

Vliv relaxace betonu na hodnotu vnitřních sil od sedání podpěry mostu

Lenka Dohnalová

ČVUT, fakulta stavební
katedra stavební mechaniky
zimní semestr 2017/2018

Odborné vedení: prof. Ing. Milan Jirásek, DrSc.

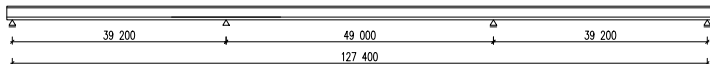
Zadání

Cílem práce je srovnání časového vývoje vnitřních sil na mostní konstrukci od postupného klesání jedné z podpěr a to pro pružný výpočet a pro výpočet podle viskoelastivity, kdy dochází k postupnému snižování vnitřních sil v důsledku relaxace.

Pro viskoelastický výpočet byly vybrány dva modely popisující dotvarování betonu:

- Model B3
- *fib* Model 2010

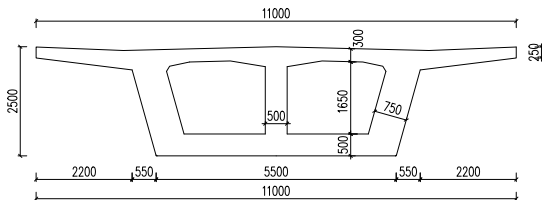
Mostní konstrukce



Obr.: Základní schéma mostní konstrukce

Konstrukce, na které jsou vnitřní síly počítány, je silniční trémový komorový most o třech polích z předpjatého betonu stojící nad místem ražby tunelu.

Mostní konstrukce



Obr.: Příčný řez konstrukcí mostu

Dvoukomorový příčný řez byl zjednodušeně uvažován v celé délce mostní konstrukce konstantní.

$$A = 9,879 \text{ m}^2$$

$$o = 40,0 \text{ m}$$

$$I = 7,461 \text{ m}^4$$

Betonová směs

Výpočet byl proveden pro beton C35/45 XF2 dle receptury, kterou ochotně poskytla společnost ZAPA beton.

- cement (Radotín) CEM I 42,5 R v množství 420 kg/m^3
- kamenivo (Votice - granit), celkový obsah 1730 kg/m^3
- obsah vody 170 kg/m^3
- střední hodnota pevnosti v tlaku ve stáří 28 dní 55 MPa

Čerstvý beton byl po uložení ošetřován standardním způsobem po dobu 5 dní.

Vlhkost prostředí je ve výpočtech uvažována hodnotou 70 %.

Hodnoty poklesů jedné z podpěr

Vývoj poklesu jedné z mostních podpěr je uvažován dle skutečně naměřených hodnot při ražbě tunelového komplexu Blanka, konkrétně z extenzometrického měření na Brusnickém tunelu ve vzdálenosti 200 m od portálu v Myslbekově ulici za období od 4. ledna 2010 do 7. června 2010 (151 dní).

Byl řešen případ ražby tunelu ve stáří mostu 10 let, nicméně výpočty jsou připraveny tak, aby byly použitelné pro sedání podpory v libovolném stáří mostní konstrukce.

Poklesy byly aplikovány nejprve na mostní opěru, poté na mostní pilíř.

Protokol z extenzometrického měření

Základní měření: 4.1.2010

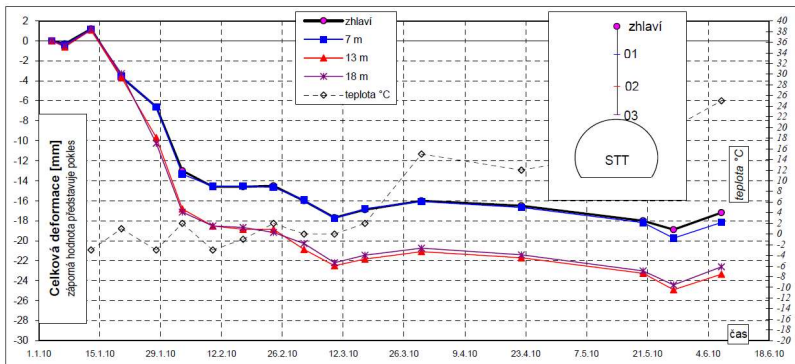
STT

Extenzometr 50.15.008

Celkový pokles terénu a kotev

Výsledky: stav k 7.6.2010

pokles [mm]: terén -17,20 kotva č. 1 -18,17 kotva č. 2 -23,35 kotva č. 3 -22,61



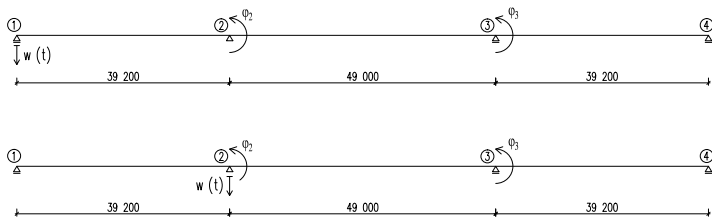
Protokol z extenzometrického měření

Pokles terénu a kotev [mm] vzhledem
 k nulovému čtení z 4.1.2010

Označení a hloubka kotvy [m]	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
terén - 0 m	17.2.10	24.2.10	3.3.10	10.3.10	17.3.10	30.3.10	22.4.10	20.5.10	27.5.10	7.6.10
	-14,60	-14,50	-16,00	-17,70	-16,90	-16,00	-16,50	-18,00	-18,90	-17,20
kotva 1 - 7 m	-14,55	-14,66	-15,93	-17,79	-16,78	-16,09	-16,68	-18,20	-19,75	-18,17
kotva 2 - 13 m	-18,85	-18,86	-20,88	-22,50	-21,83	-21,10	-21,71	-23,27	-24,91	-23,35
kotva 3 - 18 m	-18,68	-19,18	-20,28	-22,20	-21,45	-20,74	-21,41	-23,03	-24,42	-22,61

Řešení ZDM

Výpočet vnitřních sil byl proveden zjednodušenou deformační metodou (ZDM).



Obr.: Schémata pro řešení ZDM

Řešení podle principu pružnosti

V případě pružného výpočtu dostáváme pro moment ve styčnicku 2 výraz

$$M_2 = c \cdot E(t) \cdot \bar{w}(t),$$

přičemž c je vždy konstantní výraz, jehož hodnota nezávisí na čase ani na hodnotě poklesu.

Výpočet zahrnující vliv viskoelasticity

V případě viskoelastického výpočtu lze předešlý vztah přepsat jako

$$M_2(t) = c \cdot \mathcal{R}[\bar{w}(t)],$$

kde výraz $\mathcal{R}[\bar{w}(t)]$ označuje relaxační operátor aplikovaný na časový průběh sedání.

Výpočet zahrnující vliv viskoelasticity

Díky tomu, že relaxační operátor \mathcal{R} a operátor poddajnosti \mathcal{J} jsou vzájemně inverzní můžeme vyjít ze vztahu

$$\bar{w}(t) = \frac{1}{c} \mathcal{J}[M_2(t)],$$

což po rozepsání je

$$\bar{w}(t) = \frac{1}{c} J(t, t_1)M_2(t_1) + \frac{1}{c} \int_{t_1}^t J(t, t')\dot{M}_2(t')dt'.$$

Průběh klesání je spojitý, proto vztah můžeme zjednodušit na

$$\bar{w}(t) = \frac{1}{c} \int_{t_1}^t J(t, t')\dot{M}_2(t')dt'.$$

Výpočet zahrnující vliv viskoelasticity

- časový průběh poklesu rozdělíme na malé intervaly
- časovou derivaci \dot{M}_2 nahradíme aproximačním vztahem
- integrál aproximujeme sumou, využijeme lichoběžníkového pravidla

Díky tomu je v každém kroku výpočtu vždy jen jedna neznámá, hodnota momentu $M_2(t_i)$.

Výpočet zahrnující vliv viskoelasticity

První krok výpočtu:

$$\bar{w}(t_1) = 0 \quad \Rightarrow \quad M_2(t_1) = 0$$

Druhý krok výpočtu:

$$\bar{w}(t_2) = \frac{1}{c} \frac{M_2(t_2) - M_2(t_1)}{\Delta t} \cdot \frac{J(t_2, t_2) + J(t_2, t_1)}{2} \Delta t,$$

$$\Rightarrow M_2(t_2) = M_2(t_1) + \frac{2c}{J(t_2, t_2) + J(t_2, t_1)} \cdot \bar{w}(t_2)$$

Výpočet zahrnující vliv viskoelasticity

Pro další kroky výpočtu vztah pro hodnotu neznámé $M_2(t_i)$ zobecníme tak, aby byl vhodný pro výpočet v Matlabu.

$$M_2(t_i) = M_2(t_{i-1}) + \frac{2c \cdot \bar{w}(t_i)}{J(t_i, t_i) + J(t_i, t_{i-1})} - \sum_{j=2}^{i-1} \frac{(M_2(t_j) - M_2(t_{j-1})) \cdot (J(t_i, t_j) + J(t_i, t_{j-1}))}{J(t_i, t_i) + J(t_i, t_{i-1})}$$

B3 - stručný popis modelu

Jedná se o model popisující dlouhodobé chování betonu, který byl navržen profesorem Z. P. Bažantem.

Model B3 zahrnuje vliv dotvarování a smršťování, včetně jejich kombinace.

Funkce poddajnosti má tvar

$$J(t, t') = q_1 + q_2 Q(t, t') + q_3 \ln[1 + (t - t')^n] + q_4 \ln\left(\frac{t}{t'}\right) + J_d(t, t'),$$

kde q_1 je inverzní asymptotický modul pružnosti,

q_2 , q_3 a q_4 jsou konstanty zohledňující vliv základního dotvarování, závisí na vlastnostech betonu,

$J_d(t, t')$ je funkce zahrnující dodatečné dotvarování vlivem vysychání.

Hodnota $E(t)$ pro srovnávací pružný výpočet

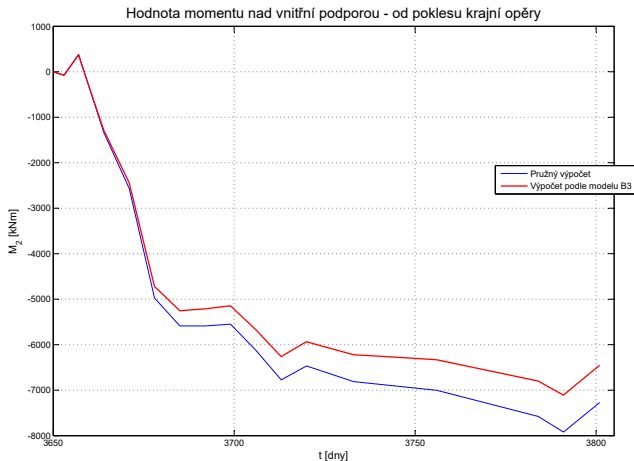
Modul pružnosti v konkrétním čase je u tohoto modelu definován jako převrácená hodnota funkce poddajnosti pro délku působení zatížení 0,01 dne, tedy

$$E(t) = \frac{1}{J(t, t+0,01)}.$$

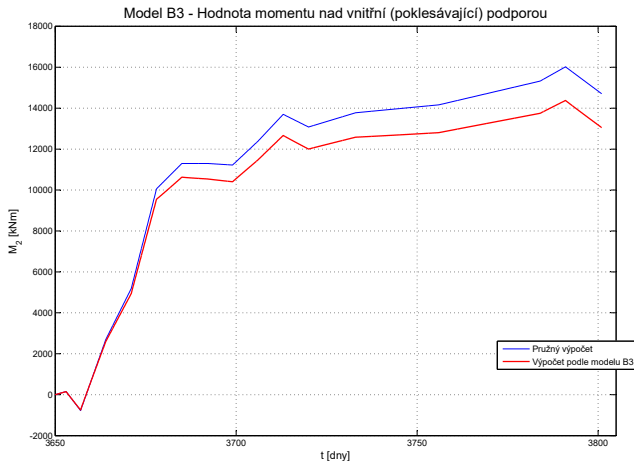
Pro použitý beton ve stáří $t = 3650$ dní je jeho hodnota

$$E(t) = 54,56 \cdot 10^3 \text{ MPa}.$$

Graf pro případ sedání mostní opěry



Graf pro případ sedání vnitřního pilíře



Srovnání výsledků z pružného a viskoelastického výpočtu

Pro pokles 17,2 mm na konci průběhu sedání dostáváme pro případ sedání krajní opěry hodnoty momentu

$$M_{2,B3} = -6,4538 \text{ MNm},$$

$$M_{2,el} = -7,2718 \text{ MNm},$$

pro případ sedání vnitřního pilíře potom hodnoty

$$M_{2,B3} = 13,0511 \text{ MNm}$$

$$M_{2,el} = 14,7052 \text{ MNm}.$$

Během postupného klesání se tedy při výpočtu podle modelu B3 hodnota vnitřních sil vlivem relaxace sníží zhruba o 11,2 % ve srovnání s výpočtem provedeným podle principu pružnosti.

fib Model 2010 - stručný popis

Tento model pro dotvarování vychází ze staršího modelu CEB, jedná se vlastně o jeho úpravu ve výpočtu základního dotvarování a dotvarování od vlivu vysychání.

Funkce poddajnosti pro *fib* Model 2010 má tvar stejný jako u svého předchůdce CEB Modelu

$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} + \frac{\varphi_{28}(t, t')}{E_{28}},$$

rozdíl je pouze ve vztahu pro výpočet funkce $\varphi_{28}(t, t')$.

Hodnota $E(t)$ pro srovnávací pružný výpočet

Modul pružnosti závisí kromě střední tlakové pevnosti (\bar{f}_c) také na typu použitého kameniva (α_E) a na třídě cementu včetně rychlosti počátečního nárůstu pevnosti (s). Je definován jako

$$E(t) = E_{28} \sqrt{\exp\left(s\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right)},$$

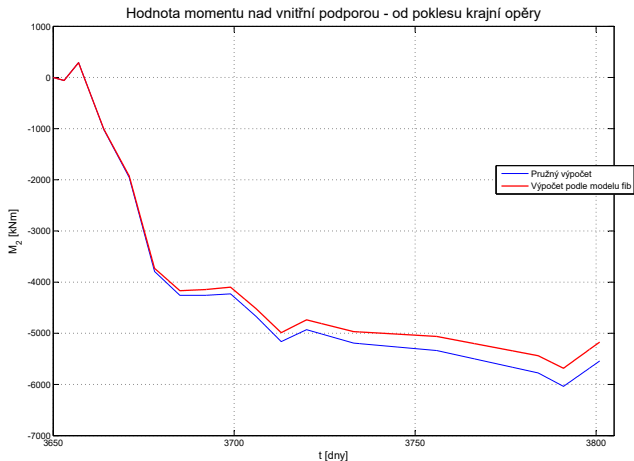
kde

$$E_{28} = 21,5 \text{ GPa} \cdot \alpha_E \left(\frac{\bar{f}_c}{10 \text{ MPa}}\right)^{1/3}.$$

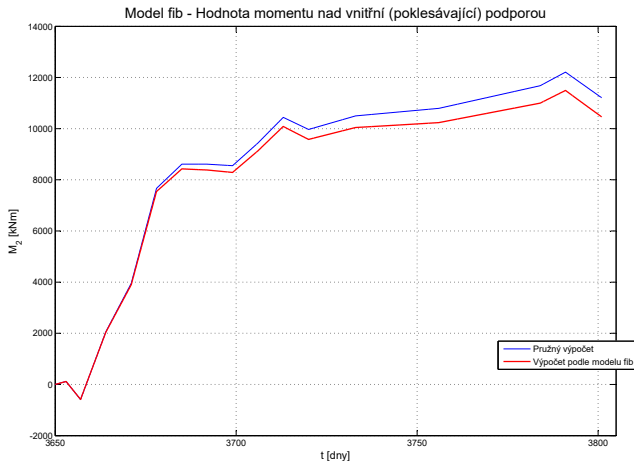
Pro použitý beton ve stáří 10 let je pro srovnávací pružný výpočet u *fib* Modelu 2010 hodnota modulu pružnosti

$$E(t) = 41,58 \cdot 10^3 \text{ MPa}.$$

Graf pro případ sedání mostní opěry



Graf pro případ sedání vnitřního pilíře



Srovnání výsledků z pružného a viskoelastického výpočtu

Pro pokles 17,2 mm na konci průběhu sedání krajní opěry dostáváme následující hodnoty momentu

$$M_{2,fib} = -5,1723 \text{ MNm}$$

$$M_{2,el} = -5,5417 \text{ MNm,}$$

pro případ sedání vnitřního pilíře potom hodnoty

$$M_{2,fib} = 10,4596 \text{ MNm}$$

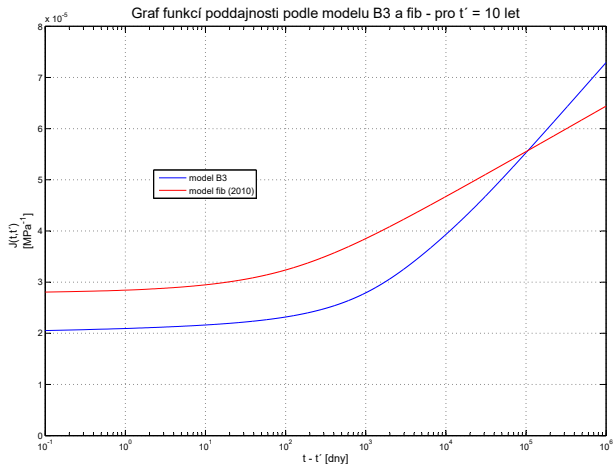
$$M_{2,el} = 11,2065 \text{ MNm.}$$

Při výpočtu s použitím *fib* Modelu 2010 je hodnota vnitřních sil vlivem relaxace nižší zhruba o 6,7 % oproti pružnému výpočtu.

Posouzení vlivu viskoelasticity na hodnoty vnitřních sil

- u obou zkoumaných modelů je zřejmý příznivý vliv relaxace při postupném zatěžování poklesem podpory
- ve stáří betonu 10 let je vliv relaxace výraznější u modelu B3 než u *fib* Modelu 2010
- zásadnější vliv na hodnotu vnitřních sil má vlastní volba modelu dotvarování, potažmo způsob stanovení modulu pružnosti $E(t)$

Srovnání funkcí poddajnosti obou modelů



Zhodnocení vytvořeného programu

- program je vhodný jen pro relativně velký časový krok (cca 1,5 hodiny)
- při výraznějším zkrácení délky kroku dochází k značnému nárůstu délky výpočtu
- použitelný pro libovolné stáří mostu v době sedání, model se stárnutím

Děkuji za pozornost.