

Modelling of gradual construction of road bridge and its creep

J. Brož, J. Kruis,¹

Summary: *New technologies of highway concrete bridges construction require a more detailed analysis of bridges. Especially, the gradual construction has to be modelled because there are specific load cases which act only during a short period. Although the load cases disappear after a short time, they have significant influence on the behaviour of the concrete bridge. It is caused by the fact that the concrete is loaded very early and its stiffness is not developed to the final magnitude. The paper deals with modelling of gradual construction which reveals itself by changing the number of nodes and finite elements during the analysis.*

1. Úvod

V současné době je v České republice budována síť dálnic, které se neobejdou bez mostních konstrukcí. Mosty patří mezi nejdražší části dálnic a jejich výstavbě je věnována velká pozornost. Zejména se vyvíjejí nové technologie výstavby mostů, které je třeba nejprve numericky ověřit. Tento příspěvek se zabývá právě numerickými modely popisujícími několik verzí výstavby dálničních předpjatých mostních konstrukcí.

Moderní postupy výstavby předpjatých mostů zejména požadují krátký pracovní takt, tedy dobu, potřebnou k výstavbě jednoho pole. Nově postavené pole je proto krátce podepřeno skruží a v případě některých postupů výstavby je velmi brzy zatíženo dalšími částmi konstrukce. Krátký pracovní takt vede také na zavedení předpětí velmi brzo po vybetonování pole. Zatížení aplikovaná v raných stádiích se mohou projevit velkým dotvarováním, které převyšuje povolené normové hodnoty.

2. Popis konstrukce a technologie výstavby

Příspěvek se zabývá mostem, který se bude nacházet na budované dálnici D47 Brno - Ostrava v úseku u měst Lipník nad Bečvou a Bělotín. Dálnice D47 je v tomto místě budována jako šestiproudá. Most bude budován pomocí technologie betonáže na přesuvné skruži.

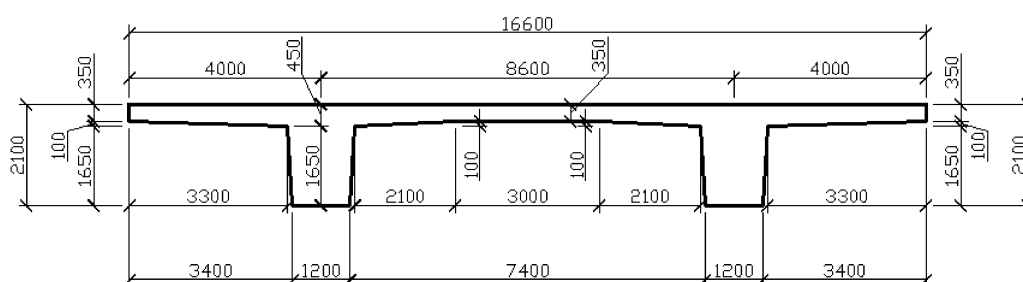
Most je rozdělen na pravou a levou část. Tyto části jsou zcela samostatné, jde tedy o dva samostatné mosty. Na obou mostech se nacházejí tři jízdní pruhy o šířce 3,75 m a odstavný

¹ Ing. Jaroslav Brož, Katedra mechaniky, Stavební fakulta ČVUT, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, tel. +420 224 355 417, e-mail broz@cml.fsv.cvut.cz, doc. Ing. Jaroslav Kruis, Ph.D., Katedra mechaniky, Stavební fakulta ČVUT, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, tel. +420 224 354 369, e-mail jk@cml.fsv.cvut.cz,

pruh o šířce 2,5 m. Most má 10 polí, první a desáté pole má rozpětí 25 m a druhé až deváté pole má rozpětí 32 m. Celková délka mostu je tedy 306 m. Podrobnější popis konstrukce a technologie výstavby lze nalézt v práci [Brož 2007].

2.1. Mostní konstrukce

Mostní konstrukce je z betonu třídy C30/37 a je dodatečně předpínaná. Podélné předpětí tvoří 15 ks lan Dywidag 15,7 mm St1570/1770 v jednom kanálku a příčné předpětí 4 ks lan Dywidag 15,7 mm St1570/1770 v jednom kanálku. V podélném směru je konstrukce definována jako spojitý nosník. V příčném řezu je most definovaný jako dvoutrámový most s deskou o šířce 17,1 m. Tvar trámu je lichoběžníkový s výškou 2,1 m a spodní šířkou 1,2 m. Tloušťka desky je na okraji a uprostřed mostu 0,35 m, směrem k trámu se zvyšuje až na 0,45 m. Příčný řez mostu je vyobrazen na obr. 1.



Obrázek 1: Příčný řez mostní konstrukcí.

2.2. Přesuvná skruž

Přesuvná skruž se skládá v příčném směru ze tří podélných ocelových příhradových nosníků. Tyto nosníky jsou spojeny příčníky z válcovaných profilů IPE. Jednotlivé příhradové nosníky jsou ještě rozděleny na části pro snadnější manipulaci při transportu. Skládají se z hlavního nosníku, redukce a nosu pro vysouvání. Přesuvná skruž je zachycena na fotografii na obr. 2.

2.3. Technologie výstavby

Most bude betonován na přesuvné skruži postupně od pole číslo 1 k poli číslo 10 a zpět v druhém směru. Jeden takt mostu je budován 15 dní. Časový harmonogram jednoho taktu je uveden v tab. 1. Činnosti jsou prováděny přesně tak, jak jsou za sebou řazeny v tab. 1.

3. Popis modelování

3.1. Materiálové modely

Pro betonovou mostovku byl použit modul pružnosti betonu $E = 30$ GPa a stáří betonu při zatížení bylo 3 dny. Pro ocelovou skruž byl použit modul pružnosti $E = 210$ GPa. Jako model dotvarování byl použit Bažantův model B3. Podrobnější popis Bažantova modelu B3 lze nalézt v článkách [Bažant 1995], [Bažant 1995].



Obrázek 2: Přesuvná skruž.

Tabulka 1: Časový postup při budování jednoho taktu.

Pořadí	Činnost	Délka trvání [den]
1	Přesun skruže	2
2	Urovnání bednění	2
3	Armování včetně kanálků	5
4	Betonáž	1
5	Technologická pauza	3
6	Předpínání včetně injektáže	2

3.2. Modelování postupné výstavby

Modelování postupné výstavby konstrukce je v programu MEFEL ([SIFEL]) zajištěno pomocí tzv. časových funkcí. Každý stupeň volnosti a každý konečný prvek má přiřazenu časovou funkci, která rozhoduje o zapnutí či vypnutí příslušné entity v požadovaném čase. Je-li hodnota časové funkce rovna nule, je entita vypnuta. Je-li hodnota časové funkce kladná, je entita zapnuta. V každém časovém kroku se zjišťuje, zda-li nedošlo k vypnutí nebo zapnutí nějakého stupně volnosti nebo prvku. Pokud došlo k nějaké změně, musejí se získané výsledky uložit, přegenerovat kódová čísla (čísla neznámých), přelokovat matice a vektory a namapovat uložené výsledky na nový stav problému. Pro účely grafického zobrazení výsledků je možné vložit pomocný krok sloužící k odstranění nespojitosti v řešení.

Při postupné výstavbě je důležité určit dobu, kdy nastane spolupůsobení stávajícího a nově vybudovaného pole. Tento problém je při postupné výstavbě mostu vyřešen následujícím způsobem. Na každém rozhraní mezi poli byly zdvojeny uzly konečněprvkového modelu mostovky.

Těmto uzlům byly přiděleny časové funkce, které zajistily jejich spojení po uplynutí předem zvoleného časového úseku. Velikost časového úseku, po kterém byly uzly spojeny, byla tři dny.

3.3. Zatížení konstrukce

Betonová mostovka byla zatížena vlastní tíhou. Vlastní tíha betonové mostovky byla uvažována hodnotou $\gamma = 25 \text{ kNm}^{-3}$. Toto zatížení bylo modelováno jako objemové zatížení na šestistěnných prvcích. Přesuvná skruž byla také zatížena vlastní tíhou. Vlastní tíha přesuvné skruže byla modelována jako uzlové zatížení.

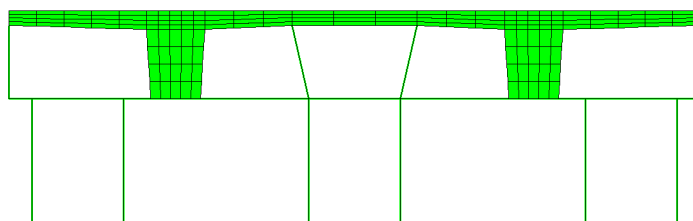
Předpětí bylo modelováno na betonové mostovce jako uzlové zatížení, protože jsou předpínací kabely podle výkresů téměř všude přímé. Změny směru kabelů jsou provedeny pomocí krátkých oblouků, které lze nahradit lomenou čarou (tečnovým polygonem). Předpětí se tak projeví jen osamělými silami v místech lomů a na začátcích a koncích kabelů. Bylo uvažováno jak podélné, tak příčné předpětí.

Hodnota síly pro jeden kanálek pro podélné předpětí měla hodnotu $P_p = 2,394 \cdot 10^6 \text{ N}$, což odpovídá předpínacímu napětí $\sigma_p = 1330 \text{ MPa}$ a 15 lanům Dywidag 15,7 mm St1570/1770. Hodnota síly pro jeden kanálek příčného předpětí měla hodnotu $P_{pr} = 0,894 \cdot 10^6 \text{ N}$, což odpovídá předpínacímu napětí $\sigma_p = 1415 \text{ MPa}$ a 4 lanům Dywidag 15,7 mm St1570/1770.

3.4. Modely mostovky a skruže

Pro generování konečných prvků pro mostní konstrukci a skruž byl použit program T3D. Manuál programu T3D lze nalézt na adrese [T3D]. Nejprve byly vytvořeny konečněprvkové modely tří příhradových ocelových nosníků, ze kterých byl spojením získán model skruže. Následně byl vytvořen model mostovky.

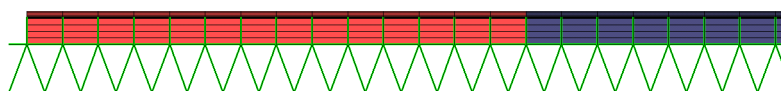
Celkový model skruže a mostní konstrukce má 33 630 uzlů a 34 944 konečných prvků, z čehož 14 040 prvků je prutových a 20 904 prvků je šestistěnných prostorových. Pro prutové prvky byly použity ohýbané prutové prvky se šesti stupni volnosti v každém uzlu. Šestistěnné prostorové prvky měly tři stupně volnosti v každém uzlu. Popis těchto prvků lze nalézt v knize [Bittnar a Šejnoha 1992]. Diskretizovaný celkový model je na obr. 3, 4 a 5.



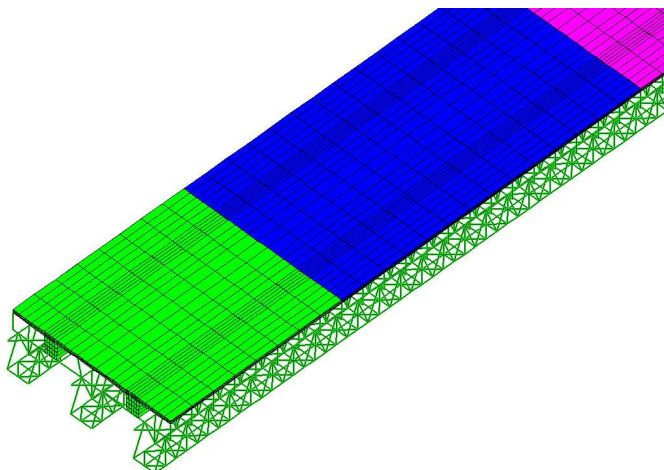
Obrázek 3: Diskretizace mostovky a skruže v podélném řezu.

3.5. Modely výstavby mostní konstrukce

Modely výstavby mostní konstrukce byly spočítány v programu MEFEL. Otevřený program MEFEL vyvíjený na katedře mechaniky FSv ČVUT slouží k výpočtům úloh mechaniky pevné



Obrázek 4: Boční pohled na konečněprvkový model.



Obrázek 5: Izometrický pohled na konečněprvkový model.

fáze metodu konečných prvků. Program lze použít pro řešení lineární statiky, dynamiky (vlastního i vynuceného kmitání), materiálově nelineární statiky, dotvarování, úloh s měnícím se počtem prvků a neznámých. Program MEFEL lze nalézt na adrese [SIFEL].

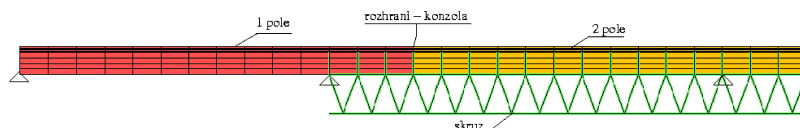
3.5.1. Výpočet dotvarování celého mostu bez postupné výstavby a bez skruže

Jako první byl proveden výpočet dotvarování samotného mostu vybetonovaného najednou bez výstavby. Zatížení bylo tvořeno kombinací podélného předpětí, příčného předpětí a vlastní tíhy. Veškeré zatížení bylo na konstrukci naneseno ve stejný čas. Stáří betonu mostu při zatížení bylo pro všechna pole mostu stejné. Rovnalo se hodnotě tří dnů.

3.5.2. Výpočet dotvarování pro most s modifikovanou postupnou výstavbou

Jako druhý byl proveden výpočet dotvarování mostní konstrukce budované pomocí přesuvné skruže, která je podepřena z pilíře na pilíř (viz obr. 6). Tento způsob podepření je označen jako varianta 1. Model byl vytvořen pro porovnání s modelem, jež se v současnosti při výstavbě používá.

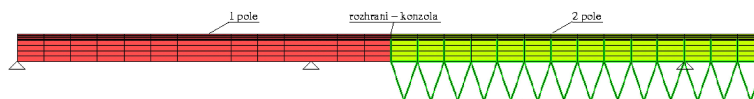
Jako zatížení byla uvažována kombinace podélného předpětí, příčného předpětí a vlastní tíhy. Zatížení na konstrukci bylo naneseno následujícím způsobem. Tři dny po vybetonování aktuálního taktu bylo aktivováno zatížení vlastní tíhou a pátý den po vybetonování aktuálního taktu bylo aktivováno podélné a příčné předpětí. Současně s aktivací předpětí byla deaktivována skruž pod tímto polem a aktivována pro následující pole, které se bude budovat v následujícím taktu.



Obrázek 6: Způsob podepření skruže označený jako varianta 1.

3.5.3. Výpočet dotvarování pro most s postupnou výstavbou

Jako poslední byl proveden výpočet dotvarování mostní konstrukce budované pomocí přesuvné skruže, která je zavěšena na konzolu vybetonovanou v předchozím taktu, a na dalším pilíři (viz obr. 7). Tento způsob podepření je označen jako varianta 2. Jedná se o podepření skruže, které se v současné době skutečně používá. Načasování zatížení je shodné jako u výpočtu dotvarování pro most s modifikovanou postupnou výstavbou.



Obrázek 7: Způsob podepření skruže označený jako varianta 2.

4. Výsledky modelování

Pro porovnání výsledků z jednotlivých variant výpočtů dotvarování byly vybrány tři uzly sítě na mostovce. Jejich čísla, souřadnice a popis lze nalézt v tab. 2. Vybrané uzly jsou též zmíněny na obr. 8. Pro vybrané uzly byly vytvořeny grafy průběhu svislého průhybu v čase (viz obr. 9, 10 a 11). Půběhy jsou zachyceny do doby ukončení výstavby, což je 150 dní. Podrobnější popis výsledků lze nalézt v práci [Brož 2007].

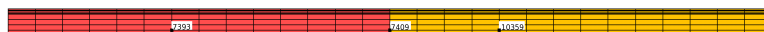
Tabulka 2: Tabulka uzlů a jejich souřadnic.

Číslo uzlu	Souřadnice x [m]	Souřadnice y [m]	Souřadnice z [m]	Popis umístění
7393	13,50	3,375	-1,6875	uprostřed 1. pole
7409	31,50	3,375	-1,6875	na 1. konzole
10359	40,50	3,375	-1,6875	uprostřed 2. pole

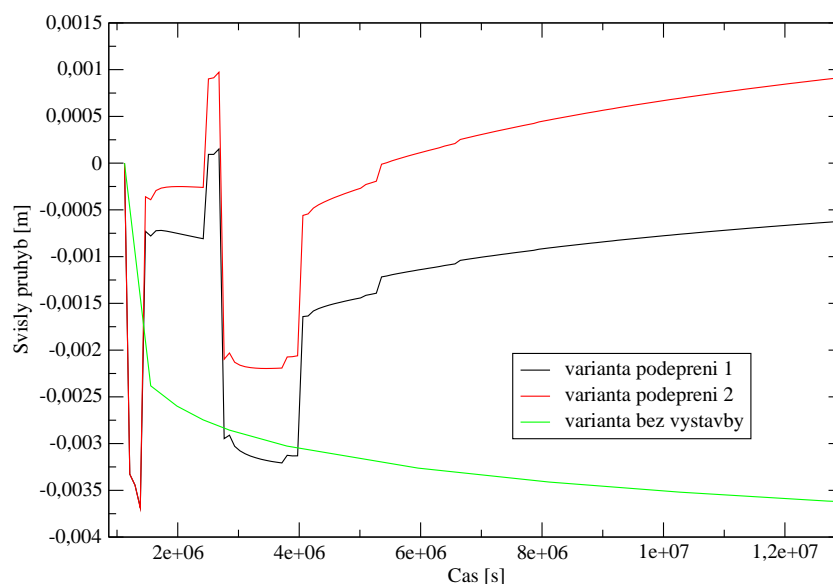
Výpočet dotvarování celého mostu bez postupné výstavby a bez skruže je na obr. 9, 10 a 11 označeno jako varianta bez výstavby. Tento výpočet dostatečně nezachycuje chování konstrukce během výstavby. Nevýhodou je i stejné stáří betonu celé konstrukce, což je v rozporu s reálným stavem. Tento model byl použit pro porovnání s modely vytvořenými při projektování v praxi.

Výpočet dotvarování mostu s postupnou výstavbou je označen na obrázcích jako varianta podepření 2 a výpočet dotvarování mostu s modifikovanou postupnou výstavbou je označen na obrázcích jako varianta podepření 1. V těchto výpočtech je již zachycen vliv postupné výstavby mostní konstrukce. Z grafů je patrné, že největší vliv na čerstvě vybudované pole mostu má

výstavba tří až čtyř následujících polí. Výstavba dalších polí nemá již na toto pole prakticky žádný vliv. V tomto čase již má průběh dotvarování pro dané pole svůj typický průběh.



Obrázek 8: Umístění vybraných uzlů na konstrukci.



Obrázek 9: Graf průhybu uzlu 7393.

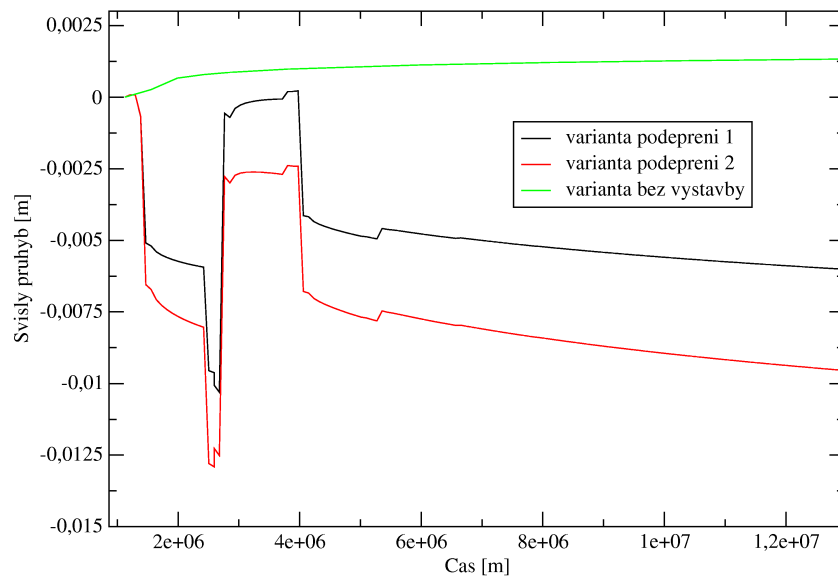
5. Závěr

V příspěvku bylo prokázáno, že používané podepření skruže pomocí zavěšení na konzolu má na mostní konstrukci neblahý vliv a vede ke zvýšení průhybů mostní konstrukce. Jako lepší se jeví varianta podepření skruže z pilíře na pilíř. Při této variantě dochází na všech třech sledovaných uzlech k menším průhybům než ve variantě podepření z konzoly na pilíř.

Získané výsledky budou použity při rozhodování o technologii výstavby mostních konstrukcí. Je jasné, že v praxi nelze vzhledem k časovému omezení při projektování a návrhu konstrukce provádět náročné modelování postupné výstavby každé navrhované konstrukce.

6. Poděkování

Tato práce vznikla za finanční podpory projektu 103/07/1455 GA ČR.



Obrázek 10: Graf průhybu uzlu 7409.

7. Reference

[Bažant 1995] Bažant, Z.P. & Baweja, S. 1995: Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3. *Materials and Structures* vol. 28, 357-367.

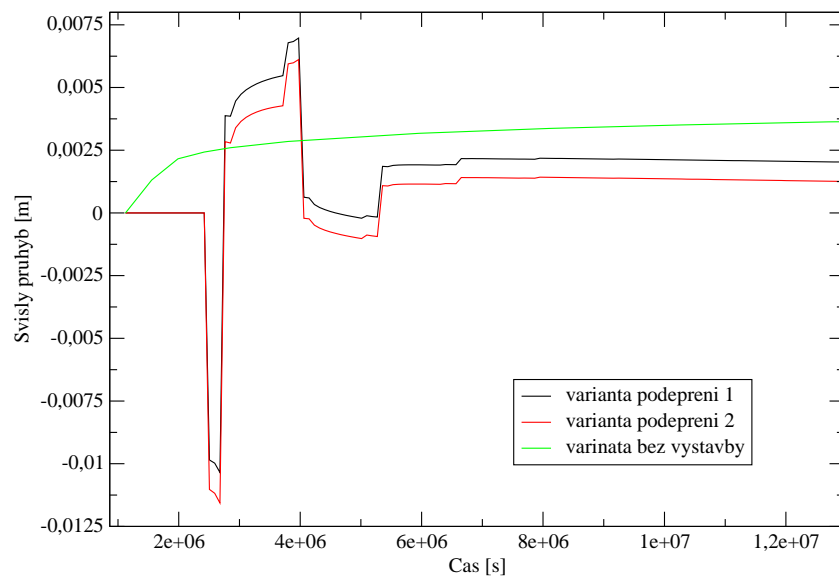
[Bažant 1995] Bažant, Z.P. & Xi, Y. 1995: Continuous Retardation Spectrum for Solidification Theory of Concrete Creep. *Journal of Engineering Mechanics* vol. 121

[Bittnar a Šejnoha 1992] Bittnar, Z. & Šejnoha 1992: J. Numerické metody mechaniky 1. Vydavatelství ČVUT Praha

[Brož 2007] Brož, J. 2007, Modelování postupné výstavby mostní konstrukce a jejího dotvárování. Diplomová práce na Katedře mechaniky FSv ČVUT v Praze.

[T3D] <http://mech.fsv.cvut.cz/~dr/t3d.html>

[SIFEL] <http://cml.fsv.cvut.cz/~sifel>



Obrázek 11: Graf průhybu uzlu 10359.