

Použitelnost

- funkční způsobilost za provozních podmínek
- pohodlí uživatelů
- vzhled konstrukce

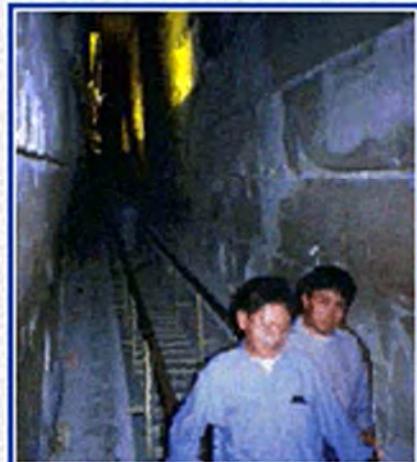
Obvyklé mezní stavy použitelnosti betonových konstrukcí:

- mezní stav napětí z hlediska podmínek použitelnosti,
- mezní stav trhlin,
- mezní stav přetvoření.

je potřebné definovat

- omezující kritéria $C \geq E_d$
- návrhové hodnoty zatížení, které se budou aplikovat
- návrhové vlastnosti materiálů
- model chování (výpočetní model)

Žádné nesnáze s použitelností u historických staveb



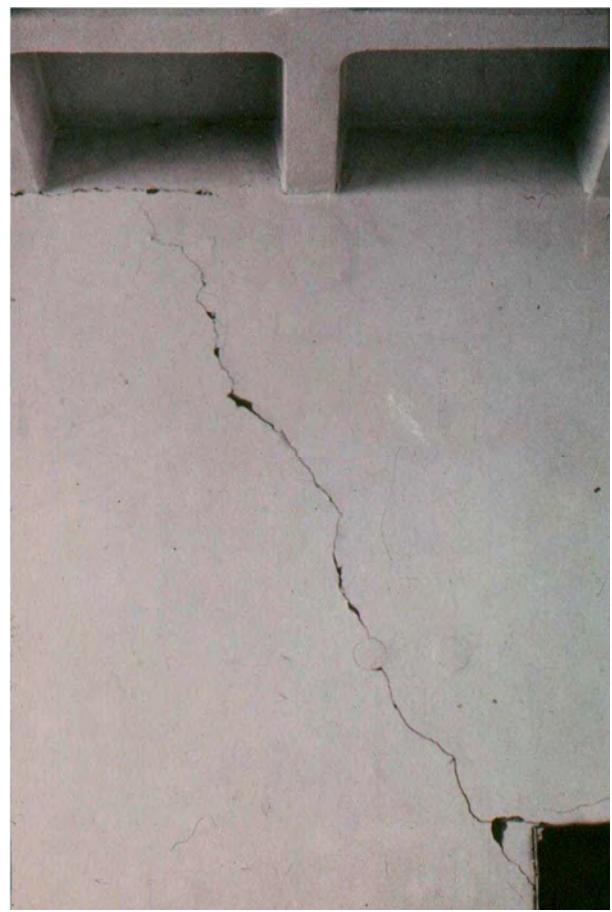
Středověké klenby



Bazilika sv. Markéty



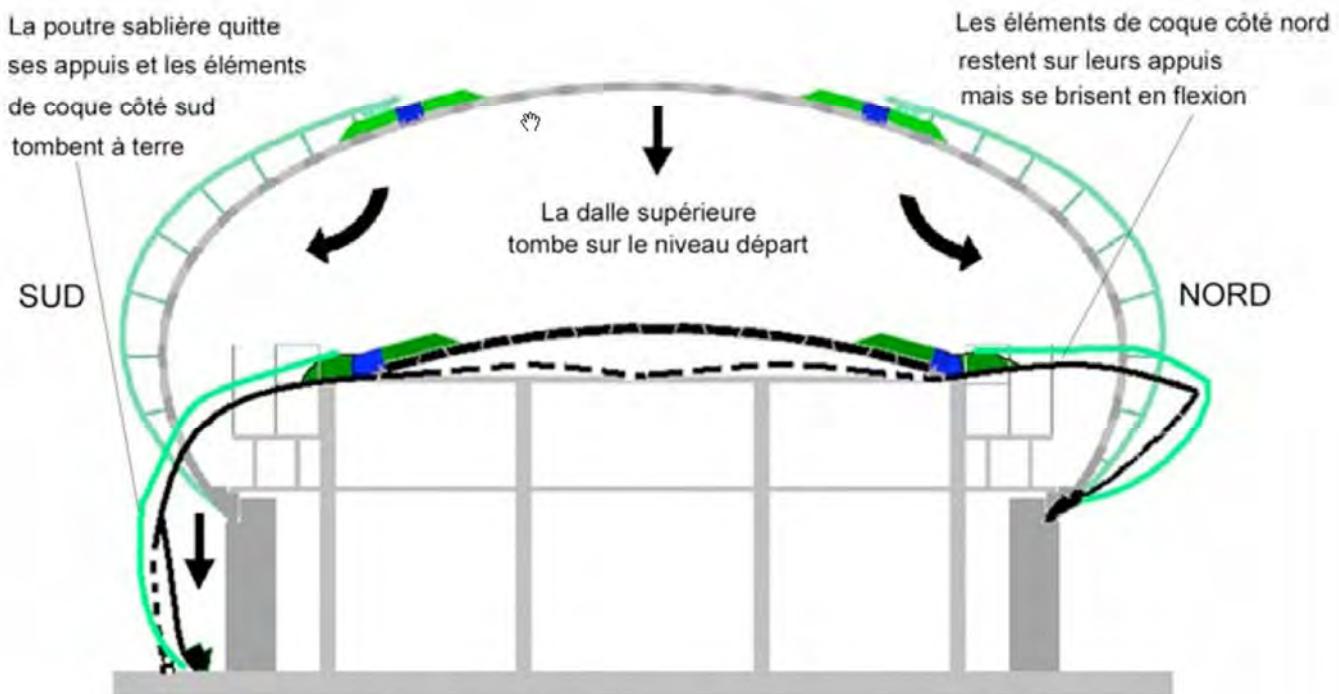
Obchodní dům CENTRUM



Použitelnost - Millennium bridge v Londýně



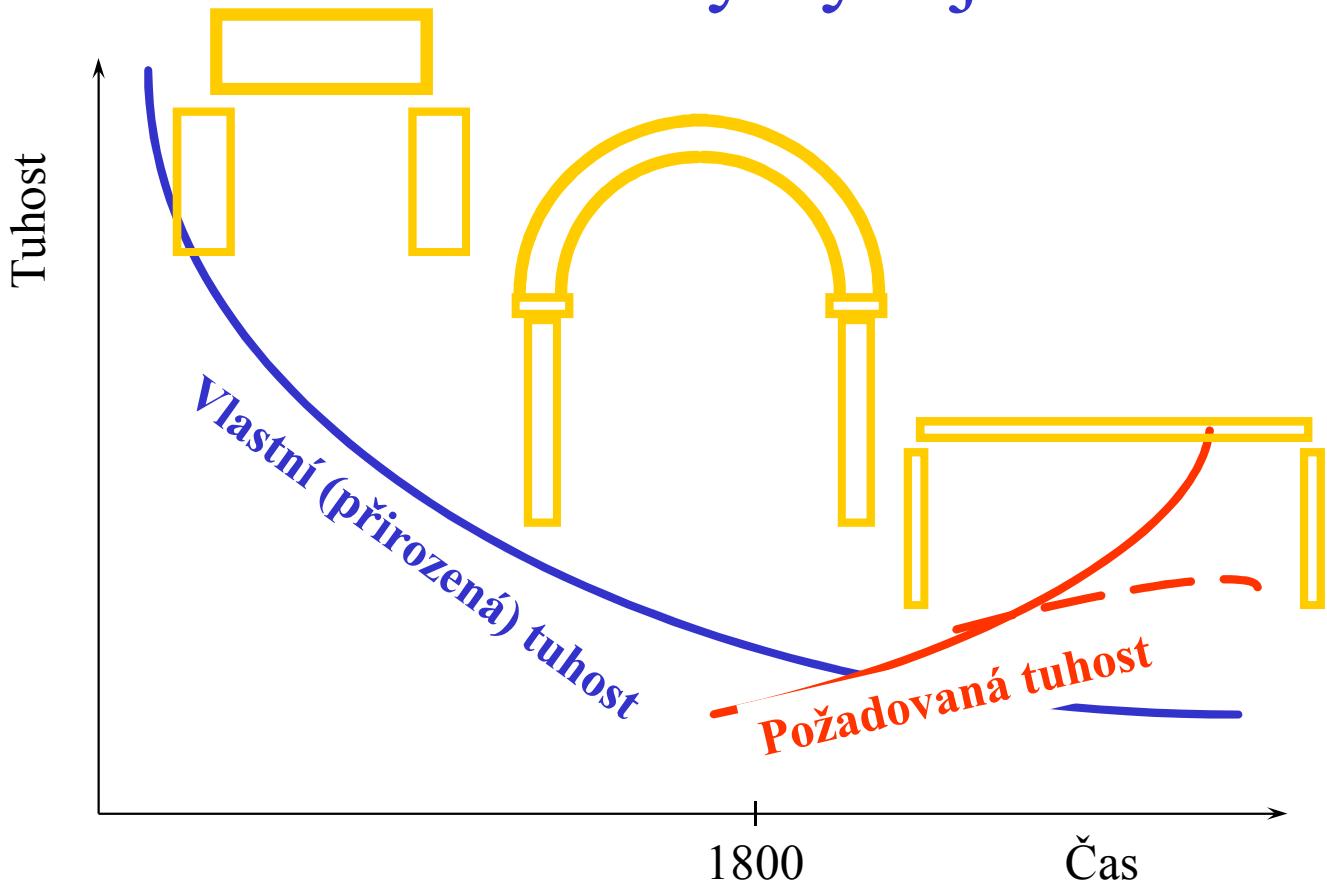
Nedostatečná tuhost přispěla ke zřícení



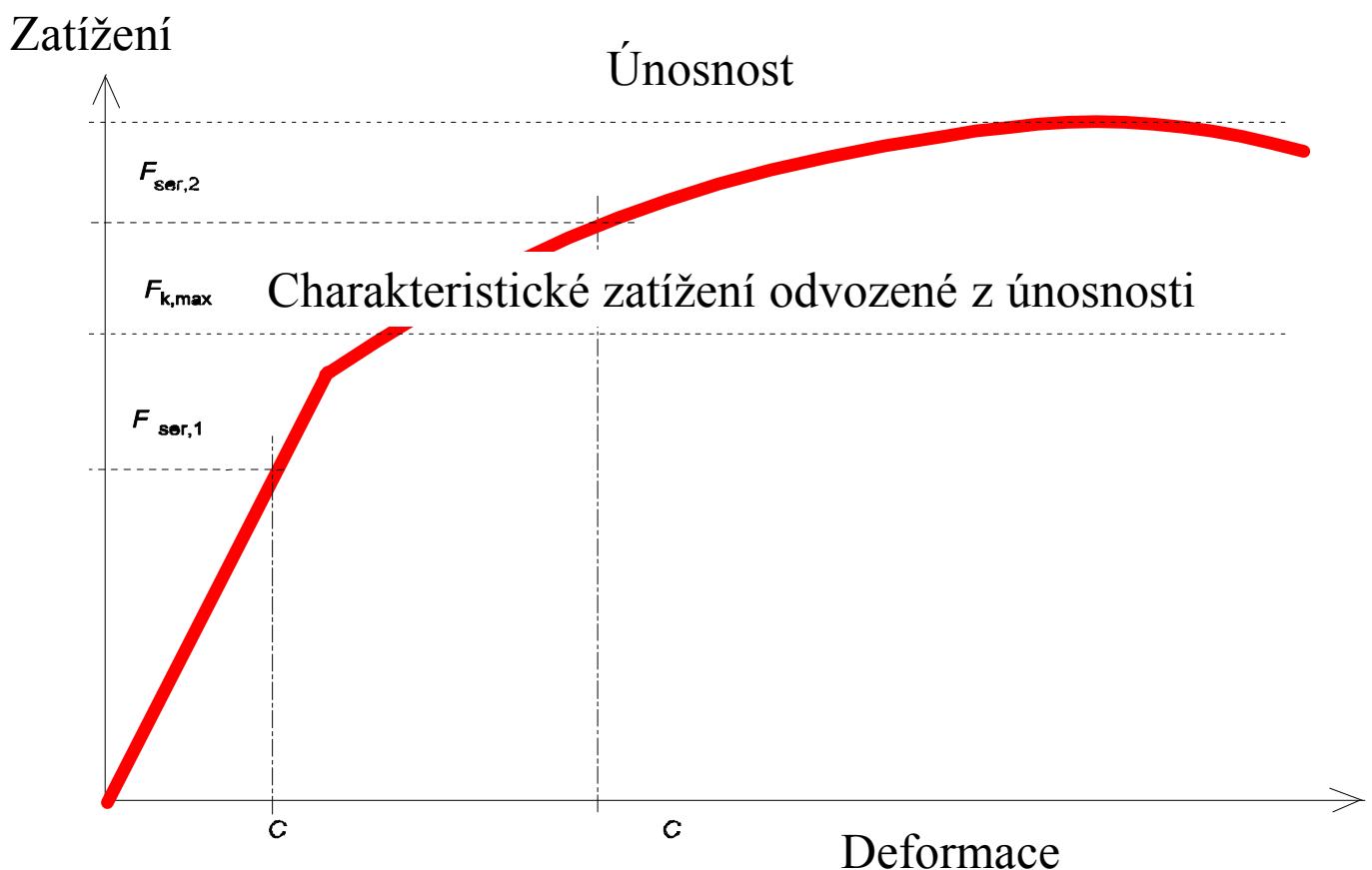
Failure zone



Historický vývoj



Mezní stavy únosnosti a použitelnosti



Použitelnost

Obvyklé mezní stavy použitelnosti betonových konstrukcí:

- mezní stav napětí z hlediska podmínek použitelnosti,
- mezní stav trhlin,
- mezní stav přetvoření.

$$C \geq E_d$$

je potřebné definovat

- omezující kritéria
- návrhové hodnoty zatížení, které se budou aplikovat
- návrhové vlastnosti materiálů
- model chování (výpočetní model)

Kombinace zatížení

Při výpočtu mezních stavů použitelnosti se uplatňují následující kombinace, které závisí na povaze dominantního zatížení:

- kvazistálá kombinace

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (1)$$

- častá kombinace

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

- výjimečná kombinace

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3)$$

Omezení napětí

EC2 předepisuje omezení napětí pro:

- **Tlaková napětí v betonu.**

Nadměrné hodnoty tlakových napětí v betonu mohou v provozním stavu na konstrukci vyvolat:

- vznik podélných trhlin,
- rozvoj mikrotrhlin v betonu,
- vyšší hodnoty dotvarování.

Tyto jevy mohou vést ke vzniku takových stavů, které znemožní používání konstrukce.

- **Tahová napětí ve výztuži.**

Cílem omezení napjatosti výztuže je zamezení vzniku nadměrného nepružného přetvoření výztuže (a tím i celého prvku) a zamezení vzniku širokých, trvale otevřených trhlin v betonu.

Omezení napětí

V běžných případech není třeba posuzovat, pokud jsou splněny

- požadavky EC2 na mezní stav únosnosti

- požadavky EC2 na minimální vyztužení

- konstrukční zásady

$$\sigma_s \leq k f_{yk} \quad \begin{array}{l} \text{pro napětí od účinků charakteristické kombinace zatížení } k = 0,8 \\ \text{pro napětí od účinků vynucených přetvoření } k = 1 \end{array}$$

$$\sigma_c \leq k f_{ck} \quad \text{pro omezení tlakových napětí v betonu } k = 0,6$$

$$\quad \quad \quad \text{pro omezení napětí z hlediska nebezpečí dotvarování } k = 0,45$$

Mezní stav trhlin

EC2 vychází ze skutečnosti, že:

- není možné přesně stanovit šířku trhliny (zejména s ohledem na rozptyl tahové pevnosti betonu a soudržnost betonu a výzvuze) pomocí jednoduchých vztahů
- znalost přesné šířky trhliny není pro trvanlivost betonové konstrukce významná a proto EC2 považuje za účelnější stanovit zásady uspořádání výzvuze pro zamezení vzniku širokých trhlin než komplikovaně stanovit šířku trhliny výpočtem.

Mezní šířka trhliny

| Třídy | Železobet prvky | Předpjaté prvky |
|----------------------------|------------------|------------------|
| | Kvazistálá komb. | Častá komb. |
| X0, XC1 | 0,4 ¹ | 0,2 |
| XC2, XC3, XC4 | | 0,2 ² |
| XD1, XD2, XS1, XS2, XS3 | 0,3 | Dekomprese |

$$w_{cal} < w_{lim}$$

Kontrola trhlin bez přímého výpočtu

Požaduje se minimální procento využitění

Pro uvažované napětí ve výzvaze se dodrží maximální průměr výzvaze nebo maximální vzdálenost výzvaze

| Steel stress* [MPa] | Maximum bar size [mm] | | |
|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | w _k =0,4 mm | w _k =0,3 mm | w _k =0,2 mm |
| 160 | 40 | 32 | 25 |
| 200 | 32 | 25 | 16 |
| 240 | 20 | 16 | 12 |
| 280 | 16 | 12 | 8 |
| 320 | 12 | 10 | 6 |
| 360 | 10 | 8 | 5 |
| 400 | 8 | 6 | 4 |
| 450 | 6 | 5 | - |

Trhliny a průhyb konstrukcí ovlivňuje

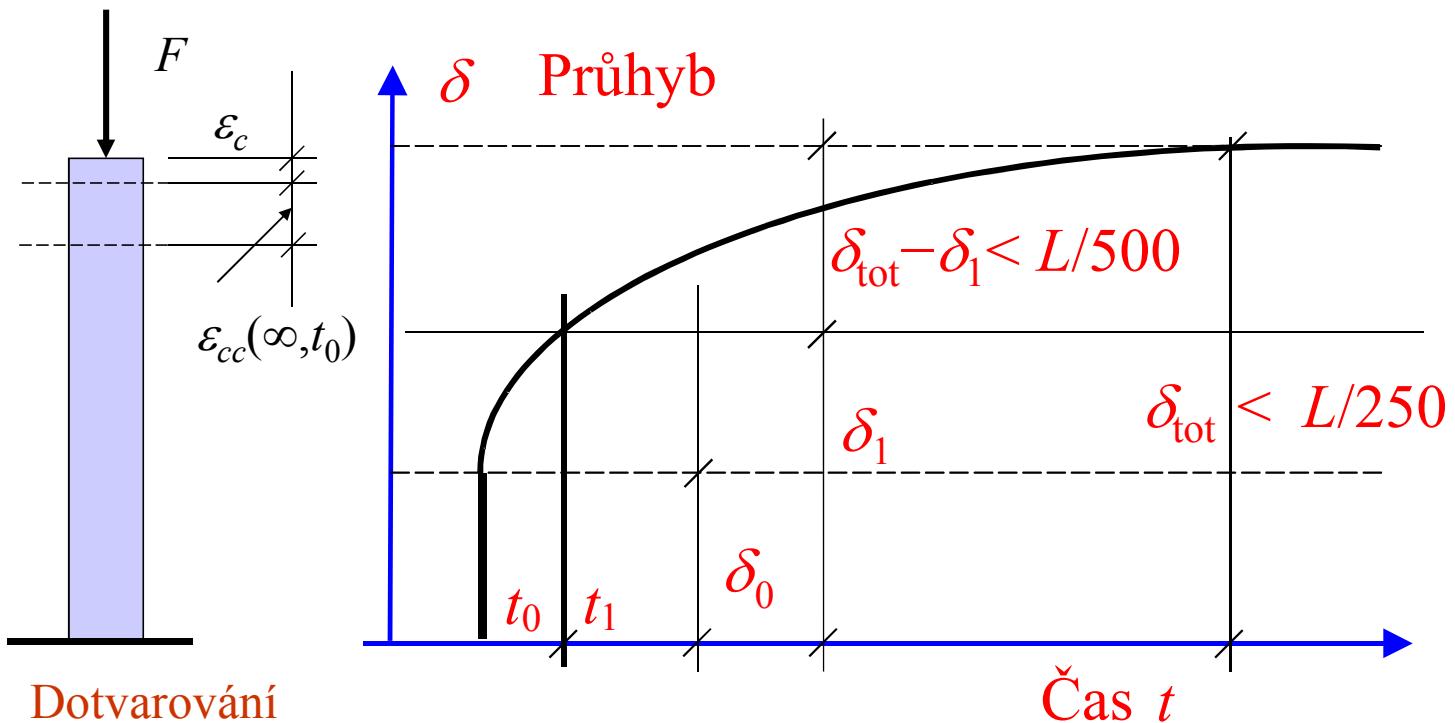
- funkční způsobilost za provozních podmínek
- pohodlí uživatelů
- vzhled konstrukce



Základní kritéria pro průhyby

- - kritérium obecné použitelnosti:
průhyb při kvazistálém zatížení nemá překročit $1/250$ rozpětí. Pro omezení průhybu může být použito nadvýšení; velikost nadvýšení bednění by neměla překročit $1/250$ rozpětí.
- - kritérium průhybu po zabudování prvku:
průhyb po zabudování (provedení) prvku by neměl přestoupit hodnotu $1/500$ rozpětí při kvazistálé kombinaci zatížení. Ostatní omezení by měla být uvažována v závislosti na náchylnosti k porušení připojených prvků.

Základní kritéria pro průhyby



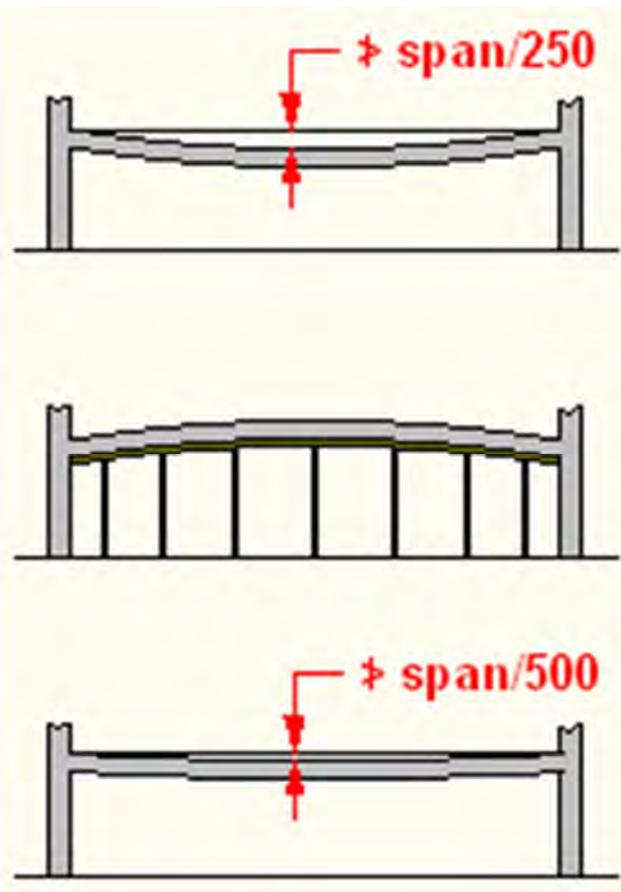
Dotvarování způsobuje pozvolný nárůst trvalých deformací (průhybů) při dlouhodobě působícím zatížení

Maximální průhyby

Maximální celkový průhyb L/250

Průhyb lze snížit nadvýšením,
avšak menším než L/250

Maximální průhyb po zabudování
nenosných prvků (příček, dveří)
L/500



Výpočet průhybu

Efektivního modulu pružnosti betonu:

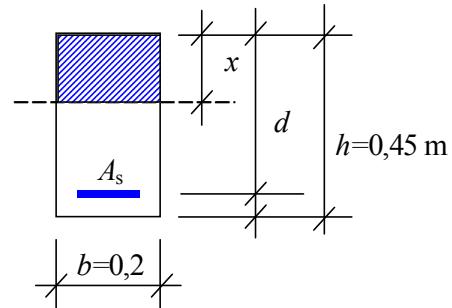
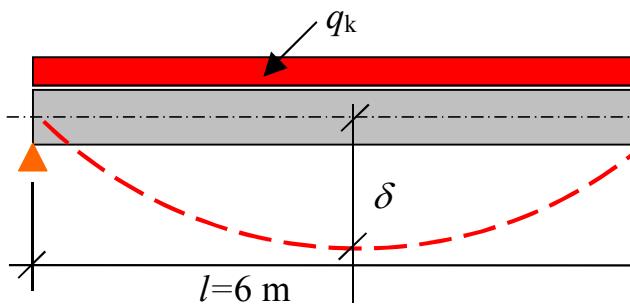
$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_o)}$$

Křivost od smršťování

$$\frac{1}{r_{cs}} = \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S}{I} \quad \alpha_e = E_s / E_{c,eff}$$

ε_{cs} je poměrné přetvoření betonu od smršťování,
 S je statický moment průřezové plochy výzvuže k těžišti průřezu

Příklad výpočtu průhybu



| | | | | |
|-----------------------|--|------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Efektivní modul | $E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_o)}$ | $\alpha_e = E_s / E_{c,eff}$ | $E_{c,eff} = 7500$ | $\alpha, e = 26,66667$ |
| Dlouhodobý průhyb | | $\delta_c = 0,017778$ | $\delta_{mezní} = 0,024$ | |
| Křivosť od smršťování | $\frac{1}{r_{cs}} = \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S}{I}$ | $1/r_{cs} = 0,001134$ | | |
| Průhyb od smršťování | | $\delta_s = 0,005103$ | | |
| Celkový průhyb | | $\delta_{tot} = 0,022881$ | $\delta_{tot} < \delta_{tot}?$ | PRAVDA |

Ověření průhybů

Ověření mezního stavu přetvoření může být provedeno:

- bez výpočtu přetvoření, používají se jednodušší metody založené např. na ověření štíhlosti prvku,
- výpočtem přetvoření a srovnáním vypočtených hodnot s přípustnými limitními hodnotami.

Omezující poměr rozpětí a účinné výšky l/d

Průhyb není nutno počítat pokud $(l/d) < \text{omezující } (l/d)$

Omezující l/d

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1,5 \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2 \sqrt{f_{ck}} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{3/2} \right] \quad \text{pokud } \rho \leq \rho_0 \quad (7.16.a)$$

pro $\rho = \rho_0$ $\frac{l}{d} = K(11 + 1,5 \sqrt{f_{ck}})$

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1,5 \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right] \quad \text{pokud } \rho > \rho_0 \quad (7.16.b)$$

kde l/d je mezní poměr rozpětí k účinné výšce;;

K součinitel, kterým se zohledňují různé nosné systémy;

ρ_0 referenční stupeň vyztužení $\rho_0 = \sqrt{f_{ck}} 10^{-3}$; ($\sim 0,022 = 2,2\%$)

ρ požadovaný stupeň vyztužení tahovou výztuží ve středu rozpětí (u konzoly ve veknutí) na ohybový moment vyvozený návrhovým zatížením;

ρ' požadovaný stupeň vyztužení tlakovou výztuží ve středu rozpětí (u konzoly ve veknutí) na ohybový moment vyvozený návrhovým zatížením;

f_{ck} v jednotkách MPa.

Omezující poměr rozpětí k účinné výšce l/d

| Nosná soustava | K | Silně namáhaný beton $\rho \geq 1,5\%$ | Slabě namáhaný beton $\rho = 0,5\%$ |
|---|-----|---|--|
| prostě podepřený nosník, prostě podepřená deska nosná v jednom nebo ve dvou směrech krajní pole spojitého nosníku nebo spojité desky nosné v jednom směru nebo desky nosné ve dvou směrech spojité v delší straně | 1,0 | 14 | 20 |
| vnitřní pole nosníku nebo desky nosné v jednom směru nebo desky nosné ve dvou směrech | 1,3 | 18 | 26 |
| deska lokálně podepřená (rozhoduje delší rozpětí) | 1,5 | 20 | 30 |
| konzola | 1,2 | 17 | 24 |
| | 0,4 | 6 | 8 |

POZNÁMKA Uvedené hodnoty lze považovat obecně za konzervativní; výpočtem lze často prokázat, že jsou možné štíhlejší prvky.

POZNÁMKA U desek nosných ve dvou směrech se má posouzení provést pro kratší rozpětí. U desek lokálně podepřených se při posouzení má uvažovat delší rozpětí.

POZNÁMKA Uvedené mezní hodnoty pro lokálně podepřené desky odpovídají mírnějšímu omezení než je průhyb uprostřed pole 1/250 rozpětí vztažený ke sloupům. Zkušenosti ukazují, že toto omezení je vyhovující.

Otázky ke zkoušce

Mezní stavy použitelnosti

Kombinace zatížení pro mezní stav použitelnosti

Omezení šířky trhlin

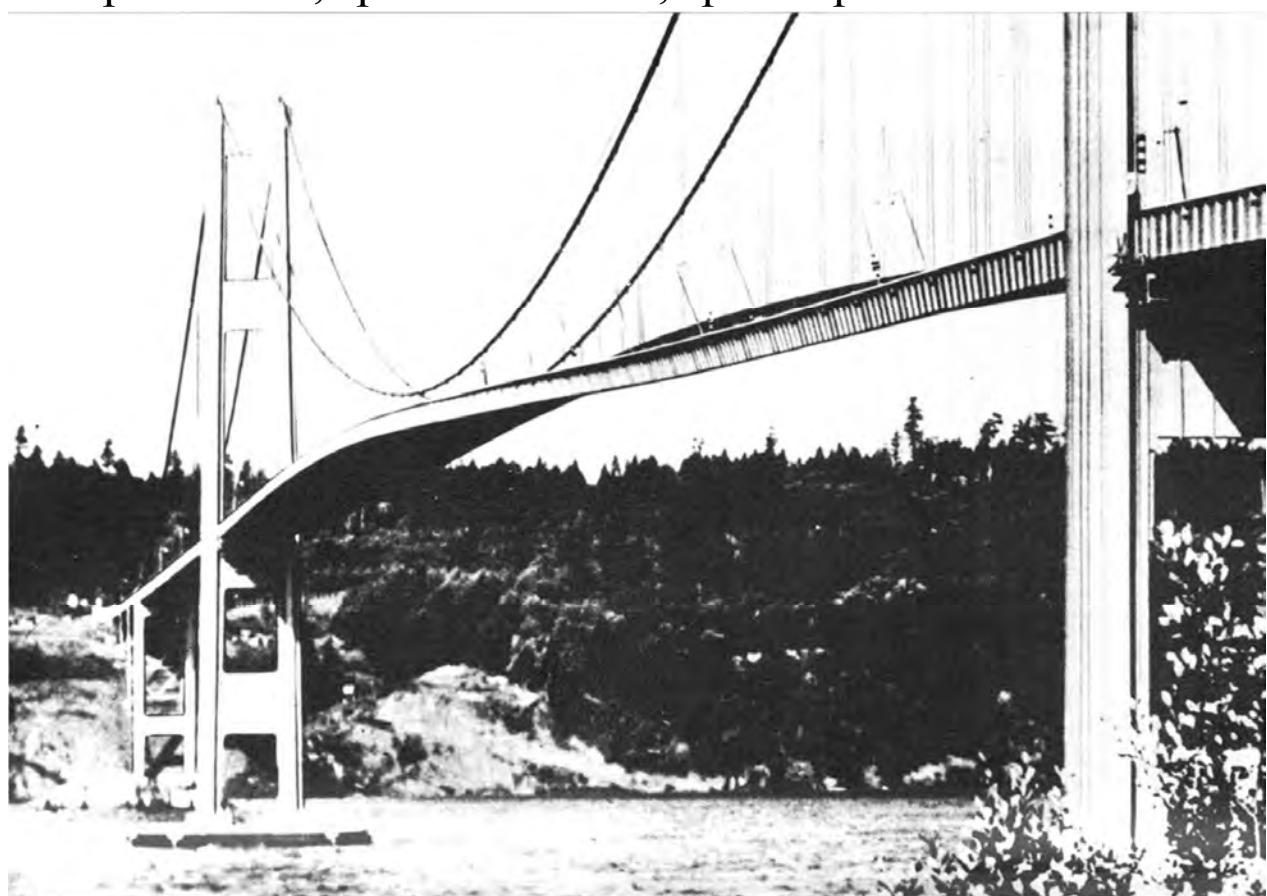
Omezení průhybů

Omezující poměr l/d

Výpočet průhybů

Tacoma Narrows Bridge 1940

span 853 m, span/width = 72, span/depth = 350



Maximální průměr výztuže

Pro uvažované napětí ve výztuži se dodrží maximální průměr výztuže

| Steel stress * [MPa] | Maximum bar spacing [mm] | | |
|----------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| | w _k =0,4 mm | w _k =0,3 mm | w _k =0,2 mm |
| 160 | 300 | 300 | 200 |
| 200 | 300 | 250 | 150 |
| 240 | 250 | 200 | 100 |
| 280 | 200 | 150 | 50 |
| 320 | 150 | 100 | - |
| 360 | 100 | 50 | - |

Omezující poměr l/d

Betonové desky a nosníky:

$$\frac{l}{d} \leq \lambda_d \quad \lambda_d = K_{c1} \cdot K_{c2} \cdot K_{c3} \cdot \lambda_{dtab} ,$$

K_{c1} je součinitel závislý na tvaru průřezu ($K_{c1} = 0,8$ pro T průřezy s poměrem šířky příruby k šířce žebra větší než 3; $K_{c1} = 1,0$ v ostatních případech),

K_{c2} je součinitel závislý na rozpětí ($K_{c2} = 7/l$ pro $l > 7,0$ m; $K_{c2} = 1,0$ pro $l \leq 7,0$ m),

$$K_{c3} = \frac{310}{\rho_s} \doteq \frac{500}{f_{yk}} \frac{A_{s,prov}}{A_{s,req}}$$

je součinitel napětí tahové výztuže σ_s v extrémně namáhaném průřezu při časté kombinaci provozního zatížení,

Omezující poměr l/d

| Nosná konstrukce | K | $\rho = 1,5 \%$ | $\rho = 0,5 \%$ |
|---|-----|-----------------|-----------------|
| Prostě podepřený nosník, prostě podepřená deska (nosná v jednom a ve dvou směrech) | 1,0 | 14 | 20 |
| Krajní pole spojitého nosníku nebo desky nosné v jednom směru, krajní pole desky nosné ve dvou směrech, spojité ve směru kratšího rozpětí | 1,3 | 18 | 26 |
| Vnitřní pole spojitého nosníku nebo desky nosné v jednom nebo ve dvou směrech | 1,5 | 20 | 30 |
| Deska lokálně podepřená | 1,2 | 17 | 24 |
| Konzola | 0,4 | 6 | 8 |

Omezující poměr l/d

