

STATIKA MOSTNÍCH KONSTRUKCÍ A TEORIE STÁRNUTÍ STRUCTURAL ANALYSIS OF BRIDGES AND RATE-OF-CREEP THEORY

JAROSLAV NAVRÁTIL

Příspěvek připomíná některé problematické vlastnosti modelů stárnutí, smršťování a dotvarování betonu podle ČSN 73 6207, které jsou doposud používány v každodenní praxi.

Some questionable features of the models for ageing, shrinkage, and creep of concrete according to ČSN 73 6207 are reminded in the paper. The models are still used in everyday practice.

Moderní stavební konstrukce často prochází během výstavby různými statickými systémy, jsou tvořeny kombinací hybridních systémů z oceli, prefabrikovaného a monolitického betonu, přičemž hlavní nosné prvky jsou používány jako podpůrný systém pro později budované části průřezu či konstrukce. Proto je velmi důležité použít pro statickou analýzu konstrukce správné hodnoty modulu pružnosti, stárnutí betonu, jeho dotvarování a smršťování [6], [11]. Jak dokazuje řada příkladů z praxe, podcenění těchto charakteristik vede k nadměrným průhybům kon-

strukce v montážních i provozních stavech, poruchám dilatačních spár a redistribuci napětí v průřezu i konstrukci.

V rámci své pedagogické i znalecké činnosti i jako pracovník zodpovědný za vývoj software pro analýzu betonových konstrukcí firmy SCIA se však často setkávám s kolegy, kteří vědomě či nevědomě ignorují tyto skutečnosti. Část z nich používá dávno překonané teorie s bezelstnou nevědomostí, ostatní zaštiťují ustanoveními ČSN 73 6207 [4] pohodlné používání **zaběhnutých** metod a nástrojů.

Nechci v tomto příspěvku napadat zdravý konzervatismus mostních inženýrů a sám nevidím dobrý důvod k opuštění **osvědčených** metod a nástrojů. Domnívám se však, že je třeba respektovat nesporný vývoj v této oblasti, který prokázal chyby v dříve doporučovaných a používaných postupech a teoriích. Přestože věřím, že dále uvedené skutečnosti jsou velké části inženýrů známy, rozhodl jsem se na konkrétních jednoduchých příkladech ukázat, jak fatálním chybám může „důsledným“ uplatněním některých ustanovení [4] dojít.

VLIV MODULU PRUŽNOSTI A STÁRNUTÍ BETONU

V rámci studie vlivu výstavby a předpětí na spojitě postupně budované mosty [8] byl sledován vliv modulu pružnosti a stárnutí betonu na průhyby při výstavbě konstrukce. Byl řešen velmi štíhlý nosník dvouokmoroového průřezu, jehož průřez byl betonován ve dvou etapách. Po 7 dnech od betonáže spodní část průřezu byla dobetonována spřažená horní deska. Byl sledován průhyb převislého konce konstrukce v montážním stavu, kdy byl odkružen prostý nosník o rozpětí 42 m s převislými konci délky 10 m. Úloha byla řešena v pěti variantách, které se lišily pouze velikostí uvažovaného modulu pružnosti, případně stárnutím. Modul pružnosti byl uvažován:

1. podle EC2 [10], $E_{28} = 31,5$ GPa se stárnutím standardně definovaným dle [10],
2. podle ČSN 73 6207 [4], $E_{konst} = 36$ GPa, bez stárnutí (ČSN 73 6207 neu-

vádí žádný vztah pro změnu modulu pružnosti vlivem stárnutí betonu),

3. podle ČSN 73 6207 [4] se zadaným stárnutím prostřednictvím programu Nexis [5] tak, aby byl vypočtený modul pružnosti po 28 dnech $E_{28} = 36$ GPa a aby bylo po 7 dnech dosaženo 80 % pevnosti dle požadavku [4],

4. podle ČSN 73 6207 [4] se zadaným stárnutím prostřednictvím programu Nexis [5] tak, aby vypočtený modul pružnosti po 28 dnech odpovídal hodnotě podle [10] $E_{28} = 31,5$ GPa a aby bylo po 7 dnech dosaženo 80 % pevnosti dle požadavku [4],

5. podle EC2 [10] se zadaným stárnutím prostřednictvím programu Nexis [5] tak, aby vypočtený modul pružnosti po 28 dnech odpovídal hodnotě podle EC 2 $E_{28} = 31,5$ GPa a aby bylo po 7 dnech dosaženo 80 % pevnosti dle požadavku [4].

Pokud v *obr. 1* vyneseme ve sloupcovém grafu průhyb vypočtený standardním způsobem podle ČSN 73 6207 [4] jako 100 % a výsledky ostatních výpočtů v odpovídajícím poměru, získáme velmi zajímavé srovnání. Je zřejmé, že model dle ČSN 73 6207 se výrazně liší od přesnějšího modelu EC2 [10]. Čísla sloupců v *obr. 1* odpovídají výše uvedenému číslování pěti variant řešení.

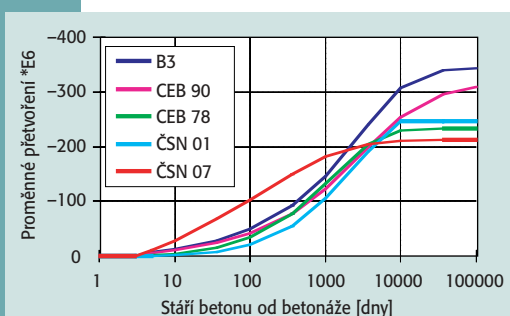
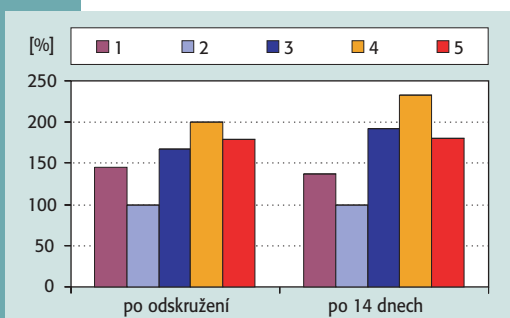
VELIKOST SMRŠŤOVÁNÍ BETONU

Rozdíly mezi jednotlivými teoriemi smršťování a dotvarování betonu byly již popsány v mnoha učebnicích a byla provedena řada seriózních studií. V tomto příspěvku se omezíme na citaci některých výsledků studie [7]. Na *obr. 2* je srovnání smršťování betonu vypočtené podle doporučení [1], [2], [9], [3] a [4]. Jsou vyneseny hodnoty funkce smršťování za předpokladu ošetřování betonu po dobu tří dnů. Jak je zřejmé z grafů na obrázku, průběh smršťování v čase i jeho konečná hodnota vypočtená podle [4] jsou výrazně odlišné od ostatních modernějších teorií.

DOTVAROVÁNÍ BETONU A HISTORIE ZATÍŽENÍ

Obecně známá je i neschopnost teorie stárnutí použité v [4] zohlednit rozdílnou historii zatížení betonu při výpočtu dotva-

Obr. 1 Srovnání průhybů převislého konce
Fig. 1 Comparison of deflection of cantilever



Obr. 2 Srovnání smršťování betonu
Fig. 2 Comparison of shrinkage of concrete

rování. Ke zhodnocení velikosti chyby nám poslouží jednoduchý srovnávací příklad tlačенého elementu z obr. 3. V horní části obrázku jsou naznačeny dva typy zatížení normálovými silami, které mají rozdílnou historii (síly jsou vneseny postupně v časech t_0 a t_1), přičemž od času t_1 je celková hodnota síly u obou typů zatížení totožná.

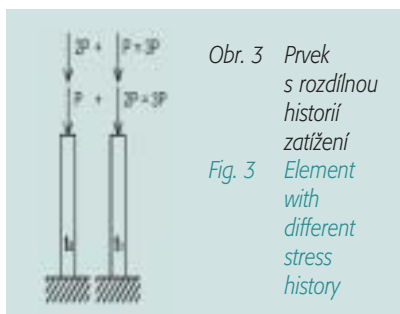
Obě úlohy byly řešeny podle [4] a [10]. Ze srovnání v obr. 4 vyplývá:

- výpočet podle [4] nelze správně posíhnut dotvarování prvků s rozdílnou historií zatížení, neboť přírůstky dotvarování od času zatížení t_1 jsou pro obě historie zatížení stejné,
- rozdíly přírůstků dotvarování od času zatížení t_1 dosahují při výpočtu podle [10] ještě po 270 letech hodnotu téměř 10 %,
- absolutní velikost přírůstků dotvarování podle [4] je ve srovnání s [10] výrazně nižší.

K tomuto bodu je třeba poznamenat, že kromě správné volby reologického modelu je pro zohlednění vlivu historie zatížení betonu důležitá i použitá metoda výpočtu dotvarování. Z tohoto hlediska jsou vhodné numerické metody založené na časové diskretizaci [5], [6], na rozdíl od přibližných metod využívajících afinitu dotvarování.

ROZDÍLNÉ SMRŠŤOVÁNÍ A DOTVAROVÁNÍ SPŘAŽENÝCH ČÁSTÍ PRŮŘEZU

Z podstaty smršťování a dotvarování betonu je zřejmé, že štíhlejší prvky vysychají, a tedy smršťují a dotvarují rychleji než prvky masivní. Všechny moderní teorie tento jev ve větší či menší míře zohledňují [1], [2], [3], [9], [10]. Bohužel ČSN 73 6207 [4] tuto možnost nedává. Pro ukázkou významnosti tohoto vlivu byly v [8] provedeny srovnávací výpočty, ve kterých byla výše popsána mostní konstrukce řešena jako konstrukce s celistvým průřezem, dále jako spřažená konstrukce (samostatně modelována základní část průřezu a spřažená deska) bez ošetřování



Obr. 3 Prvek s rozdílnou historií zatížení
Fig. 3 Element with different stress history

Obr. 4 Přírůstek dotvarování od času zatížení t_1

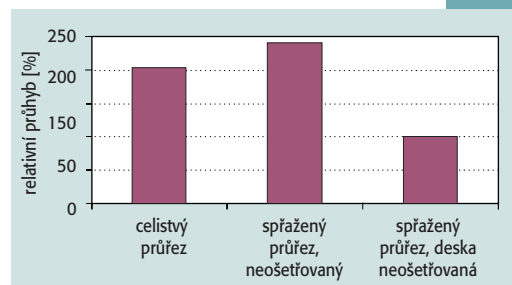
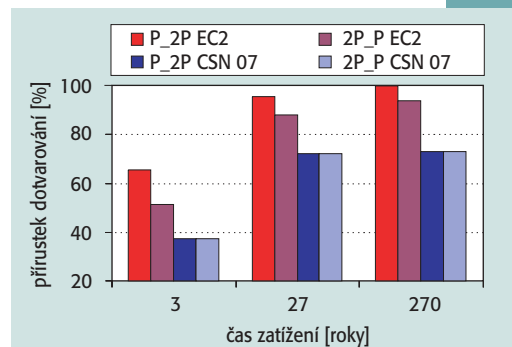
Fig. 4 Increment of creep strain from time of loading t_1

betonu a jako spřažená konstrukce s řádně ošetřovaným betonem (po dobu 10 dnů od betonáže). Na Obr. 5 je obdobně jako v předchozím případě sledován průhyb převislého konce konstrukce. Z grafu opět vyplývají fatální rozdíly průhybů v montážním stavu 14 dnů po odskrutžení vyplývající z rozdílného smršťování a dotvarování betonu obou částí průřezu.

ZÁVĚR

V příspěvku byly na příkladech ukázány některé nedostatky v modelech smršťování, dotvarování a stárnutí betonu a v hodnotách modulů pružnosti doporučených v ČSN 73 6207 [4]. Srovnání s modernějšími a přesnějšími předpisy ukazují mnohdy fatální chyby, které se mohou neblaze projevit při návrhu konstrukce citlivé na tyto jevy.

Cílem článku není napadat normotvůrce doposud platné normy pro navrhování mostních konstrukcí [4]. Podle mého názoru může norma dále poskytovat projektantům základ či rámec pro bezpečný návrh konstrukce. Článek má být spíše apelem na praktické inženýry, kteří by měli o výše uvedených nedostatcích nejen vědět, ale měli by je zohlednit při návrhu a analýze konstrukcí například prove-



Obr. 5 Relativní průhyb převislého konce
Fig. 5 Relative deflection of cantilever

dením paralelního výpočtu pomocí některého z přesnějších modelů.

Tato práce vznikla za podpory projektu MSM 261100007.

Doc. Ing. Jaroslav Navrátil, CSc.
ÚBZK, VUT v Brně
Veveří 95, 662 37 Brno
e-mail: navratil.j@fce.vutbr.cz

Literatura:

- [1] Bažant Z. P., Baweja S.: Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures – Model B3, RILEM Rec., Mater. Struct., 28 (1995), 357–365
- [2] CEB-FIP Model Code 1990, Final Draft 1991, BULLETIN No 203, CEB, Lausanne, 1990
- [3] ČSN 73 21201 Navrhování betonových konstrukcí, Vydavatelství ÚNM Praha, 1981
- [4] ČSN 73 6207 Navrhování mostních konstrukcí z předpjatého betonu, Český normalizační institut, 1993.
- [5] Fáze výstavby, předpínací kabely, TDA. Sys. prog. pro projektování prutových a stěnodeskových konstrukcí – manuál programu, SCIA CZ, 2001
- [6] Navrátil J.: Časově závislá analýza rámových konstrukcí, *Stavebnický časopis*, 7 (40), 429–451, 1992
- [7] Navrátil J.: Studie reologických modelů pro beton, *Stavební obzor*, 1/1998, str. 12–16, 1998
- [8] Navrátil J., Novák R.: Studie vlivu výstavby a předpětí na spojitě postupně budované mosty, Sb. příspěv. "Statika mostů 2002", mez. československý odb. sem., Brno, SCIA CZ & ČKAIT, 2002, str. 19–31
- [9] Practical design of reinforced and prestressed concrete structures based on the CEB-FIP Model Code MC78, Thomas Telford Ltd, London, 1984
- [10] prEN 1992 (Final draft), Eurocode 2: Design of Concrete Structures, European Standard, ECS, Brussel, 2001
- [11] Stráský J., Navrátil J., Suský S.: Applications of Time-Dependent Analysis in the Design of Hybrid Bridge Structures, *PCI Journal*, vol. 46 no. 4, 56–74, 2001