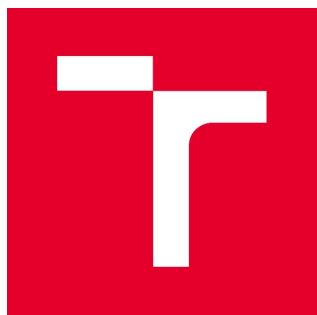




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

VLIV ZMĚNY NÁHRADNÍ TLOUŠTKY PRŮŘEZU
NA CHOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

THE EFFECTIVE CROSS-SECTION THICKNESS AND ITS EFFECT ON THE BEHAVIOR
OF CONCRETE CONSTRUCTIONS

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. et Ing. Radovan Hofírek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. MILOŠ ZICH, Ph.D.

BRNO 2020

Bibliografická citace VŠKP

Ing. et Ing. Radovan Hofírek. *VLIV ZMĚNY NÁHRADNÍ TLOUŠŤKY PRŮŘEZU NA CHOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ*. Brno, 2020. 238 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.

OBSAH:

1	ÚVOD	4
2	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	4
2.1	ÚVOD	4
2.2	DIFERENČNÍ DOTVAROVÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ.....	5
2.3	VÝVOJ TEORIÍ A NORMOVÝCH PŘEDPISŮ PRO DOTVAROVÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ.....	6
2.4	DOPOSUD ZÍSKANÁ EXPERIMENTÁLNÍ DATA.....	7
3	CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE.....	7
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	8
4.1	DLOUHODOBÉ MĚŘENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH TĚLES V DEFINOVANÉM LABORATORNÍM PROSTŘEDÍ.....	8
4.2	DLOUHODOBÉ MĚŘENÍ REÁLNÉ MOSTNÍ KONSTRUKCE U OBCE OPATOVICE N/L.....	9
4.3	DLOUHODOBÉ MĚŘENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH TĚLES V REÁLNÉM PROSTŘEDÍ.....	11
4.4	ZÁVĚR K EXPERIMENTÁLNÍMU MĚŘENÍ	12
5	NUMERICKÁ ANALÝZA VLIVU ZMĚNY NÁHRADNÍ TLOUŠŤKY PRŮŘEZU	13
5.1	ZOHLEDNĚNÍ VLIVU ZMĚNY NÁHRADNÍ TLOUŠŤKY PRŮŘEZU „METODOU POSUNU“	13
5.2	ZOHLEDNĚNÍ VLIVU ZMĚNY NÁHRADNÍ TLOUŠŤKY PRŮŘEZU „MATEMATICKÝMI VZTAHY“ PRO MODEL B4	14
6	APLIKACE ZPŘESNĚNÝCH ROVNIC SMRŠŤOVÁNÍ A DOTVAROVÁNÍ NA PROSTÉM NOSNÍKU.....	16
6.1	VARIANTY VÝPOČTOVÉHO MODELU:.....	17
6.2	VLIV ZMĚNY NÁHRADNÍ TLOUŠŤKY PRŮŘEZU:	17
7	APLIKACE ZPŘESNĚNÝCH ROVNIC SMRŠŤOVÁNÍ A DOTVAROVÁNÍ DO VÝPOČTOVÉHO MODELU MOSTU V OPATOVICÍCH NAD LABEM	19
7.1	VÝPOČTOVÝ MODEL - POPIS	19
7.2	MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY	20
7.2.1	Beton C35/45-XF2	20
7.2.2	Předpínací výztuž.....	20
7.3	HARMONOGRAM	20
7.4	VLIV SKRUŽE NA VÝPOČTOVÝ MODEL	21
7.5	VÝPOČTOVÉ MODELY ZOHLEDŇUJÍCÍ VLIV NÁHRADNÍ TLOUŠŤKY BETONU	21
7.6	VÝPOČET CELKOVÉHO PŘETVOŘENÍ	22
7.7	POROVNÁNÍ PŘETVOŘENÍ VÝPOČTOVÝCH MODELŮ A NAMĚŘENÍ.....	23
8	ZÁVĚR.....	23
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	26
10	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	27
11	STRUKTUROVANÝ ŽIVOTOPIS	29

1 Úvod

Pro reologické jevy (dotvarování a smršťování betonu) bylo vyvinuto množství teorií a výpočtových modelů. Tyto teorie se neustále zpřesňují ať už možnostmi výpočetní techniky, zkušenostmi z předchozích neúspěchů, či větším počtem měření na reálných a experimentálních konstrukcích. Současné reologické modely neumožňují ve svých předpisech zohlednit změnu vysychání průřezu, která běžně nastává u velkého množství konstrukcí např. položením izolace na povrch konstrukce, uložením betonu do vodního prostředí apod. A právě experimentální ověření a následné numerické ověření tohoto jevu je předmětem této práce.

2 Současný stav poznání

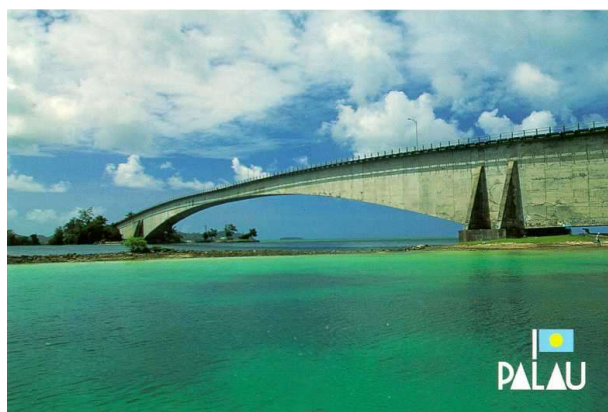
2.1 Úvod

Při statickém řešení konstrukce bývá nutné přijmout řadu předpokladů o statickém chování jednotlivých prvků i celé konstrukce. Mostní konstrukce překonávající velké vzdálenosti se budují po fázích (mostní estakády), nebo po segmentech (letmá betonáž), obr. 1. Komerové konstrukce se skládají z různě starého betonu, z různě tlustých stěn a desek, ty mají za následek nestejnoměrné vysychání průřezu, a tím i nestejnoměrné smršťování a dotvarování jednotlivých částí. Dochází k tzv. diferenčnímu dotvarování a smršťování, viz [1], [2], [3], které jsou současnou praxí zanedbávány a mohou být jednou z příčin podhodnocení dlouhodobých průhybů konstrukcí a mít závažný dopad na celkové chování konstrukcí, zejména dlouhodobých průhybů velkých mostů [4], obr. 2.

Dalším zanedbáním v predikci dotvarování a smršťování je uvažování jedné hodnoty náhradní tloušťky průřezu po celou životnost konstrukce. Mostní konstrukce (mostovky) jsou zaizolovány pomocí hydroizolačních asfaltových pásů a betonové nádrže na palivo například pomocí sklolaminátová výstelka [8]. V obou případech se hydroizolace aplikuje s několikaměsíčním zpožděním oproti vlastní výstavbě betonového průřezu. Konstrukce tedy část své životnosti vysychá celým povrchem a po položení izolace brání vysychání jednoho nebo více povrchů průřezu se změni charakter způsobu vysychání. Velikost náhradní tloušťky průřezu může mít značný vliv na chování celé konstrukce. Náhradní tloušťka průřezu popisuje, jak je daný průřez schopen vysychat. Výpočet závisí na poměru plochy průřezu k vysychajícímu obvodu. Správné určení reologických jevů je značně obtížné, neboť záleží na mnoha vstupních parametrech jako volba vodního součinitele, cementu, velikosti a druhu kameniva, dále pak na hydrometrických podmínkách prostředí, rozměrech prvku, vlivu teploty, druhu namáhání a způsobu ošetřování.



Obr. 1: Letmo betonovaná mostní konstrukce u obce Vepřek, převzato z [19]



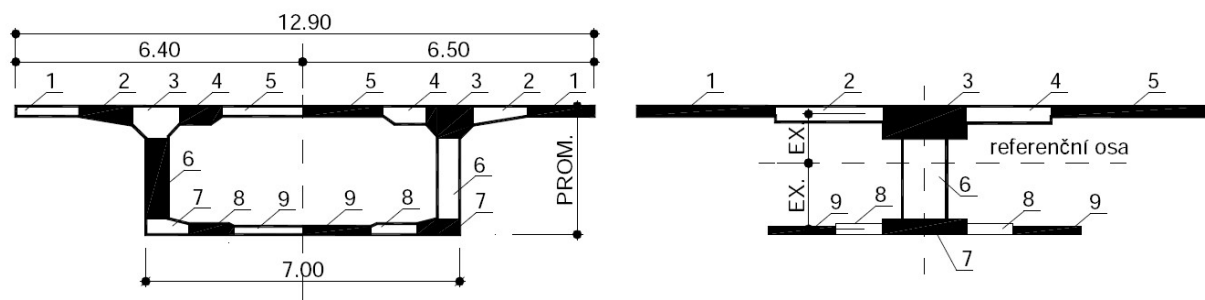
Obr. 2: Nadměrné deformace a následné zřícení mostu Koror-Babeldaob, převzato z [20]

Díky značné obtížnosti správné predikce reologických jevů je v současné době řada významných nebo inovativních mostních konstrukcí dlouhodobě sledována pomocí strunových tenzometrů [5], [6], [7]. Dlouhodobé sledování umožňuje porovnání reálné hodnoty sledovaných charakteristik s predikcí uvažovanou v projektu konstrukce, zpřesnění výpočetního modelu, a tak umožňuje včasné odhalení případných poruch.

Současné normové předpisy [9] a také výpočetní programy pro časovou analýzu konstrukcí tyto změny způsobu vysychání neumožňují zohlednit, což může být potencionálním zdrojem nepřesností statické analýzy. Existuje i poměrně málo experimentálních dat o tomto jevu a je třeba se tímto jevem důsledně zabývat experimentálně i numericky.

2.2 Diferenční dotvarování a smršťování

Diferenční dotvarování a smršťování je způsobeno nestejným vysycháním komorového průřezu vlivem různě tlustých stěn a desek, obr. 3, popř. použitím různých starých betonů. Pokud by horní deska, stěny, spodní deska působili samostatně, smršťování betonu v každém prvku vyvolá za určitý časový interval různé poměrné přetvoření. Deformace u tenkých prvků jsou výraznější a naopak.



Obr. 3: Příklad dělení komorového průřezu na jednotlivé desky, převzato z [2]

Bylo prokázáno [1], [3], že uvažováním modelů s diferenčním smršťováním a dotvarováním došlo k lepší shodě mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami průhybů. Diferenční smršťování nemá vliv na konečnou hodnotu průhybů, má ale vliv na jejich časový průběh. Velký vliv na výsledky má uvažování typu průřezu (s izolací horní desky nebo průřez bez izolace). Výsledky pro oba průřezy jsou často velice rozdílné a při nesprávném použití mohou vést k podcenění hodnot průhybů. U dělených modelů je nutné respektovat změnu náhradní tloušťky průřezu v důsledku položení izolace na horní povrch mostu. Bohužel zatím není k dispozici program, který by tuto změnu průřezu zohledňoval. Je tedy nutné mít dva výpočetní modely s různou náhradní tloušťkou průřezu.

2.3 Vývoj teorií a normových předpisů pro dotvarování a smršťování

Reologické vlastnosti jsou pozorovány již od druhé poloviny 19. století a postupně s vývojem betonového stavitelství se vyvíjí jednotlivé teorie (teorie zpožděné pružnosti, teorie stárnutí, kombinované teorie) a z nich normové předpisy, jako ČSN 73 6207, ČSN 73 1201, Model Code 1990, ČSN P ENV 1992-1-1, ČSN EN 1992-1-1, Model Code 2010, Model B3, ACI 209.2R, Model B4, dle nichž je možné počítat dotvarování a smršťování.

Z jednotlivých normových předpisů je zřejmý postupný vývoj od jednoduchých funkcí k sofistikovaným vztahům s mnoha koeficienty a proměnnými. Průběhy dotvarování a smršťování se pro jednotlivé normové předpisy značně liší, neboť výpočty jsou ovlivněny mnoha různými vstupními parametry.

Mezi nejvyspělejší a nejpropracovanější modely popisující dotvarování a smršťování betonu patří model prof. Bažanta B4 [11], publikovaný v 2015. Tato norma vychází z kombinované teorie, postihuje více faktorů ovlivňující smrštění a dotvarování jako stáří betonu, relativní vlhkost prostředí, rychlost hydratace cementu, vodní součinitel, průměrná pevnost betonu, obsah cementu vody a kameniva, ale především velikost prvku a s tím náhradní tloušťku průřezu.

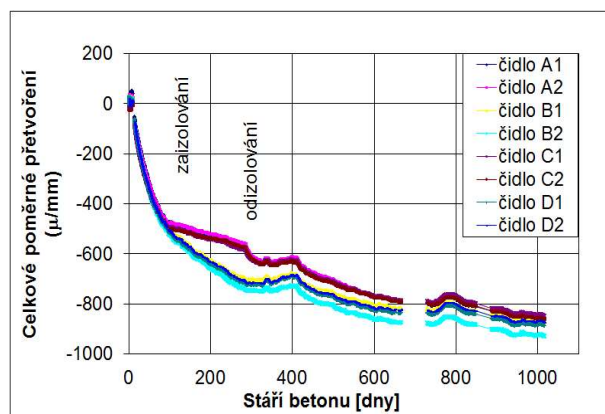
Pro následující výpočty byly vybrány dva nejnovější normové předpisy, a to Model Code 2010 [10] z roku 2010 a Model B4 [11] z roku 2015.

2.4 Doposud získaná experimentální data

V rámci dlouhodobého měření předpjatých nádrží v Loukově [8] byly vyrobeny 4 ks těles o rozměrech 400 x 400 x 200 mm určených pro sledování smršťování betonu. Před betonáží byly do středu každého tělesa zabudovány dva strunové tenzometry, vždy ve směru delších rozměrů. Po dobu 95 dní tělesa mohla volně vysychat celým povrchem. Poté byla dvě tělesa z pěti stran opatřena samolepící asfaltovou hydroizolací, obr. 4. Po 286 dnech byla izolace z těles odstraněna. Zbylá tělesa byla po celou dobu bez izolace, jedná se o referenční vzorky. Naměřené průběhy poměrného přetvoření jsou uvedeny na obr. 5.



Obr. 4: Těles v klimatizované laboratoři, horní tělesa s izolací, převzato z [18]



Obr. 5: Průběh poměrného přetvoření na jednotlivých čidlech, převzato z [18]

Experiment prokázal, že tělesa při ošetřování zvětšují svůj objem a po ukončení ošetřování betonu (odstranění fólie) nastává prudké smršťování průřezu, stejné u všech vzorků. Obě čidla jednoho tělesa ukazují velmi podobné výsledky, smršťování tedy probíhalo oběma směry stejně rychle. Původně zaizolovaná tělesa po stržení izolace začínají dohánět smršťování referenčních těles, lze tedy předpokládat, že celková kapacita smršťování u obou typů vzorků zůstane stejná nebo velmi blízká.

3 Cíl disertační práce

Předpokládané dílčí cíle disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

- poskytnout základní informace týkající se změny náhradní tloušťky průřezu v průběhu životnosti konstrukce a popsat obecnou problematiku,
- provést dlouhodobé měření na experimentálních tělech v definovaném laboratorním prostředí, tato data analyzovat, popsat a vyhodnotit,
- provést dlouhodobé měření na experimentálních tělech v reálném prostředí, tato data analyzovat, popsat a vyhodnotit,

- provést dlouhodobé měření na reálné konstrukci, tato data analyzovat, popsat, vyhodnotit a najít souvislosti mezi experimentálními tělesy a reálnou konstrukcí,
- vytvořit praktická doporučení a metodické pokyny, které by uměly zohlednit změnu náhradní tloušťky průřezu na jeho vysychání v průběhu životnosti,
- vytvořit algoritmus zpřesňující aktuální normové předpisy Bažant B4 (B3), Model Code 2010, aby normové předpisy uměli zohlednit změnu náhradní tloušťky průřezu na jeho vysychání v průběhu životnosti,
- aplikovat výše uvedené poznatky na reálnou konstrukci.

4 Experimentální část

V rámci experimentální části byla provedena tři dlouhodobá měření:

- dlouhodobé měření experimentálních těles v laboratorním prostředí,
- dlouhodobé měření reálné mostní konstrukce u obce Opatovice nad Labem,
- dlouhodobé měření těles v reálném prostředí, v komoře mostu.

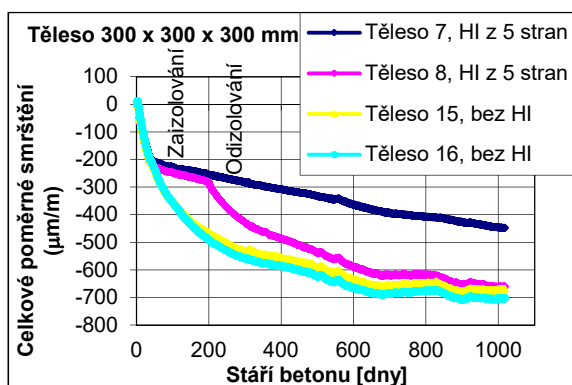
Byla provedena a vyhodnocena zatěžovací zkouška mostní konstrukce u obce Opatovice nad Labem pomocí sledování napjatosti. Dále jsou použita data získaná v rámci měření vzorků Loukovských nádrží [8], viz výše.

4.1 Dlouhodobé měření experimentálních těles v definovaném laboratorním prostředí.

V rámci specifického výzkumu [FAST-J-14-2521] bylo vyrobeno 16 ks betonových těles se zabudovanými strunovými tenzometry. Frekvence z tenzometrů byly snímány jednotkou DataTaker DT615. Tělesa byla převezena do klimatizované laboratoře, kde byla odbedněna a uložena pro sledování (při 60% vlhkosti). Po dobu 35 dní tělesa mohla volně vysychat celým povrchem, obr. 6.



Obr. 6: Uložení těles v klimatizované laboratoři – bez izolace

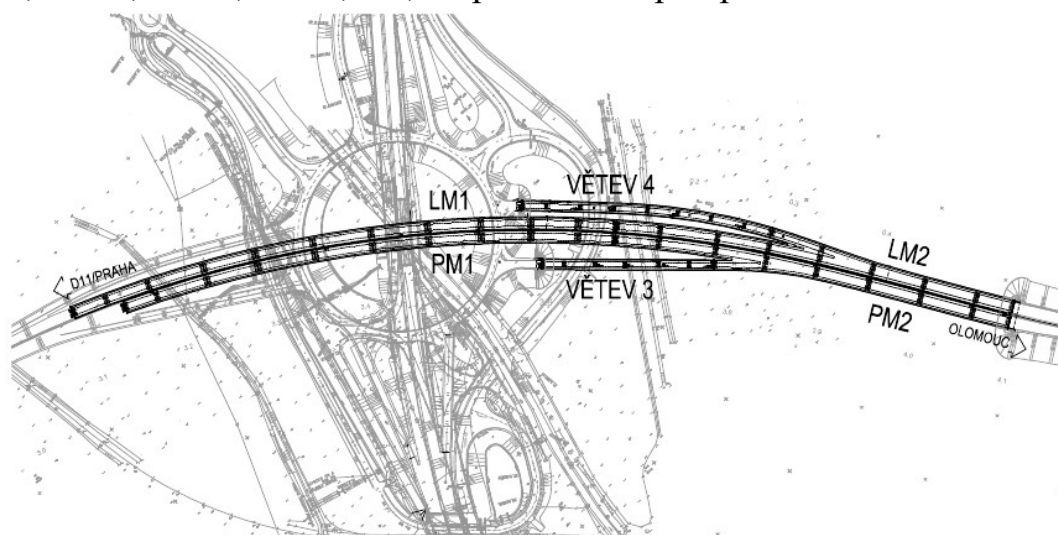


Obr. 7: Celkové poměrné přetvoření na tělesech 300 x 300 x 300 mm

Některá tělesa byla opatřena hydroizolací Sikaplan WT 4220-15C z šesti, pěti, tří a jedné strany. Jedno těleso bylo zcela ponořeno do vody a jedno těleso bylo ponořeno částečně (jeden povrch pod vodou). Dvě tělesa byla zaizolována po 90 dnech z 5 stran, další tělesa sloužila jako vzorky referenční. Ve stáří betonu 200 dní, tedy po 165 dnech, byla izolace z těles odstraněna. Na obr. 7 jsou vykresleny průběhy poměrného přetvoření pro vybraná tělesa.

4.2 Dlouhodobé měření reálné mostní konstrukce u obce Opatovice n/L

Nosnou konstrukci tvoří betonový, podélně předpjatý most komorového průřezu z předpjatého betonu C35/45-XF2, betonářské výztuže B500B a předpínací výztuže systému VSL. Mostní estakáda překračuje složitě území u obce Opatovice nad Labem, obr. 8, ve výšce nivelety až 20,5 m nad původním terénem. Celková délka konstrukce 1145,5 m je rozdělena na několik mostů. Nosnou konstrukci 2. části levého mostu (LM2) tvoří 8 polí s rozpětím v ose komunikace 44,0 + 60,0 + 54,0 + 54,0 + 56,0 + 56,0 + 56,0 + 38,0 m, od pilíře L15B po opěru L23.

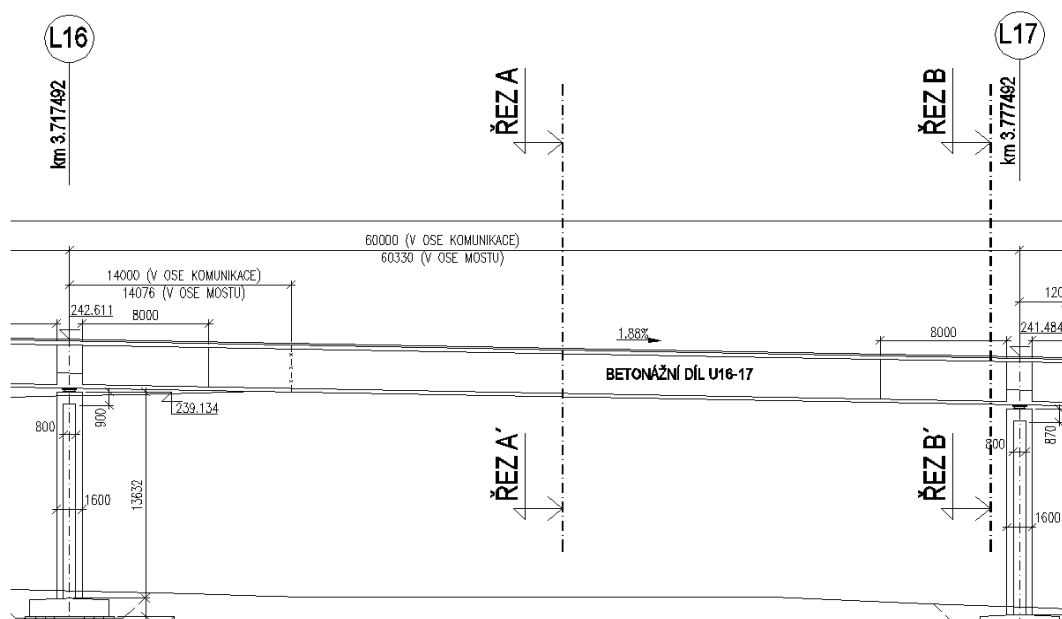


Obr. 8: Situace celé mimoúrovňové křižovatky u obce Opatovice nad Labem [33]

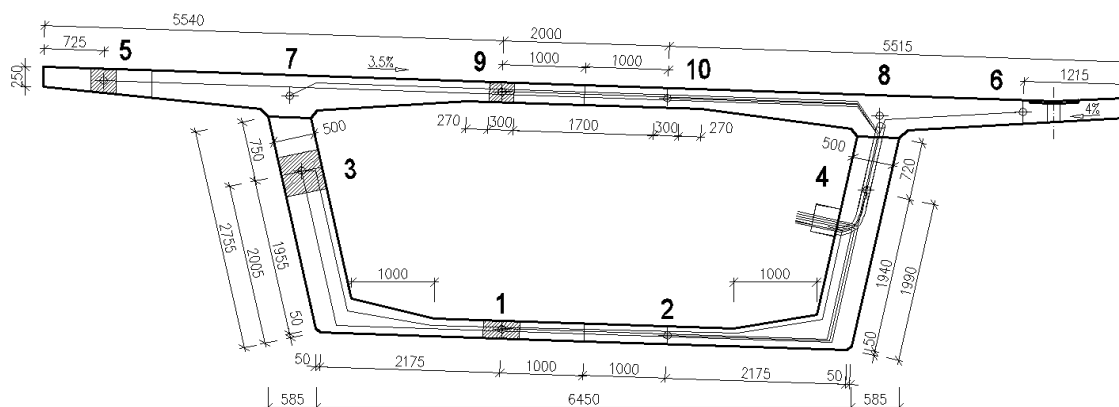
Mostní konstrukce (LM2) byla rozdělena na dvě technologické části, které postupovaly ve výstavbě proti sobě. První část byla prováděna na spodní přesuvné skruži ve směru staničení od pilíře L15B po pilíř L17. Druhá část byla prováděna na pevné skruži proti směru staničení od opěry L23 po pilíř L18.

Betonáž nosné konstrukce se prováděla postupně po polích s převislým koncem (cca v $\frac{1}{4}$ následujícího pole). Mezi pilíři L17 a L18 byl na přesuvné skruži zhotoven uzavírací díl. Komorový průřez byl zhotoven ve dvou fázích, kdy v první fázi byla vybetonována spodní deska a šikmé stěny. Po předpnutí byla doarmována a zabetonována horní deska komorového průřezu a po dopnutí konstrukce se pokračovalo na další pole. Autor práce se na výstavbě podílel jako asistent stavbyvedoucího.

Konstrukce mostu byla osazena strunovými tenzometry, obr. 10, které byly připojeny k měřicí ústředně DataTaker DT615. Osazení tenzometrů bylo provedeno ve dvou příčných řezech mezi pilíři L16 a L17, kde je rozpětí 60 m, obr. 9. Jedná se o místa s největším ohybovým namáháním v podélném směru mostu. Autor práce zajišťoval instalaci tenzometrů a měření. Veškeré práce, které byly na mostní konstrukci provedeny, byly autorem práce zaznamenány a byl zhotoven skutečný harmonogram výstavby.

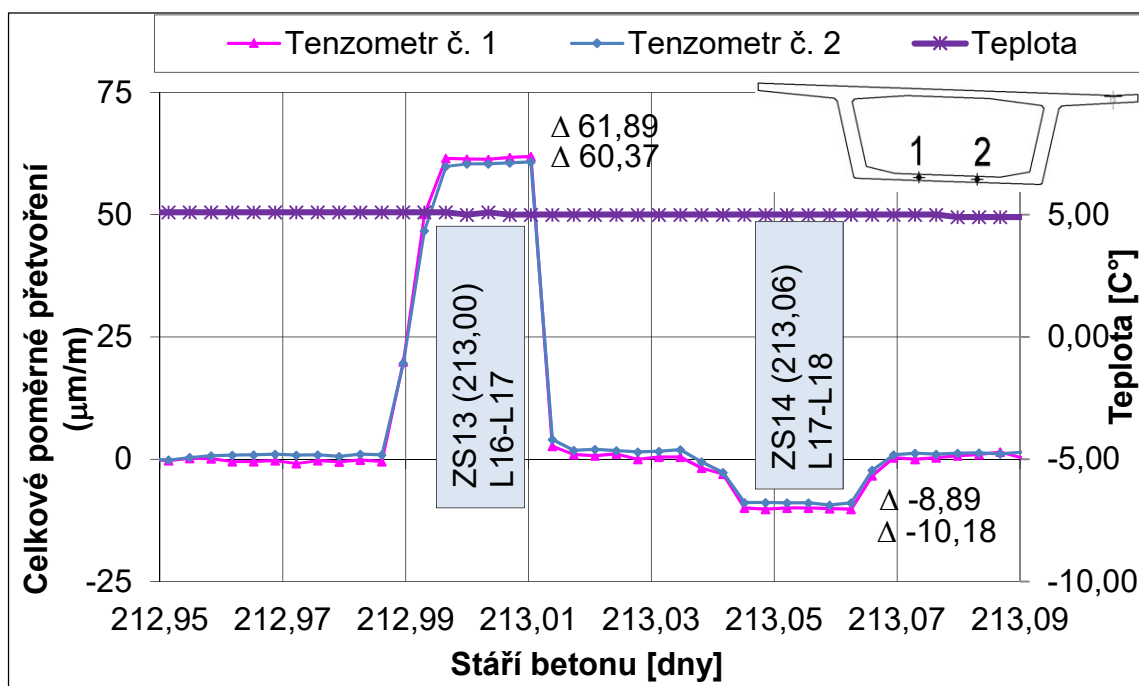


Obr. 9: Umístění tenzometrů ve dvou řezech



Obr. 10: Tenzometry v polovině rozpětí – řez A – A'

Na mostní konstrukci byla provedena zatěžovací zkouška. Pro sledované pole mezi pilíři L16 - L17 a následující nejbližší pole L17 - L18 byla zatěžovací sestava tvořena devíti naloženými vozidly Tatra 818. Přírůstky poměrného přetvoření v důsledku zatížení mostní konstrukce zatěžovacími stavy ZS13 a ZS14 jsou vykresleny pro vybrané tenzometry na obr. 11. Měření poměrného přetvoření během zatěžovací zkoušky prováděl autore práce.



Obr. 11: Zatěžovací zkouška – tenzometry č. 1 a 2, spodní deska v polovině rozpětí

Naměřené hodnoty přetvoření získané ze zatěžovací zkoušky byly porovnány s vypočtenými hodnotami. Pro zatěžovací stav ZS13 v polovině rozpětí jsou hodnoty poměrného přetvoření betonu, zřejmé z obr. 12.

ZS13: $M = 16,29 \text{ MNm}$

Vypočtené hodnoty: 5 = -36,93

Naměřené hodnoty: 5 = -32,92

7 = -32,86

7 = -30,38

9 = -37,81

9 = -32,27

10 = -37,81

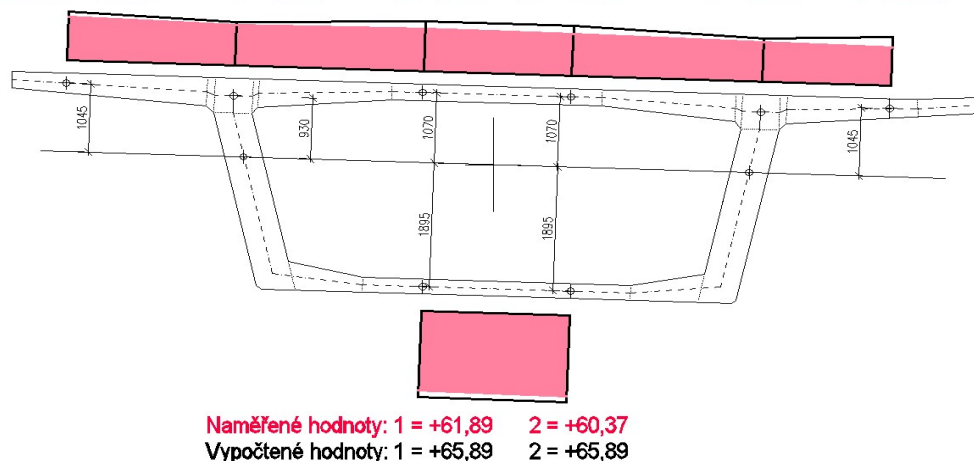
10 = -31,77

8 = -32,86

8 = -30,22

6 = -36,93

6 = -29,09



Obr. 12: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot, ZS13 v polovině rozpětí L16 a L17, změny poměrného přetvoření $\mu\text{m/m}$

4.3 Dlouhodobé měření experimentálních těles v reálném prostředí

V rámci sledování mostní komorové konstrukce u obce Opatovice nad Labem byla vyrobena tělesa odpovídající rozměrům jednotlivých desek a stěn komorového průřezu. Celkem bylo vyrobeno 10 zkušebních betonových těles opatřených

zabudovanými strunovými tenzometry uprostřed průřezu pro sledování poměrného přetvoření betonu. Tato tělesa byla zhotovena přímo na stavbě ze stejného betonu jako vlastní mostní konstrukce. Část těles přitom zůstala v komoře mostu, část těles byla převezena do klimatizované laboratoře VUT v Brně, kde byla uložena při konstantní vlhkosti a teplotě. Na tato tělesa, byla aplikována pryskyřice i asfaltové pásy cca ve stejných časech jako na reálné konstrukci. Tělesa slouží ke sledování rozdílů v měření in-situ a v laboratoři.

4.4 Závěr k experimentálnímu měření

Z naměřených dat na experimentálních tělesech lze konstatovat, že:

- jsou-li tělesa ošetřována vodou, např. pod PE folií, tělesa zvětšují svůj objem a po oddělení fólie a ukončení ošetřování nastává prudké vysychání průřezu,
- 2 čidla jednoho průřezu (stejná délka v obou směrech průřezu) prokazují, že rychlost smršťování probíhá v obou směrech stejně rychle,
- stejná tělesa vykazují podobné přírůstky poměrného přetvoření,
- po ponoření tělesa do vody se celkové poměrné smrštění zastaví, ba dokonce zvětšuje svůj objem (bobtná),
- těleso částečně ponořeno do vody (jedna strana ponořena), nadále smršťuje, i když v daleko menší míře než referenční tělesa,
- tělesa zaizolovaná z šesti stran zastaví růst celkového poměrného přetvoření,
- u těles, která jsou zaizolovaná z 1 až 5 stran, dochází ke zpomalení celkového poměrného přetvoření podle toho, na kolika stranách byla izolace aplikována,
- po odstranění izolace (vyjmutí těles z vody) je zřejmé, že původně zaizolována (ponořená) tělesa začínají dohánět smršťování referenčních těles, lze tedy předpokládat, že celková kapacita smršťování u vzorků zaizolovaných a nezaizolovaných zůstane stejná,
- tělesa umístěná v komoře mostu jsou ovlivněna změnami teploty a vlhkosti, naměřené křivky oscilují okolo křivek získaných v laboratorních podmínkách.

Z naměřených dat na mostní konstrukci lze konstatovat, že:

- po dokončení mostu (ostatního stálého zatížení) došlo k očekávanému ustálení měřených dat,
- hodnoty se dále mění již jen z důvodu reologie betonu a z důvodu změn teploty prostředí,
- naměřené a vypočtené hodnoty pro okamžité změny poměrného přetvoření, během zatěžovací zkoušky, mají dobrou shodu,
- statické předpoklady projektu i deformačního chování konstrukce jsou dobré
- realizované stavební práce prokazují dobrou kvalitu.

5 Numerická analýza vlivu změny náhradní tloušťky průřezu

5.1 Zohlednění vlivu změny náhradní tloušťky průřezu „metodou posunu“

Do okamžiku položení izolace prvek smršťuje dle křivky např. B4 – bez izolace. V okamžiku zaizolování průřezu je třeba najít náhradní čas $t_{2,2}$, ve kterém průřez s izolací dosáhne stejných hodnot přetvoření $\varepsilon_{sh,total2}$ (kdy dojde ke stejnému vysychání) jako u průřezu bez izolace $\varepsilon_{sh,tot}$.

$$\varepsilon_{sh,total1}(t, t_0) = \varepsilon_{sh,total2}(t, t_0). \quad (1)$$

Dosadíme-li do rovnice 1 základní vztahy pro smršťování, zjistíme, že jedinou proměnou je D , náhradní tloušťka průřezu:

$$D = \frac{2V}{S}. \quad (2)$$

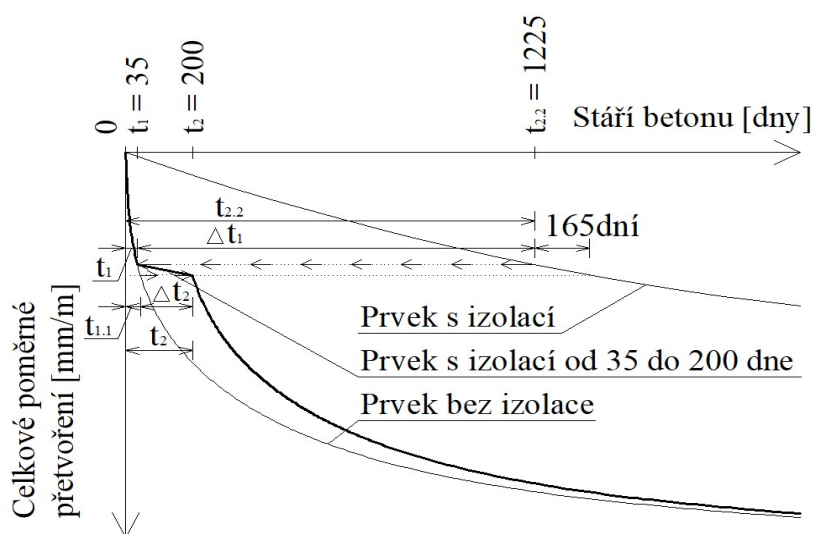
Úpravou vztahů získáme:

$$t_{2,2} = \frac{\frac{1}{S_2^2} \times (t_1 - t_0) + \frac{1}{S_1^2} \times t_0}{\frac{1}{S_1^2}}, \quad (3)$$

kde je:

- S_1 povrch tělesa bez izolace v $[\text{mm}^2]$,
 S_2 povrch tělesa s izolací v $[\text{mm}^2]$.

Odstranění izolace lze simulovat obdobně jako v případě zaizolování konstrukce vodorovným posunem. V okamžiku stržení izolace je potřeba najít náhradní čas $t_{1,1}$, ve kterém průřez bez izolace dosáhne stejných hodnot přetvoření (kdy dojde ke stejnému vysychání) jako u průřezu s izolací. Celkový průběh smršťování je zřejmý z obr. 13.



Obr. 13: Schéma celkového průběhu smršťování, zaizolování v 35 dnech, odizolování ve 200 dnech

Obdobně lze postupovat i pro jiné normové předpisy, resp. jejich funkce času: ČSN 731201, Model Code 1990, ČSN P ENV 1992-1-1, ČSN EN 1992-1-1, Model B3, ACI 209.2R. Tato metoda je zpřesňována dalšími výpočetními metodami.

5.2 Zohlednění vlivu změny náhradní tloušťky průřezu „matematickými vztahy“ pro Model B4

V této kapitole jsou odvozovány matematické úpravy vztahů časové funkce pro Model B4 [11], které mají zohlednit vliv změny náhradní tloušťky průřezu. V čase zaizolování t_1 dochází ke změně náhradní tloušťky průřezu z hodnoty D_1 na D_2 , tedy dochází ke změně parametru τ_{sh} z hodnoty τ_{sh1} na τ_{sh2} . Dále pak v čase odizolování t_2 se postup obrátí.

Pro průřez bez izolace v čase $t \in (0, t_1)$ platí pro časovou funkci

$$S(t) = \tanh \left[\sqrt{\left(\frac{(t - t_0)}{\tau_{sh1}} \right)} \right]. \quad (4)$$

Po zaizolování průřezu v čase $t \in (t_1, t_2)$ platí:

$$S(t) = \tanh \left[\sqrt{\left(\frac{(t_1 - t_0)}{\tau_{sh1}} + \frac{(t - t_1)}{\tau_{sh2}} \right)} \right]. \quad (5)$$

Po odizolování průřezu v čase $t \in (t_2, \infty)$ platí:

$$S(t) = \tanh \left[\sqrt{\left(\frac{(t_1 - t_0)}{\tau_{sh1}} + \frac{(t_2 - t_1)}{\tau_{sh2}} + \frac{(t - t_2)}{\tau_{sh1}} \right)} \right], \quad (6)$$

kde:

t	aktuální čas ve dnech,
t_0	čas konce ošetřování, začátek vysychání ve dnech (1 den),
t_1	čas zaizolování průřezu (35 dní),
t_2	čas odizolování průřezu (200 dní).

Tyto „matematické vztahy“ jsou v naprosté shodě s „metoda posunu“. Vztahy jsou dále zpřesňovány zavedením korelační funkce k_{f1} pro zaizolování prvku a korelační funkce k_{f2} pro odizolování prvku. Korelační funkcí bylo dosaženo podmínky, aby křivka byla vždy ve stanovených mezích mezi křivkami B4 – bez izolace a B4upr_zaizolování. Matematickými metodami [12], metodou nejmenších čtverců a metodou půlení intervalu byly nalezeny koeficienty k_1 (pro korelační funkci k_{f1}) a k_2 (pro korelační funkci k_{f2}) pro výpočtové křivky, tak aby se co nejvíce blížili naměřeným hodnotám.

Výsledné koeficienty k_1 a k_2 dovedly autora práce k myšlence, že musí existovat souvislost mezi plochou, kterou je umožněno vysychání k celkové ploše tělesa. Dále jsou odvozeny matematické vztahy, které odstranili korelační funkci a zohledňují vliv změny náhradní tloušťky průřezu s přímou závislostí na poměru vysychajících ploch.

Zaizolování tělesa z 5 stran:

$$p_1 = \frac{\text{plocha vysychání}}{\text{celková plocha}} = \frac{0,09}{0,54} = 0,16667 = 16,667\%, \quad (7)$$

Odizolování tělesa z 5 stran:

$$p_2 = \frac{\text{plocha vysychání}}{\text{celková plocha}} = \frac{0,54}{0,54} = 1,00 = 100\% \quad (8)$$

kde je:

p_1 podíl plochy, kterou je umožněno vysychání k celkové ploše
 p_2 podíl plochy, kterou je umožněno vysychání k celkové ploše

Dále mohou být tyto rovnice zjednodušeny odstraněním jednoho poločasu smršťováním (τ_{sh2}).

Pro průřez bez izolace v čase $t \in (0, t_1)$ platí pro časovou funkci:

$$S(t) = \tanh \left[\sqrt{\left(\frac{(t - t_0)}{\tau_{sh1}} \right)} \right]. \quad (9)$$

Po zaizolování průřezu v čase $t \in (t_1, t_2)$ platí:

$$S(t) = \tanh \left[\sqrt{\left(\frac{(t_1 - t_0)}{\tau_{sh1}} + \frac{(t - t_1)}{\tau_{sh1}} \times p_1 \right)} \right], \quad (10)$$

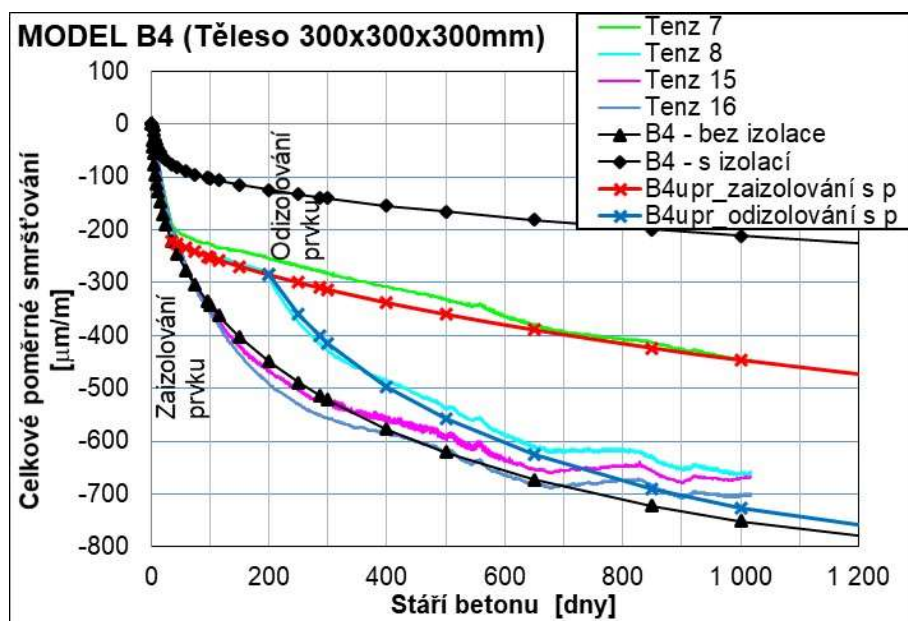
Po odizolování průřezu v čase $t \in (t_2, \infty)$ platí:

$$S(t) = \tanh \left[\sqrt{\left(\frac{(t_1 - t_0)}{\tau_{sh1}} + \frac{(t_2 - t_1)}{\tau_{sh1}} \times p_1 + \frac{(t - t_2)}{\tau_{sh1}} \times p_2 \right)} \right], \quad (11)$$

Pro těleso 300 x 300 x 300 mm, které je zaizolované z 5 stran v 35 dnech a odizolované 200. den, bylo dosaženo následujícího zpřesnění.

Legenda křivek:

B4 – bez izolace = základního výpočtu Modelu B4, kde $D = 100$ mm.
 B4 – s izolací = základního výpočtu Modelu B4, kde $D = 600$ mm.
 B4upr_zaizolování s p = upravené vztah do výpočtového Modelu B4 v 35. den.
 B4upr_odizolování s p = upravené vztah do výpočtového Modelu B4 ve 200. den.



Obr. 14: Změna průběhu smršťování – logaritmické a lineární zobrazení

Z obr. 14 je zřejmé, že naměřená data a vypočítané křivky B4upr_zaizolování s p a B4_odizolování s p prokazují dobrou shodu. Zavedení těchto vztahů umožní zpřesnit analýzu betonových konstrukcí. Tyto vztahy mají přímou vazbu na plochu, kterou je umožněno vysychání.

Dále byly odvozeny matematické vztahy pro:

- Model B4, pro tělesa ponořená v průběhu životnosti do vody,
- Model B3, který zohledňuje vlivu změny náhradní tloušťky průřezu s poměry zaizolovaných ploch,
- Model B3, pro tělesa ponořená v průběhu životnosti do vody,
- Model Code 2010, který zohledňuje vlivu změny náhradní tloušťky průřezu s poměry zaizolovaných ploch,
- Model Code 2010, pro tělesa ponořená v průběhu životnosti do vody.

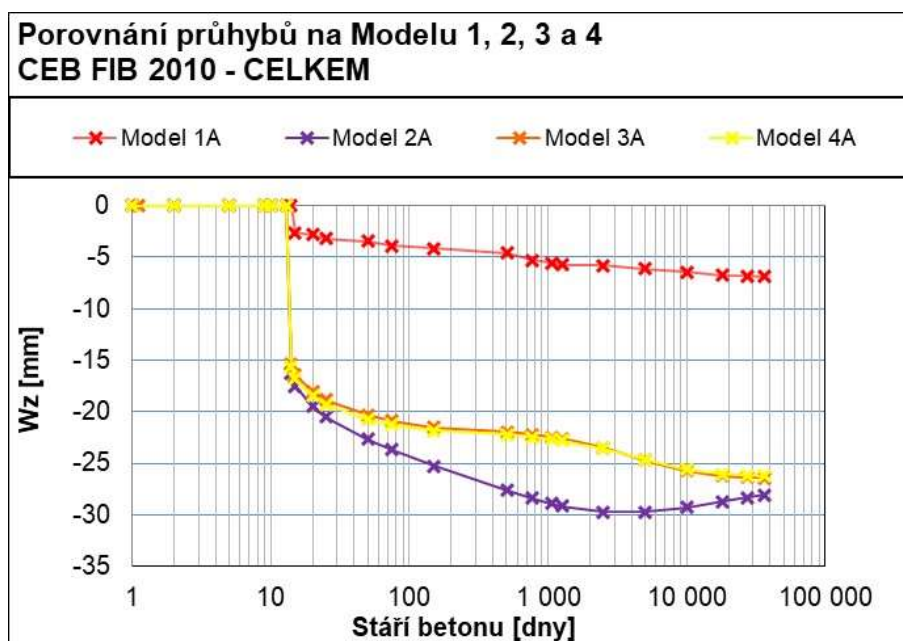
Matematické vztahy byly aplikovány na všechna autorem měřená tělesa. Byla prokázána dobrá shoda naměřených a vypočtených hodnot. Lze tedy předpokládat, že způsob výpočtu je správný.

6 Aplikace zpřesněných rovnic smršťování a dotvarování na prostém nosníku

V programu Midas Civil 2018 byl vytvořen prutový komorový nosník o rozpětí 60 m z betonu C35/45, prostě podepřený, předepnut celkem 16 ks 15 lanovými kabely. Pro výpočet byl použit ŘEZ 3, který se nachází v polovině rozpětí sledovaného mostního pole mostu v Opatovicích nad Labem. Zatížení konstrukce pak tvoří vlastní tíha, předpětím, dotvarování a smršťování.

6.1 Varianty výpočtového modelu:

1. Model – celistvý průřez
2. Model – spřažený průřez z U (spodní deska + stěny) + HD (horní deska)
3. Model – spřažený průřez ze SD (spodní deska) + S (stěny) + HD (horní deska)
4. Model – složený prvek z 3 elementů, SD (spodní deska) + S (stěny) + HD (horní deska), spojený tuhými vazbami.



Obr. 15: Celkové průhyby Model 1A, 2A, 3A a 4A

Byly porovnány 4 modely (1A, 2A, 3A, 4A), obr. 15, na kterých bylo prokázáno:

- Nejmenšího průhybu je dosaženo na celistvém průřezu Modelu 1A.
- Největšího průhybu bylo dosaženo na spřaženém průřezu Modelu 2A, tedy modelu ze dvou částí (spodní desky a stěn + horní desky).
- Průhyb Modelu 2A je v 2500 dnech větší o 6,4 mm, než u Modelu 3A, 4A.
- Modely 3A a 4A prokazují dobrou shodu a jsou zaměnitelné.
- Různé části příčného řezu komory vysychají různě rychle, což vyvoluje dodatečný průhyb. Dotvarování způsobené pouze diferenčním smršťováním je velmi malé a dalo by se zanedbat.

6.2 Vliv změny náhradní tloušťky průřezu:

Výše uvedené Modely 1A, 2A, 3A a 4A byly rozšířeny o následující:

Modely A = model bez izolace.

Modely B = model s izolací.

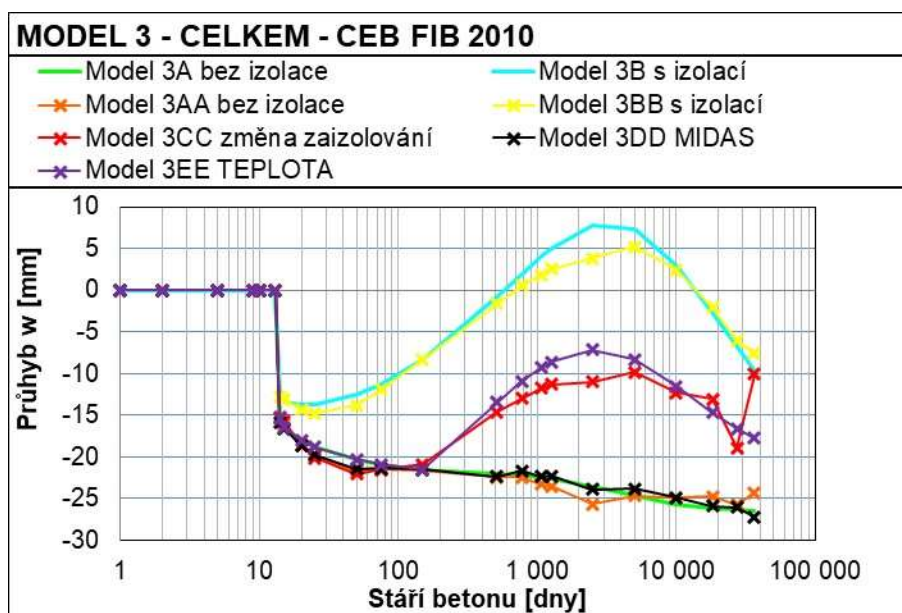
Modely AA = model bez izolace, zadaný pomocí uživatelských křivek dotvarování a smršťování.

Modely BB = model s izolací, zadaný pomocí uživatelských křivek dotvarování a smršťování.

Modely CC = model zohledňující změny zaizolování, zadaný pomocí uživatelských křivek dotvarování a smršťování.

Modely DD = model bez izolace, pomocí programu Midas Civil byly vypočteny hodnoty dotvarování a smršťování, ty byly zadány pro uživatelské křivky dotvarování a smršťování.

Modely EE = model zohledňující změny zaizolování pomocí přírůstků teploty.



Obr. 16: Celkové průhyby na konstrukci, Model 3

Z výše uvedeného, včetně obr. 16, vyplývá:

- Celistvý komorový průřez Modelu 1 vlivem změny zaizolování horního povrchu komory nezmění průhyb konstrukce, pouze se osově zkrátí. To samé platí i v případě, zadáme-li na celistvou konstrukci teplotu, která vystihuje smršťování. Komorový celistvý průřez se zkrátí pouze v ose x.
- U všech modelů, křivky AA, BB, CC, které byly zadány pomocí ručně vypočtených hodnot v Excelu a zadány pomocí USER DEFINE, nekorespondují s vytyčenými mezemi od křivek A a B. Křivky nabývají větších průhybů a vzdalují se vytyčeným mezím. Pro kontrolu byla zadána křivka DD, která použila ty samé hodnoty dotvarování a smršťování jako křivka A, tyto křivky byly vykopírovány z programu a zpět vloženy pomocí USER DEFINE. Všechny čtyři křivky AA, BB, CC, DD prokazují podobné hodnoty, což poukazuje na problém v ručním zadávání dotvarování.
- Zadáním přírůstků teploty na konstrukci jsou nahrazeny účinky změny smršťování na konstrukci.

- Upravíme-li koeficienty dotvarování obdobně jako křivky smršťování, např. „metodou posunu“ popsanou v kapitole 5, a poměrově upravíme křivky dotvarování, získáme výraznější shodu celkových průhybů patrné z Modelu 2EE, 3EE a 4EE.
- Pro zhotovení modelu estakády v Opatovicích nad Labem byl na základě výše uvedených výsledků vybrán model sestavený z 3 prvků, tedy spodní desky, stěn a horní desky. Tento model postihuje diferenční dotvarování a smršťování a nejvíce reflektuje změny způsobené změnou zaizolování horní desky. Jelikož Model 3 a Model 4 prokazují totožné výsledky, byl vybrán Model 3 jako nejvhodnější. Pro Model 3 stačí vytvořit pouze 1 osu mostu, kdežto pro Model 4 jsou potřebné osy 3, které jsou spojené tuhými vazbami.

Pro výpočetní model estakády v Opatovicích nad Labem budou změny smršťování v důsledku položení izolace řešeny přírůstkem teploty a změny dotvarování způsobené zaizolováním povrchu budou zanedbány.

7 Aplikace zpřesněných rovnic smršťování a dotvarování do výpočtového modelu mostu v Opatovicích nad Labem

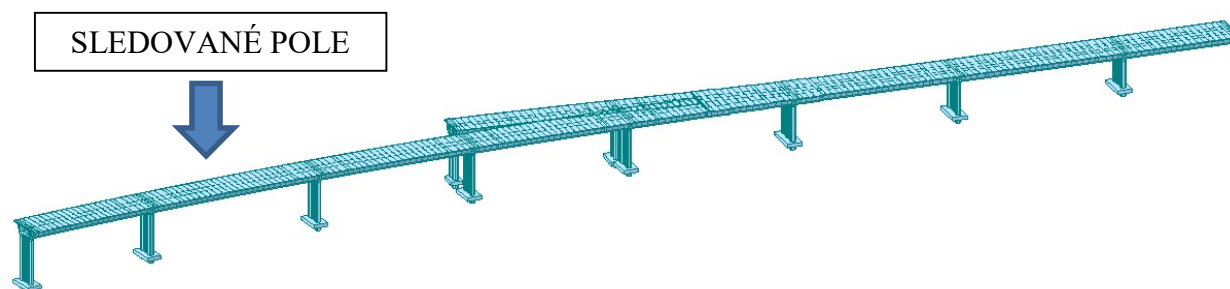
Cílem v této kapitole je aplikovat výše uvedené zpřesňující rovnice na reálnou mostní konstrukci, která byla osazena měřickým zařízením. Naměřené hodnoty budou porovnány s těmi vypočtenými.

Pro zhotovení výpočtového modelu mostní konstrukce byl vybrán výpočetní program Midas Civil. Z knihovny norem byla vybrána norma Model Code 2010 [10]. Předpis B4 [11], není ve verzi tohoto programu bohužel obsažen. Most bude modelován jako spřažená konstrukce tvořená spodní deskou, stěnou a horní deskou.

7.1 Výpočtový model - popis

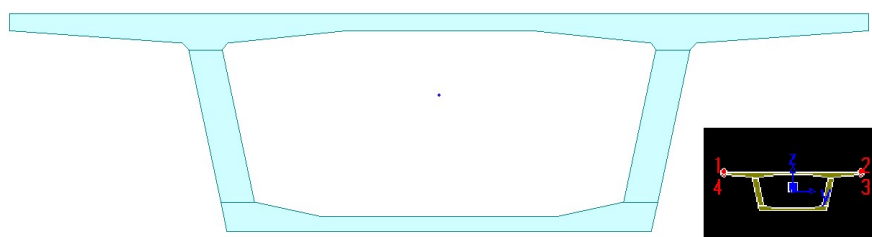
V programu Midas Civil byl vytvořen prutový model mostu, který vychází z podkladů stávající projektové dokumentace [13] a [14]:

Osa mostu, byla vytvořena v programu AutoCad a byla nadělena na maximálně 2 m dlouhé úseky. Poté byla vložena do programu Midas Civil, obr. 17. Dále bylo v programu AutoCad vykresleno celkem 21 řezů mostovky, obr. 18, pomocí funkce „Sectional Property Calculator“ převedeny do výpočtového modelu. Řezy mostovky byly vytvořeny jako kompozitní průřez „Composite Section“, složený ze spodní desky, stěn a horní desky. Model mostu je zaměřen zejména na pole s tenzometry, tedy pole 13.



Obr. 17: Prutový model v programu Midas Civil

Na obr. 18 je zobrazen základní řez 3, který se nachází v polovině rozpětí pole 12, 13, 14 a 5 na hlavním mostě.



Obr. 18: Příčný řez 3

Mezi pilíři L18 – L20 se konstrukce větví odbočením na nájezdovou rampu (větev 4). Jedná se o místo, kde se z dvoj-komory (od příčníků L23 až k mezipodporovému ztužidlu) stávají dvě samostatné komory pro větev 4 a pro hlavní most. Spodní stavba byla modelována pomocí prutů, které vystihují jednotlivé prvky: základové desky, sloupy, ložiskové bloky a ložiska, obr. 19.

7.2 Materiálové charakteristiky

7.2.1 Beton C35/45-XF2

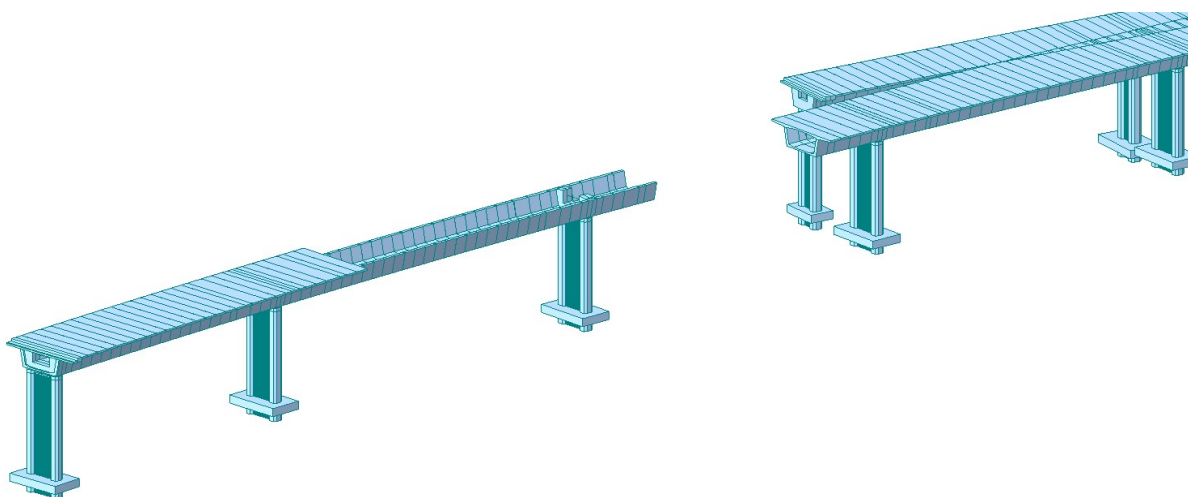
Na mostní konstrukci v Opatovicích nad Labem byl použit beton C35/45-XF2. Dle TKP 18 byla odebírána zkušební tělesa v předepsaném počtu a posílána do akreditované laboratoře SQZ. Byly vydány protokoly o zkoušce [15], ze kterých byly dopočítány materiálové charakteristiky pro každé pole, resp. fázi výstavby.

7.2.2 Předpínací výztuž

Pro předepnutí nosné konstrukce byl použit lanový předpínací systém VSL se soudržnostmi. Kabely byly navrženy z 15 lan o ϕ 15,7 mm. Firmou VSL byly vydány předpínací protokoly pro každý kabel [16], podle nichž jsou síly pro jednotlivé kabely modelovány.

7.3 Harmonogram

Ve výpočtovém programu Midas Civil je maximální snaha zohlednit skutečný postup prací.



Obr. 19: Dokončené pole 12, spodní deska a stěny pole 13, chybějící pole 14

7.4 Vliv skruže na výpočtový model

Konstrukce mostovky na pilířích L15B až L17 a uzavírací díl mezi pilíři L17 a L18 byly prováděny na spodní posuvné skruži směrem od pilíře L15B (po směru staničení). Ve výpočtovém modelu byly provedeny následující úpravy:

- byla vypnuta vlastní tíha pro pole 12, 13 a 14,
- tato vlastní tíha byla nahrazena ekvivalentním zatížením, bylo dopočítáno zatížení od vlastní tíhy spodní desky a stěn ($SD + S$) a horní desky (HD) a v příslušné fázi byla konstrukce touto silou zatížena,
- z projektu skruže (firmy Metrostav) [17] byly získány reakce na převislé konzoly od vlastní tíhy skruže a zatížení čerstvým betonem, dále byly získány reakce na převislé konzoly od spouštění konstrukce.

7.5 Výpočtové modely zohledňující vliv náhradní tloušťky betonu

Ve výpočtovém programu Midas Civil byly vytvořeny 3 výpočtové modely estakády v Opatovicích nad Labem:

Všechny tři varianty respektují:

- geometrii mostu a trasování předpínacích kabelů, dle projektové dokumentace [13] a [14], viz kapitola 7.1,
- materiálové charakteristiky získané z laboratorních zkoušek a předpínacích protokolů, viz kapitola 7.2,
- časovou osu výstavby, viz kapitola 7.3,
- způsob modelování podpěrných skruží, viz kapitola 7.4,
- příčný řez mostu, který je modelován jako kompozitní průřez složený ze spodní desky, stěn a horní desky.

Model 3A:

je modelem bez izolace horní desky, po celou dobu životnosti. Má náhradní tloušťku průřezu pro spodní desku 284 mm, pro stěny 500 mm a pro horní desku 343 mm.

Model 3B:

je modelem s izolací horní desky, po celou dobu životnosti. Má náhradní tloušťku průřezu pro spodní desku 284 mm, pro stěny 500 mm a pro horní desku 695 mm.

Model 3C:

je modelem se změnou zaizolování horní desky v čase, pomocí teploty a vychází z Modelu 3A. Má náhradní tloušťku průřezu pro spodní desku 284 mm, pro stěny 500 mm a pro horní desku 343 mm. Změna smršťování v důsledku zaizolování na horní desce vychází z úpravy rovnic z kapitoly 5. V programu Excel byla dopočítána změna přetvoření, způsobená zaizolováním horní desky, pro různě staré betony. Tato přetvoření, byla převedena na přírůstky teploty, které byly výpočtovém programu Midas Civil zadány pomocí funkce „Beam Section Temperature“ na horní povrch mostovky.

7.6 Výpočet celkového přetvoření

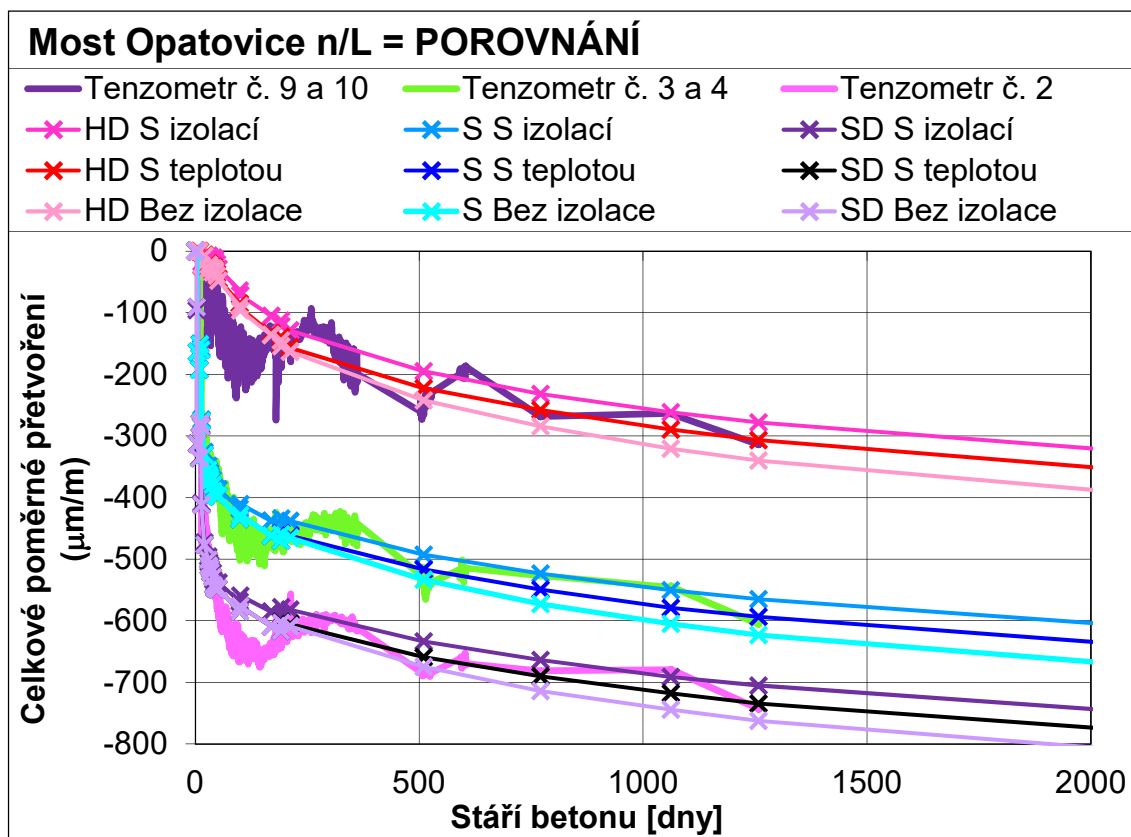
Z výpočtového modelu, z programu Midas Civil, byly získány účinky zatížení v čase v místě tenzometrů.

- | | |
|---------------------------|--------------------------------|
| 1. CS Dead Load | Vlastní tíha |
| 2. CS Tendon Primary | Předpínací výztuž - primární |
| 3. CS Tendon Secondary | Předpínací výztuž - sekundární |
| 4. CS Creep Primary | Dotvarování - primární |
| 5. CS Creep Secondary | Dotvarování - sekundární |
| 6. CS Shrinkage Primary | Smršťování - primární |
| 7. CS Shrinkage Secondary | Smršťování - sekundární |
| 8. CS Summation | Sumace, celkové účinky |

Celkové účinky napětí (8) jsou z programu Midas Civil vypočítány jako $(1 + 2 + 3 + 4 + 6)$. Z celkových účinků napětí dopočítáme celkové přetvoření v čase $\varepsilon_c(t)$, tzv. „mechanická“ přetvoření. Sekundární účinky $(5 + 7)$ pro dotvarování a smršťování zobrazují značná napětí (fiktivní síly), ze kterých jsou dopočítány tzv. „nemechanické“ účinky přetvoření. Součtem „mechanických“ a „nemechanických“ účinků přetvoření získáme celkové přetvoření horní desky, stěn a spodní desky komorového mostního průřezu.

7.7 Porovnání přetvoření výpočtových modelů a naměření

Porovnání výsledků výpočtových modelů 3A, 3B, 3C a naměřených hodnot v místě nainstalovaných tenzometrů v polovině rozpětí pole 13 je zřejmé z obr. 20.



Obr. 20: Porovnání modelů 3A, 3B a 3C a naměřených hodnot v polovině rozpětí pole 13, od 0 do 2000 dní, lineární zobrazení časové osy

Vypočtené hodnoty Modelu 3C, které zohledňují zaizolování mostovky pomocí teploty, vykazují nejvyšší shody s naměřenými hodnotami a to jak z krátkodobého (od vzniku konstrukce do 200 dní) tak i z dlouhodobého hlediska (do 1258 dní).

8 Závěr

Disertační práce se zabývá vlivem změn náhradní tloušťky betonového průřezu na chování betonových konstrukcí. Tedy jakým způsobem se změni reologické jevy betonu v důsledku nanesení, popř. stržení izolace z povrchu betonových těles nebo konstrukcí v průběhu životnosti konstrukce.

V úvodní části disertační práce (kap. 2) byl popsán současný stav řešení problematiky. Byl představen vliv diferenčního dotvarování a smršťování na komorovém příčném řezu. Z výsledků je zřejmá různorodost jednotlivých normových předpisů a parametrů, které do výpočtu vstupují, tak i značný rozptyl výsledných hodnot. Obecně lze říct, že čím novější předpis, tím je komplikovanější a výsledné hodnoty přetvoření jsou větší. V další části této pasáže bylo představeno

první experimentální měření, provedené při stavbě Loukovských nádrží na palivo [8]. Zde byla zhotovena 4 experimentální tělesa, která sledovala vliv zaizolování.

V druhé části disertační práce (kap. 4) byla prezentována tři dlouhodobá měření. Prvním experimentem bylo dlouhodobé měření 16 experimentálních těles v laboratorním prostředí. Na betonových tělesech 300 x 300 x 300 mm a 300 x 300 x 150 mm se zabudovanými tenzometry byla aplikována v 35 dnech izolace z 6, 5, 3, 1 a z žádné strany. Jedno těleso bylo ponořeno do vody a jedno bylo ponořeno jen jednou stranou. Některá tělesa byla 200. den odizolována. Sledování probíhalo více než 1000 dní a bylo získáno množství dat pro následné vyhodnocení. Byly provedeny standardní materiálové zkoušky betonu k získání materiálových charakteristik.

Druhým experimentem bylo dlouhodobé měření reálné mostní konstrukce u obce Opatovice nad Labem. Do mostní konstrukce bylo zabudováno celkem 20 ks tenzometrů ve 2 charakteristických řezech, jeden řez se nachází v polovině rozpětí a druhý řez u pilíře L17 mostního pole 13. U mostní konstrukce byl zaznamenán harmonogram výstavby a byly zpracovány protokoly o předpínání a zkušební protokoly betonu. Sledování mostní konstrukce probíhá v jednom z nejdelších polí mostní konstrukce od jeho zabetonování do současnosti.

V souvislosti s touto mostní konstrukcí byla zhotovena další experimentální tělesa. Tato tělesa reflektovala jednotlivé tloušťky desek, ze kterých byla komora mostu složena. Část těles zůstala v reálném prostředí (v konstrukci mostu) a část těles byla převezena do klimatizované laboratoře VUT v Brně. Tělesa byla zaizolována ve stejný okamžik jako mostní konstrukce.

Veškerá měření prokázala vliv změny zaizolování popř. odizolování na přetvoření tělesa. Po aplikování izolace dojde ke zpomalení celkového poměrného přetvoření, a to podle toho na kolika stranách byla izolace aplikována. Naopak po odstranění izolace z tělesa, původně zaizolovaného, dojde ke zrychlení poměrného přetvoření. Menší tělesa vysychají rychleji oproti těm velkým.

V poslední části této kapitoly byla provedena a vyhodnocena zatěžovací zkouška mostní konstrukce u obce Opatovice nad Labem pomocí sledování napjatosti. Doposud získané výsledky potvrdily dobrou shodu naměřených a vypočtených hodnot pro hodnoty okamžitých změn poměrného přetvoření (během zatěžovací zkoušky).

Třetí část disertační práce (kap. 5) byla věnována numerické analýze zohledňující vliv změny náhradní tloušťky průřezu. Byl odvozen přechod z křivky bez izolace na křivku s izolací pomocí tzv. „metody posunu“, která je vhodná pro všechny normové předpisy. Tuto metodu bylo potřeba dále zpřesňovat, a proto byly

odvozeny nové „matematické vztahy“ pro předpisy Model B4 (B3) a Model Code 2010. Tyto vztahy z „metody posunu“ vycházejí a umožňují jejich optimalizaci.

Do základního vztahu byla nejprve přidána korelační funkce, která měla zajistit, že zpřesňující koeficient bude vždy mezi limitami, tj. mezi křivkou bez izolace a s izolací. Metodou nejmenších čtverců a postupnou iterací byly získány křivky, které se nejvíce blížily naměřeným údajům. Bylo zjištěno, že koeficienty těchto křivek byly blízké poměru ploch zaizolovaného a nezaizolovaného průřezu a proto byly tímto poměrem nahrazeny. Výsledné „matematické vztahy“ s poměrem zaizolovaných ploch byly použity pro model B4 a B3 a obdobně pro Model Code 2010. Byly odvozeny vztahy pro tělesa, které po část své životnosti jsou uloženy ve vodě. Bylo ověřeno, že navržené úpravy korespondují s naměřenými hodnotami.

V poslední části disertační práce (kap. 6 a 7) jsou tyto nové matematické úpravy aplikovány ve výpočetním programu Midas Civil. Nejprve na prostém nosníku komorového průřezu o délce 60 m a poté na samotném modelu mostní konstrukce v Opatovicích nad Labem.

Na prostém nosníku bylo ověřeno chování celistvého průřezu (1A), spřaženého průřezu ze spodní desky a stěn, tzv. U-čko, a horní desky (2A), spřaženého průřezu ze spodní desky, stěn a horní desky (3A) a z průřezu složeného ze 3 elementů (SD, S a HD), které jsou spojeny tuhými vazbami (4A). Bylo zjištěno, že spřažený průřez 3A je zaměnitelný s modelem 4A. V programu Midas Civil byla snaha zadat vliv zaizolování pomocí uživatelských křivek pro dotvarování a smršťování (křivky AA, BB, CC, DD), bohužel bez reálného výsledku. Proto byla prověřena možnost zohlednění změny smršťování v důsledku položení izolace na průřez pomocí zatížení teplotních přírůstků na povrchu horní desky (křivka EE). Takto ověřený způsob výpočtu, byl aplikovaný na mostní konstrukci v Opatovicích nad Labem.

Mostní konstrukce estakády byla modelována pouze jako konstrukce spřaženého průřezu ze SD, S a HD. Model mostu respektuje skutečnou geometrii, materiálové charakteristiky, síly v předpínacích kabelech, harmonogram výstavby a vliv spodní přesuvné skruže. Z porovnání vypočteného a naměřeného přetvoření je zřejmé, že nejlepší shody bylo dosaženo na výpočtovém modelu, který zohledňuje vliv zaizolování mostní konstrukce pomocí zatížení přírůstky teploty. Navržený postup se osvědčil, došlo k přiblížení naměřených a vyčtených hodnot přetvoření. Změna zaizolování v čase způsobuje nepatrné navýšení průhybů D_z . I když v našem případě se ukázalo, že pro tuto konkrétní mostní konstrukci není z hlediska celkového chování vliv významný. Nicméně u mostů většího rozpětí (např. u letmo betonovaných) tomu tak být nemusí.

Z řešené práce vyplynula řada otevřených problémů a podmětů pro další výzkum, který by měl být zaměřen především:

- jaký je vliv diferenčního vysychání na dotvarování,
- jak jsou konstrukce velkých rozpětí (letmo betonované) citlivé na změny vysychání, způsobené zaizolováním mostovky,
- použít sofistikovanější matematické metody, při odvozování „matematických vztahů“ s poměrem zaizolovaných ploch tak, aby odpadly zpřesňující koeficienty k_1 a k_2 u lineárně lomené časové funkce $\beta_{ds}(t - t_s)$ pro předpis Model Code 2010.

Dále autor práce doporučuje provést obdobným způsobem dlouhodobé sledování letmo betonované mostní konstrukce o velkém rozpětí, na které by následně mohly být aplikovány výše uvedené poznatky.

9 Seznam použité literatury

- [1] ZICH, M.: Analýza chování letmo betonovaných mostů s ohledem na diferenční smršťování a ochabnutí smykem, disertační práce, Brno 2001.
- [2] ZICH, M.: Projekty sledování jejich realizace a analýza dlouhodobého chování betonových konstrukcí, habilitační práce, VUT FAST Brno, 2011. ISBN 978-80-214-1213-4/ISSN 1213-418X.
- [3] ZICH, M.; NAVRÁTIL, J., Vliv diferenčního smršťování a dotvarování na deformace letmo betonovaného mostu přes Vltavu u Vepřeku, článek v Beton TKS, ISSN 1213-3116, Beton TKS s.r.o., Praha, 2011.
- [4] NAVRÁTIL, J.; ZICH M., Long-term deflections of cantilever segmental bridges, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, ISBN 1822-427, 8/2013, IF 2012=1,48.
- [5] ZICH, M., Koncepce dlouhodobého sledování mostů na, článek v Beton TKS, ISSN 1213-3116, Beton TKS, s.r.o., Praha, 2011.
- [6] ZICH, M.; KOLÁČEK, J.; DANĚK, P., Použití strunových tenzometrů pro zatěžovací zkoušku mostů, článek v Beton TKS, ISSN 1213-3116, Beton TKS s.r.o., Praha, 2012.
- [7] NOVOTNÝ, P.; ZICH, M.; STRÁSKÝ, J., Projekt a sledování mostu přes údolí Hošťovského potoka na, článek v Beton TKS, ISSN 1213-3116, Beton TKS, s.r.o., Praha, 2012.
- [8] VÍTEK, J.; ZICH, M. Předpjaté betonové nádrže na pohonné hmoty. In Betonářské dny 2010. 2010. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2010. s. 39-44. ISBN: 978-80-8076-089-2.
- [9] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, Český normalizační institut, Listopad 2006.

- [10] CEB-FIP Model Code 2010, First complete draft – Volume 1, Bulletin No55, Fédération internationale du béton, 2010. ISBN 978-2-88394-095-6.
- [11] RILEM DRAFT RECOMMENDATION, Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability Mater. Struct., 2015.
- [12] ČERMÁK, L.; HLAVIČKA, R. Numerické metody. Brno: Akademické nakladatelství CERM, sro Brno, 2016. s. 1-110.
- [13] MIKULA, J. R35 Sedlice – Opatovice, dostavba estakády, Estakáda na silnici R35 v km 3,15-4,10, 1600 nosná konstrukce, L15B – L19, Praha 2014.
- [14] MIKULA, J. R35 Sedlice – Opatovice, dostavba estakády, Estakáda na silnici R35 v km 3,15-4,10, 1700 nosná konstrukce, L20 – L23, Praha 2014.
- [15] PRACHTOVÁ, R. Sedlice – Opatovice, Dostavba estakády na silnici R35 v km 3,15 – 4,10, Protokoly o zkoušce betonu SQZ. Praha 2015.
- [16] PRACHTOVÁ, R. Sedlice – Opatovice, Dostavba estakády na silnici R35 v km 3,15 – 4,10, Předpínací protokoly VSL. Praha 2014.
- [17] KUBÍŘEK, L.; MATYÁŠ, L.; DYBAL, J. R35 Sedlice – Opatovice, dostavba estakády, levý most, přesuvná skruž pro betonáž nosné konstrukce, Praha 2013.
- [18] ZICH, M. Výstavba skladových kapacit – Loukov, Monitoring chování nádrže, zpráva o provedených měřeních. Brno 2010.
- [19] AUTOR NEUVEDEN. [www.google.cz](https://www.google.cz/maps/place/Vltava+Bridge/@50.3056011,14.3245745,1434m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x0:0x5366e85f9563384b!8m2!3d50.3056011!4d14.3245974) [online]. Dostupný na WWW: <https://www.google.cz/maps/place/Vltava+Bridge/@50.3056011,14.3245745,1434m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x0:0x5366e85f9563384b!8m2!3d50.3056011!4d14.3245974>.
- [20] AUTOR NEUVEDEN. [www.asyura2.com](http://www.asyura2.com/0406/idletalk10/msg/583.html) [online]. Dostupný na WWW: <http://www.asyura2.com/0406/idletalk10/msg/583.html>.

10 Seznam publikací autora

- [21] CHOVANEC, L.; HOFÍREK, R. Dvoukřídlový zvedací most "100-lecia Odzyskania Niepodległości Polski" v Sobieszewie – Polsko. In 24. Mezinárodní symposium mosty 2019. 2019. s. 159-166. ISBN: 978-80-86604-79-4.
- [22] HOFÍREK, R.; LANG, R.; ZICH, M. Changes in shrinkage after the application of insulation to the concrete surface. In 24th Concrete Days 2017. Solid State Phenomena. Zurich Switzerland: Trans Tech Publications, 2018. s. 121-126. ISBN: 978-3-0357-1284-1. ISSN: 1012-0394.
- [23] CHOVANEC, L.; HOFÍREK, R. Dvoukřídlový zvedací most v Sobieszewie - Polsko. Silnice a železnice, 2018, č. 4, s. 31-42. ISSN: 1801-822X.

- [24] HOFÍREK, R.; LANG, R.; ZICH, M. Změny průběhu smršťování po aplikování izolace na povrch betonu. In 24. Betonářské dny 2017. 1. Litomyšl: 2017. s. 1-6. ISBN: 978-80-906759-0-2.
- [25] HOFÍREK, R. Zatěžovací zkouška mostní konstrukce u obce Opatovice nad Labem, vyhodnocení napjatosti. In Juniorstav 2017. Brno: 2017. s. 1-8. ISBN: 978-80-214-5462-0.
- [26] HOFÍREK, R. Dlouhodobé sledování mostní konstrukce u obce Opatovice nad Labem. In Juniorstav 2016 18. odborná konference doktorského studia. 1. 2016. s. 1-8. ISBN: 978-80-214-5311-1.
- [27] HOFÍREK, R. Výstavba mostní konstrukce u obce Opatovice nad Labem. In Juniorstav 2016 18. odborná konference doktorského studia. 1. Vysoké učení technické v Brně, 2016. s. 1-6. ISBN: 978-80-214-5311- 1.
- [28] HOFÍREK, R. Dotvarování a smršťování – náhradní rozměr průřezu. In Juniorstav. Sborník abstraktů. 2015. s.113-120. ISBN:978-80-214-5091- 2.
- [29] HOFÍREK, R. Experiment změny smršťování betonových těles v důsledku změny vysychání průřezu. In Juniorstav. Sborník abstraktů. 2015. s. 112-117. ISBN: 978-80-214-5091- 2.
- [30] HOFÍREK, R. R35 Sedlice - Opatovice, Construction of the Flyover SO 206.2 at the R35 Expressway km 3.15 - 4.10. In Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015. Solid State Phenomena. 2015. s. 309-314. ISBN: 978-3-03835-675-2. ISSN: 1662-9779.
- [31] HOFÍREK, R.; ZICH, M. R35 Sedlice - Opatovice, dostavba estakády SO 206.2 - sledování napjatosti nosné konstrukce. In 22. Betonářské dny 2015, Sborník příspěvků konference. 1. vydání. Česká betonářská společnost ČSSI, 2015. s. 1-6. ISBN: 978-80-906097-0- 9.
- [32] HOFÍREK, R. R35 Sedlice - Opatovice, dostavba estakády SO 206.2 na silnici R35 v km 3,15-4, 10. In 22. Betonářské dny 2015, Sborník příspěvků konference. 1. vydání. Česká betonářská společnost ČSSI, 2015. s. 1-6. ISBN: 978-80-906097-0- 9.
- [33] MIKULA, J.; BAFFI, L.; GROULÍK, F.; RAKOUŠ, R.; ŘEDINA, M.; HOFÍREK, R. Estakáda na mimoúrovňovém křížení silnice R35 u Opatovic nad Labem. Silnice a železnice, 2015, roč. 2015, č. 1, s. 11-16. ISSN: 1801-822X.
- [34] HOFÍREK, R.; ZICH, M.; SLÁNSKÝ, B. Vliv změny náhradní tloušťky průřezu na jeho vysychání. In Betonarske dni 2014, Zborník prednášok. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2014. s. 381-386. ISBN: 978-80-8076-114- 1.

- [35] HOFÍREK, R.; ZICH, M. Náhradní rozměr průřezu a jeho vliv na smršťování. In 21. Betonářské dny 2014, Sborník ke konferenci. Hradec králové: Česká betonářská společnost ČSSI, 2014. s. 352-358. ISBN: 978-80-903806-7-7.
- [36] HOFÍREK, R.; ZICH, M. The effective cross-section thickness and its effect on shrinkage. In Proceedings from 21st Czech Concrete Day 2014. Advanced Materials Research. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, Churerstrasse 20, CH-8808 Pfaffikon, Switzerland, 2014. s. 168-171. ISBN: 978-3-03835-474-1. ISSN: 1022-6680.
- [37] SLÁNSKÝ, B.; ZICH, M.; HOFÍREK, R. Časově závislá analýza mostu s postupně stavěným příčným řezem s využitím 3D modelu. In Betonářské dny 2014 a 5. post kongresové kolokvium SNK fib - Zborník prednášok. Bratislava: STU v Bratislave, 2014. s. 123-126. ISBN: 978-80-8076-114-1.

11 Strukturovaný životopis

Osobní údaje:

Radovan Hofírek
Ústav betonových a zděných konstrukcí
Fakulta stavební
Vysoké učení technické v Brno
Veveří 331/95, 602 00 Brno
hofirek.r@fce.vutbr.cz

Vzdělání:

2013 – doposud	Doktorské studium Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební Obor: Konstrukce a dopravní stavby (K) Téma: Vliv změny náhradní tloušťky betonového průřezu na chování betonových konstrukcí	EQF8
2016 – 2018	Magisterské studium Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební Obor: Realizace staveb (R) Téma: Stavebně technologický projekt demolice a výstavby mostu	EQF7
2011 – 2013	Magisterské studium Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební Obor: Konstrukce a dopravní stavby (K) Téma: Návrh předpjatého komorového mostu	EQF7
2007 – 2011	Bakalářské studium Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební	EQF6

Obor: Konstrukce a dopravní stavby (K)

Téma: Návrh železobetonového mostu

2003 – 2007

Středoškolské vzdělání zakončené maturitou EQF4

SPŠ – stavební, Kudelova 8, Brno

Obor: Pozemní stavitelství (S)

Zahraniční stáž:

8/2013 – 2/2014

Univerzita v Aveiru, Portugalsko

Fakulta stavebního inženýrství

Práce na projektech:

FAST-J-14-2521 specifický výzkum

Vliv změny náhradní tloušťky průřezu na jeho vysychání

Dosavadní praxe:

8/2014 – doposud

Metrostav a.s., Divize 4, stavební společnost

Realizované projekty:

- D1 - úsek 19, SO203 – Most Vysočina
- Zdvihací most pře Martwu Wislu v Sobiszewie, Polsko
- D1 - úsek 6, SO202.1
- D11 – Osičky – Hradec Králové, SO244
- R35 dostavba estakády u obce Opatovice nad Labem

6/2012 – 8/2013

Link projekt s.r.o.

Projekční kancelář: mosty a konstrukce

Pomocný projektant – výkresy výztuže a tvarů, dimenzování ŽB monolitických a ocelových prvků

6/2008 – 6/2012

Hladík a Chalivopulos s.r.o.

Projekční kancelář: statika stavebních konstrukcí

Pomocný projektant: výkresy výztuže a tvarů ŽB monolitických a prefabrikovaných konstrukcí.

2007 – 2008

Projekce rodinných domů pod vedením Ing. Pirochty

2005 – 2006

PavingSpol – pomocný dělník na stavbě

Významná ocenění:

2013

„TOPEXPO – CENA REKTORA“ - Soutěž o nejlepší diplomovou práci v oboru doprava a dopravní stavitelství 2012

2013

„CENA KOMISE ČBS“ - Vynikající diplomová práce v oboru betonu 2013

2013

„ČESTNÉ UZNÁNÍ ČBS“ - Vynikající diplomová práce v oboru betonu 2013