

# Vliv vysychání na únosnost, použitelnost a životnost betonových prvků a konstrukcí

## DRYING EFFECT ON STRENGTH, SERVICEABILITY AND DURABILITY OF CONCRETE ELEMENTS AND STRUCTURES

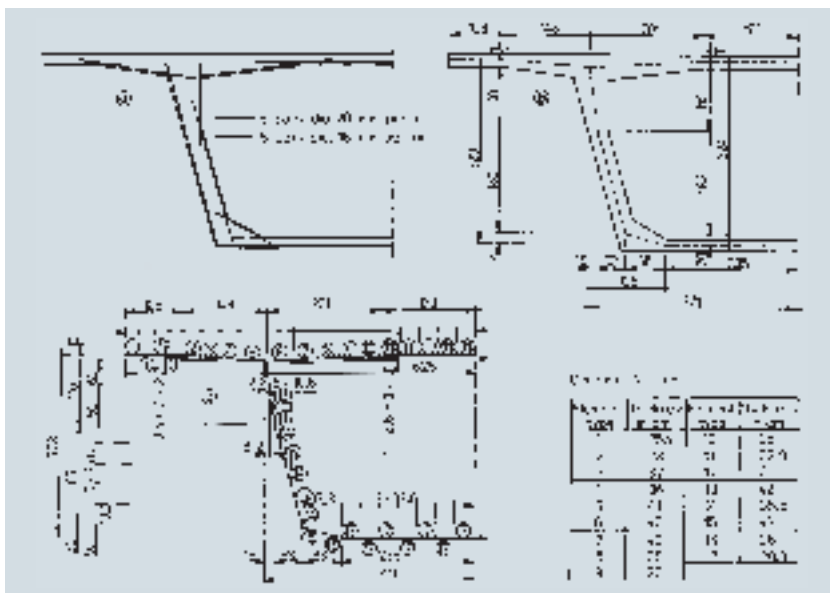
KAREL BAUER, VLADIMÍR  
ČERVENKA, VLADIMÍR KRÍSTEK

*Smršťování betonu v důsledku vysychání může značně ovlivnit chování betonových konstrukcí. V rámci této studie byly účinky vysychání sledovány u komorových mostů a vyhodnoceny pomocí numerické simulace skutečného chování založené na nelineární analýze metodou konečných prvků. Uvážení účinků smršťování vede k podstatnému zvýšení průhybů.*

*Drying shrinkage can have a significant effect on strength, serviceability and durability of concrete structures. The present study investigates the effects of drying on box girder bridges with help of numerical simulation of real behavior based on the non-linear finite element analysis. Considering the drying effect leads to a considerable increase of deflection.*

Je zřejmé, že pro objektivní posouzení skutečného chování betonových prvků a konstrukcí při vyšších úrovních namáhání nestačí běžný pružný výpočet založený na krajně zjednodušených materiálových modelech. Řešení, pokud má uspokojivě respektovat reálné chování betonu, nelze limitovat předpoklady pružnosti a linearity. Materiálový model musí vystihovat jak poškozování betonu v tlaku bez trhlin, tak i poškozování betonu po vzniku trhlin, spolupůsobení betonu a výztuže, výtuzné pruty i sítě, a též tahovou houževnatost betonu. Je nutno řešit i pokritické chování konstrukce po dosažení únosnosti na sestupné větvi diagramu zatížení-průhyb.

Vhodný přístup, využívající poznatků založených na nelineární lomové mechanice, je uveden v [2] a [3].



Obr. 2 Uspořádání, rozměry a vyztužení řešeného mostního segmentu [1]

Fig. 2 Geometry, dimensions and reinforcing of analyzed bridge segment [1]

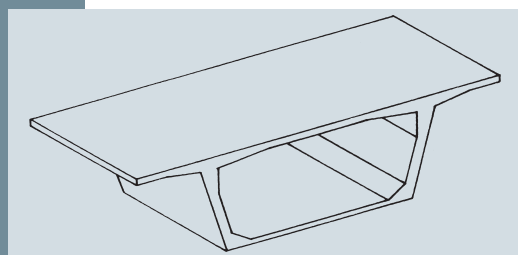
Je třeba si uvědomit, že výchozím stavem je konstrukce namáhaná napětími vyvolanými nerovnoměrným vysycháním a teplotními vlivy, které začaly působit obvykle ještě dávno před zavedením vnějšího zatížení konstrukce, řešení tohoto stavu je popsáno v [1]. Znamená to, že konstrukce (nebo konstrukční prvek) – i když není zatížena – má v sobě napětí, často takových intenzit, že vyvolávají vznik a rozvoj trhlin v povrchových oblastech a typické nelineární jevy.

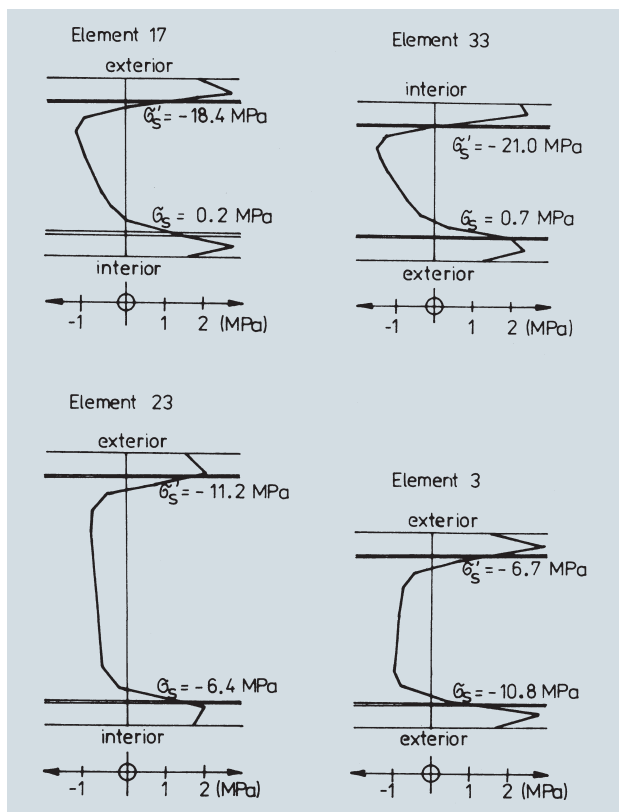
Proto při sledování chování konstrukce po zavedení vnějšího zatížení a při jeho postupném zvyšování je třeba vyjít ze stavu napětí vyvolaného vlivy objemových změn. Jednotlivé prvky (např. mostní konstrukce) byly nejprve vystaveny vlivům vysychání a po zabudování do konstrukce, v průběhu funkce mostu, zatěžovány dalším vnějším zatížením. Převzetí tohoto užitečného zatížení je základní funkcí konstrukce. Otázkou proto je, jaká je únosnost prvku prvotně zasaženého vlivy vysychání (popř. i vlivy teploty) ve srovnání s prvkem, u něhož by tyto vlivy byly ignorovány, tj. jak ovlivňuje primární poškození prvku vlivem vysychání a teploty jeho únosnost a deformace.

Obr. 1 Řešený mostní segment

Fig. 1 Bridge segment under consideration

Pro příklad kvantifikace tohoto počátečního vlivu objemových změn na únosnost a použitelnost železobetonových prvků byl vybrán komorový průřez mostu (obr. 1 a 2), jehož chování při vystavení vlivům vysychání bylo sledováno v [1]. Počáteční stav rozložení napětí v tomto segmentu charakterizující vliv vlhkosti a teploty je zřejmý z obr. 3. Zde jsou zobrazena rozložení těchto napětí po tloušťce prvků pro několik typických oblastí segmentu; tato napětí jsou závislá nejen na stáří betonu a na vzdálenosti uvažovaného bodu od povrchu, ale též na poloze sledovaného místa. Je zřejmé velmi nelineární, časově proměnné rozložení napětí, s maximem dosaženým v nízkém stáří betonu. Je též patrný značný vliv tahového změkčení betonu při vzrůstajících deformacích vrstev a vzniku trhlin při povrchu – napětí zde klesá. Dokonce v oblastech, kde by výpočet bez respektování účinků vysychání poskytl tlaková napětí, vznikají napětí tahová. Nejvyšších tlakových napětí je dosaženo ve vnitřní části





Obr. 3 Rozložení napětí po tloušťce prvků pro čtyři typické oblasti segmentu; napětí jsou závislá na stáří betonu, na vzdálenosti uvažovaného bodu od povrchu a na poloze sledovaného místa [1]

Fig. 3 Stress distribution through the thickness of walls for four typical regions of segment; stresses are dependent on concrete age, distance from the surface and location [1]

tenké spodní desky. Tlaková napětí jsou zde vyvolána nutností vyrovnat tahová napětí vzniklá při površích. Napětí v příčné výtuzi dosahují hodnot 20 MPa. Prokazuje se tedy, že běžné technické výpočty návrhové praxe, které jsou založeny na charakteristikách celých průřezů (moment setrvačnosti, průřezová plocha) a kde taktéž projevy dotvarování a smršťování betonu jsou vztaženy jako střední charakteristiky k celému průřezu, jsou nepoužitelné, neboť poskytují nesprávné, zavádějící výsledky, podstatně rozdílné od uvedeného výstižného řešení. Je zřejmé, že napětí získaná takovýmto výpočtem nerespektujícím skutečný nerovnoměrný proces vysychání jsou pouze fiktivní.

Uvedená studie sleduje chování segmentu při postupném zvyšování rovnoměrného zatížení horní desky až po dosažení konečné únosnosti.

Výpočet byl proveden použitím programu SBETA založeného na metodice uve-

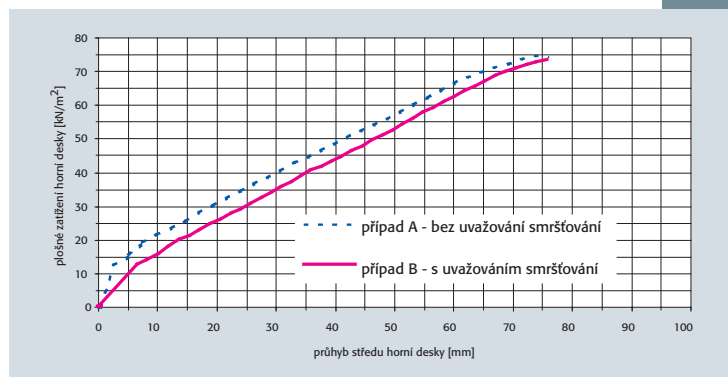
dené v [2]. Jsou porovnávány dva přístupy:

- v případě A nebyly vzaty v úvahu projevy vysychání a doprovodného smršťování betonu,
- v případě B tyto účinky respektovány byly. Pro případ B je výchozím stavem rozložení napětí a porušení mostního segmentu – jako důsledek vlivu vysychání – stav naznačený na obr. 3.

V obou případech byl mostní segment přitěžován postupnými kroky zatížením rovnoměrně rozloženým po povrchu horní desky. Řešení bylo provedeno metodou arc-length s automatickou úpravou velikosti zatěžovacího kroku. Základní hodnota přírůstku zatížení odpovídala 1,25 kN/m<sup>2</sup>.

Materiálové charakteristiky betonu a oceli použité ve výpočtu jsou uvedeny v tab. 1.

Pro porovnání obou případů je nejprve na obr. 4 zobrazena závislost průhybu středu šířky horní desky na velikosti

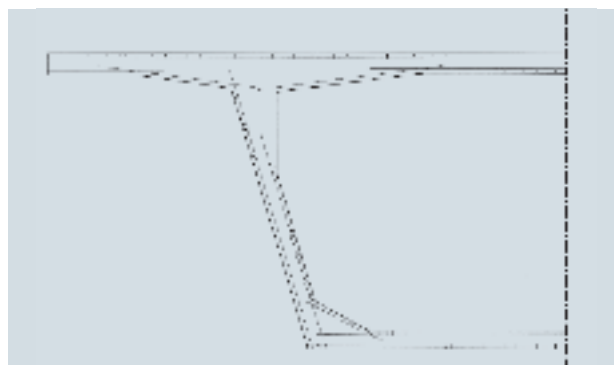


Obr. 4 Ovlivnění vztahu mezi průhybem a zatížením horní desky mostního segmentu prvotními objemovými změnami betonu – závislost průhybu středu horní desky na zatížení

Fig. 4 Effect of initial volume changes on load-deflection relation of top slab of the bridge segment – relationship between deflection of the slab midspan and loading

Obr. 5 Oblasti trhlin vyvolaných smršťováním v nezátčeném segmentu

Fig. 5 Crack pattern in the segment due to shrinkage only

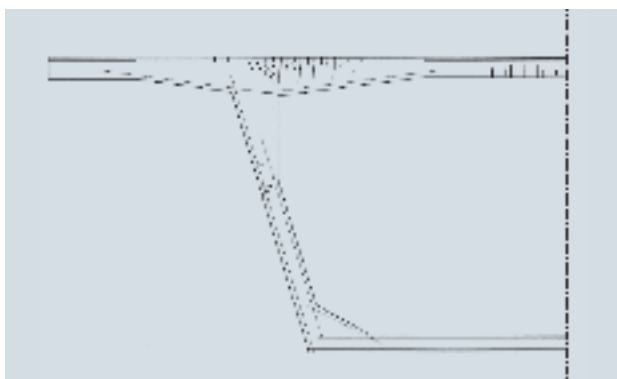


zatížení horní desky mostního segmentu. Jak je zřejmé z obr. 4, má počáteční stav napětí vyvolaný objemovými změnami

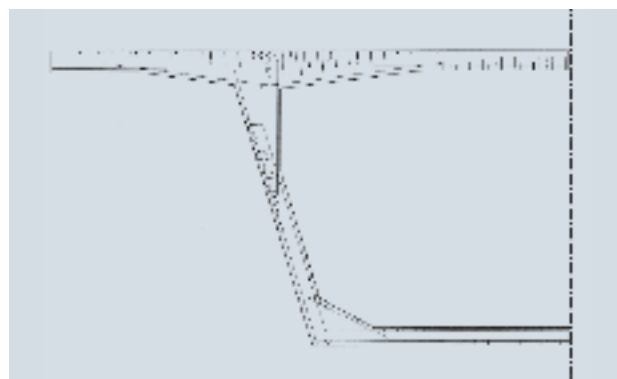
Tab. 1 Materiálové charakteristiky pro nelineární výpočet

Tab. 1 Material parameters for non-linear analysis

Materiálový parametr	Hodnota
Beton	
Pevnost v tlaku [MPa]	42,5
Modul pružnosti [MPa]	36950
Pevnost v tahu [MPa]	3,257
Lomová energie [MJ/m <sup>3</sup> ]	0,000050
Poissonovo číslo	0,2
Objemová hmotnost vyztuženého betonu [t/m <sup>3</sup> ]	2,5
Výtuz	
Modul pružnosti [MPa]	200000
Mez kluzu [MPa]	640



a) případ A – bez uvažování smršťování, zatížení horní desky 25 kN/m<sup>2</sup>  
a) case A – without shrinkage, loading of top slab 25 kN/m<sup>2</sup>



b) případ B – s uvažováním smršťování, zatížení horní desky 25 kN/m<sup>2</sup>  
b) case B – with shrinkage, loading of top slab 25 kN/m<sup>2</sup>

Obr. 6 Rozvoj trhlin v segmentu při provozním zatížení (na 30% únosnosti): a) při ignorování vlivů objemových změn, b) při jejich respektování

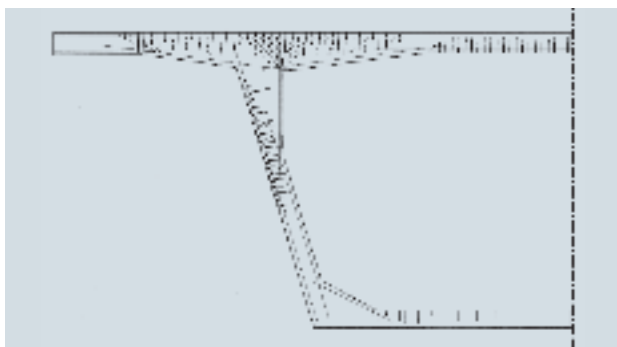
Fig. 6 Crack pattern in the segment under service load (30% of ultimate load): a) without volume change effect, b) with consideration of volume change effect

poměrně malý vliv na celkovou únosnost řešené konstrukce, která se v obou případech pohybuje okolo 75 kN/m<sup>2</sup>. Zcela zásadní je však nárůst průhybů v důsledku prvotního zasažení konstrukce vlivy objemových změn. Při zatížení na úrovni 25 kN/m<sup>2</sup> (tj. jedné třetiny meze únosnosti prvku) vzroste průhyb vlivem objemových změn více než o třetinu oproti případu, kdy je tento vliv opomenut. Pro nižší hodnoty zatížení je nárůst ještě dramatictější: průhyb při uva-

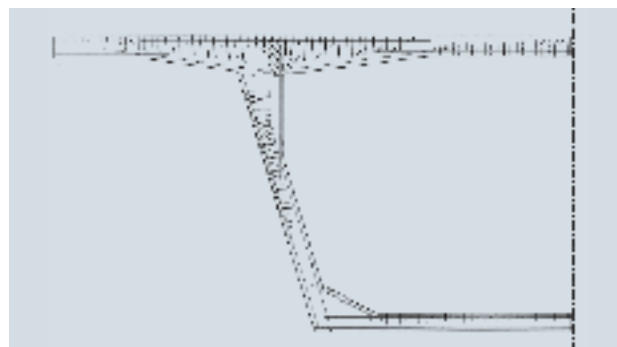
Obr. 7 Rozvoj trhlin v segmentu při zatížení na mezi únosnosti: a) při ignorování vlivů objemových změn, b) při jejich respektování

Fig. 7 Crack pattern in the segment under ultimate load: a) without volume change effect, b) with consideration of volume change effect

a) případ A – bez uvažování smršťování, zatížení horní desky 75 kN/m<sup>2</sup>  
a) case A – without shrinkage, loading of top slab 75 kN/m<sup>2</sup>



b) případ B – s uvažováním smršťování, zatížení horní desky 75 kN/m<sup>2</sup>  
b) case B – with shrinkage, loading of top slab 75 kN/m<sup>2</sup>



žování objemových změn může být i více než dvojnásobný.

Objemové změny ovlivňují vznik a vývoj trhlin v betonovém prvku. Zatímco v případě, kdy objemové změny nejsou respektovány (případ A) se předpokládá, že nezatížený prvek je bez napětí a tudíž i bez trhlin a deformací, je ve skutečnosti (případ B) situace zcela odlišná. Vlivem objemových změn vznikají v prvku počáteční napětí přesahující mez pevnosti v tahu a vznikají zde trhlinky. Jakým způsobem je nezatížený prvek zasažen trhlinami je dobře patrné z obr. 5.

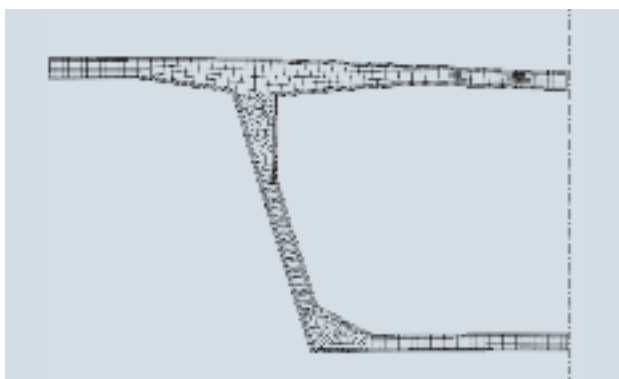
Je zřejmé, že zatěžujeme-li stejným režimem totožný, avšak v jednom případě neporušený a ve druhém případě již trhlínkami porušený mostní segment, bude se odlišným způsobem vyvíjet nejen deformace konstrukce, ale i další rozvoj a rozšiřování trhlin. Je to způsobeno rozdílnými parametry takto „totožných“ prvků. Porovnáním obr. 5 s 6 a), b) je dobře patrný rozdíl v rozvoji trhlin pro oba případy při úrovni zatížení horní desky 25 kN/m<sup>2</sup>, tedy při cca 1/3 únosnosti. Zatímco v případě, kdy s počátečními objemovými změnami nepočítáme, je trhlínkami zasažena pouze horní deska, a to jen v oblastech největších ohybo-

vých momentů a částí stěn, v druhém případě je segment zasažen podstatně masivněji. Trhliny jsou rozšířeny ve stěnách i ve spodní desce, a to při obou povrchích. Horní deska je již potrhána v celém rozsahu. Stejně markantní rozdíl je vidět na obr. 7 a), b) pro zatížení na mezi únosnosti.

Tvar průřezu mostního segmentu po deformaci je uveden pro oba případy, při zatížení na úrovni 30% meze únosnosti na obr. 8 a na mezi únosnosti na obr. 9.

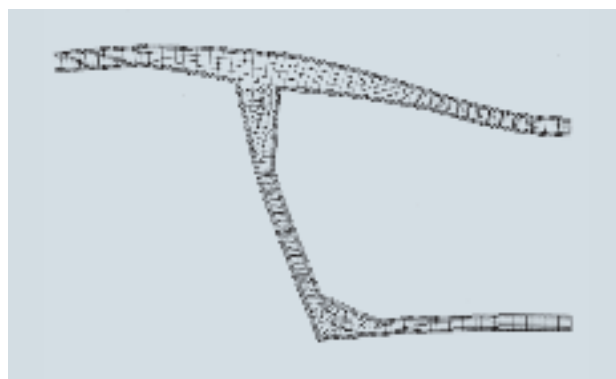
Samotný tvar deformované konstrukce se pro případy, kdy je s objemovými změnami počítáno, příliš neliší od případu, kdy je smrštění zanedbáno. Výrazně rozdílná je však absolutní velikost průhybu jednotlivých bodů konstrukce. Při uvažování smršťování má průhyb středu horní desky na úrovni meze únosnosti velikost 75 mm, což je o 5 mm více oproti případu, kdy se smršťováním nepočítáme. Na úrovních blízkých hodnotám provozního zatížení je rozdíl ještě markantnější. Průhyb při uvažování smršťování se zvětší ze 14 na 21 mm, což představuje padesátiprocentní nárůst.

Z hlediska životnosti konstrukce je podstatné zasažení segmentu trhlínkami;



Obr. 8 Deformace mostního segmentu při zatížení na 30% únosnosti (25 kN/m<sup>2</sup>, deformace 10x převýšeny)

Fig. 8 Deformed form of bridge segment under 30% of ultimate load (25 kN/m<sup>2</sup>, deformations magnified 10x)



Obr. 9 Deformace mostního segmentu při zatížení na mezi únosnosti (75 kN/m<sup>2</sup> – mezní zatížení, deformace 10x převýšeny)

Fig. 9 Deformed form of bridge segment under ultimate load (75 kN/m<sup>2</sup>, deformations magnified 10x)

významné je jejich rozmístění a zejména jejich šířky. I toto kritérium jednoznačně naznačuje, že zanedbání vlivu prostředí v návrhu betonových prvků může vést k podstatnému zvýšení rizika koroze, a tudíž ke znehodnocení konstrukce. Na grafech vyznačených na obr. 10 je dobře patrné zasažení horní desky průřezu trhlinami i jejich šířky pro oba řešené případy, a to jak při spodním, tak při horním okraji.

U případu, kdy není počáteční stav vyvolaný objemovými změnami respektován, je při zatížení na cca 1/3 meze únosnosti horní deska zasažena trhlinami zhruba ze 40 % (buď při horním, nebo při dolním povrchu – obr. 6). Maximální šířka trhlin je 0,11, resp. 0,07 mm. Pokud do výpočtu vliv vysychání a doprovodného smršťování zahrneme, je prakticky celá horní deska zasažena trhlinami (buďto při horním, nebo při dolním povrchu – obr. 7). Šířka trhlin dosahuje 0,09 mm.

Zatímco šířka trhlin je v obou případech

prakticky shodná, je markantní (více jak 100%) rozdíl v rozsahu oblastí, které jsou trhlinami zasaženy (obr. 10). Srovnání rozvoje a šířky trhlin ve stěnách a spodní desce pro oba případy vede ke stejným závěrům.

Obdobná maximální šířka trhlin v obou případech je dána poměrně silným vyztužením analyzovaného prvku. Výztuž limituje nárůst šířky jednotlivých trhlin a vede k rovnoměrnému rozdělení většího počtu trhlin na větší oblast konstrukce. V případě slabě vyztuženého nebo (hypoteticky) prostého betonu by došlo zřejmě k nárůstu šířky jednotlivých trhlin.

Z uvedených výsledků je zřejmé, že podcenění vlivu počátečního zasažení objemovými změnami může vést k neúměrnému riziku, a ve svých důsledcích k možnému znehodnocení konstrukce. Zatímco z hlediska celkové únosnosti není tento vliv příliš závažný, je naopak zcela podstatný z hlediska mezního stavu použitelnosti a zejména z hlediska životnosti konstrukce.

Výsledky byly získány v rámci řešení grantových projektů 103/02/1005 a 103/02/0020 podporovaných Grantovou agenturou ČR a výzkumného záměru ČVUT – Stavební fakulty CEZ J04/98:210000003. Článek byl lektorován.

Ing. Karel Bauer, CSc.

PIT, o. p. s.

Choceradská 13, 141 38 Praha 4

e-mail: [pti@pti.cz](mailto:pti@pti.cz), [www.pti.cz](http://www.pti.cz)

Ing. Vladimír Červenka, PhD

Červenka Consulting

Předoje 22, 162 00 Praha 6

tel.: 220 610 018

e-mail: [cervenka@cervenka.cz](mailto:cervenka@cervenka.cz), [www.cervenka.cz](http://www.cervenka.cz)

Prof. Ing. Vladimír Křístek, DrSc.

Katedra betonových konstrukcí a mostů

Fakulta stavební ČVUT

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

tel.: 224 353 875

e-mail: [kristek@fsv.cvut.cz](mailto:kristek@fsv.cvut.cz)

Obr. 10 Šířka trhlin v horní desce při zatížení na 30% únosnosti  
Fig. 10 Crack width along the face of the top slab under 30% of ultimate load

#### Literatura:

- [1] Bažant Z. P., Křístek V., Vitek J. L.: Drying and Cracking Effects in Box-Girder Bridge Segment, Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 1, 1992, pp. 305–321
- [2] Červenka V.: Constitutive Model for Cracked Reinforced Concrete, Journal ACI, Proc. V. 82, Nov-Dec, No. 6, pp. 877–882, 1985
- [3] Červenka V.: fib Symposium 1999 Praha, Sekce 3: Modelování betonových konstrukcí, Beton a zdivo, VII, 2000/2, pp. 10–12, 1999

