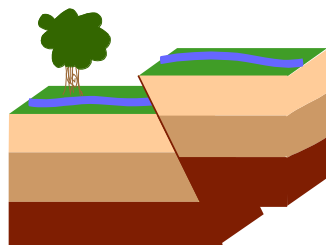
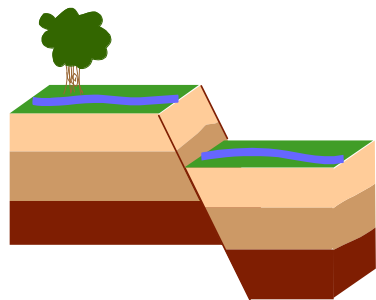
1. Zemětřesení

vznikají náhlým uvolněním energie v zemské kůře (cca 5 - 40 km hluboko) nebo ve vrchní vrstvě zem. pláště (max. 700 km)

- **deformační energie – tektonická z.** (90 % zemětřesení)
- **kinetická energie – říťivá z.** (řícení stropů v podzemí, 3%)
- **energie výbuchu – vulkanická z.** (sopečná činnost, 7%)

Projevy:

- otřesy šířící se do okolí
- deformace zemské kůry, zlomy a trhliny (až o několik m)
- přílivová vlna *tsunami*



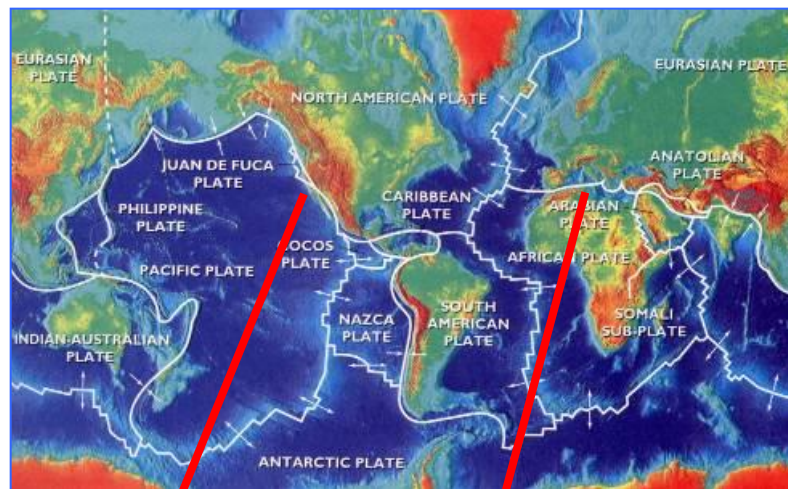
1. Zemětřesení

Vzájemné pohyby v oblasti rozhraní tektonických desek

- postupné (průměrně 5 -10 cm/rok)
- náhlé (zemětřesení)



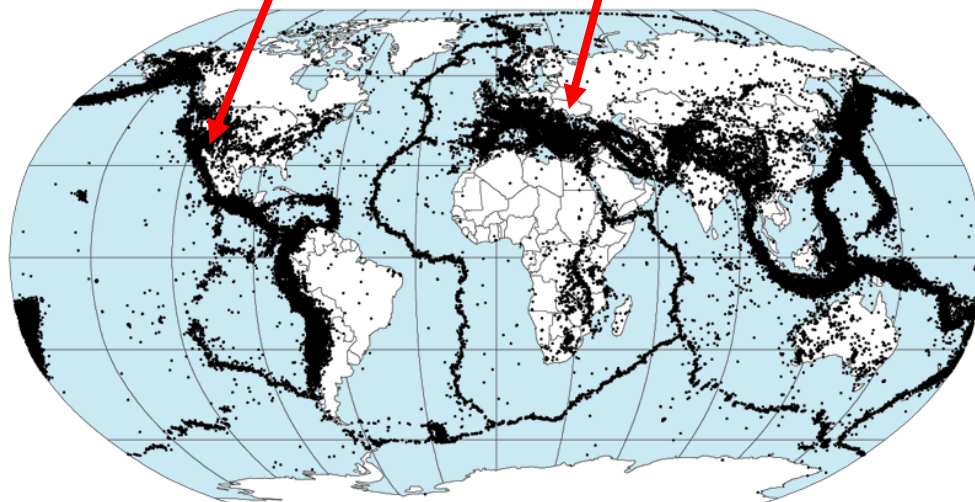
transformní divergentní konvergentní



Globální epicentra zemětřesení

- v místě rozhraní desek

např. Kalifornie, jižní Evropa



1. Zemětřesení

Seizmické vlny:

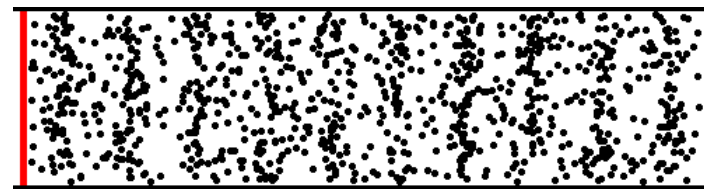
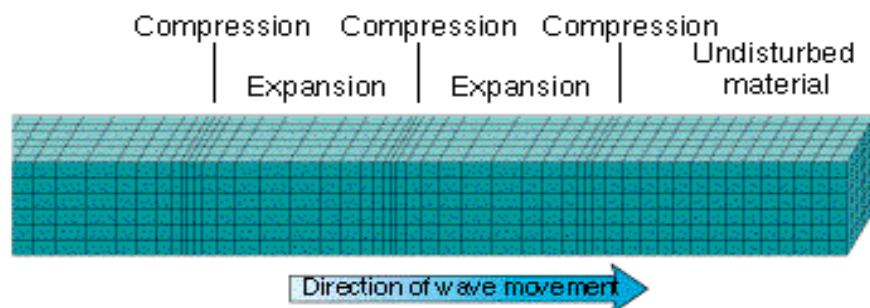
- objemové: podélné P-vlny
příčné S-vlny
- povrchové: Rayleighovy vlny
Loveho vlny

Podélné vlny – primární, longitudální, P-vlny

částice kmitají shodně se směrem šíření vlny, periodické zhušťování a zředňování hmoty

mohou šířit v jakémkoli prostředí (pevné, kapalné, plynné)

jsou nejrychlejším typem elastických vln, způsobují minimální škody



$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

E – modul pružnosti

ν – Poissonovo číslo

ρ – objemová hmotnost

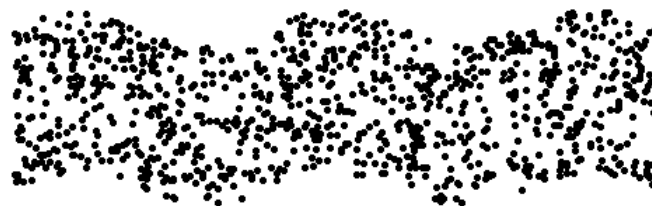
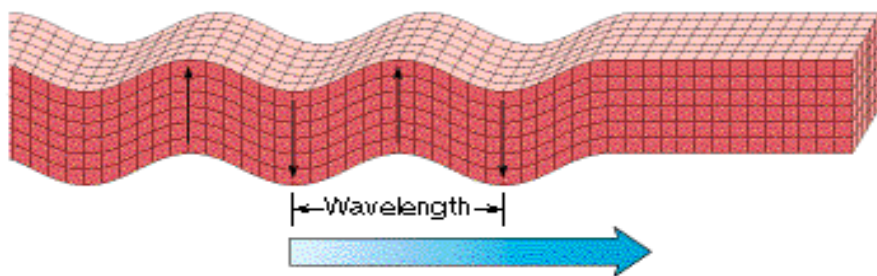


1. Zemětřesení

Příčné vlny – sekundární, transversální, S-vlny

částice kmitají kolmo na směr šíření vlny, v horizontální rovině SH-vlny, ve vertikální rovině SV-vlny

neprocházejí celým zemským tělesem, nešíří v kapalinách a plynech
pomalejší než vlny primární (přibližně 0,5 - 0,6 rychlosti P-vln), představují mnohem větší nebezpečí (ničení staveb).



$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

G – smykový modul

zemní prostředí	c_l (m/s)	c_t (m/s)
hlinitopísčité z.	500 - 700	230 - 350
hutné jíly	850 - 1500	350 - 600
šterky	1400 - 2000	800 - 1000
žula	4800 - 5500	3000 - 3400



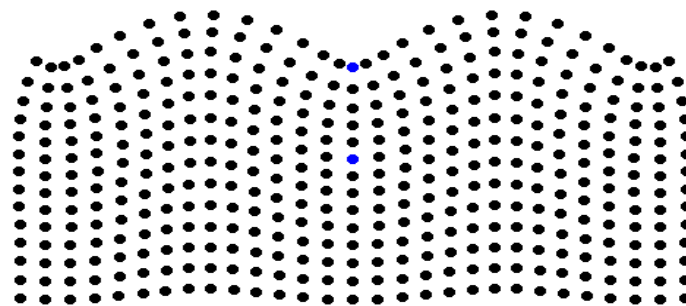
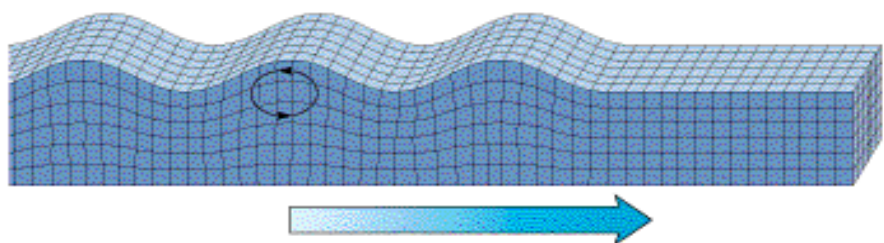
1. Zemětřesení

Rayleighovy vlny – R-vlny

částice kmitají kolmo na směr vlnění ve vertikální rovině, pohyb po eliptické trajektorii, kombinace P + SV vln v interakci se zemským povrchem

Povrchové vlny jsou celkově pomalejší než vlny objemové (tj. primární a sekundární), méně se tlumí, dosahují nejdále

představují maximální rizika, mají velké amplitudy (v horizontálním i vertikálním směru)

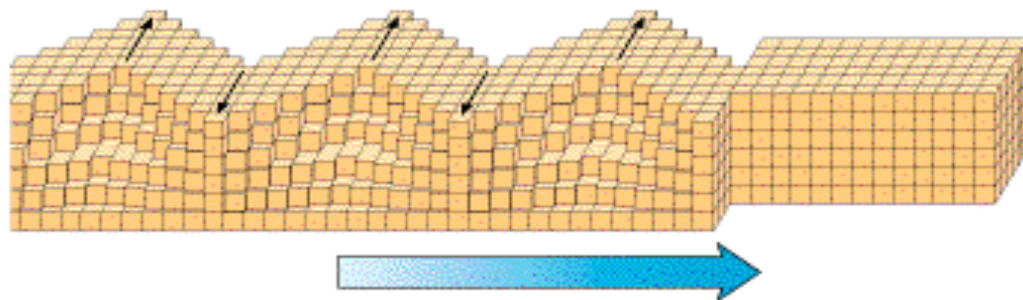


pro $\nu = 0.22$ platí $c_R = 0.914 c_t = 0.547 c_l$

1. Zemětřesení

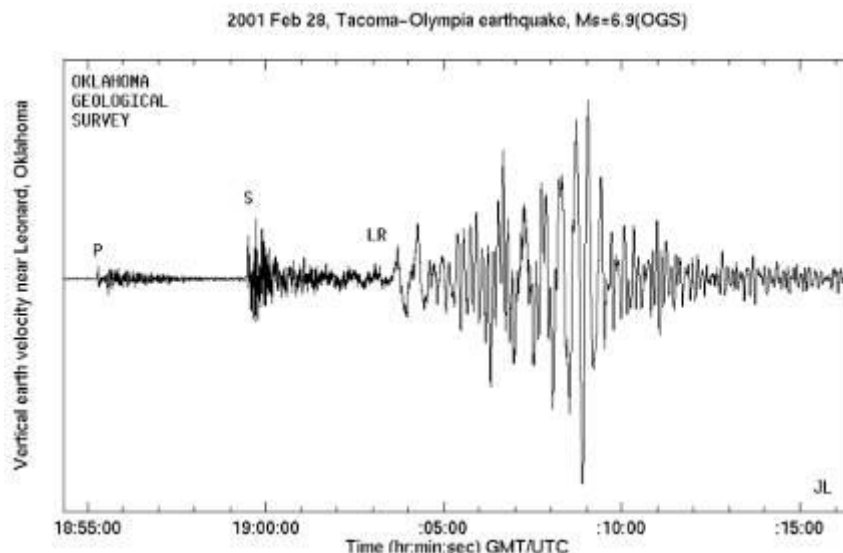
Loveho vlny – L-vlny

částice kmitají kolmo na směr vlnění v horizontální rovině (interference SH-vln v interakci s povrchem), rychlejší než R-vlny, představují max. rizika



Příklad seismogramu

první jsou registrovány vlny podélné (P), po nich přicházejí sekundární (S), jako poslední dorazí vlny povrchové (LR), které způsobují maximální rozkmit seismografu



1. Zemětřesení

European Seismological Commission

International Geological Correlation Program
Project no. 382: SESAME

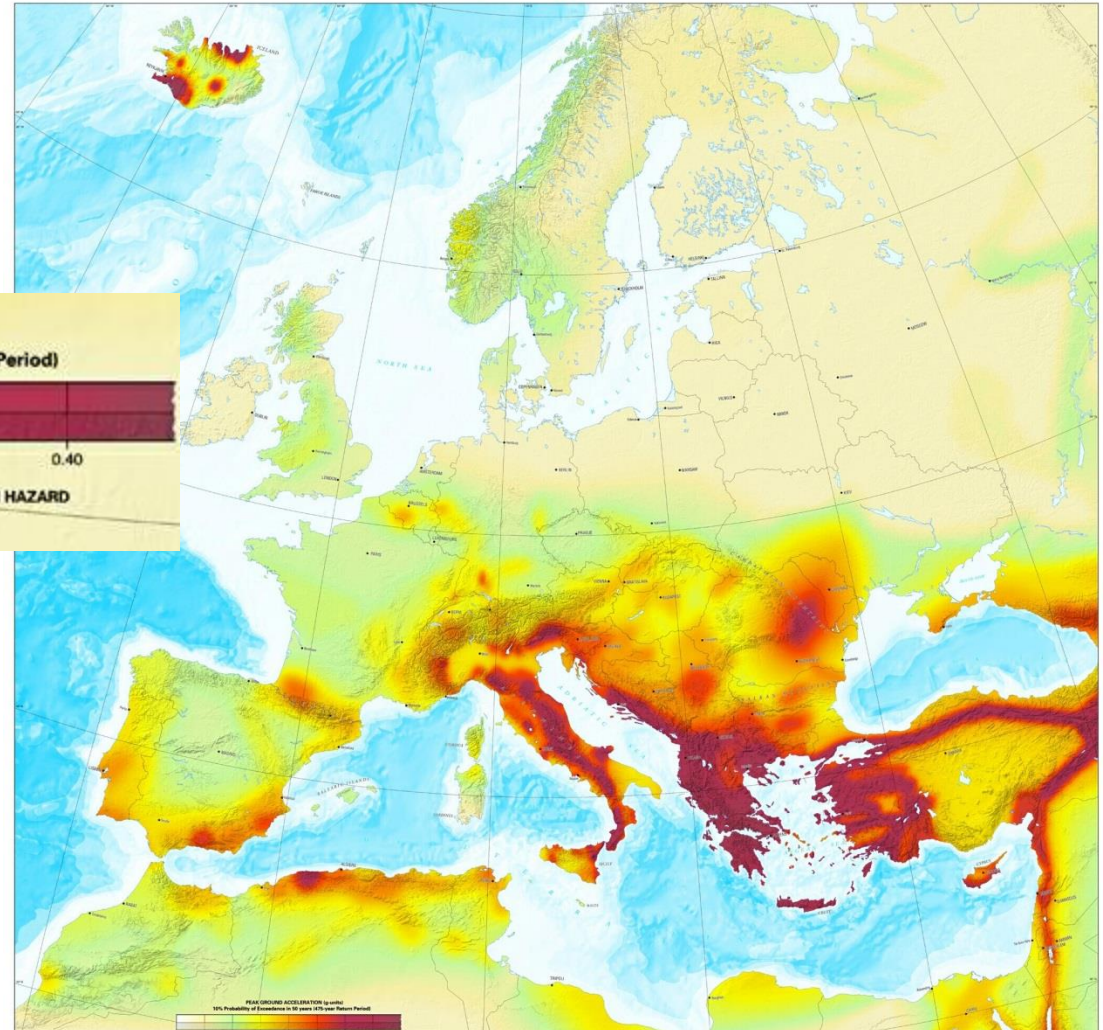
EUROPEAN-MEDITERRANEAN SEISMIC HAZARD MAP

Editors: D. Giardini, M. J. Jiménez and G. Grünthal



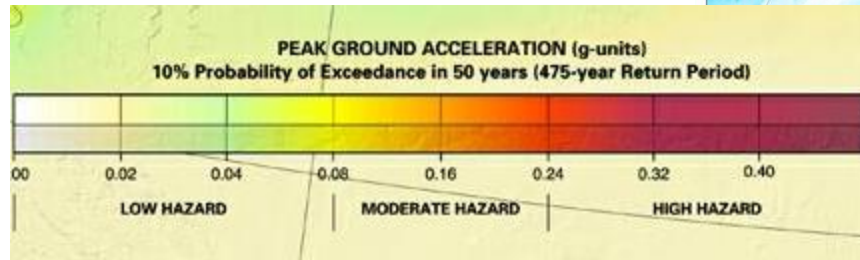
Scale 1:5 000 000

February 2003



Seismické riziko

špičkové zrychlení
(jako násobek g)



pravděpodobnost výskytu
10% během 50 let
tj. doba návratu 475 let



Eurokód 8 – Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení



Oblast „velmi malé seismicity“
– ustanovení EC8 obvykle nemusí být dodržována

1. Zemětřesení

Kategorizace seizmických oblastí podle EC8

Velmi malá seizmicita

$a_{gR} \cdot \gamma_I \cdot S$ je nejvýše $0,05g$ ($0,49 \text{ m/s}^2$)

a_{gR} – referenční špičkové zrychlení

γ_I – součinitel významu (= 1 pro běžné stavby)

S – součinitel podloží (=1 skalní podloží
=1,6 málo únosné podloží)

nemusí být ustanovení EC 8 dodržována (cca 50% území ČR)

Malá seizmicita

$a_{gR} \cdot \gamma_I \cdot S$ je nejvýše $0,10g$ ($0,98 \text{ m/s}^2$)

mohou být pro některé typy nebo kategorie staveb použity omezené nebo zjednodušené způsoby seizmického návrhu obvykle se provádí pouze výpočet na únosnost bez průkazu požadavků na duktilitu a disipaci energie



3. Zemětřesení

Intenzita zemětřesení

určována na základě pozorování makroseizmických účinků zemětřesení - různé stupně poškození staveb, vznik prasklin a puklin v povrchu, případný pokles nebo vzestup terénu, sesuvy apod.

subjektivní veličina závislá na určení míry škod, které vznikly v souvislosti s otřesy, její velikost v každém místě pozorování je odlišná a klesá se vzdáleností od epicentra

Zemětřesné stupnice

- **MCS** (Mercalli-Cancani-Sieberg), příp. MM (modif. Mercalli)
 - **MSK-64** (Medveděv-Sponheuer-Kárník)
 - **EMS-98** (Evropská makroseizmická stupnice) - současná st. 12 stupňů, založené na makroseizmických projevech
- stupnice obsahuje: označení stupně intenzity zemětřesení, jeho název, popis účinků



Stupnice EMS-98 – Evropská makroseismická stupnice

Intenzita	Charakteristika	Pozorované projevy
I	Nepocítitelné	Naměřitelné pouze přístroji.
II	Stěží pocítitelné	Pozorovatelné citlivými osobami v klidu, zvláště ve vyšších patrech budov.
III	Slabé	Část osob uvnitř budov pocítuje slabý otřes, zavěšené předměty se mohou kývat, otřesy podobné průjezdu nákladního auta.
IV	Pozorovatelné	Lze pozorovat i mimo budovy, spící se probudí. Okna, dveře, nádobí drnčí, zavěšené předměty se kývají. Otřesy připomínají průjezd těžkých nákladních vozidel.
V	Silné	Pozoruje i venku mnoho lidí, lehčí předměty se posouvají. Kyvadlové hodiny se zastavují, dveře a okna se zavírají a otvírají.
VI	Lehce poškozující	Potíže s chůzí, lidé s úlekem vybíhají ven. Posunují se i těžší kusy nábytku, rozezní se zvony. Objevují se trhliny v omítce.
VII	Poškozující	Pocítují i lidé jedoucí v motorových vozidlech, objevují se trhliny ve zdech, hůře postavené budovy a tovární komíny se řítí. Vodní plochy se vlní.
VIII	Těžce poškozující	Vyvolává zděšení a paniku, velké škody na většině budov, boří se stěny, v půdě se objevují trhliny.
IX	Destruktivní	Všeobecná panika, i dobře postavené budovy vykazují vážné škody, mohou být poškozeny železniční koleje. Lehčí stavby jsou zničeny.
X	Velmi destruktivní	Vážné škody i u budov se speciální konstrukcí, většina budov je zničena. Poškození přehrad, mostů železnic a potrubí.
XI	Devastující	Všeobecná katastrofa, všechny druhy budov těžce poškozeny nebo zničeny. Přerušení kolejí a potrubí. Dochází k sesuvům půdy a řícení skal.
XII	Kompletně devastující	Úplné zničení všech staveb, rozsáhlé terénní změny, horizontální i vertikální posuny podél velkých trhlin.



Stupnice EMS-98 – Evropská makroseismická stupnice



1. Zemětřesení

Velikost zemětřesení

objektivně měřitelná veličina – závisí na energii uvolněné v hypocentru, její hodnota je stanovena na základě měření účinků zemětřesení, které registrují seismografy

- **Richterova stupnice** – používá veličinu magnitudo M

$$M = \log_{10} \left(\frac{A}{A_0} \right)$$

(C.F. Richter, 1935)

A je amplituda výchylky ve vzdál. 100 km od epicentra změřená tzv. Wood-Andersonovým seismografem

$A_0 = 0,001\text{mm}$ (kalibrační konstanta)

$M = 3$, je-li $A = 1\text{mm}$

$M > 5$ je pro konstrukce nebezpečná, $M > 7$ velké zemětřesení

$M > 8$ ničivé zemětřesení, max. hodnota cca 9,5 st.

Magnitudo je jedno číslo pro každé zemětřesení



1. Zemětřesení

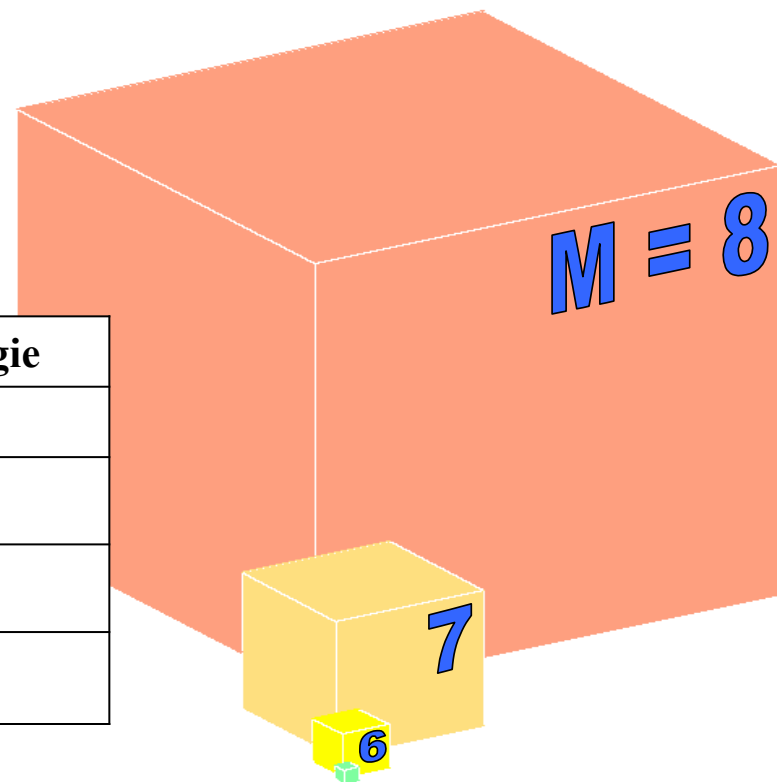
Seismická energie

Velikost celkové **seismické energie** (E v J) uvolněné při zemětřesení lze odhadnout podle nelineárního vztahu:

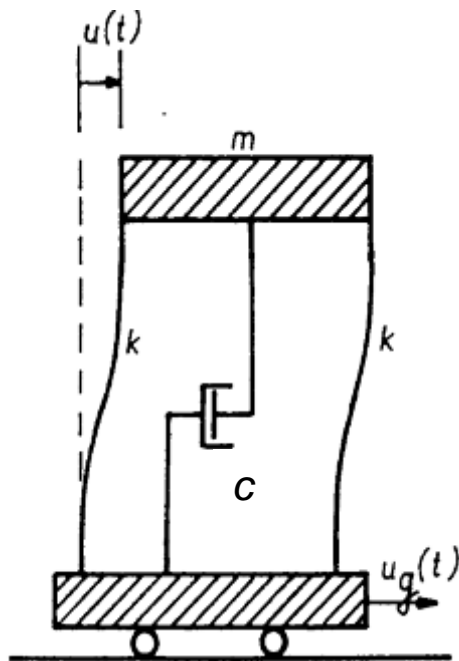
$$\log_{10} E = 4.8 + 1.5M$$

z hlediska energie: $M=5.5 \sim 100$ t TNT

Změna M	Změna výchylky	Změna energie
1.0	10.0 x	cca 32 x
0.5	3.2 x	cca 5.5 x
0.3	2.0 x	cca 3 x
0.1	1.3 x	cca 1.4 x



2. Výpočet seismické odezvy



Soustava s 1 SV

$$u_t = u + u_g \rightarrow \ddot{u}_t = \ddot{u} + \ddot{u}_g \leftarrow \text{akcelerogram}$$

$$m\ddot{u}_t(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0$$

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t)$$

Soustava s n SV

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{r}^s\ddot{u}_g(t)$$

směrový vektor – (složený z 0 a 1)
určuje směr zatížení zemětřesením

Řešení:

- přímá integrace (akcelerogram)
- modální analýza pomocí spektra odezvy (n SV)

2. Výpočet seizmické odezvy

Soustava s 1 SV – pohybová rovnice pro seizmické zatížení

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t)$$



$$c = \xi c_{cr} = \xi 2\sqrt{km} = 2m\xi\omega_n \quad (\text{souč. útlumu})$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{vlastní kruhová frekvence})$$

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega_n\dot{u}(t) + \omega_n^2 u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad \longrightarrow \quad u = u(t, \omega_n, \xi) = u(t, T_n, \xi)$$

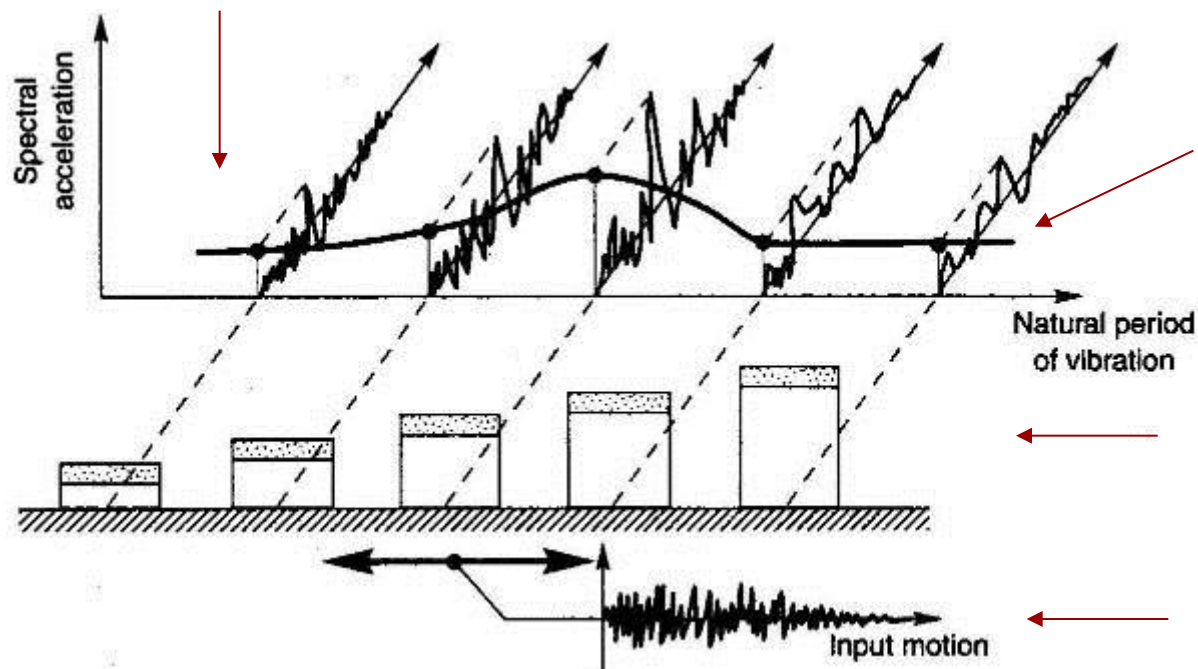
Řešení:

- přímá integrace (např. Newmarkova metoda)
- Duhamelův integrál



2. Výpočet seizmické odezvy

Spektrum odezvy – response spectrum



maximální výchylka
vs. vlastní frekvence
(vlastní perioda)

výpočet soustav s 1 SV

vstupní akcelerogram

odezva soust. s 1 SV

$u = u(t, T_n, \xi)$ →

$$S_d(T_n, \xi) = \max_t |u(t, T_n, \xi)|$$

$$S_v(T_n, \xi) = \max_t |\dot{u}(t, T_n, \xi)|$$

$$S_a(T_n, \xi) = \max_t |\ddot{u}_t(t, T_n, \xi)|$$

$$(\ddot{u}_t = \ddot{u} + \ddot{u}_g)$$

spektrum odezvy S_d

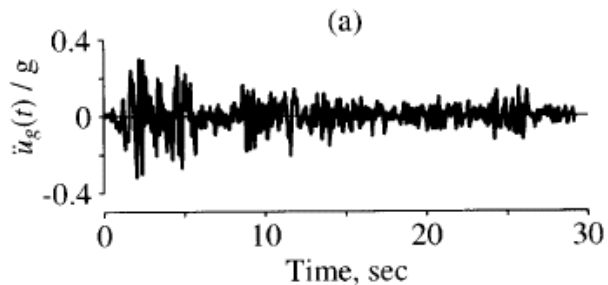
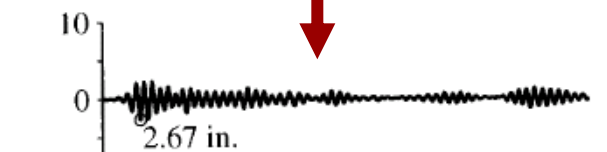
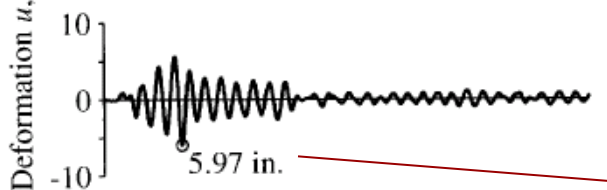
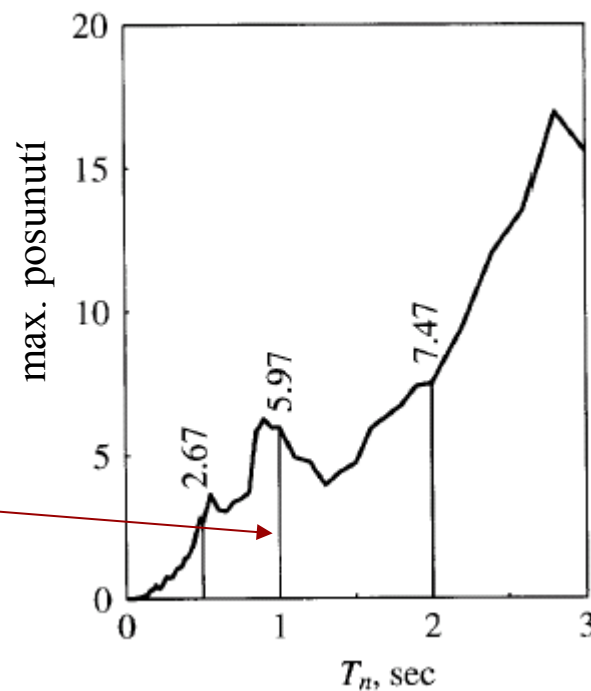
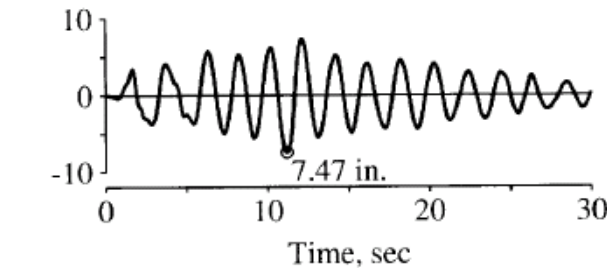
d - posunutí

v - rychlost

a - zrychlení

2. Výpočet seizmické odezvy

Spektrum odezvy – response spectrum

akcelerogram
El Centro
 $T_n = 0.5 \text{ sec}$
 $\zeta = 2\%$

 $T_n = 1 \text{ sec}$
 $\zeta = 2\%$

 $T_n = 2 \text{ sec}$
 $\zeta = 2\%$
spektrum odezvy (posunutí)
pro útlum 2%

odezva 3 soustav s různou vl. periodou a útlumem 2%



2. Výpočet seizmické odezvy

Spektrum odezvy – response spectrum

Maximální hodnota vnitřní síly – může být určena pomocí S_d

$$f(t) = k u(t) \rightarrow f_{max} = k u_{max} = k S_d$$

$$k = m \omega_n^2 \rightarrow f_{max} = m \omega_n^2 S_d = m S_{a, pseudo}$$

pseudo-spektrum odezvy zrychlení $S_{a, pseudo} = \omega_n^2 S_d$

pseudo-spektrum odezvy rychlosti $S_{v, pseudo} = \omega_n S_d$

pseudo-spektra velmi dobře odpovídají skutečným spektrům:

$$S_d = \max |u(t)|$$

$$S_v = \max |\dot{u}(t)| \approx S_{v, pseudo} = \omega_n S_d$$

$$S_a = \max |\ddot{u}_t(t)| \approx S_{a, pseudo} = \omega_n^2 S_d$$

$$S_a = \omega_n S_v = \omega_n^2 S_d$$

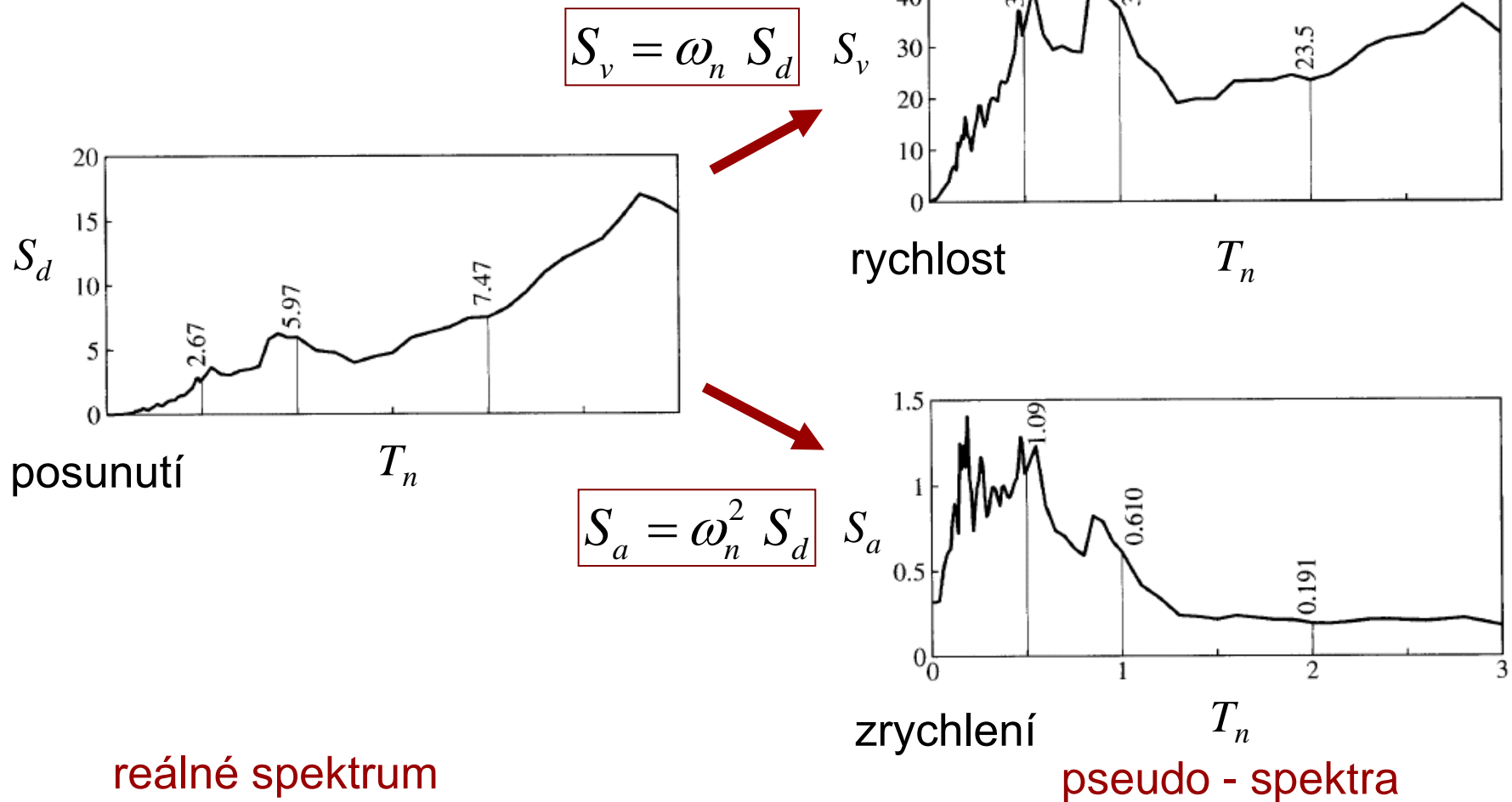
v praxi se používají pseudo-spektra,
ale označení „pseudo“ se neužívá



2. Výpočet seizmické odezvy

Spektrum odezvy – response spectrum

zemětřesení El Centro



2. Výpočet seizmické odezvy

Modální analýza pomocí spektra odezvy

pohybová rovnice pro 1 SV

$$ku(t) + c\dot{u}(t) + m\ddot{u}(t) = ku(t) + 2\xi\sqrt{km}\dot{u}(t) + m\ddot{u}(t) = -m\ddot{u}_g(t)$$

$$\omega_n^2 u(t) + 2\xi\omega_n \dot{u}(t) + \ddot{u}(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad \longrightarrow \quad \boxed{u_{\max} = S_d}$$

modální rovnice

– klasický útlum + normované vlastní tvary

$$\omega_j^2 q_j(t) + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j(t) + \ddot{q}_j(t) = \phi_j^T \mathbf{p}(t)$$

$$\omega_j^2 q_j(t) + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j(t) + \ddot{q}_j(t) = -\phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{r}^s \ddot{u}_g(t) \quad \longrightarrow \quad \boxed{q_{j,\max} = \phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{r}^s S_d}$$

vlastní tvar kmitání

modální souřadnice

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{j=1}^N \phi_j q_j(t)$$

nebo:

$$q_{j,\max} = \phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{r}^s S_d \quad \longleftarrow \quad \text{spektrum odezvy posunutí}$$

$$S_d(T_j) \equiv S_{d(j)} \equiv S_d$$

$$q_{j,\max} = \frac{\phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{r}^s}{\omega_j^2} S_a \quad \longleftarrow \quad \text{spektrum odezvy zrychlení}$$

$$S_a(T_j) \equiv S_{a(j)} \equiv S_a$$



2. Výpočet seizmické odezvy

Modální analýza pomocí spektra odezvy – postup řešení

1. konstrukce se řeší rozkladem do vlastních tvarů
maximum odezvy libovolné veličiny $R_{j,\max}$ (průhybu, vnitřní síly),
které přísluší j -tému tvaru ϕ_j , se určí

$$R_{j,\max} = q_{j,\max} R_j$$

$$q_{j,\max} = \phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{r}^s S_d \quad \text{nebo} \quad q_{j,\max} = \frac{\phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{r}^s}{\omega_j^2} S_a$$

R_j je hodnota veličiny R , odpovídající kmitání v j -tém tvaru
(např. pořadnice vlast. tvaru, setrvačná síla apod.)

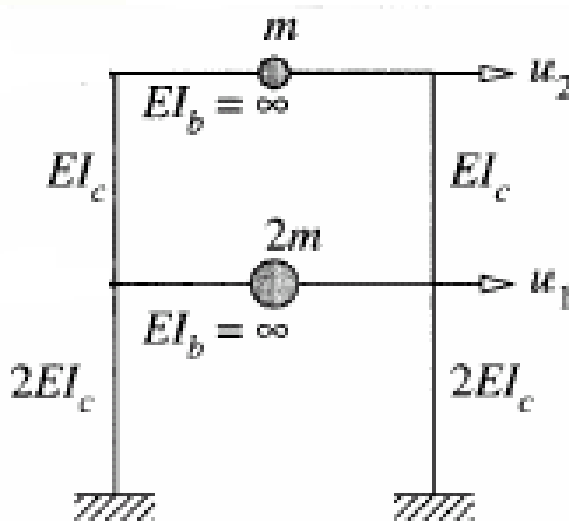
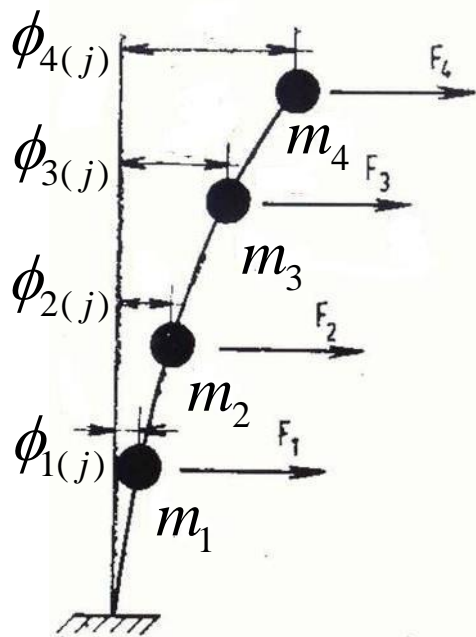
2. celkové maximum odezvy R_{\max} se určí např. metodou SRSS

$$R_{\max} = \sqrt{\sum_j R_{j,\max}^2}$$



2. Výpočet seizmické odezvy

Modální analýza pomocí spektra odezvy – konstrukce s diagonální maticí hmotnosti



m_i hmotnost bodu i

$\phi_{i(j)}$ pořadnice j – tého
vlastního tvaru v bodě i

$$q_{j,\max} = \frac{\phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{r}^s}{\omega_j^2} S_a = \frac{\sum_i m_i \phi_{i(j)}}{\omega_j^2} S_a$$

pro normované tvary

$$q_{j,\max} = \frac{\sum_i m_i \phi_{i(j)}}{\omega_j^2 \sum_i m_i \phi_{i(j)}^2} S_a$$

pro obecné tvary



2. Výpočet seizmické odezvy

Modální analýza pomocí spektra odezvy – konstrukce s diagonální maticí hmotnosti

výpočet maximální hodnoty posunutí v bodě k
(odpovídající j -tému tvaru kmitání)

$$u_{k(j)} = \phi_{k(j)} q_{j,\max} = \frac{\phi_{k(j)} \sum_i m_i \phi_{i(j)}}{\omega_j^2 \sum_i m_i \phi_{i(j)}^2} S_a = \frac{\phi_{k(j)} \sum_i m_i \phi_{i(j)}}{\sum_i m_i \phi_{i(j)}^2} S_d \quad \leftarrow \begin{array}{l} \text{spektrum} \\ \text{odezvy} \\ \text{posunutí} \end{array}$$

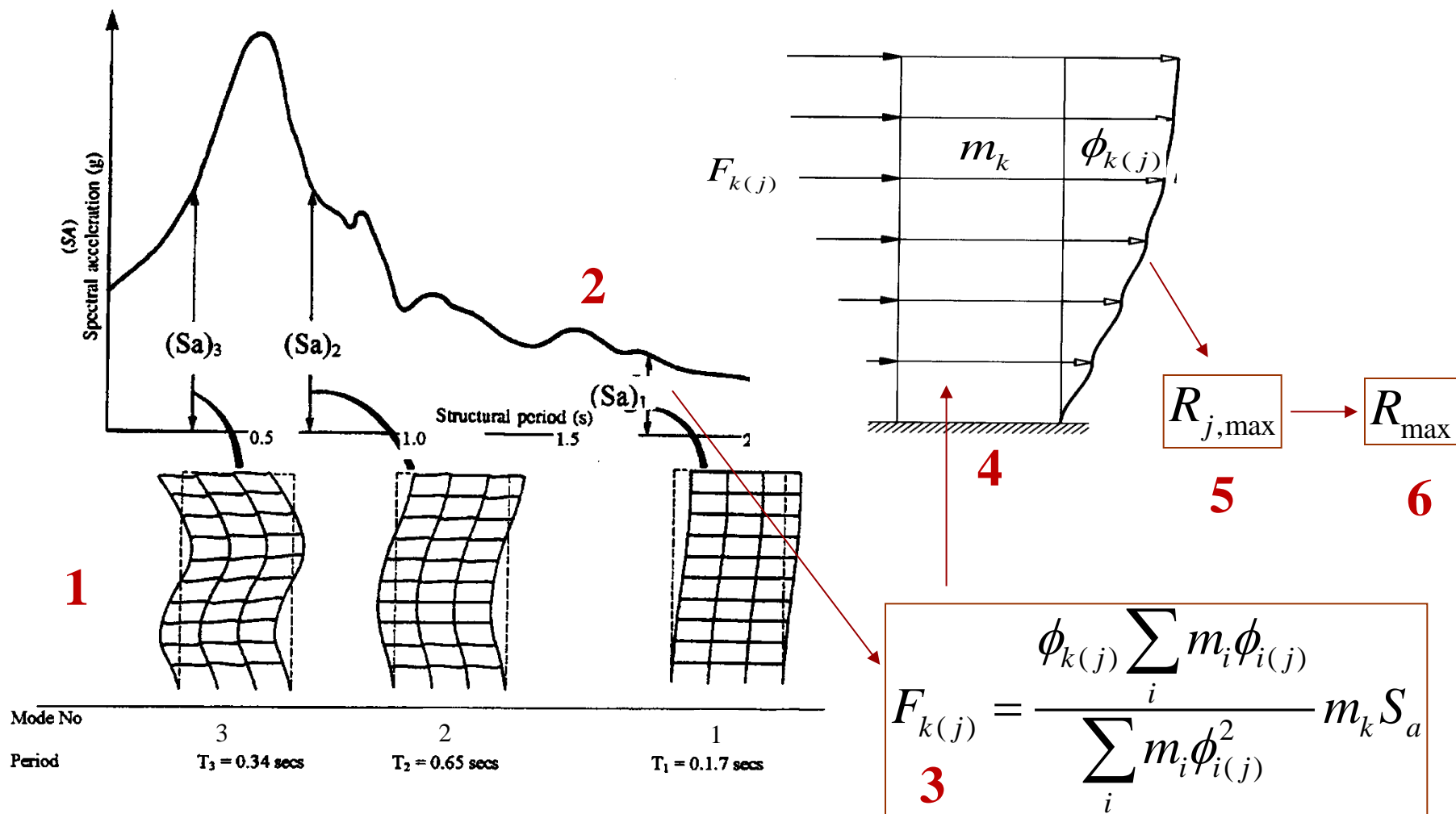
výpočet maximální hodnoty zatížení v bodě k
(odpovídající j -tému tvaru kmitání)

$$F_{k(j)} = \underbrace{m_k \omega_j^2 \phi_{k(j)}}_{\text{setrvačné síly}} q_{j,\max} = \frac{\phi_{k(j)} \sum_i m_i \phi_{i(j)}}{\sum_i m_i \phi_{i(j)}^2} m_k S_a \quad \leftarrow \begin{array}{l} \text{spektrum} \\ \text{odezvy} \\ \text{zrychlení} \end{array}$$



2. Výpočet seizmické odezvy

Modální analýza pomocí spektra odezvy



2. Výpočet seizmické odezvy

Modální analýza pomocí spektra odezvy

Počet uvažovaných vlastních tvarů při výpočtu odezvy závisí na tzv. **efektivní modální hmotě** $M_{(j)}^{eff}$

$$M_{(j)}^{eff} = \frac{(\phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{r}^s)^2}{\phi_j^T \mathbf{M} \phi_j}$$

uvažují-li všechny tvary, je $\sum M_{(j)}^{eff}$ rovno celkové hmotnosti doporučuje se uvažovat takový počet vlastních tvarů, aby $\sum M_{(j)}^{eff}$ bylo min. 90% celkové hmotnosti soustavy (EC 8)

pro konstrukce
s diagonální maticí hmotnosti

$$M_{(j)}^{eff} = \frac{\left(\sum_{i=1}^N m_i \phi_{i(j)} \right)^2}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{i(j)}^2}$$



2. Výpočet seismické odezvy

Statická metoda pro budovy se 2 rovinami souměrnosti

Předpoklady:

- seismické zatížení se modeluje jako horizontální statické zatížení působící vždy ve směru jedné osy souměrnosti
- rozdělení zatížení po výšce je úměrné hmotnosti patra a výchylce základního vlastního tvaru (případně výšce patra)
- pro stanovení návrhového zrychlení se používá návrhové spektrum z normy (případně modifikované součinitelem duktility)

je nutné znát pouze první vlastní frekvenci (periodu) a odpovídající tvar kmitání
ve zjednodušené variantě stačí pouze provést odhad vlastní periody kmitání



2. Výpočet seizmické odezvy

Statická metoda pro budovy se 2 rovinami souměrnosti

Postup:

1. Výpočet první vlastní periody a tvaru kmitání – lze provést odhad základní (první) periody kmitání pomocí přibližných vztahů nebo přibližné metody (např. Rayleighova metoda)

$$T_1 \approx C_t H^{3/4}$$

$C_t = 0,085$ pro ocelové rámy odolávající momentům
= 0,075 pro betonové rámy odolávající momentům
ocelové rámy s excentrickým zavětrováním
= 0,050 všechny ostatní konstrukce

H – výška budovy (v metrech), platí do 40 m výšky

$$T_1 \approx 2\sqrt{d}$$

d – vodorovné posunutí horního patra budovy (v m)
od zatížení vlastní tíhou působící ve směru
základního tvaru kmitání (tj. ve vodor. směru)



2. Výpočet seizmické odezvy

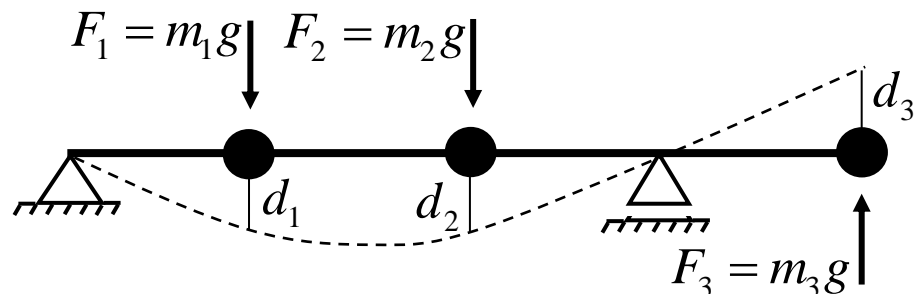
Statická metoda pro budovy se 2 rovinami souměrnosti

$$T_1 \approx 2\pi \sqrt{\frac{\sum_i m_i d_i^2}{\sum_i F_i d_i}}$$

Rayleighova
metoda

d_i – vodorovné posunutí od zatížení silami $F_i = m_i g$
tj. od vlastní tíhy působící ve směru základního
tvaru kmitání

m_i – hmotnost i – tého patra



2. Pro danou vlastní periodu určit z návrhového spektra
příslušnou hodnotu zrychlení S_a

3. Určit smykovou sílu v základech

$$F_b = S_a \sum_i m_i$$

2. Výpočet seizmické odezvy

Statická metoda pro budovy se 2 rovinami souměrnosti

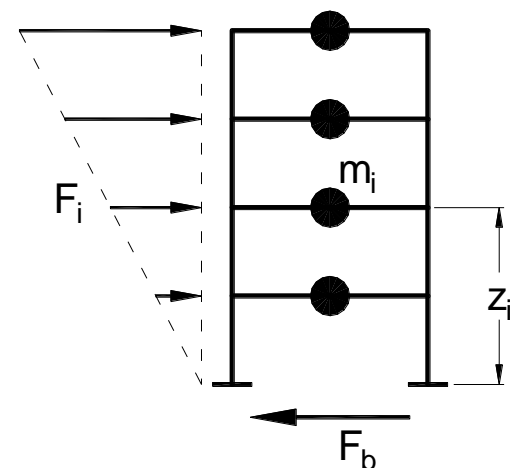
4. Rozdělit vodorovné zatížení po výšce budovy
 - v závislosti na hmotnosti patra m_j a výchylce základního tvaru kmitání ϕ_j v bodě j

$$F_j = F_b \frac{\phi_j m_j}{\sum_i \phi_i m_i}$$

nebo

$$F_j = F_b \frac{z_j m_j}{\sum_i z_i m_i}$$

(tvar kmitání
jako přímka)



5. Výpočet odezvy (síly, posunutí d_e) pomocí **statické analýzy**

pokud zatížení bylo určeno s použitím **součinitele duktility** q ,
 je nutné určit skutečná posunutí

$$d_s = q d_e$$

3. EC8 - Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení

EN 1998-1:	Obecná pravidla, seizmická zatížení a pravidla pro pozemní stavby	09/2006
EN 1998-2:	Mosty	05/2007
EN 1998-3:	Posuzování a opravy poz.staveb	05/2007
EN 1998-4:	Zásobníky, nádrže, potrubí	12/2007
EN 1998-5:	Základy, opěrné a zárubní zdi a geotechnická hlediska	07/2007
EN 1998-6:	Věže, stožáry a komíny (celkem cca 600 str.)	02/2007

Hlavní zásady návrhu:

- lidské životy musí být chráněny,
- škody jsou omezené,
- konstrukce důležité pro ochranu obyvatel zůstanou schopné provozu.



3. EC8 - Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení

Požadavek vyloučení zřícení – mezní stavy únosnosti

doba návratu zemětřesení 475 let

vyloučení lokálního nebo globálního zřícení konstrukce zachováním integrity a zbytkové únosnosti konstrukce po zemětřesení

Požadavek omezeného poškození – mezní stavy omezeného poškození

doba návratu zemětřesení 95 let

vyloučení takových poškození a s tím spojených omezení použití, kdy finanční důsledky by byly nepřiměřeně vysoké ve srovnání s cenou konstrukce

redukce návrhové hodnoty seizmického zatížení na 40-50%



3. EC8 - Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení

Metody výpočtu odezvy

1. lineárně pružný výpočet

- metoda výpočtu pomocí příčných sil (základní tvar kmitání)
- **modální analýza pomocí spektra odezvy** (více tvarů kmitání) – *základní metoda řešení EC8*

2. nelineární výpočet

- metoda statického přitěžování (sledování postupného vzniku plastických kloubů)
- dynamický výpočet časového průběhu odezvy (přímá integrace pohybových rovnic)

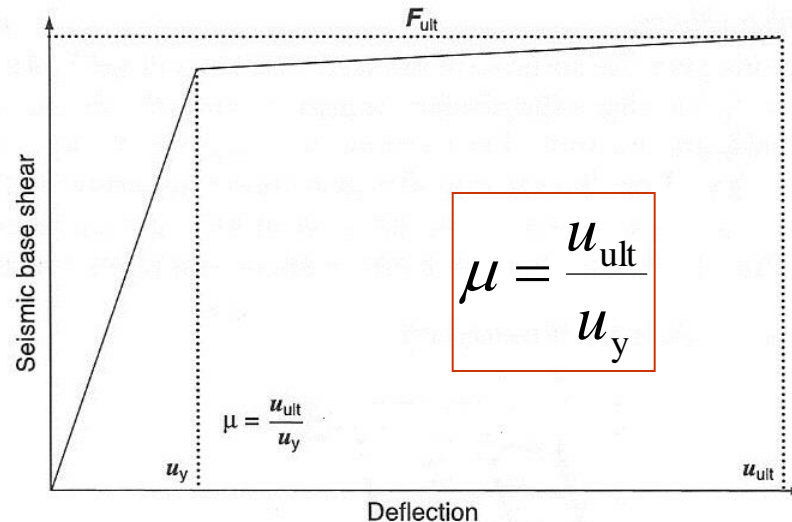


4. Duktilita konstrukcí

Pro stanovení návrhového spektra je nutné určit **součinitel duktility q** (behaviour factor) – ten závisí zejména na duktilitě

Duktilita – schopnost konstrukce (nebo konstrukčního prvku) odolávat bez výrazné ztráty pevnosti opakovaným cyklům velkých deformací v oblasti nad mezí kluzu - závisí na materiálu, průřezech, prvcích, konstrukci

Duktilita – poměr maximálního posunutí (např. vrcholu budovy) při vzniku kinematického mechanismu u_{ult} k hodnotě posunutí při vzniku prvního plastického kloubu u_y (na mezi kluzu)



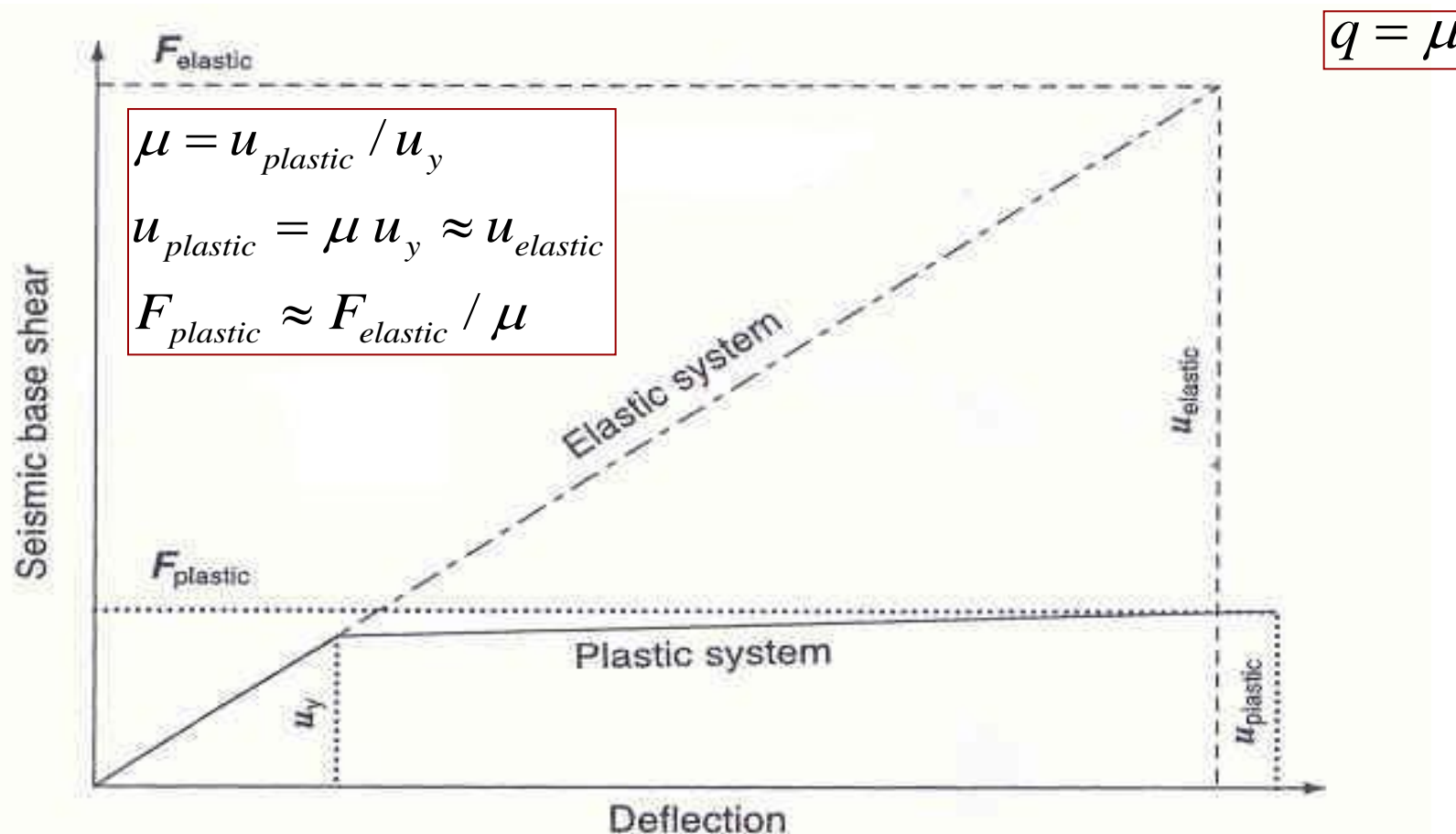
Při návrhu je nutné prokázat, že konstrukce má **schopnost** dosahovat takové duktility (vlastnost konstrukce), která je vyšší než **požadavek** na duktilitu konstrukce při zemětřesení (závisí na konstrukci a zemětřesení)



4. Duktilita konstrukcí

Síly a posunutí v plastických a elastických systémech

– **poddajné konstrukce** se střední a dlouhou vlastní periodou
(konstrukce je tak měkká, že stojí na místě a pohybuje se podloží)



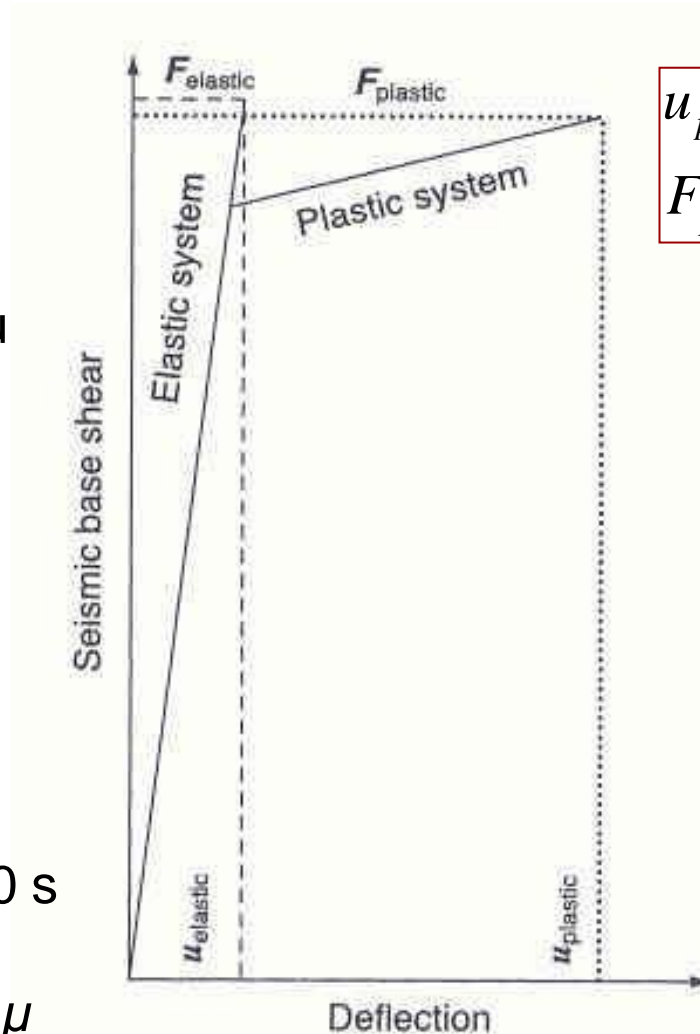
4. Duktilita konstrukcí

Síly a posunutí
v plastických a
elastických
systémech

– **tuhé konstrukce**

s krátkou vlastní periodou
(konstrukce se pohybuje
společně s podložím,
odezva je určována
setrvačnými silami)

Pro konstrukce s vlastní
periodou do cca 0,05-0,30 s
se q lineárně zvyšuje
od hodnoty 1 na hodnotu μ



$$u_{plastic} = \mu u_y \approx \mu u_{elastic}$$

$$F_{plastic} \approx F_{elastic}$$

$$\text{pro } T_0 = 0 \quad q = 1$$

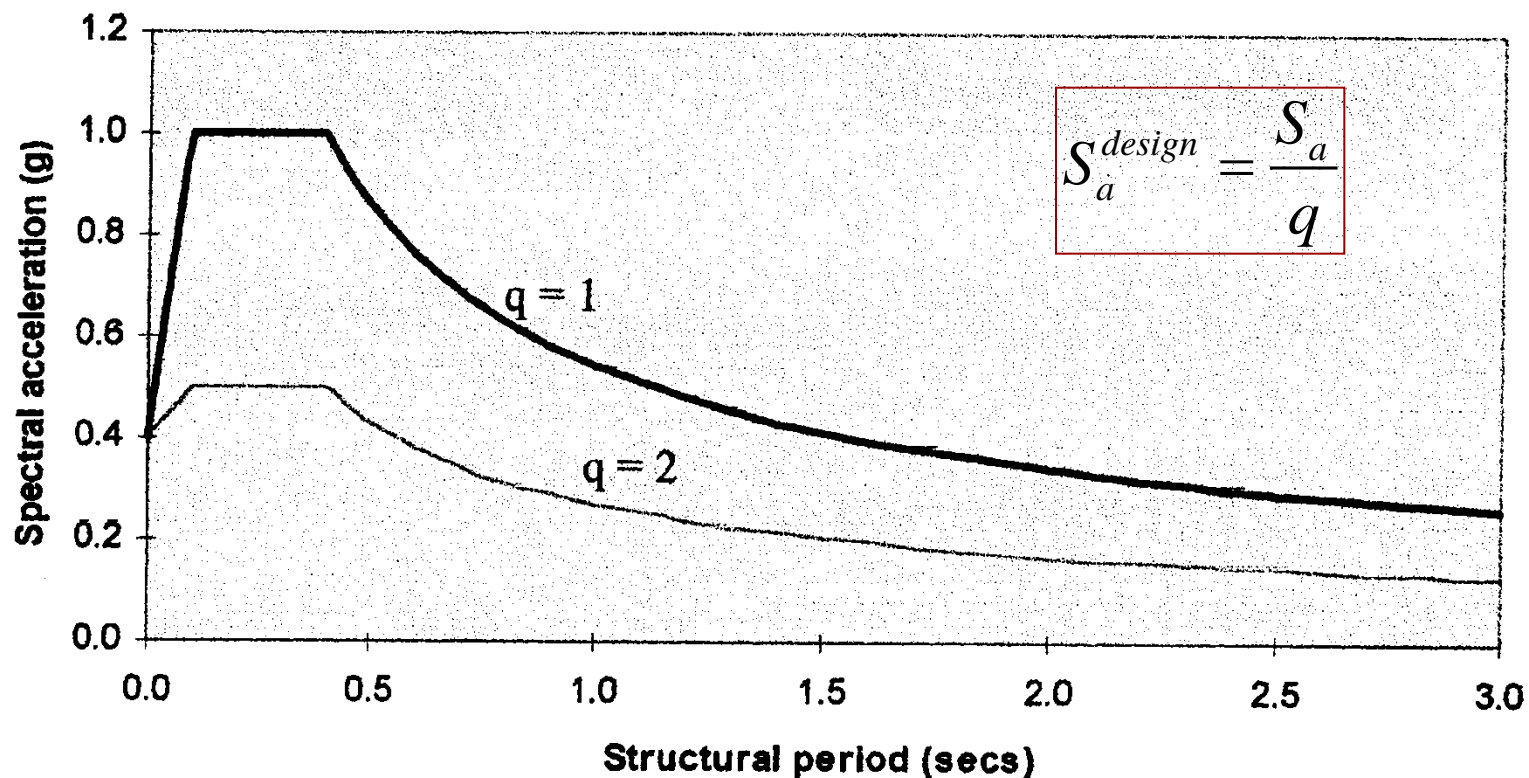


4. Duktilita konstrukcí

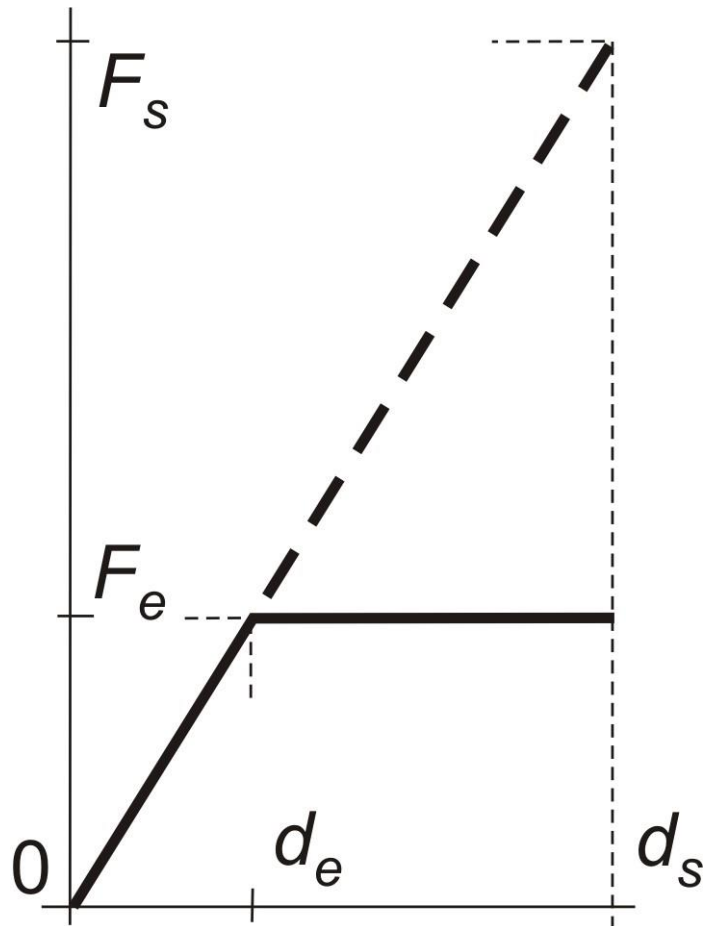
Redukce návrhového spektra pro duktilní konstrukce

EC8 spectra for elastic and ductile structures

$p_{ga} = 0.4g$



4. Duktilita konstrukcí



konstrukce se střední
a dlouhou periodou

F_s – seizmická síla působící na
pružnou konstrukci

F_e – seizmická síla s uvažáním
součinitele duktility

d_e – posunutí vypočtené

d_s – posunutí odpovídající
skutečnému zemětřesení

d_s / d_e duktilita

součinitel duktility q

Výpočet:

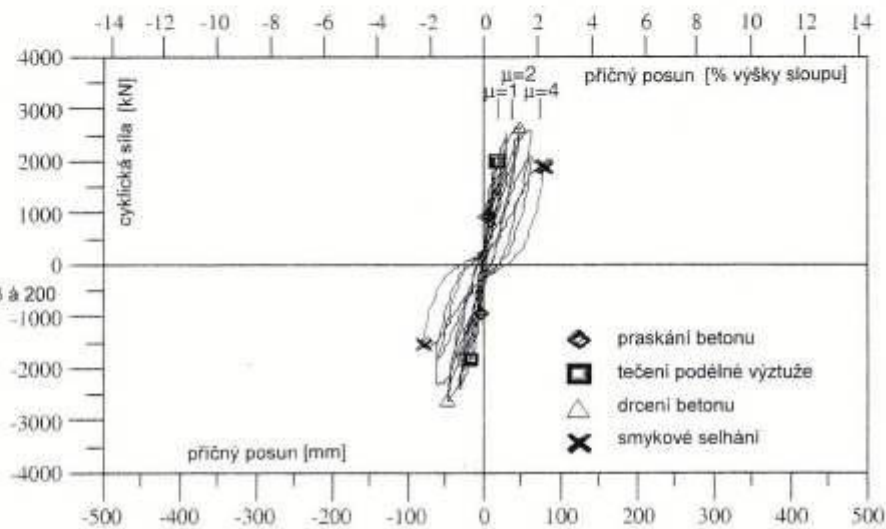
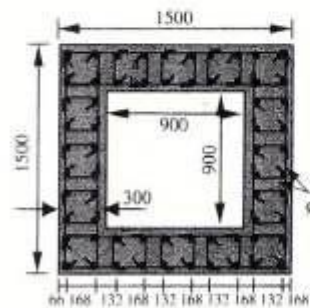
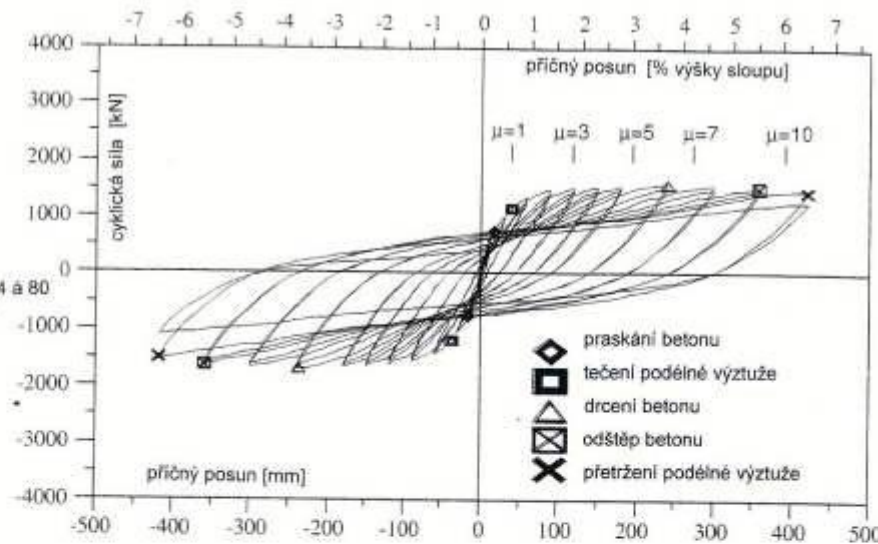
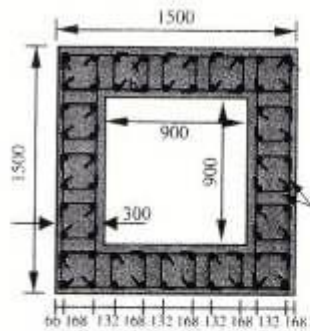
$F_e = F_s / q$ působící zatížení

lze redukovat,
má-li konstrukce
dostatečnou duktilitu

$d_s = d_e * q$ výsledné posunutí



4. Duktilita konstrukcí



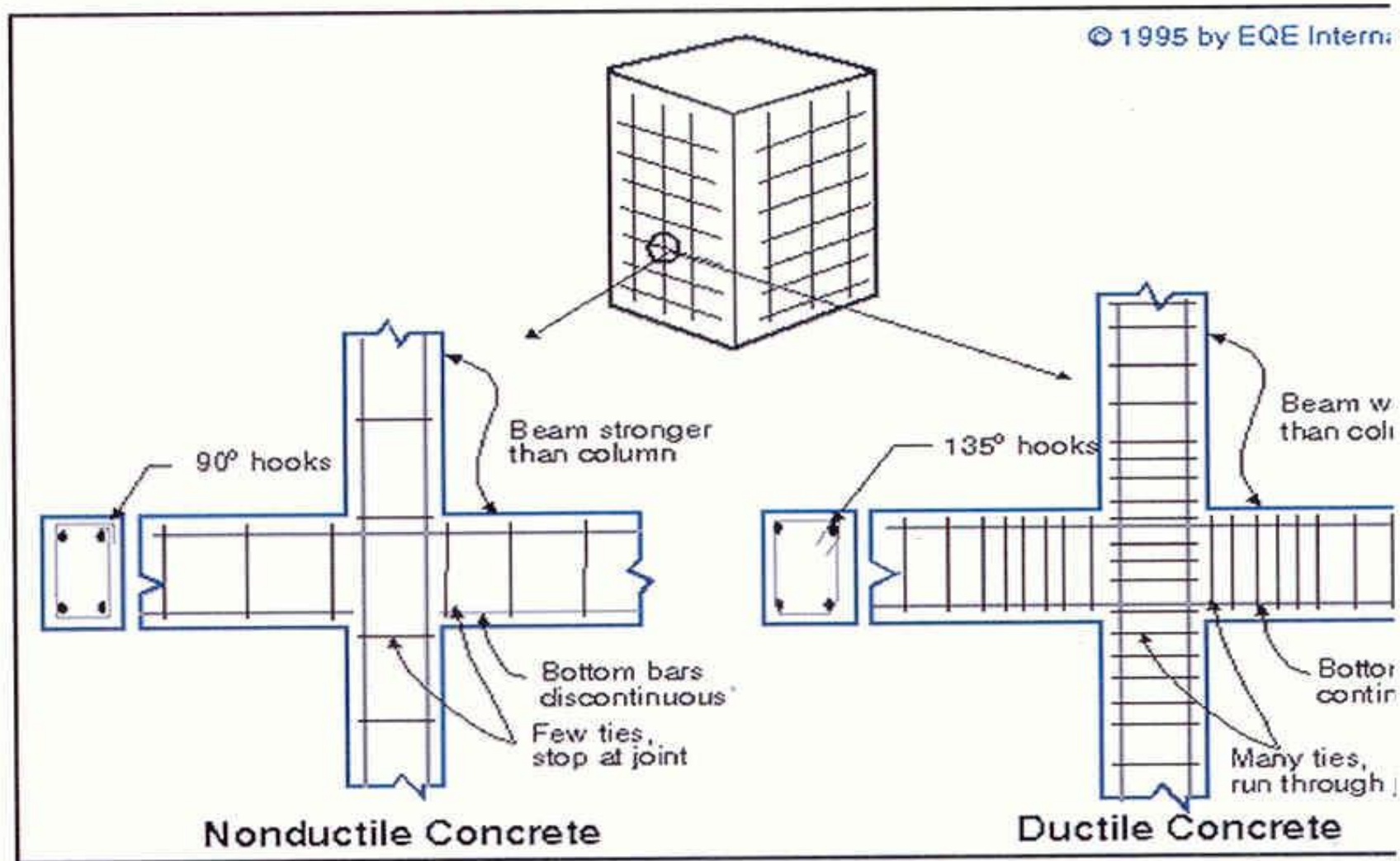
ŽB sloup

vysoká duktilita
- příčná výztuž
á 80 mm

nízká duktilita
- příčná výztuž
á 200 mm



4. Duktilita konstrukcí

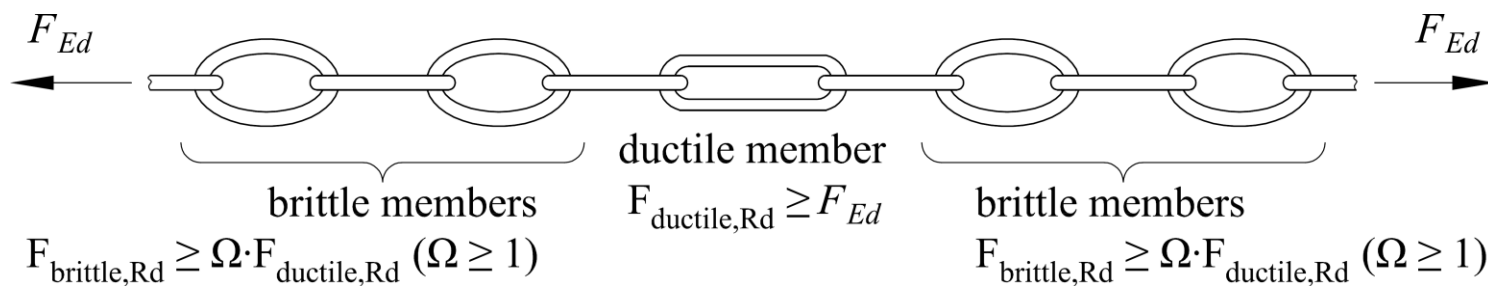


4. Duktilita konstrukcí

Konstrukce se skládá z duktilních a křehkých prvků

Je nutné zajistit hierarchii únosnosti – nejprve musí dojít k porušení v duktilním tvaru (např. ohyb ocelových nebo betonových nosníků) a následně ve tvaru křehkého porušení (např. smykové porušení nosníků, vybočení výztuže, kolaps ve svařovaném styku)

Je nutné prokázat, že duktilní tvary porušení jsou slabší než křehké tvary porušení – křehké prvky musí být navrženy tak, aby vydržely plnou kapacitu duktilních (plasticky se přetvářejících a energii disipujících) prvků – **návrh na kapacitu** (*capacity design*)



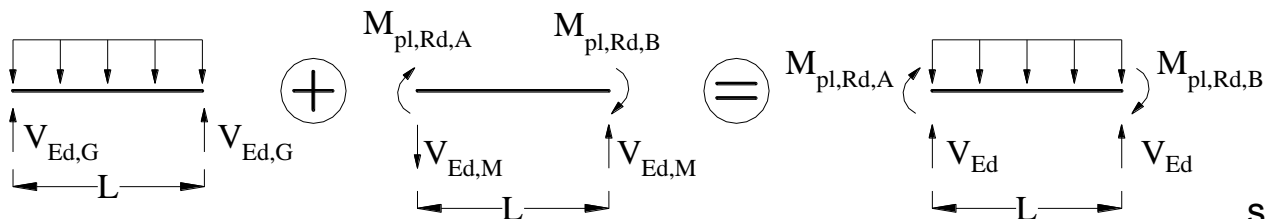
- | | |
|----------------|--|
| Duktilní prvky | – využívá se koncepce navýšení pevnosti |
| | – mohou být snadno opraveny po seizmické události |
| Křehké prvky | – praktické pokyny týkající se dimenzování (normy) |



4. Duktilita konstrukcí

Příklady návrhu na kapacitu

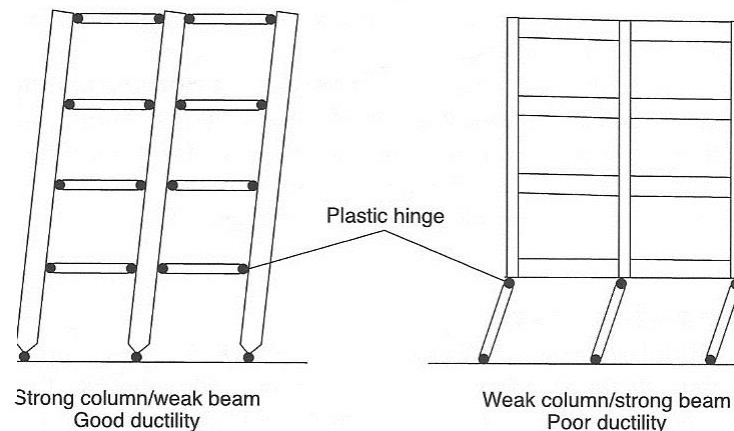
- Kontrola smykové pevnosti nosníků
 - provádí se za předpokladu vzniku plastických kloubů



$$\Omega V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$$

smyková síla \leq pevnost ve smyku
EC8: $\Omega = 2$

- Zajištění vzniku globálního plastického mechanismu (silný sloup, slabý nosník)
 - maximální možný počet disipačních oblastí
 - rovnoměrná disipace energie po konstrukci



4. Duktilita konstrukcí

Příklady návrhu na kapacitu

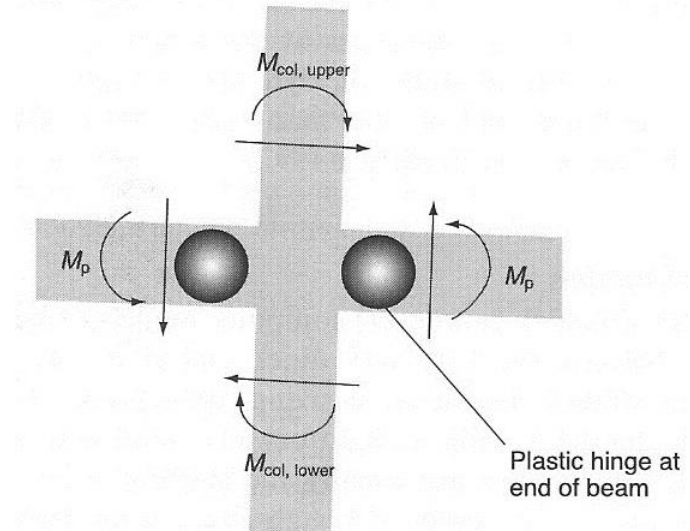
- Ve styčném zajistit, aby součet ohybové pevnosti sloupů byl větší než součet plastických momentů na konci nosníků

$$\sum_{column} M_{Rd} > \sum_{beam} M_{pl,Rd}$$

$$\sum_{column} M_{Rd} > \Omega \sum_{beam} M_{Rd}$$

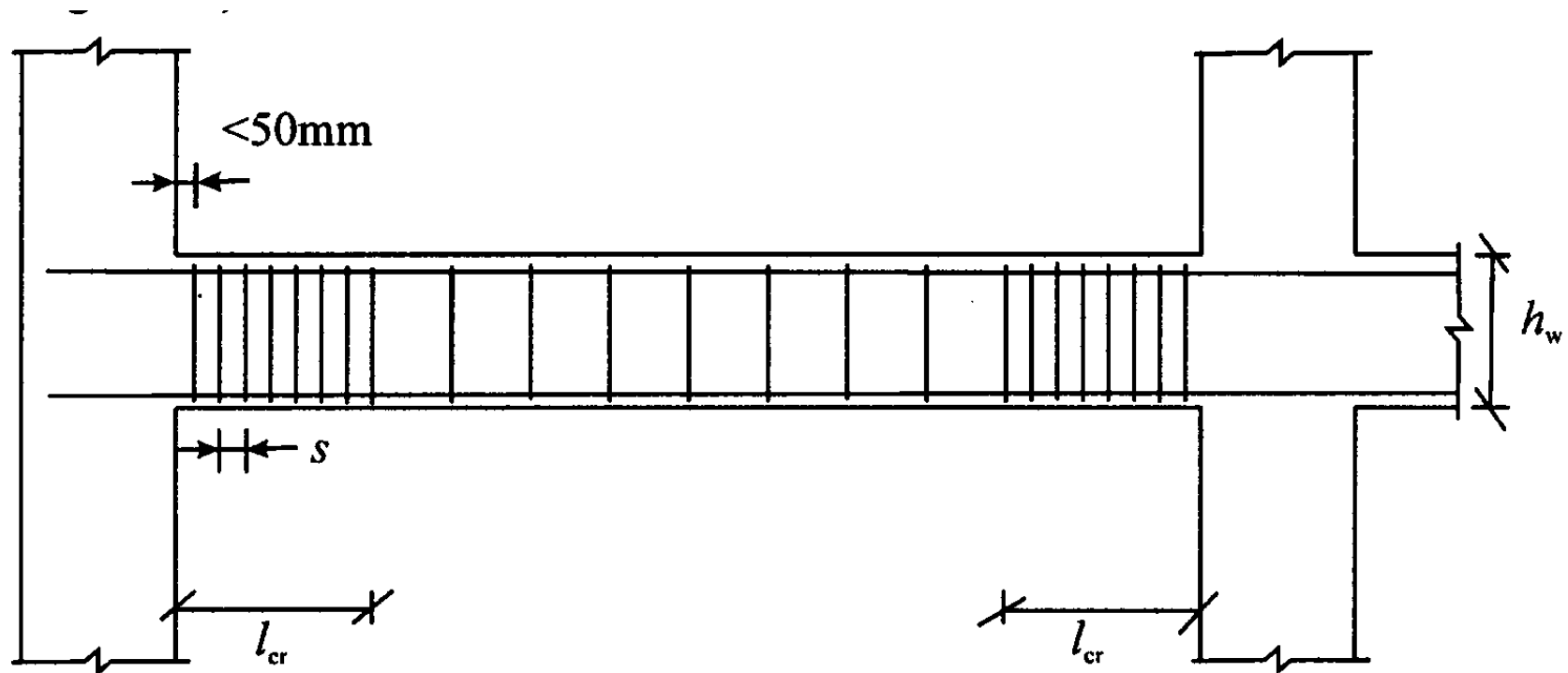
momenty odolnosti sloupů > momenty odolnosti nosníků

EC8: $\Omega = 1,3$



4. Duktilita konstrukcí

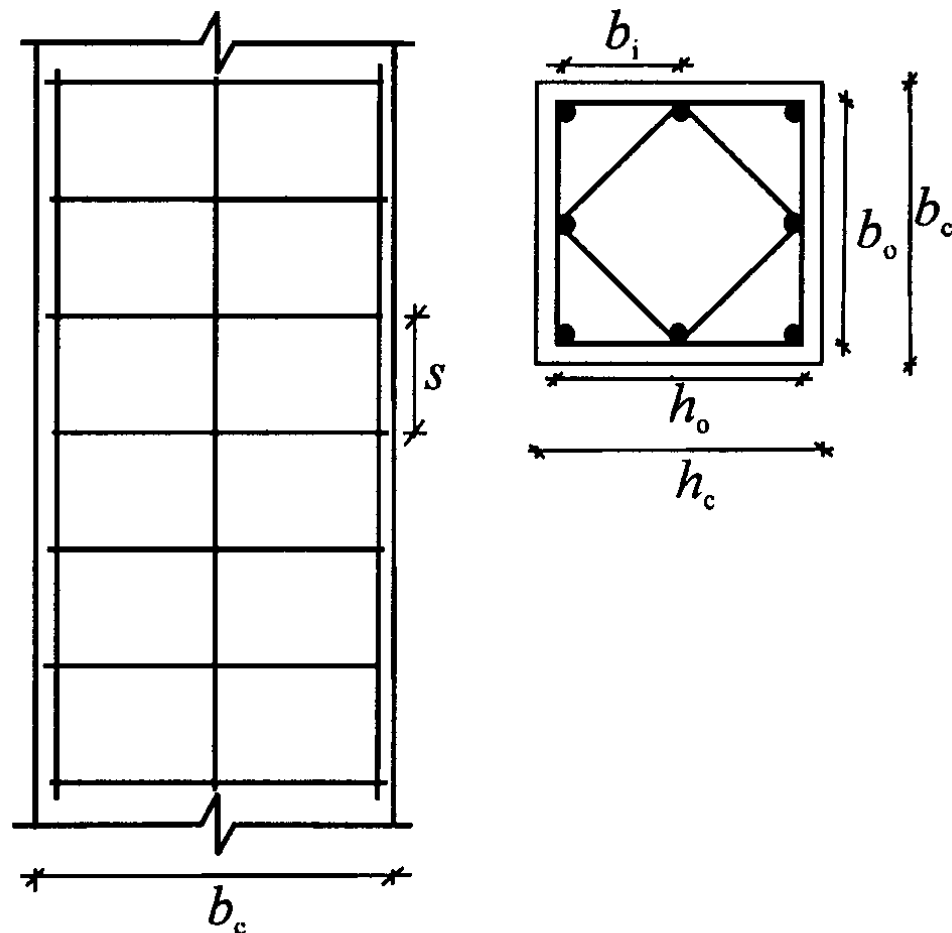
Požadavky EC8 na duktilitu ŽB konstrukcí



zhuštění třmínků, propojení výztuže v místech očekávaných plastických kloubů

4. Duktilita konstrukcí

Požadavky EC8 na duktilitu ŽB konstrukcí



Minimální rozměry prvků:

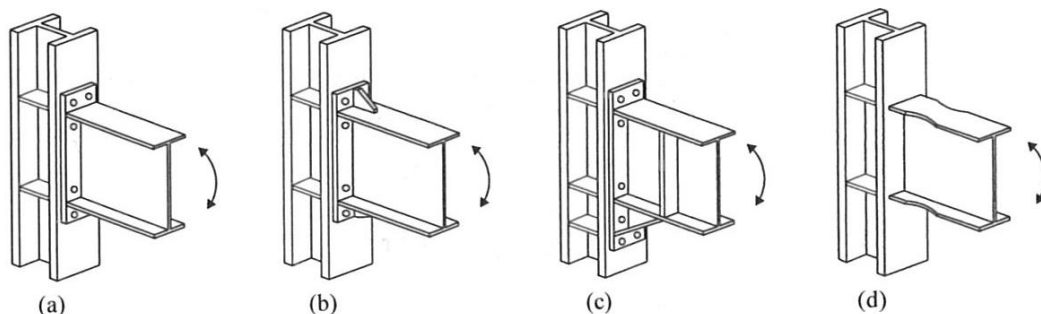
- tloušťka stěny 150 mm
- šířka trámu 200 mm
- rozměr sloupu 250 mm

Požadavky na výztuž:
konstrukční ocel žebírková,
třmínky min. průměr 6 mm

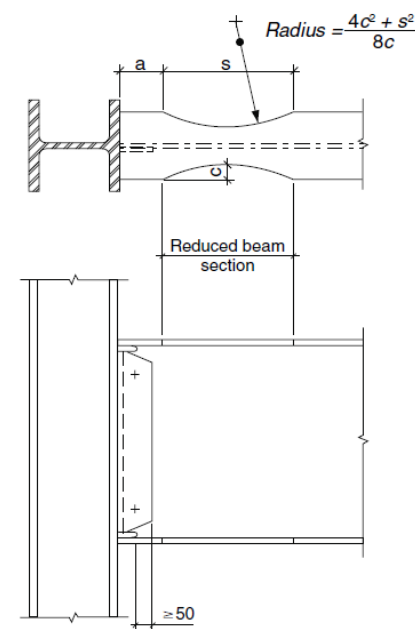
4. Duktilita konstrukcí

Ocelové konstrukce

Spoje nosníku se sloupem – předem kvalifikované styčníky



- a) Styčník s nevztuženou čelní deskou b) Styčník s vyztuženou čelní deskou c) Styčník s náběhem d) Svařovaný styčník s oslabeným nosníkem



**Oslabený nosník
„dog bone“**

4. Duktilita konstrukcí

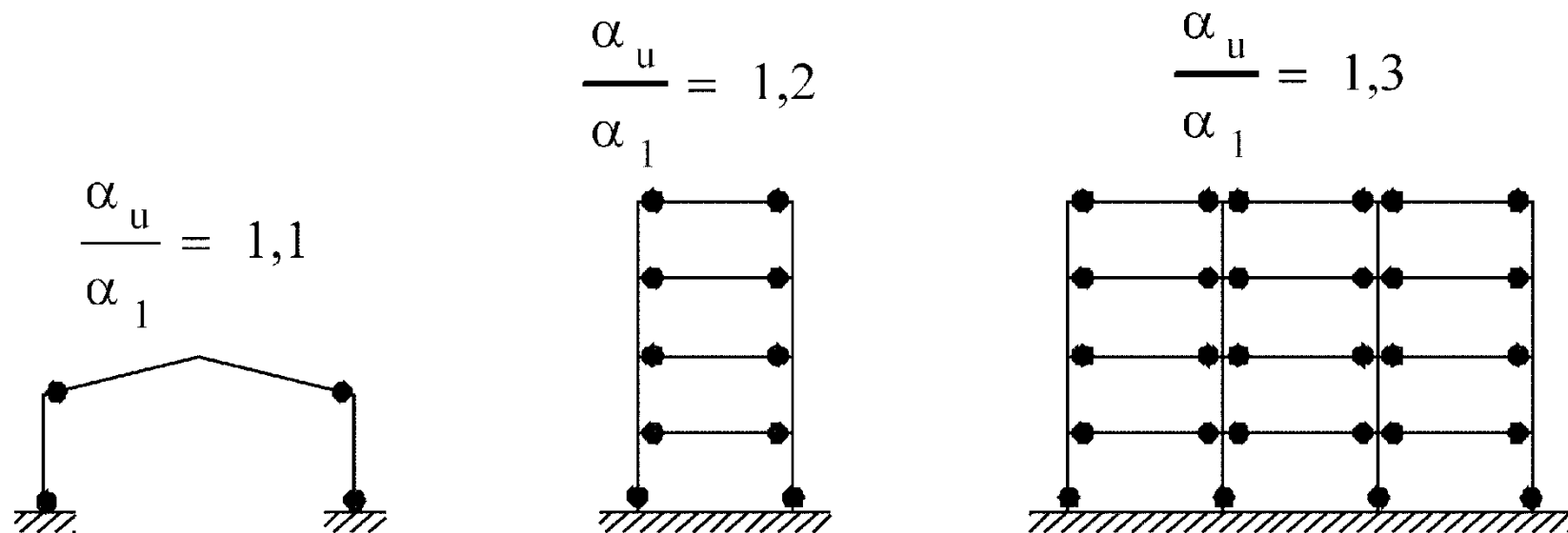
EC8 – součinitel duktility pro ŽB konstrukce

Budovy	střední duktilita	vysoká duktilita
Obrácené kyvadlo (konzola s 1 SV)	1,5	2
Konstrukce s malou torzní tuhostí	2	3
Rámy, stěnové systémy	3 – max. 4,5	4,5 – max. 6,75



4. Duktilita konstrukcí

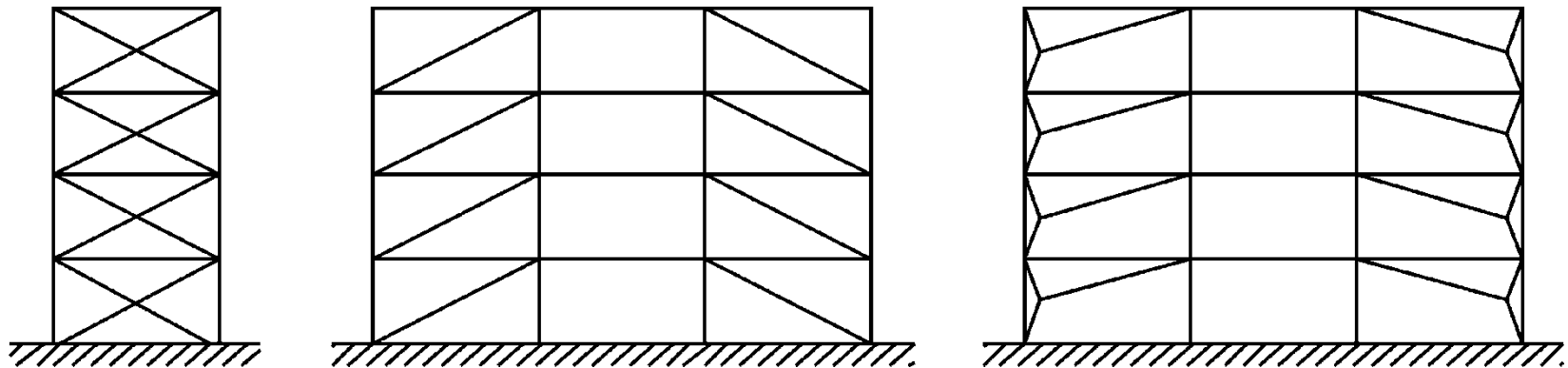
EC8 – součinitel duktility pro ocelové konstrukce



disipativní ocelové konstr.	střední duktilita	vysoká duktilita
rámy odolávající momentům	4	5 – max. 6,5

4. Duktilita konstrukcí

EC8 – součinitel duktility pro ocelové konstrukce

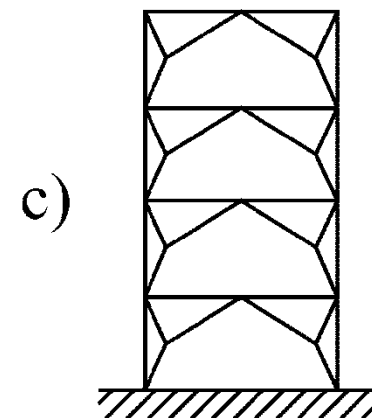
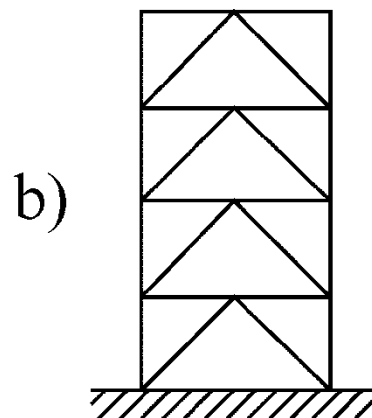
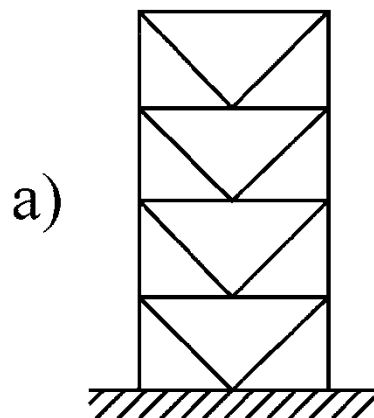


disipativní ocelové konstr.	střední duktilita	vysoká duktilita
-----------------------------	-------------------	------------------

rámy s centrickým ztužením diagonálami	4	4
---	---	---

4. Duktilita konstrukcí

EC8 – součinitel duktility pro ocelové konstrukce



disipativní ocelové konstr. střední duktilita

vysoká duktilita

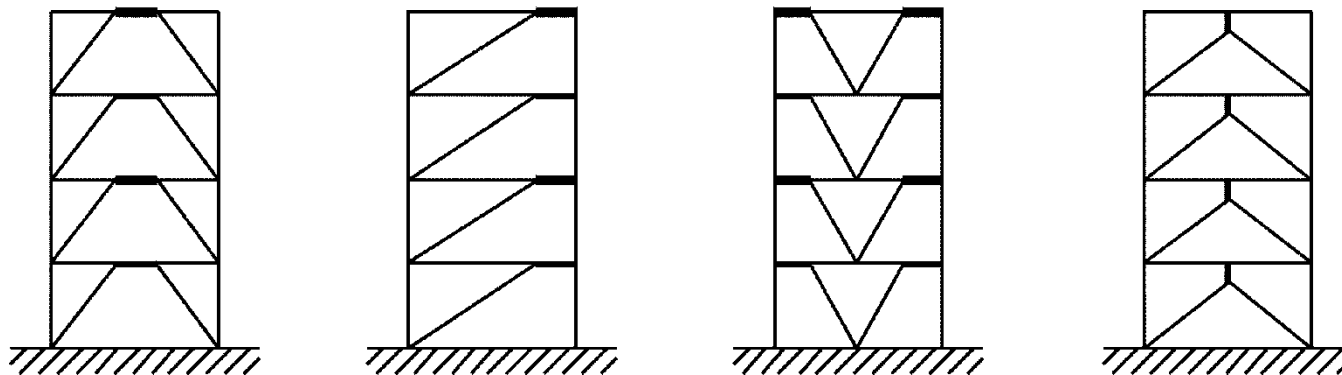
rámy s centrickým ztužením
tvaru V

2

2,5

4. Duktilita konstrukcí

EC8 – součinitel duktility pro ocelové konstrukce



$$\frac{\alpha_u}{\alpha_1} = 1,2$$

disipativní ocelové konstr.
rámy s excentrickým ztužením
diagonálami

střední duktilita

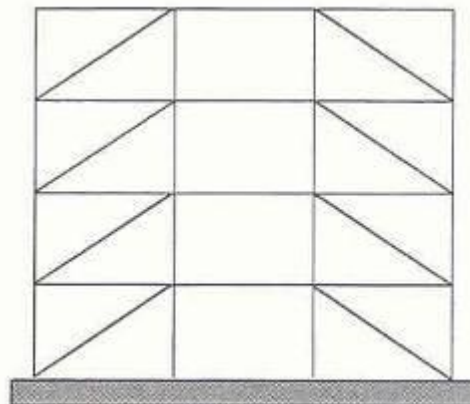
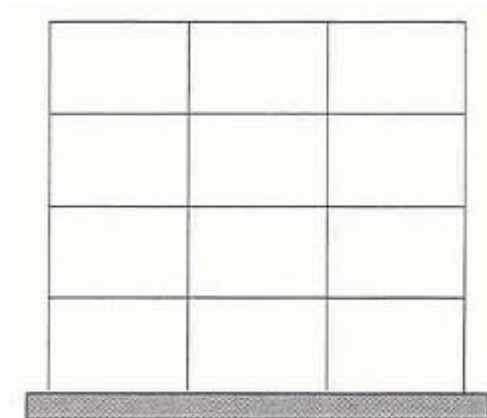
4

vysoká duktilita

6

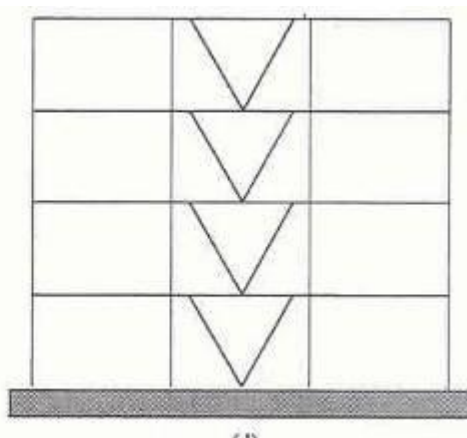
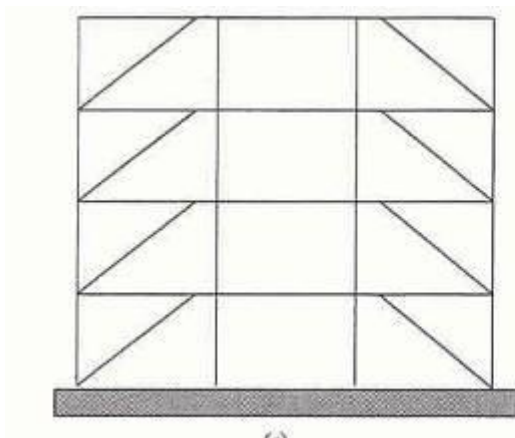
5. Konstrukční zásady

Zajištění tuhosti v příčném směru



rámy
odolávající momentům

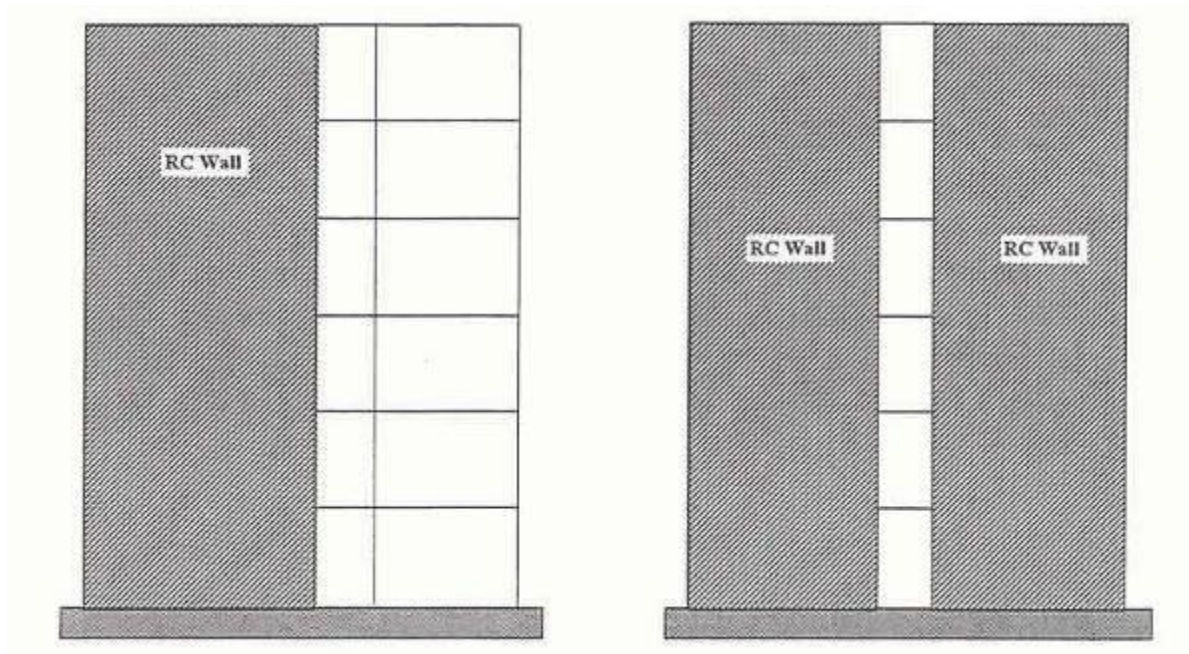
centrické ztužení



excentrické ztužení

5. Konstrukční zásady

Zajištění tuhosti v příčném směru



rám + ŽB stěna

spojené ŽB stěny

5. Konstrukční zásady

Základní pokyny pro koncepční návrh

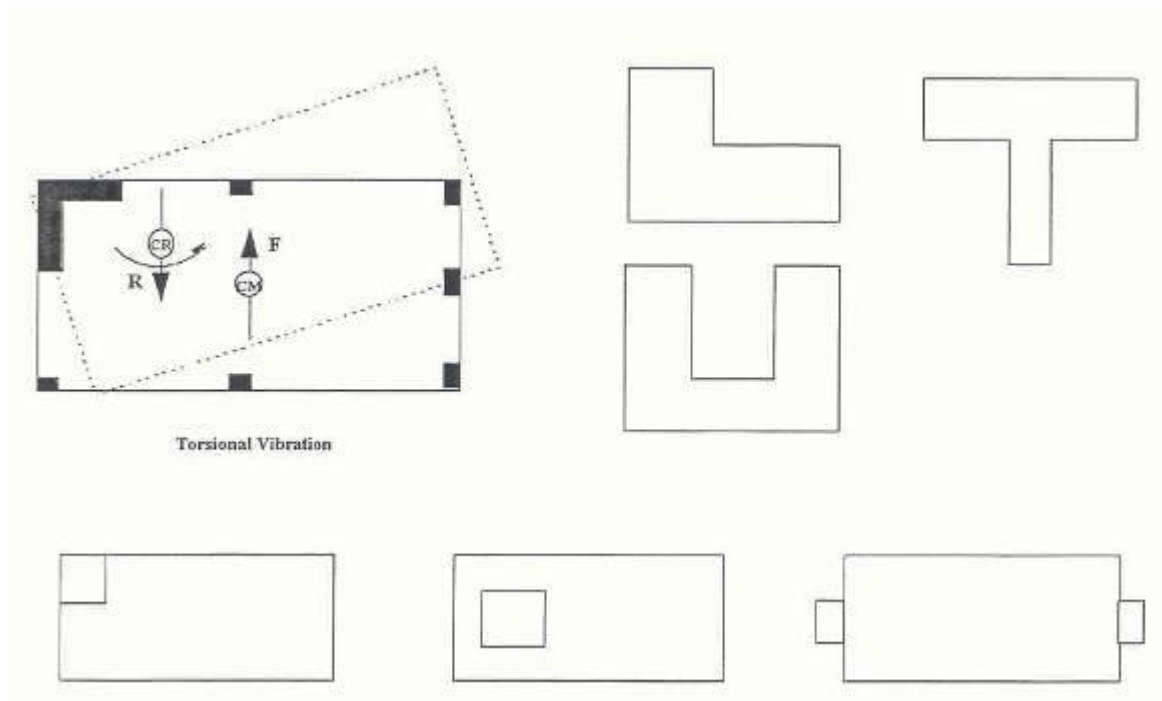
- jednoduchost konstrukce (jasné statické schéma, jasná a přímá cesta přenosu seizmického zatížení)
- jednotnost, symetrie, statická neurčitost (vyvážené rozdělení prvků v konstrukci, zamezení koncentrace napětí, malé excentricity tuhostí a hmot, možnost dělení konstrukce pomocí seizmických spár)
- odolnost a tuhost v obou směrech (pravoúhlý systém s podobnou tuhostí a odolností v obou směrech)
- odolnost a tuhost v kroucení (hlavní prvky odolávající seizmickému zatížení blíže obvodu konstrukce)
- podlaží jako diafragma (dostatečně tuhá ve své vlastní rovině, účinné připojení k vertikálnímu systému)
- přiměřené základy (zajistit rovnoměrné buzení konstrukce)



5. Konstrukční zásady

Nevhodné půdorysy

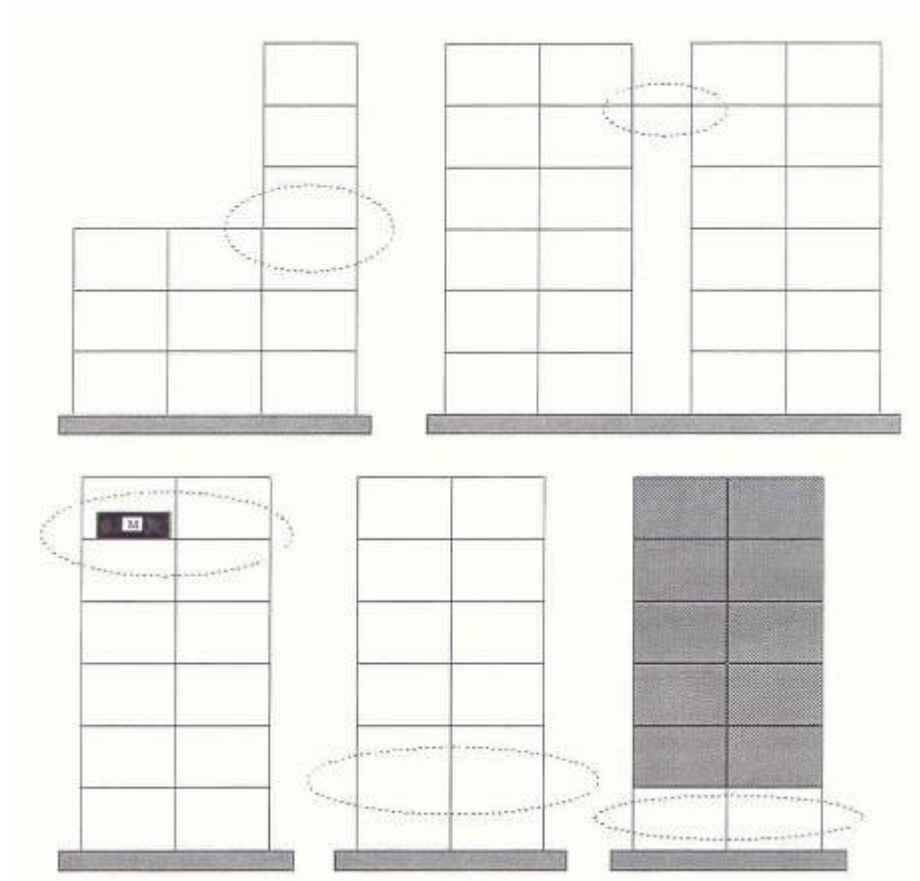
- nebezpečí vzniku torzního kmitání



5. Konstrukční zásady

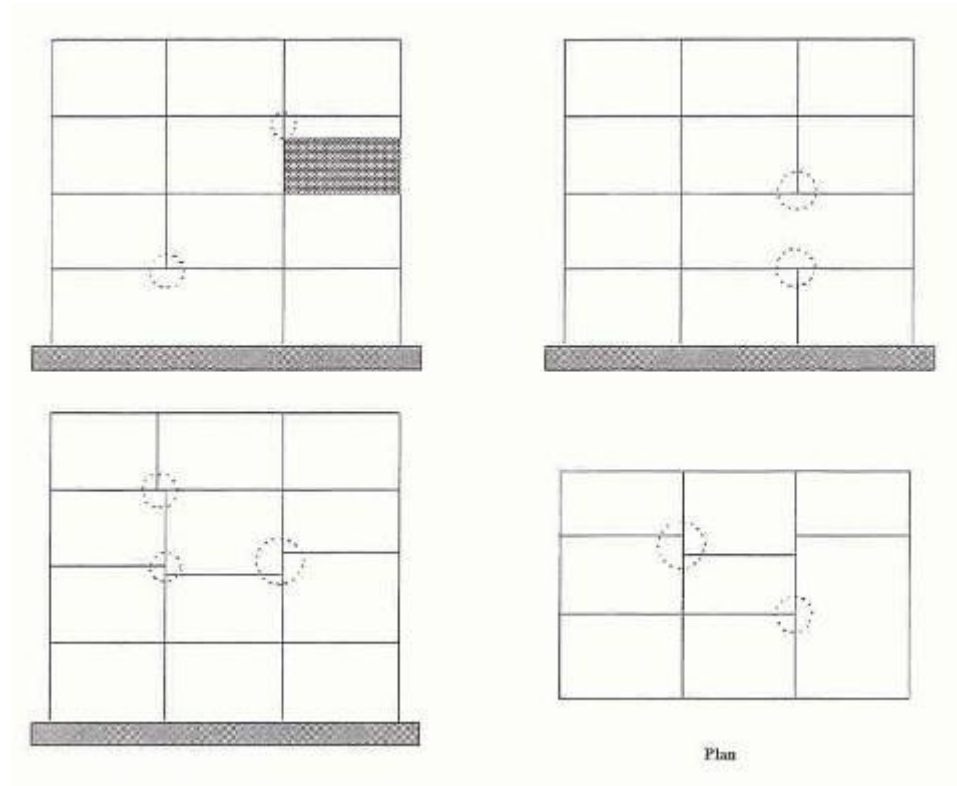
Nepravidelnost po výšce

- náhlá změna tuhosti nebo hmotnosti



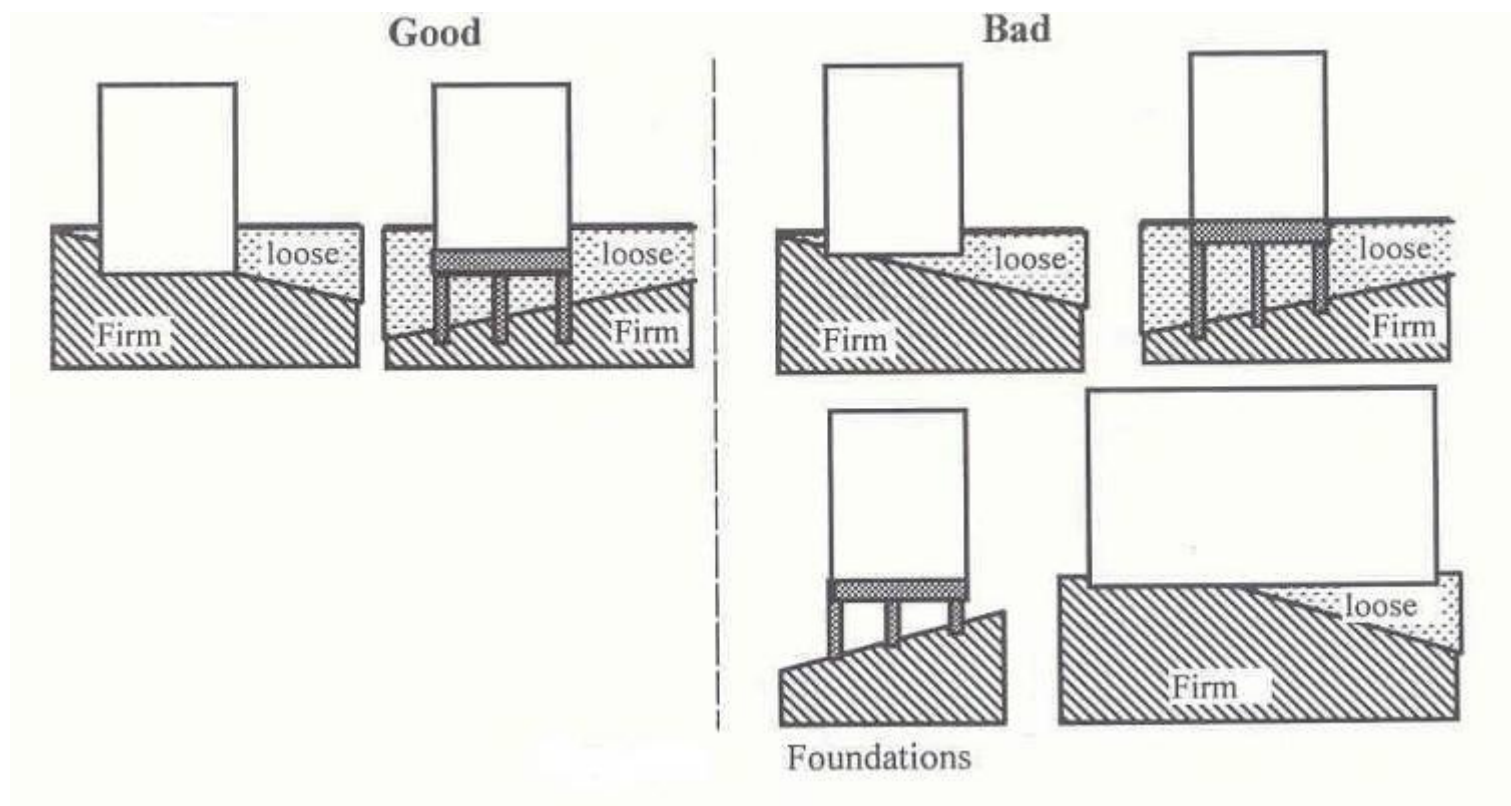
5. Konstrukční zásady

Diskontinuity sloupů a nosníků



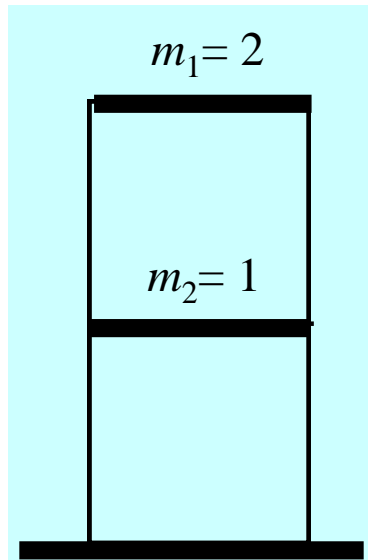
5. Konstrukční zásady

Geotechnická hlediska



6. Příklad

Modální analýza pomocí spektra odezvy



$$K = \begin{bmatrix} 300 & -300 \\ -300 & 500 \end{bmatrix} \quad M = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\omega = \begin{bmatrix} 7.07 \\ 24.494 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} 0.889 \\ 0.256 \end{bmatrix} \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0.667 & -3 \end{bmatrix}$$

vlastní frekvence, periody a tvary kmitání

pro danou periodu
se zrychlení S_a
odečte ze spektra

$$\Rightarrow T_1 = 0.889 \text{ sec} \Rightarrow S_a(T_1) \equiv S_{a(1)} = 9.93 \text{ m/sec}^2$$

$$S_{d(1)} = S_{a(1)} / \omega_1^2 = 9.93 / 50 = 0.1986 \text{ m}$$

$$\Rightarrow T_2 = 0.256 \text{ sec} \Rightarrow S_a(T_2) \equiv S_{a(2)} = 13.29 \text{ m/sec}^2$$

$$S_{d(2)} = S_{a(2)} / \omega_2^2 = 13.29 / 600 = 0.0222 \text{ m}$$



6. Příklad

$$M_{(1)} = \sum_i m_i \phi_{i(1)}^2 = 2.444$$

$$M_{(2)} = \sum_i m_i \phi_{i(2)}^2 = 11$$

$$L_{(1)} = \sum_i m_i \phi_{i(1)} = 2.667$$

$$L_{(2)} = \sum_i m_i \phi_{i(2)} = -1$$

$$\Gamma_{(1)} = \frac{L_{(1)}}{M_{(1)}} = 1.091$$

$$\Gamma_{(2)} = \frac{L_{(2)}}{M_{(2)}} = -0.091$$

výpočet posunutí
(viz kap. 2)

$$u_{k(j)} = \frac{\phi_{k(j)} \sum_i m_i \phi_{i(j)}}{\sum_i m_i \phi_{i(j)}^2} S_{d(j)} = \Gamma_{(j)} S_{d(j)} \phi_{k(j)}$$

$$u_{(1)} = \Gamma_{(1)} S_{d(1)} \phi_{(1)} = 1.091 * 0.1986 \begin{bmatrix} 1 \\ 0.667 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.217 \\ 0.144 \end{bmatrix}$$

$$u_{(2)} = \Gamma_{(2)} S_{d(2)} \phi_{(2)} = -0.091 * 0.0222 \begin{bmatrix} 1 \\ -3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0022 \\ 0.006 \end{bmatrix}$$



6. Příklad

výpočet zatížení
(viz kap. 2)

$$F_{k(j)} = \frac{\phi_{k(j)} \sum_i m_i \phi_{i(j)}}{\sum_i m_i \phi_{i(j)}^2} m_k S_{a(j)} = \Gamma_{(j)} S_{a(j)} m_k \phi_{k(j)}$$

$$F_{(1)} = \Gamma_{(1)} S_{a(1)} M \phi_{(1)} = 1.091 * 9.93 \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0.667 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 21.7 \\ 7.2 \end{bmatrix}$$

$$\text{nebo: } F_{(1)} = Ku_{(1)} = \begin{bmatrix} 300 & -300 \\ -300 & 500 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.217 \\ 0.144 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 21.9 \\ 6.9 \end{bmatrix}$$

$$F_{(2)} = \Gamma_{(2)} S_{a(2)} M \phi_{(2)} = -0.091 * 13.29 \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.4 \\ 3.6 \end{bmatrix}$$

$$\text{nebo: } F_{(2)} = Ku_{(2)} = \begin{bmatrix} 300 & -300 \\ -300 & 500 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.002 \\ 0.006 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.4 \\ 3.6 \end{bmatrix}$$

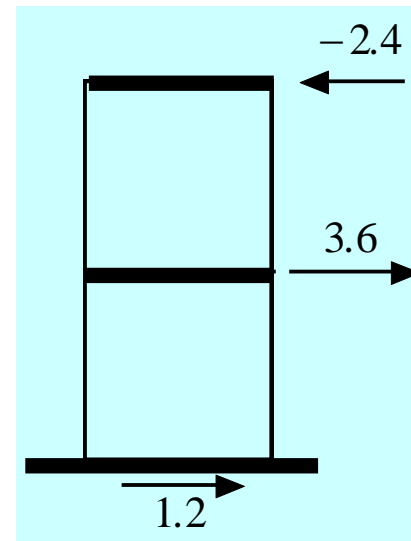
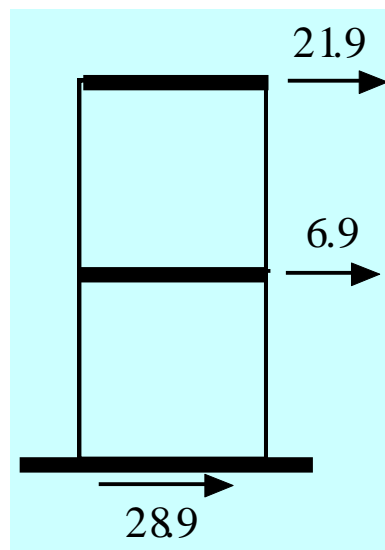
alternativní výpočet posunutí
(jako odezva na seizmické zatížení)

$$u_{(j)} = K^{-1} F_{(j)}$$



6. Příklad

zatížení



síla v základech

metoda SRSS -
max. hodnota posunutí
a síly v základech

(zcela dominantní je
zde vliv 1. vl. tvaru)

$$u_{\max} = \sqrt{\begin{bmatrix} 0.217^2 + (-0.002)^2 \\ 0.144^2 + 0.006^2 \end{bmatrix}} = \begin{bmatrix} 0.217 \\ 0.144 \end{bmatrix}$$

$$F_{b,\max} = \sqrt{28.9^2 + 1.2^2} = 28.9$$

6. Příklad

efektivní
modální
hmota

$$M_{(1)}^{eff} = \frac{\left(\sum_i m_i \phi_{i(1)} \right)^2}{\sum_i m_i \phi_{i(1)}^2} = \frac{\left(L_{(1)} \right)^2}{M_{(1)}} = \frac{2.667^2}{2.444} = 2.910$$

$$M_{(2)}^{eff} = \frac{\left(\sum_i m_i \phi_{i(2)} \right)^2}{\sum_i m_i \phi_{i(2)}^2} = \frac{\left(L_{(2)} \right)^2}{M_{(2)}} = \frac{(-1)^2}{11} = 0.091$$

$$\sum_j M_{(j)}^{eff} = 3 = \sum_i m_i$$



6. Příklad

Zjednodušený postup 1:

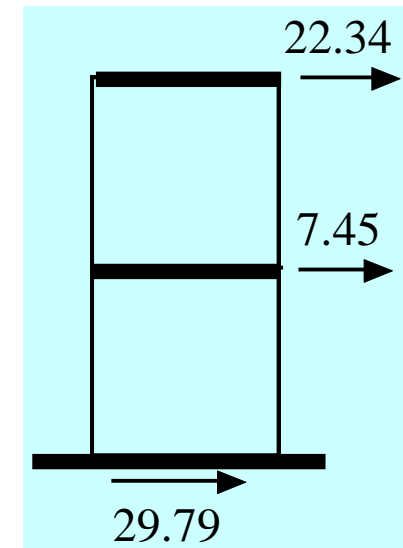
výpočet zatížení – uvažuje se pouze 1. vlastní tvar kmitání

$$F_b = S_{a(1)} \sum_i m_i = 9.93 * (2 + 1) = 29.79$$

$$F_j = F_b \frac{m_j \phi_{j(1)}}{\sum_i m_i \phi_{i(1)}} = F_b \frac{m_j \phi_{j(1)}}{L_{(1)}}$$

$$F_1 = 29.79 \frac{2 * 1}{2.667} = 22.34$$

$$F_2 = 29.79 \frac{1 * 0.667}{2.667} = 7.45$$



6. Příklad

Zjednodušený postup 2:

výpočet zatížení – základní tvar kmitání se uvažuje jako přímka

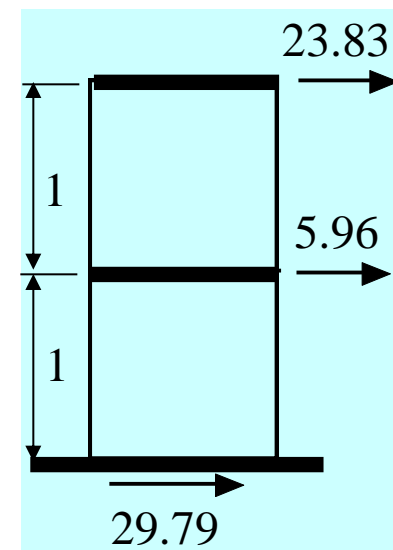
$$F_b = S_{a(1)} \sum_i m_i = 9.93 * (2 + 1) = 29.79$$

$$\sum_i z_i m_i = 2 * 2 + 1 * 1 = 5$$

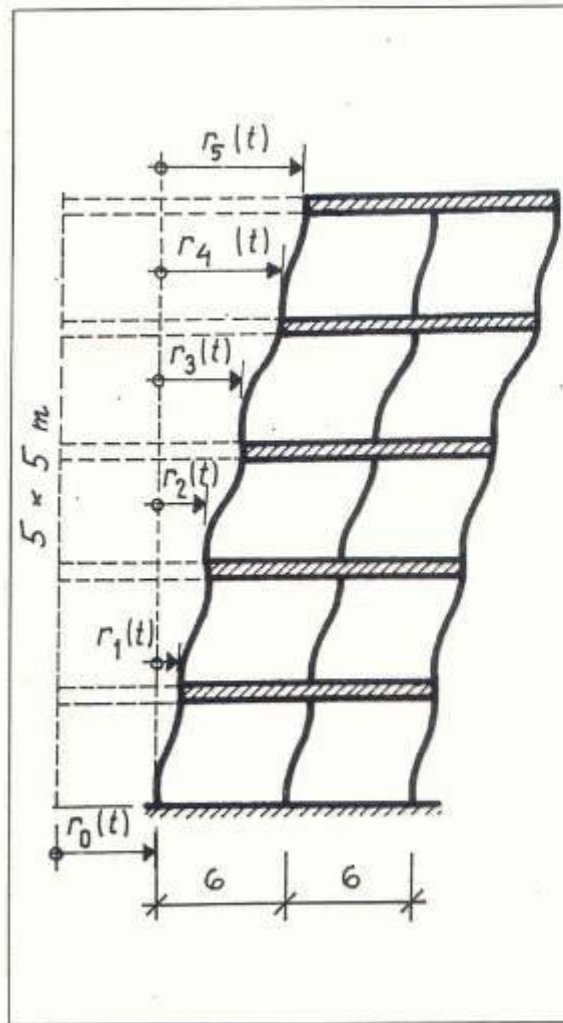
$$F_j = F_b \frac{z_j m_j}{\sum_i z_i m_i}$$

$$F_1 = 29.79 \frac{2 * 2}{5} = 23.83$$

$$F_2 = 29.79 \frac{1 * 1}{5} = 5.96$$



7. Ukázka výpočtu seizmické odezvy



Příklad výpočtu odezvy

$E = 26\,500 \text{ MPa}$

útlum 5%

sloupy $0.40 \times 0.40 \text{ m}$

$I = 2.13 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$

$\rho = 2\,500 \text{ kg/m}^3$

příčle $0.40 \times 0.60 \text{ m}$

$I = 7.20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$

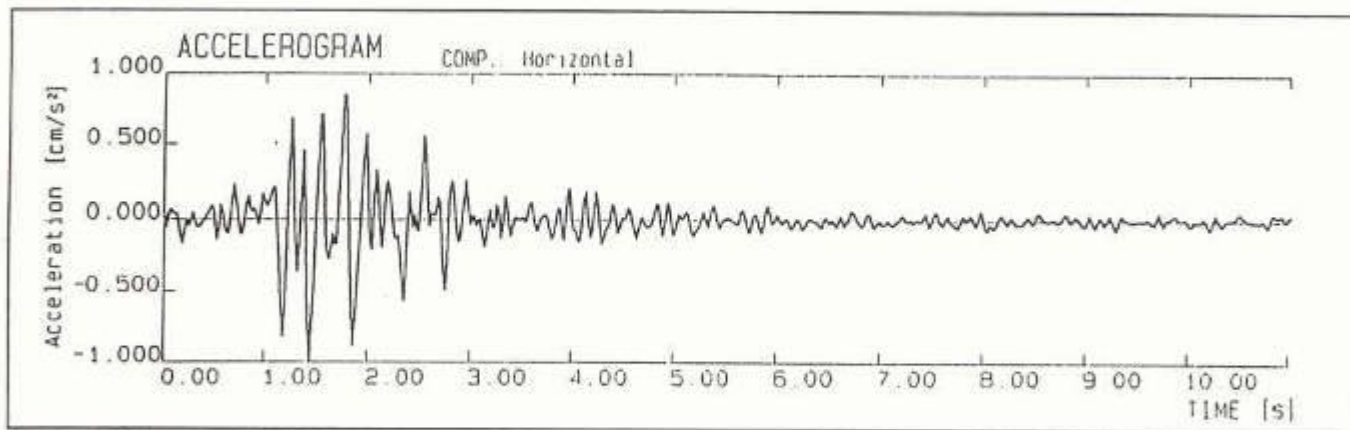
$\rho = 5\,000 \text{ kg/m}^3$



7. Ukázka výpočtu seizmické odezvy

Řešení přímou integrací

Akceleroogram - Kalifornie, 7° MSK, $a_{max} = 1.028 \text{ m/s}^2$



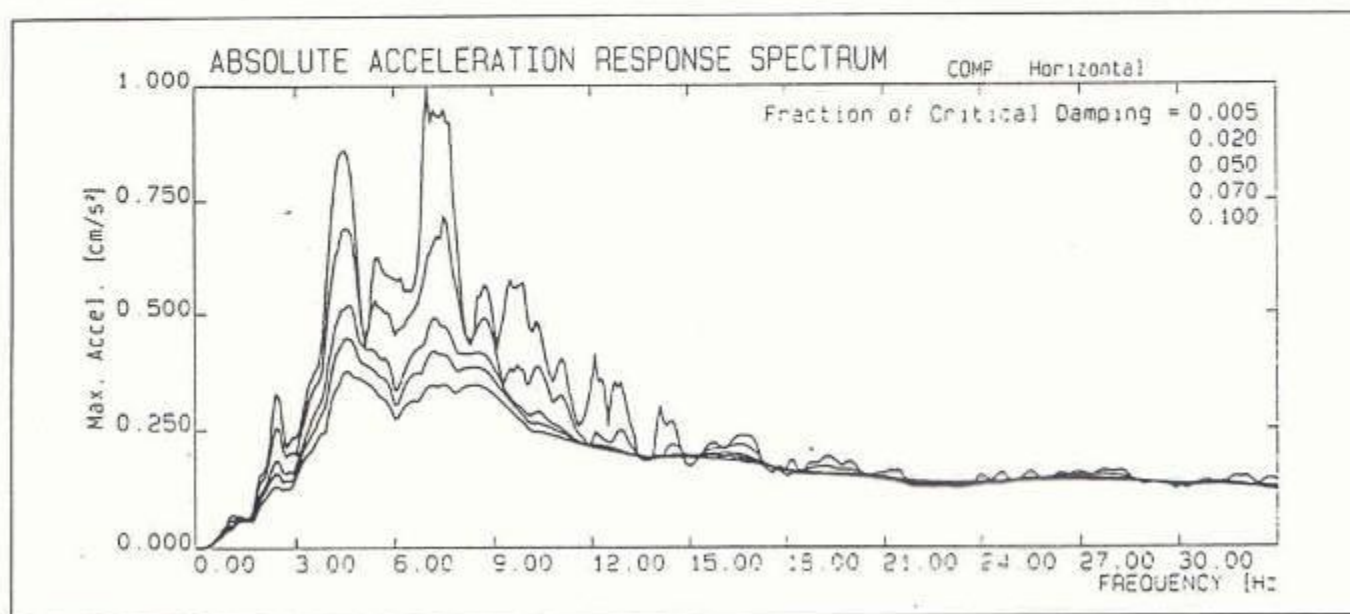
max. vodorovná výchylka $u = 7.24 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ $t = 3.07 \text{ s}$

7. Ukázka výpočtu seismické odezvy

Řešení pomocí spektra odezvy

Spektrum zrychlení - max. hodnota 7.27 m/s^2

(útlum 0.5 %)



7. Ukázka výpočtu seismické odezvy

Řešení pomocí spektra odezvy

$f_{(i)}$ (Hz)	$u_{(i)}$ ($\text{kg}^{-1/2}$)	S_a (m/s^2)	t_{\max} (s)	$q_{(i)}$ ($\text{mkg}^{1/2}$)
2.41	0.134	1.28	3.07	$5.195 \cdot 10^{-2}$
7.02	0.128	3.00	1.57	$-0.450 \cdot 10^{-2}$
11.01	0.113	1.92	4.48	$-0.061 \cdot 10^{-2}$

max. vodorovná výchylka

$$u = \sqrt{0.700^2 + (-0.058)^2 + (-0.007)^2} \cdot 10^{-2}$$

$$u = 7,03 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

vliv počtu vlastních tvarů – efektivní modální hmota

$$M_{(1)}^{eff} = 87.23 \quad M_{(2)}^{eff} = 8.58 \quad M_{(3)}^{eff} = 2.37 \quad M_{(4)}^{eff} = 0.71 \quad M_{(5)}^{eff} = 0.15$$

$$\sum m_i = 99 \quad \sum M_i^{eff} = 98.89$$

