

## **Omezení nadměrných průhybů komorových mostů optimalizací vedení předpínacích kabelů**

Lukáš Vráblík, Vladimír Křístek

### **1. Úvod**

Jedním z nejzávažnějších faktorů ovlivňujících hlediska udržitelné výstavby mostů z předpjatého betonu je důraz na kvalitu konstrukcí s ohledem na mezní stavy použitelnosti, na trvanlivost a na bezporuchový provoz při přiměřené údržbě, tj. údržbě s malými náklady a s minimálním narušením provozu na mostě. Z hlediska použitelnosti, provozuschopnosti, dlouhodobé spolehlivosti a životnosti předpjatých mostních konstrukcí větších rozpětí je vysoce aktuální otázka trvalého růstu deformací v čase. Zkušenosti, zejména s velkými předpjatými mosty postavenými během poslední desetiletí ukazují, že zmíněné požadavky zdaleka splněny nejsou a že je zde potřeba zvýšení kvality konstrukcí nově navrhovaných mostů. Zkušenosti ukazují na větší hodnoty skutečných průhybů oproti výpočtové predikci a na jejich dlouhodobý nárůst v čase - skutečné dlouhodobé průhyby jsou větší než průhyby stanovené dosavadními výpočty. Příčin tohoto jevu je celá řada a je třeba je objektivně analyzovat - výsledky najdou uplatnění pro spolehlivý a hospodárný návrh konstrukcí, jakožto účinný nástroj pro dosažení parametrů udržitelné výstavby: úspor konstrukčních materiálů, energie a finančních nákladů, a to nejen na výstavbu, ale i na údržbu, opravy a rekonstrukce.

Mosty je třeba navrhovat a posuzovat jak z hlediska napěťových stavů (což náleží k požadavkům únosnosti), tak z hlediska jejich přetvoření včetně časového vývoje průhybů (což je součástí požadavků použitelnosti). Jde však o dva aspekty na rozdílných úrovních. Zatímco splnění napěťových relací je třeba zajistit *v každém jednotlivém bodě konstrukce*, splnění požadavku přípustných průhybů (a jejich časového vývoje) *v několika typických průřezech* (např. ve středech rozpětí hlavních polí) z praktického pohledu postačuje pro zajištění přijatelnosti průhybů celé konstrukce.

### **2. Účinky předpětí na průhyby**

Je zřejmé, že velmi účinnou cestou k omezení nárůstu dlouhodobých průhybů velkých mostů je vhodný návrh předpětí. Jedním ze základních faktorů ovlivňujících návrh předpětí je poměr stálých a nahodilých zatížení – ukazuje se, že klasický přístup k návrhu předpjaté konstrukce, založený na kritériu plného předpě-

tí průřezů pro účinky stálých a nahodilých zatížení, nemusí garantovat i omezení dlouhodobého nárůstu průhybů.

Zatížení mostů lze v zásadě rozdělit do dvou kategorií, na vlivy vnějšího svislého zatížení a předpětí. Zatížení předpětím lze idealizovat soustavou vnějších zatěžovacích faktorů jejichž rozložení je rozdílné od charakteru a rozložení vnějšího svislého zatížení. Tato rozdílnost se může - v případě změn statického systému konstrukce - projevit rozdílným vlivem na velikosti a rozložení vnitřních sil v konstrukci a průhyby v konečném statickém systému. Znamená to např. že nízké hodnoty průhybů konstrukce ve stavebních stavech, dosažené aplikací zvoleného charakteru předpětí, nemusí zdaleka znamenat též nízké dlouhodobé průhyby konstrukce v definitivním statickém systému. Nevhodným uspořádáním předpětí - nevhodným ukotvením kabelů (přestože takovýto kabel může být velmi účinný pro dosažení žádoucích napětí v průřezu a může i zajistit významnou redukci průhybu konzol ve stádiu výstavby mostu) lze dosáhnout toho, že takovýto kabel bude naopak *napomáhat k nárůstu průhybu* po změně statického systému.

Proto je velmi závažná otázka uspořádání předpětí - kam umístit ukotvení předpínacího kabelu a volit jeho dráhu tak, aby se co nejvíce uplatnil při redukci nárůstu průhybů. Je možné se pokusit uspořádání předpětí optimalizovat - vybrat z možných způsobů předpětí takový, který (při zjištění požadovaných napětíových účinků) bude vyvozovat co **největší (vzhůru směřující) průhyby ve vybraném průřezu**, např. ve středu mostního pole.

Je zřejmé, že předpětí může působit na konstrukci dvěma způsoby:

- příčnými silami vyvolanými zakřivením kabelů
- ohybovými momenty vyvolanými excentrickým ukotvením kabelů.

Předpětí je pro ovlivnění nárůstu průhybů neúčinnější, pokud jsou příčné síly a zatížení vyvolané zakřivením kabelů umístěny v místech největších **pořadnic příčinkových čar** průhybu, a pokud excentrická ukotvení kabelů jsou umístěna v místech největších **sklonů** (místech s největší hodnotou derivace) těchto příčinkových čar. V této souvislosti stojí za připomenutí, že příčinkové čáry průhybu a příčinkové čáry ohybových momentů mají rozdílné průběhy a zejména sklony, a proto zatěžující faktor vyvozující velké ohybové účinky nemusí vyvozovat velké průhyby a naopak. Je tedy zřejmé, že vhodným umístěním ukotvení předpínacích kabelů lze dosáhnout toho, že takto optimalizované předpětí může být pro redukci průhybu účinnější než předpětí, které by právě jen afinně kopirovalo účinky vnějšího zatížení konstrukce.

Při návrhu mostu je proto žádoucí posoudit několik variant uspořádání předpínacích kabelů a vybrat tu, která bude nejvíce účinná i pro redukci dlouhodobého

---

Lukáš Vrablík, Ing., Vladimír Křístek, Prof.Ing.DrSc.

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra betonových konstrukcí a mostů

Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice

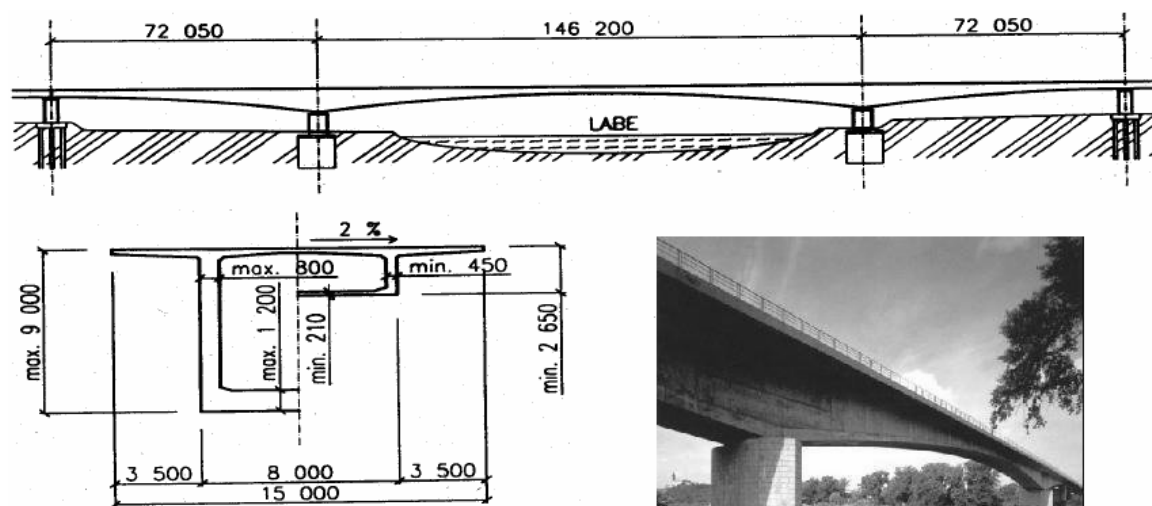
tel.: 224 353 875 , fax.: 233 335 797, e-mail: vrablik@promo.cz, kristek@fsv.cvut.cz

nárůstu průhybů. Při optimalizaci vedení kabelů pro omezení průhybů je třeba – z praktického hlediska – vycházet z používaných, osvědčených a technologicky a staticky zdůvodněných typů vedení kabelových drah, neboť jenom v tomto rozsahu má smysl o jakékoliv optimalizaci uvažovat. Zabývat se jinými typy v rámci širší optimalizační studie nemá z hlediska praktického použití význam, a to i z důvodu, že množina reálných kabelových drah musí být vhodná i pro vyhovění napěťovým kritériím v průřezech mostu.

Pro ukázkou výpočtu účinnosti předpínacích kabelů na redukci průhybů byl vybrán most přes Labe v Mělníku. Hlavní nosnou konstrukcí mostu tvoří spojitý nosník o třech polích s rozpětími jednotlivých polí 72,050 + 146,200 + 72,050 m. Komerový příčný řez se po délce mostu mění (obr.1). Most byl betonován letmo, symetricky ze zárodků umístěných nad pilíři.

System předpětí konstrukce:

- **dolní kabely středního pole** – vedeny při dolních vláknech průřezu v oblasti středního pole
- **dolní kabely krajního pole** – vedeny v okrajových částech krajních polí při dolním povrchu nosníku
- **horní kabely zmonolitňující** – vedeny při horním povrchu nosníku v oblasti nad vnitřní podporou
- **horní kabely konzolové** – sloužící k zachycení namáhání během vaha-dlové výstavby, napínány jednostranně, vedeny při horním povrchu nosníku



Obr.1 Most přes Labe v Mělníku

Kabely byly vzhledem k proměnnosti příčného řezu po délce nosníku a tím změny polohy těžišťové osy zadány jako lomené. Výsledky výpočtu jsou shrnuty v následující tabulce, ukázán je jejich vliv na velikost průhybu středního pole.

Výpočet účinků jednotlivých kabelů byl proveden pomocí programu Opti 1.1, (viz dále), příčinkové čáry veličin byly získány na prutovém modelu programem NEXIS, vliv proměnnosti průřezu po délce mostu byl respektován.

Tabulka 1 – Přehled účinků kabelů

Typ kabelu	Celkový počet	Nepříznivé kabely	
		[ks]	[%]
Dolní kabely středního pole	12	1	8
Dolní kabely krajního pole	8	8	100
Horní kabely zmonolitňující	4	0	0
Horní kabely konzolové	80	14	18
CELKEM	104	23	22

### 3. Výpočetní program Opti 1.1

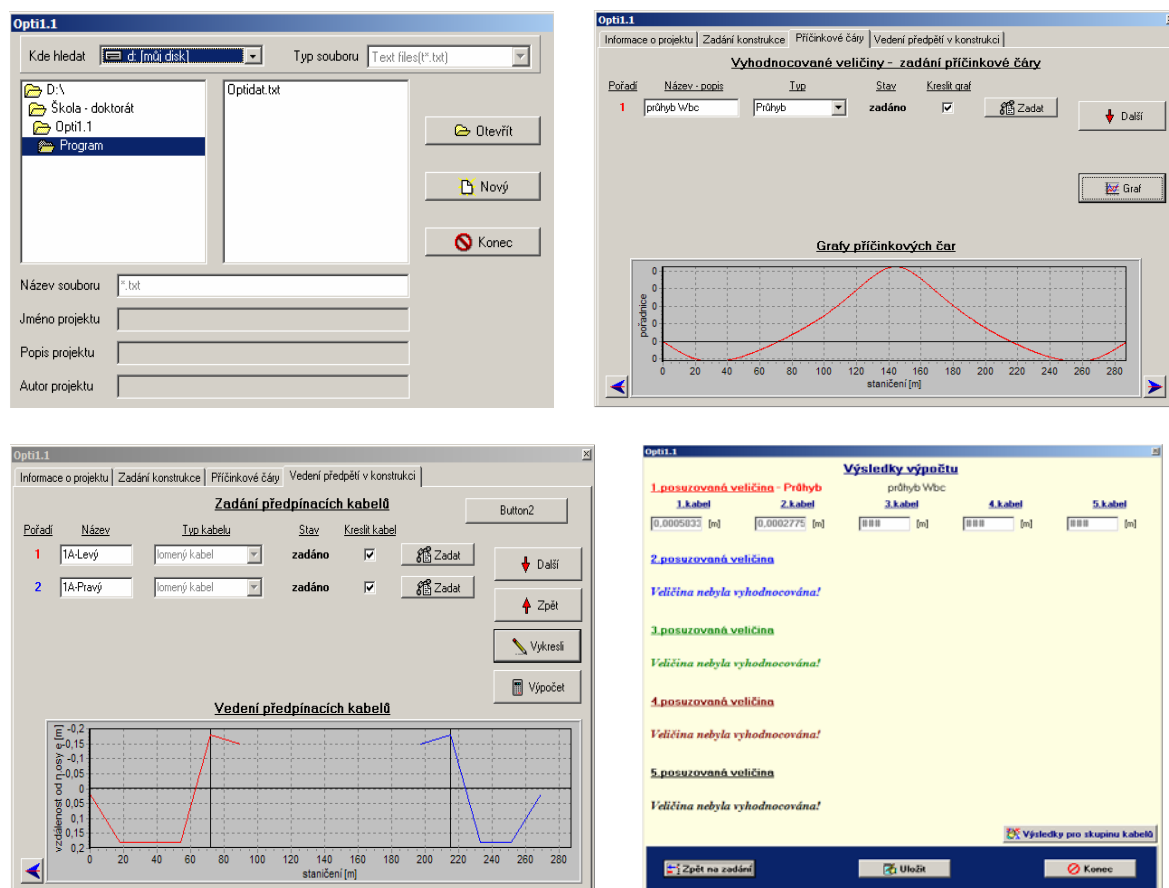
Jako pomůcka pro optimalizaci uspořádání kabelů pro efektivní omezení průhybů byl vytvořen výpočetní program **OPTI 1.1** (ukázka zadávacích a výsledkových dialogů viz. obr.2) vyčísлюjící hodnotu průhybu (možno i jiné statické veličiny) zadaného průřezu mostu. Projektant zadá řadu realistických a výrobně přijatelných tvarů kabelové dráhy včetně jejich ukotvení a výpočet mu poskytne hodnoty průhybu zadaného průřezu mostu příslušné k jednotlivým variantám kabelové dráhy. Výpočet je velmi rychlý – ve velmi krátké době je schopen zpracovat stovky variant tvarů kabelové dráhy. Projektant se tedy nemusí z hlediska počtu těchto variant nijak omezovat a velmi snadno může interaktivně, postupnými úpravami dospět k optimálnímu tvaru.

Při výpočtu použitím programu **OPTI 1.1** se zadává:

- poloha posuzovaného průřezu a hledaná statická veličina – kromě průhybu je možné vyhodnocovat i jiné statické veličiny na konstrukci (záleží pak pouze na zadání příslušné příčinkové čáry), sledovat je tak možné vliv vedení kabelů na redukci průhybu a zároveň jeho vliv na napjatost
- poloha průřezů, kde je kabel kotven
- způsob vedení kabelu – lomený, přímý, parabolický, kombinace lomeného a parabolického
- excentricity v jednotlivých bodech kabelu u lomeného kabelu, parametry paraboly u parabolického kabelu

- velikosti předpínací síly v jednotlivých úsecích mezi zadanými průřezy (tj. respektování ztrát předpětí třením)
- pořadnice příčinkové čáry průhybu (popřípadě jiné statické veličiny) v jednotlivých bodech konstrukce; hodnoty derivace příčinkové čáry jsou následně automaticky dopočítány programem **OPTI 1.1**.

Program je k volně k dispozici na internetových stránkách Katedry betonových konstrukcí a mostů <http://beton.fsv.cvut.cz>.



Obr.2 Program Opti 1.1

#### 4. Závěr

Jak ukazuje výše uvedená tabulka, sledovat kabely z hlediska jejich vlivu na redukci, respektive zvýšení průhybů je opodstatněné. Na reálné konstrukci mostu v Mělníku působí 22% všech kabelů (tedy více jak 1/5) zvýšení průhybu středního pole.

Jako naprosto nevhodné se ukázaly „dolní kabely krajního pole“ – kabely kotvené pasivními kotvami přibližně v 1/3 rozpětí krajního pole (od začátku, resp.

konce konstrukce), vedené těsně u dolního povrchu (respektující náběhy) a napínané z čel.

U „*horních kabelů konzolových*“ (montážní kabely, které slouží k zachycení napětí během konzolovitého postupu výstavby) jsou nepříznivé ty, které jsou pasivně kotveny v blízkosti vnitřních podpor, vedeny jsou přímo, těsně při horním povrchu. Napínány jsou přibližně v 1/5 od konce konstrukce (u kabelů směřujících do krajního pole), respektive v 1/5 od středu vnitřního pole (kabely směřující do středního pole). Tyto vzdálenosti vycházejí z tuhostních relací konstrukce po délce mostu.

Uspořádání předpětí je nutno sladit a optimalizovat - z možných způsobů předpětí vybrat takový, který (při zjištění napěťových relací ve stavebních stádiích i v definitivním statickém systému) bude současně účinný na dosažení požadovaných průhybů na konstrukci v definitivním statickém systému.

Jako zcela obecný závěr je třeba připomenout, že předpětí které je účinné pro redukci průhybů mostních polí není svými intenzitami ani uspořádáním obecně totožné s předpětím účinným pro redukci napětí v průřezech a naopak. Pro řízení velikosti a vývoje průhybů proto nevede cesta jen zvyšováním předpětí určeného pro řízení napěťových stavů. Návrh předpětí pro řízení průhybů je samostatná úloha, která není podřízena úloze řízení napěťových stavů.

Předepnout konstrukci „pořádně“ neznamena co nejvíce, ale inteligentně tak, aby oběma úrovním posuzování bylo vyhověno. Úkolem projektanta je sladit uspořádání předpětí tak, aby bylo co nejefektivnější pro splnění kritérií obou úrovní.

## **Poděkování**

Uvedené výsledky byly získány v rámci řešení Výzkumného záměru Stavební fakulty ČVUT č. MSM 6840 77 0005.

## **Literatura:**

- [1] VRÁBLÍK L., KRÍSTEK V. (2005): Optimalizace vedení kabelů pro účinné omezení průhybů velkých mostů z předpjatého betonu, Symposium Mosty, Brno
- [2] Projekt RDS (1990) Most přes Labe v Mělníku, SSŽ