

NOVÝ SOFTWARE NA STATIKU A NAVRHOVÁNÍ SPŘAŽENÝCH BETONOVÝCH MOSTŮ

NEW SOFTWARE FOR STATIC ANALYSIS AND DESIGN OF COMPOSITE CONCRETE BRIDGES

LIBOR ŠVEJDA

Statický výpočet a navrhování vícetrámových mostů spřažených z předpjatých nebo železobetonových mostních prefabrikátů a monolitické mostovky je poměrně častou úlohou inženýrské praxe. Četnost tohoto typu konstrukcí a náročnost jejich návrhu vyžaduje optimální softwarovou podporu. Osvědčený mostařský software RIB PONTI lze tak nyní rozšířit na funkční rozsah PONTI betonverbund pro zpracování těchto typů mostů.

A static analysis and design of multiple girder composite bridges containing prestressed or reinforced beams and monolithic deck is a rather frequent engineering task. Quite a large number of this construction pattern and the demand factor of their design call for an optimal software aid. The proofed software RIB PONTI for static analysis and design of bridges can be enhanced to functional range of PONTI betonverbund for processing these construction types.

Nový softwarový systém PONTI betonverbund umožňuje analýzu zejména následujících typů konstrukcí:

- prefabrikované trámové mosty jako roštové systémy,
- kombinované prefabrikované trámové a deskové (skořepinové) konstrukce,
- celkové výpočetní modely včetně mostních opěr a založení na pilotách.

Nový systém je vybaven grafickým prostředím 3D na výpočty a navrhování předpjatých a železobetonových nosníků spřažených s monolitickou deskou. Do výpočtu je zahrnuta celková historie statického systému, průřezů, zatížení a předpětí. K významným vlivům dále patří sekundární efekty v důsledku dotvarování a smršťování.

Návrhy a posouzení spřažené konstrukce probíhají volitelně podle mostních norem EC2, DIN-Fachberichte nebo ÖNORM.

MOSTAŘSKÝ SOFTWARE PRO STAVEBNÍ PRAKTIKU

S funkčním rozšířením spřažených betonových průřezů se softwarový systém PONTI stává ještě výkonnějším inženýrským nástrojem, který optimálně podporuje jednotlivé pracovní kroky profesionálním uživatelským prostředím. Návrhové algoritmy generují přehledné grafické průběhy, které např. obsahují stupeň využití k jednotlivým mezním stavům. Je možné řešení např. následujících úloh:

- časově závislý vznik průřezů z prefabrikované a monolitické části (historie průřezů),
- časově závislá zatížení s rozdílným okamžikem aktivace (historie zatížení),
- předpětí s různým okamžikem aktivace, např. při dvoustupňovém předpětí (historie předpětí),
- typ předpětí s dodatečnou soudržností, bez soudržnosti nebo s okamžitou sou-

držností (tj. předpětí prefabrikátu v lící formě),

- různé stavy statického systému a spojení prostých nosníků do spojitých nosníků (historie statického systému),
- lineární výpočet vnitřních účinků pro všechna vnější zatížení a vynucená přetvoření, dvoustupňové předpětí, sekundární efekty (dotvarování + smršťování) s automatickým generováním příslušných návrhových kombinací,
- návrh předpjatého betonu na rovinný ohyb se zohledněním dotvarování, smršťování a relaxace,
- kompletní návrhy předpjatého betonu pro mezní stavy únosnosti, použitelnosti a únavy včetně životnosti,
- návrh výtuzže na štěpení v kotevní oblasti předpínacích lan prefabrikátů.

NADŘAŽENÁ ORGANIZACE SPŘAŽENÝCH PRŮŘEZŮ

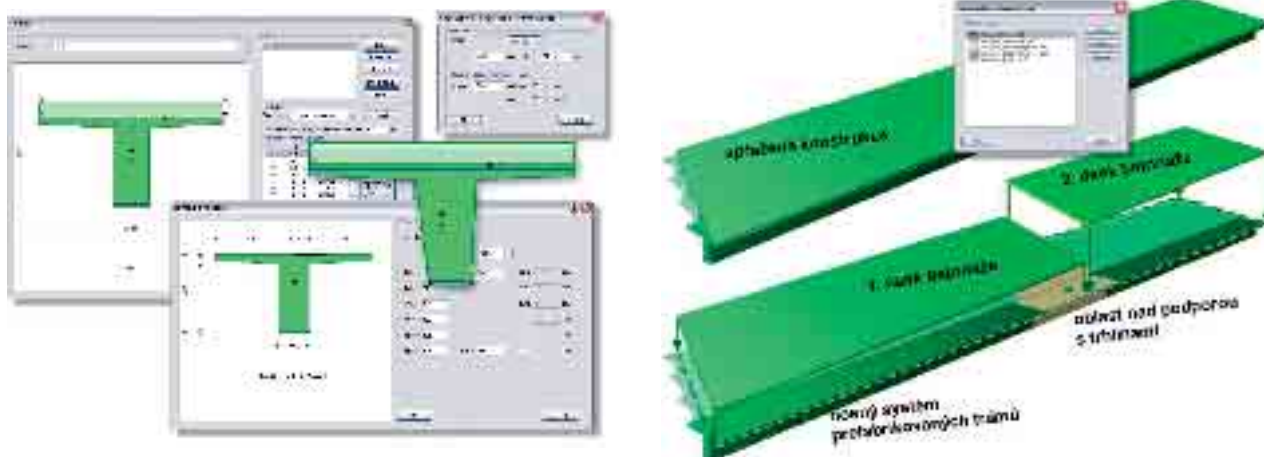
Na rozdíl od monolitických mostů je popis spřažených betonových průřezů podstat-

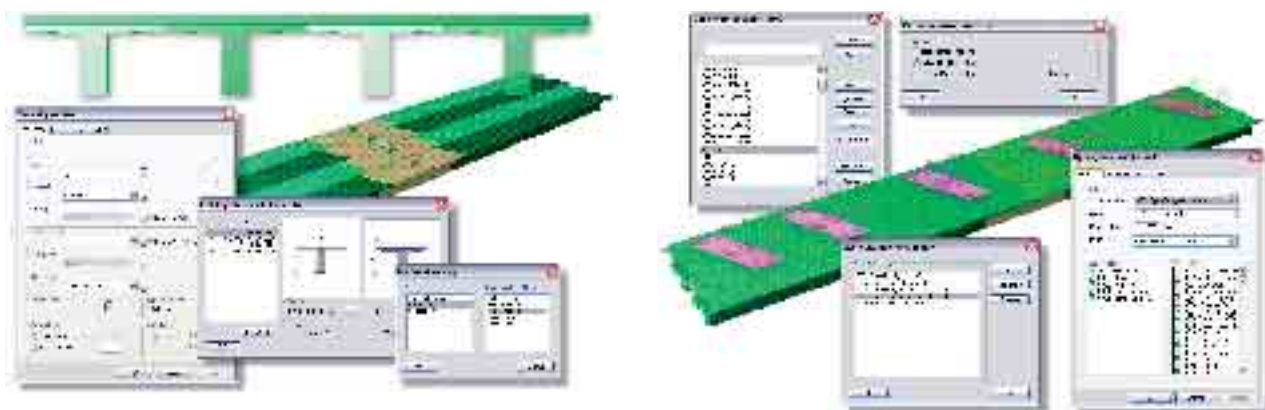
Obr. 1 Panely definice spřažených průřezů PONTI betonverbund

Fig. 1 Dialogs for definition of concrete composite cross sections in PONTI betonverbund

Obr. 2 Schéma stavebních stádií spřaženého prefabrikovaného mostu

Fig. 2 Schematic layout of construction stages of a composite precast bridge





Obr. 3 Přiřazení variant průřezu pro různé oblasti a stádia mostních nosníků

Fig. 3 Setting of cross section variants to different areas and stages of the bridge beams

Obr. 4 Pohyblivá zatížení typu Tandem systém na spřaženém mostě

Fig. 4 Flowing traffic loads Tandem system acting on the composite bridge

ně komplikovanější a má pro řešení úlohy zásadní význam. Během návrhu konstrukce vede každá změna průřezu, resp. jeho dílčích částí, zpravidla ke změnám tuhosti celého statického systému a ke změnám zatížení od vlastní tíhy. Z těchto důvodů je důležité, aby byla datová správa spřažených betonových průřezů a z nich vyplývajících variant průřezů co nejpřehlednější. Stejně tak se automaticky zohledňují spolupůsobící šířky desky.

Jako parametrizované dílčí průřezy prefabrikátů jsou k dispozici obdélníkový průřez, průřez T nebo průřez zdvojené T (I), popř. s bočními náběhy horní a dolní pásnice. Průřezy prefabrikátů mohou být symetrické podél svislé osy, resp. ve zvláštních případech i nesymetrické. Návrhy a posouzení uvažují i v těchto případech rovinný ohyb. Jednotlivým částem průřezu lze přiřazovat různé druhy betonů.

ZADÁVÁNÍ NEZÁVISLE NA SÍTI KP

PONTI betonverbund zohledňuje všechny technologické zvláštnosti spřažených betonových mostů, které vyplývají ze spřažení dvou různých částí průřezu a mají tak podstatný vliv na jejich tuhostní a deformační chování. Zohlednění úseků betonáže, oblastí vzniku trhlin v betonové desce nad podporami a její spolupůsobící oblasti je v maximální míře automatizováno. Pro každý stavební stav se zohled-

ňuje vliv montážní a zatěžovací historie a redistribuce, včetně vlivů historie průřezů pomocí techniky jejich tzv. variant.

Dle potřeb statického návrhu mohou být nosníky modelovány s konstantní výškou nebo s náběhy.

ZOHLEDNĚNÍ HISTORIE VÝSTAVBY

Každý statický model spřaženého mostu musí zohledňovat vlivy vzniku trhlin v betonu, vlivy historie výstavby a zatížení a vlivy dotvarování a smršťování. Změny statického modelu v důsledku jiné skladby průřezů, úseků betonáže, materiálů, uložení, tuhosti kloubů apod. probíhají v oddělených stavebních stavech. Výkonné funkce přitom zajišťují bezpečnou a rychlou změnu variant průřezů závislých na zatížení.

Vzhledem k tomu, že se při definici tuhosti jednotlivých průřezů aplikuje tzv. metoda celkového průřezu, přistupují do výpočtu automaticky další, fiktivní stavební stavy pro sekundární zatížení v důsledku dotvarování a smršťování, poklesů podpor a popř. vynucených přetvoření. Bez zapracování vlivů etapovitě výstavby do výpočetního modelu nelze vyhovět požadavkům aktuálních evropských norem.

VÝKONNÁ TECHNOLOGIE MKP

Programový systém plně využívá funkční spektrum systému FEM TRIMAS. Vyšetření deformací a vnitřních účinků probíhá moderní technologií konečných prvků (KP). Obsažená knihovna konečných prvků umožňuje řešení nejrůznějších inženýrských úloh v oblasti staveb mostů:

- prostorové příhradové a nosníkové pruty,
- prostorové deskové, stěnové a zakřivené skořepinové prvky,
- objemové a kontaktní prvky (v případě rozšíření o vrstevnatý model podloží).

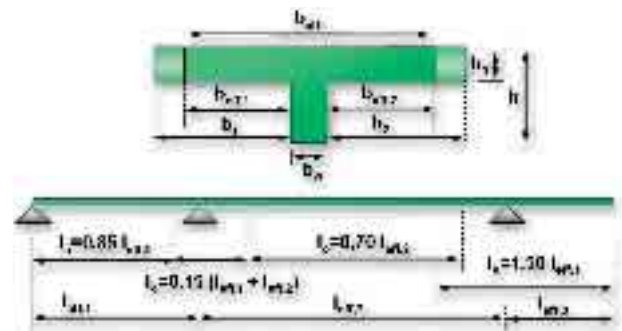
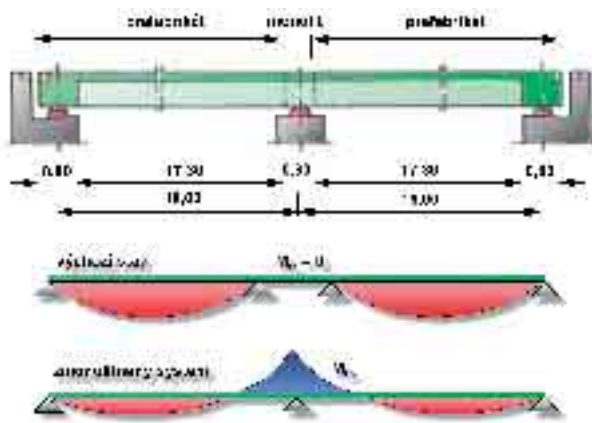
V systému TRIMAS lze modelovat jak prostorové prutové, tak i kombinované prutové a plošné konstrukce. Obvykle se uvažuje s tuhostí nosníků v podélném směru a příčným roznosem zatížení přes ortotropní desku. Podrobný popis tohoto systému MKP však překračuje rámec tohoto příspěvku.

PRAKTICKÉ ZADÁVÁNÍ VNĚJŠÍCH ZATÍŽENÍ

Možné je zadávání všech běžných typů zatížení nezávisle na dělení sítě KP, jako např. bodová zatížení, lineárně proměnná spojitá zatížení, nosníková zatížení, teplotní zatížení, vynucené deformace, libovolná plošná zatížení a pojezd pohyblivých zatížení. Každý zatěžovací stav se z hlediska zvolené normy a typu konstrukce klasifikuje svým tzv. atributem. Předdefinovány jsou veškeré běžné typy mostních zatížení s příslušnými kombinačními součiniteli dle nastavené normy. Program umožňuje až šest různých jízdních pruhů. Z přiřazení atributů zatěžovacím stavům jsou automaticky sestaveny veškeré potřebné návrhové kombinace.

Zadání spojitých zatížení probíhá s odkazem na absolutní nebo relativní délku základny danou začátkem a koncem zatěžované osy. Definice os je libovolná, tj. mohou být tvořeny např. po jednotlivých polích nebo konstrukčních dílcích.

Generování pojezdu zatěžovacích vlaků probíhá automatizovaně pomocí obsažených normových (EC, DIN) nebo vlastních zatěžovacích maker. Zatěžovací makro se přitom pohybuje s předepsaným krokem podél libovolné osy s nebo bez excentricity k ose zatěžovaného dílce a vytváří tak jednotlivé zatěžovací stavy. Obalová křivka těchto zatěžovacích stavů se automaticky vyhodnocuje vylučujícím způsobem a je obsažena v příslušných návrhových kombinacích.



ZOHLEDNĚNÍ HISTORIE ZATĚŽOVÁNÍ

Historie zatěžování musí korespondovat s procesem výstavby. Roznos příčného zatížení na spřažené nosníky se uskutečňuje nejlépe ortotropně působící deskou (staticky skořepinou) vozovky. Zatížení vlastní tíhou se stanovuje vždy z aktuálních parametrů spřažených průřezů. Principiálně se všechna zatížení mostu rozdělují do tří skupin:

Zatížení na prefabrikát: prefabrikáty, zatížení od betonáže, 1. stupeň předpětí

Zatížení na spřažené prefabrikáty: zatuhnutí, 2. stupeň předpětí, vystrojení konstrukce a pokesy podpor

Krátkodobá zatížení: proměnná zatížení, únavová zatížení, klimatická zatížení, vítr, rozjezdové a brzdné účinky

Sekundární zatížení: vynucená přetvoření z dotvarování a smršťování

Každý zatěžovací stav je v souladu se svojí aktivací přiřazen určitému stavebnímu stavu.

Výkonné funkce pro zatěžovací modely proměnného zatížení pro silniční, železniční mosty a lávky pro pěší a cyklisty dle normy Eurocode podporují rychlé a efektivní zpracování krátkodobých zatížení.

SEKUNDÁRNÍ EFEKTY

Generování všech sekundárních zatížení od zatížení betonáže, vystrojení konstrukce, smršťování a vynucených přetvoření probíhá samočinně formou ekvivalentních teplotních zatížení. K již existujícím stavebním fázím vyplývajícím z úseků betonáže a krátkodobým zatížením jsou programem automaticky dogenerovány další tzv. sekundární stavební stavy.

PŘEDPĚTÍ SPŘAŽENÝCH BETONOVÝCH NOSNÍKŮ

Vedle vícetanového předpětí prefabrikátů v lící formě je možný 2. stupeň předpětí s dodatečnou soudržností nebo bez soudržnosti.

Obr. 5 Schéma výstavby mostu a redistribuce vnitřních účinků

Fig. 5 Schematic layout of construction stages of a bridge and redistribution of internal forces

Obr. 6 Normové (EC2) rozlišení oblasti spolupůsobící šířky mostovky podél mostních trámů

Fig. 6 Standard (EC2) for effective width of flanges alongside the bridge beams

Charakteristické body křivky předpínacího kabelu se popisují ve dvou konstrukčních rovinách – v půdoryse a v náryse. Tyto konstrukční roviny odpovídají rozvinutému tvaru obecně zakřivených vztažných os. Kontrolní body křivky v náryse a půdoryse jsou vzájemně nezávislé. Výsledná prostorová křivka kabelu – kubický spline – vzniká složením zadání z obou rovin. Křivky kabelů mohou být v nárysné rovině generovány různým způsobem:

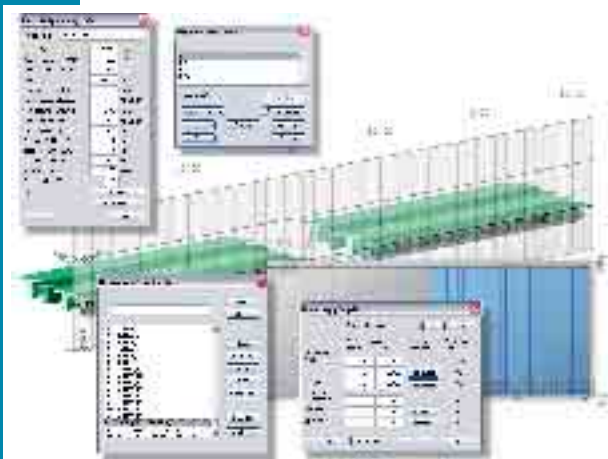
- automatická standardní křivka s horní a dolní polohou krytí a polohou inflexního bodu od podpor,

Obr. 7 Panely definice předpětí

Fig. 7 Dialogs for prestressing definition

Obr. 8 Schéma postupu klasifikace zatížení a sestavení návrhových kombinací

Fig. 8 Schematic layout of loads classification and load combination for design



- dialogové zadání souřadnic bodů křivky vztažené na počátek příslušné osy,
 - odkazem na geometrii/výšek již existujícího referenčního kabelu,
 - posuvem, překlopením o 180° a kopírováním po úsecích,
 - rovnoměrným rozložením kabelů v definované oblasti půdorysu (u plošných systémů).
- Praktickou pomůckou je automatická kontrola dodržení přípustných poloměrů křivostí.

VĚSESTRANNÉ PODMÍNKY PŘEDPĚTÍ

V zásadě jsou na každém konci předpínacího kabelu možné čtyři podmínky předpětí: předepnout, popustit, dopnout, zakotvit s pokluzem. Tyto podmínky se definují prostřednictvím předpínací síly nebo zadáním procenta z dovolené předpínací síly. Každá fáze předpětí se zobrazuje graficky formou průběhu předpínací síly podél konstrukce. Dále lze definovat tři podmínky předpětí:

- dodržení dané síly na daném místě,
- dodržení dosavadní síly na daném místě,
- dodržení dané síly na libovolném místě.

Ze zadané geometrie předpínacích kabelů lze generovat výkres mřížky a exportovat ho, např. ve formátu DXF do libovolného systému CAD.

Obr. 9 Schéma koncepce navrhování dle nových evropských norem

Fig. 9 Design philosophy of the new European standards

Obr. 10 Vyhodnocení návrhů formou diagramů a přehledných sestav

Fig. 10 Design evaluation by means of charts and well-arranged lists



VÝKONNÁ TECHNOLOGIE KOMBINACÍ

Přiřazením tzv. atributů zatěžovacím stavům jsou generovány veškeré kombinace zatěžovacích stavů v souladu s evropskou mostní normou EN 1991-2 a dále popř. i s ČSN 73 6203. Tato nastavení lze dále libovolně upravovat a doplňovat.

Šablony kombinačních stavů generují veškeré nutné kombinace pro posuvy, reakce a vnitřní účinky dle typů zatěžovacích stavů a příslušných kombinačních součinitelů.

NÁVRHY SPŘAŽENÉHO BETONU

Ve funkčním systému PONTI betonverbund jsou aplikovány následující návrhové postupy, které jsou vedeny časově závisle pro každý nosník, a to až v šesti různých časových okamžicích:

Mezní stav únosnosti

- únosnost na rovinný ohyb s normálovou silou
- únosnost na posouvající sílu a kroucení
- smyková únosnost ve spřahovací spáře

Mezní stav únavy

- únava měkké a předpjaté výztuže
- tlaková únava betonu
- ekvivalentní rozkmit únavového porušení měkké a předpjaté výztuže

Mezní stav použitelnosti

- dekomprese
- omezení tlakových napětí v betonu
- omezení napětí v měkké výztuži

- omezení napětí v předpínací výztuži
- minimální výztuž (široké trhliny)
- stabilita trhlin

Konstrukční detaily

- výztuž na štěpení kotevní oblasti předpínacích kabelů prefabrikátů
- Koncepce evropských návrhových norem vychází ze systému „tří komponent“, které rovným způsobem zohledňují mezní stavy únosnosti, použitelnosti a životnosti.

PŘEHLEDNÉ VÝSTUPY

Selektivní výstup výsledků s okamžitým náhledem dokumentu je konfigurovatelný prostřednictvím zobrazované struktury obsažených kapitol.

Všechna zadání systému a výsledky se graficky zobrazují. Zobrazení výsledků je volitelné buď přímo na statickém modelu, nebo na zvoleném trámu mostu ve formě průběhů. Výstupní protokol obsahuje jak alfanumerické, tak i grafické výsledky. Výstupy jsou k dispozici i ve formátu čitelném např. pro MS Word.

Ing. Libor Švejda

RIB stavební software, s. r. o.

Zelený pruh 1560/99, 140 00 Praha 4

tel.: 241 442 078, mobil: 608 953 721

fax: 241 442 085

email: info@rib.cz, http://www.rib.cz

