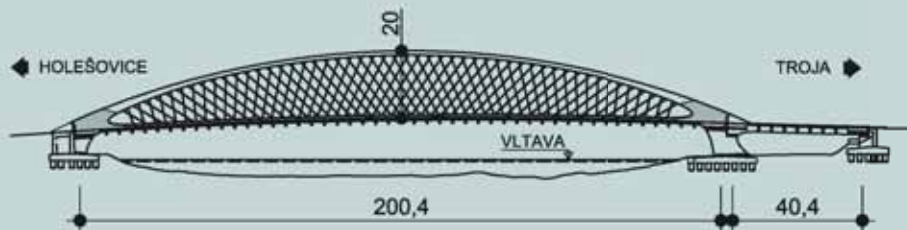
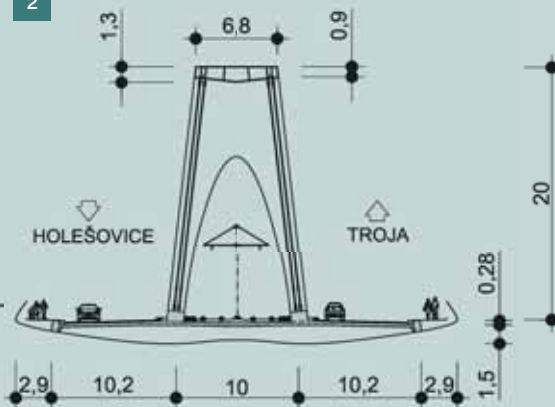


VÝSTAVBA NOVÉHO TROJSKÉHO MOSTU SE ZAMĚŘENÍM NA BETONOVÉ KONSTRUKCE ■ CONSTRUCTION OF THE NEW TROJA BRIDGE WITH FOCUS ON CONCRETE STRUCTURES

1



2



Jan L. Vítek, Robert Brož,
Petr Koukolík, Alexandr Tvrz

Nový Trojský most je síťový oblouk s hybridním systémem z oceli a betonu. Štíhlá konstrukce vyžadovala neobvyklý postup výstavby, kde se použily různé technologie pro výstavbu ocelových a betonových konstrukcí, včetně zvedání těžkých břemen a montáže velkých konstrukčních prvků. Vysokohodnotné betony a složité technologické procesy byly použity též pro velmi namáhané betonové části mostu.

The new Troja Bridge is a large network arch bridge with a hybrid system made of steel and concrete. The slender structure required unusual construction process, where different technologies of steel and concrete structures were applied including heavy lifting and assembly of large structural elements. High performance concrete and complex technological processes are used also in highly stressed concrete parts of the bridge.

Nový Trojský most převádí přes Vltavu tramvajovou trať, čtyřpruhovou městskou komunikaci, cyklisty a chodce. Most je součástí komplexu Blanka. Spojuje Městský okruh na trojské straně řeky s Holešovicemi. Návrh mostu vyšel z architektonicko-konstrukční soutěže, která byla vyhodnocena koncem roku 2006. Most svým rozpětím hlavního pole 200,4 m patří mezi největší mosty v Česku.

Předmětem článku není popis mostu jako celku. Článek popisuje výstavbu mostu a zaměřuje se zejména na betonové konstrukce, které tvoří jeho podstatnou součást. Pro tento most byly vyvinuty pokrokové druhy betonu a též

vlastní betonáže byly v mnoha případech značně komplikované.

STRUČNÝ POPIS MOSTU

Most má dvě pole. Hlavní pole překračující Vltavu o rozpětí 200,4 m má obloukovou konstrukci s táhlem. Krajiní inundační pole má roštovou konstrukci a rozpětí pouze 40,4 m. Šířka mostu včetně chodníků dosahuje cca 36 m. Obě pole jsou podepřena na společném pilíři P2, ale staticky spolu nespolečně působí, jsou oddělena dilatací. Podélný řez je schematicky uveden na obr. 1.

Hlavní pole mostu má ocelový oblouk, který je tvořen ve střední části širokým (6,9 m) a relativně nízkým (0,9 až 1,3 m) komorovým průřezem, který se směrem k podporám rozděluje na dva nezávislé komorové průřezy. Nad podporami je ocelový oblouk spojen s betonovou mostovkou.

Mostovka se skládá z tenké monolitické desky, prefabrikovaných příčnicí a ocelobetonového spráženého táhla oblouku. Na okrajích desky je malý ztužující podélník, do kterého jsou zakotveny ocelové konzoly podporující chodníky (obr. 2). Betonová mostovka je předepruta v podélném i příčném směru.

Táhlo oblouku společně s deskou přenáší vodorovnou obloukovou sílu, proto je silně předepruto. V každém z táhel oblouku umístěných mezi tramvajovým pásem a jízdními pruhy je umístěno šest kabelů o 37 lanech. Veškeré předpětí je soudržné. Ocelový oblouk a betonová mostovka jsou spojeny šikmými tyčovými závěsy. Vzni-

Obr. 1 Podélný řez mostem ■

Fig. 1 Longitudinal section

Obr. 2 Schematický příčný řez hlavním polem mostu uprostřed rozpětí

■ Fig. 2 Schematic cross-section at the midspan of the main span

Obr. 3 Výsuv roštu s prefabrikovanými příčnicí ■ Fig. 3 Launching of the grid with precast transversal beams

Obr. 4 Osazování zárodku oblouku ■ Fig. 4 Assembly of the arch footing

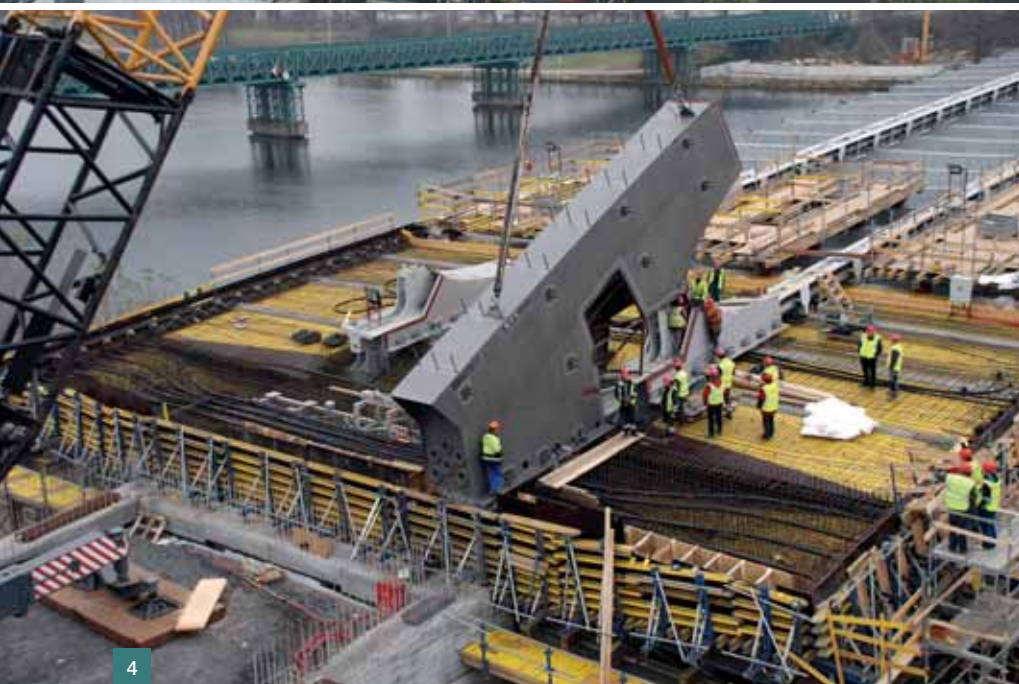
ká tak síť závěsů, proto se této konstrukci též říká síťový oblouk.

Inundační pole je celé monolitické z předpjatého betonu. Hlavní nosný systém tvoří dva podélné nosníky podepírající monolitické příčnicí stejného tvaru, jako mají příčnicí v hlavním poli, a betonová deska. Opět na okrajích desky jsou dva podélníky pro zakotvení ocelových chodníkových konzol. Předpětí mostu je realizováno v podélném i příčném směru.

POSTUP VÝSTAVBY MOSTU

Konstrukce mostu je poměrně složitá. Relativně subtilní prvky (oblouk, deska mostu, příčnicí) vzájemně spolupůsobí, a tím systém získává požadovanou

3



4

únosnost. Pokud některý z prvků chybí, zbývající části nejsou samonosné, nebo vytvářejí málo tuhý systém. Proto se dlouho uvažovalo o vhodném postupu výstavby.

Další omezení pak plynula z malého prostoru kolem mostu, kde se již na trojské straně budovaly tunely městského okruhu. Podobné konstrukce se též často stavějí na břehu vodotečí a pak se zaplavují. I tato technologie byla zvažována, ale plavební podmínky ve Vltavě ani dostupné lodní vybavení nebylo vhodné pro takovou technologii výstavby. Proto byl nakonec zvolen postup výstavby na definitivním místě s využitím dočasných podpor v řece.

Po vybetonování základů opěr a pilíře se zbudovalo pět dočasných podpor ve Vltavě. Tyto podpory jsou ocelové a jsou podepřeny čtyřmi ocelovými sloupy. Ty jsou založeny na velkopřůměrových pilotách. Ocelové trouby byly částečně zaberaněny do dna řeky. Skrz trouby byly vyvrtány a zabetonovány piloty. Horní povrch betonových pilot je v úrovni cca 1 m pode dnem řeky, aby při demontáži mohly být ocelové trouby odříznuty a beton mohl být ponechán pod úrovní dna řeky. Ocelové trouby jsou s pilotami spřaženy, čímž se zatížení může přenášet z trub do pilot. Na tyto pilíře byla postavena ocelová plošina podporující most během výstavby.

Výstavba nosné konstrukce hlavního pole byla zahájena stavbou mostovky. Postavením mostovky vznikla plošina sloužící později pro montáž ocelového oblouku. Mostovka byla stavěna metodou postupného vysouvání. Na holešovickém břehu byla instalována výrobní. Protože mostovka nemá významný podélný nosník, který by zajišťoval tuhost konstrukce během výsuvu, bylo přistoupeno k netradičnímu řešení, kdy podélný nosník byl tvořen definitivní ocelovou částí spřaženého táhla oblouku a pomocnou konstrukcí, která ocelovou část táhla doplnila pomocí diagonál a spodního pásu na příhradový nosník.

Na dvě roviny příhradové konstrukce se připojily pomocí šroubových spojů prefabrikované příčníky. Tak vznikl rošt, který se vysouval přes řeku (obr. 3). Důležité bylo, že spojení definitivní ocelové části táhla oblouku a prefabrikovaných příčníků probíhalo ve výrobě na pevných podporách, protože pouze tak bylo možné zajistit podmínky pro přesné sestavení konstrukce. Příčníky byly podepřeny ve výrobě na hydraulických stoličkách, které umožnily posuny příčníku ve třech směrech, a tím i přesné ustavení pro projektované polohy.

Výsuv roštu probíhal v úsecích 16 m dlouhých. Výsuvné zařízení sestávalo z dutých hydraulických lisů, které táhly mostní konstrukci na předpínacích tyčích. Výsuv celé konstrukce trval přibližně dva a půl měsíce. Tím byla vytvořena základní konstrukce, na kterou bylo možné instalovat další konstrukční prvky.

Výstavba hlavního pole pak pokračovala osazením zárodků oblouku (obr. 4). Ty byly podepřeny ocelovou příhradovou konstrukcí osazenou v bednění koncového příčníku. Po jejich přesném geometrickém ustavení proběhla betonáž koncových příčníků. Ocelové zárodky oblouků tak byly pevně připojeny k betonové mostovce.

Následovala betonáž desky. Deska byla betonována po úsecích opět 16 m dlouhých (čtyři pole mezi příčníky). Bednění bylo zavěšeno na prefabrikovaných příčnících. Po betonáži se bednění spustilo na lodě a převezlo do další betonážní polohy, kde se zvedlo a zakotvilo do příčníků (obr. 5). Po dokončení betonáže jednotlivých dílů se aktivovalo příčné předpětí.

Po zabetonování desky se betonovalo táhlo oblouku. Ocelový průřez s osazenými kabelovými kanálky byl



5

Obr. 5 Bednění desky mostovky ■
Fig. 5 Formwork of the bridge deck



6

Obr. 6 Táhlo oblouku před zabetonováním ■
Fig. 6 Tie of the arch before casting

Obr. 7 Čerpání samozhutitelného betonu do zárodků oblouku ■ Fig. 7 Pumping of self-compacting concrete into the arch footing



7

Obr. 8 Montáž dílů oblouku na předpolí ■
Fig. 8 Assembly of the arch elements in front of the bridge

Obr. 9 Vozík pro dopravu dílů oblouku na mostovku ■ Fig. 9 Carriage for the transport of the arch elements on the bridge deck

Obr. 10 Věže PIŽMO pro zvedání dílů oblouku ■ Fig. 10 PIŽMO towers for lifting of the arch elements

Obr. 11 Dočasný kloub pro montáž oblouku ■ Fig. 11 Temporary hinge for lifting of the arch

Obr. 12 Zvednuté krajní třetiny oblouku ■
Fig. 12 The edge parts of the arch after lifting

Obr. 13 Zvedání středního dílu oblouku ■
Fig. 13 Lifting of the central part of the arch



8



9



10



11

opatřen betonářskou výztuží. Betonáž nebyla jednoduchá vzhledem k složitému tvaru ocelové části táhla (obr. 6).

Zárodky ocelového oblouku jsou extrémně zatěžovány. Přenášejí sílu z plochého oblouku do mostovky a zároveň jsou v nich kotveny silné předpínací kabely vedoucí táhlem. Jde tedy o oblast s vysokou koncentrací napětí. Ocelová konstrukce zárodků by musela být extrémně vyztužena ocelovými výztuhami. To by bylo mimořádně technologicky náročné. Proto se přistoupilo k tomu, že se zárodky vyplnily vysokopevnostním betonem, který slouží k postupnému roznesení napětí od kotevních sil velkých kabelů do oblouku. Zárodek oblouku je komorová konstrukce s výztuhami, proto byl použit pro jeho vyplnění samozhutnitelný beton, který byl do konstrukce čerpán (obr. 7).

Po vyplnění zárodku se mohlo přistoupit k postupné montáži oblouku. Na předpolích v Holešovicích i v Tróji se postupně navázely ocelové díly oblouku o hmotnosti 45 až 80 t (obr. 8). Ty se postupně montovaly do větších dílců, které se pomocí hydraulického zavážecího vozu dopravovaly na betonovou desku hlavního pole (obr. 9).

Současně se budovaly pomocné věže z materiálu PIŽMO, které se později použily pro zvedání oblouku. Tyto věže musely být podepřeny pouze na táhle oblouku (obr. 10). Deska mostovky je tenká a nemohla by přenášet lokální zatížení od oblouku během jeho montáže.

Na betonové mostovce byly ocelové prvky dále svařeny do tří dílů. Krajní díly byly pak připojeny pomocí dočasných kloubů (obr. 11) k zárodkům ob-



12



13



14

Obr. 14 Oblouk po svaření všech dílů ■
Fig. 14 Arch after welding of all parts



15

Obr. 15 Oblouk po demontáži věží PIŽMO ■
Fig. 15 Arch after dismantling of the PIŽMO towers

Obr. 16 Počáteční napínání závěsů ■
Fig. 16 Initial dressing of hangers

Obr. 17 Most po demontáži dočasné příhradové konstrukce ■
Fig. 17 Bridge after dismantling of the temporary truss

Obr. 18 Tenzometry pro monitorování sil v závěsech ■
Fig. 18 Strain gauges for monitoring of the forces in hangers

Obr. 19 Monolitická konstrukce inundačního pole ■
Fig. 19 Cast in situ structure of the side span



16

louku a zvednuty do téměř finální polohy (obr. 12). Pak byly dočasné klouby odstraněny a spoj mezi krajními díly a obloukem byl svařen. Následovalo zvedání střední části oblouku do definitivní polohy (obr. 13). Pak byly svařeny poslední spoje na oblouku mezi střední částí a krajními částmi – byla to velmi náročná operace, protože se po celou dobu zavařování posledního spoje musela velmi pečlivě sledovat poloha oblouku a pomocí hydraulických závěsů zajišťovat, aby nedošlo k nežádoucí napjatosti v oblouku, např. vlivem teplotních změn (obr. 14).

Po dokončení svarů bylo možné oblouk uvolnit ze závěsů, a tak se oblouk stal samonosným. Následně bylo mož-

né demontovat věže sloužící ke zvedání oblouku (obr. 15). Aktivací oblouku došlo k poklesu tlakové rezervy v mostovce.

V další fázi byly instalovány tyčové závěsy MacAlloy, spojující oblouk s mostovkou. Závěsy byly napínány na relativně malou sílu (cca 10 % únosnosti), aby se zajistil jejich přímý tvar (eliminace průhybu) a zajistilo se tak jejich lineární působení (obr. 16). Tím se most přiblížil definitivnímu stavu a bylo možné začít s první fází demontáže pomocné příhradové konstrukce – rozpojením dolního pásu na čtyřech místech.

Pak se aktivovala druhá třetina podélného předpětí v mostovce a táhle ob-

louku. Tím se opět navýšila tlaková rezerva v mostovce a následovalo spuštění dočasných podpor. Most pak zůstal podepřen již v konečném stavu pouze na definitivních ložiskách. Tato operace byla, jako všechny ostatní, pečlivě monitorována. Konstrukce mostu poklesla o cca 150 mm uprostřed rozpětí a došlo k plnému zaktivování závěsů.

Pak bylo dokončeno podélné předpínání mostu dopnutím poslední třetiny předpínací síly. Dočasná příhradová konstrukce byla zcela demontována (obr. 17).

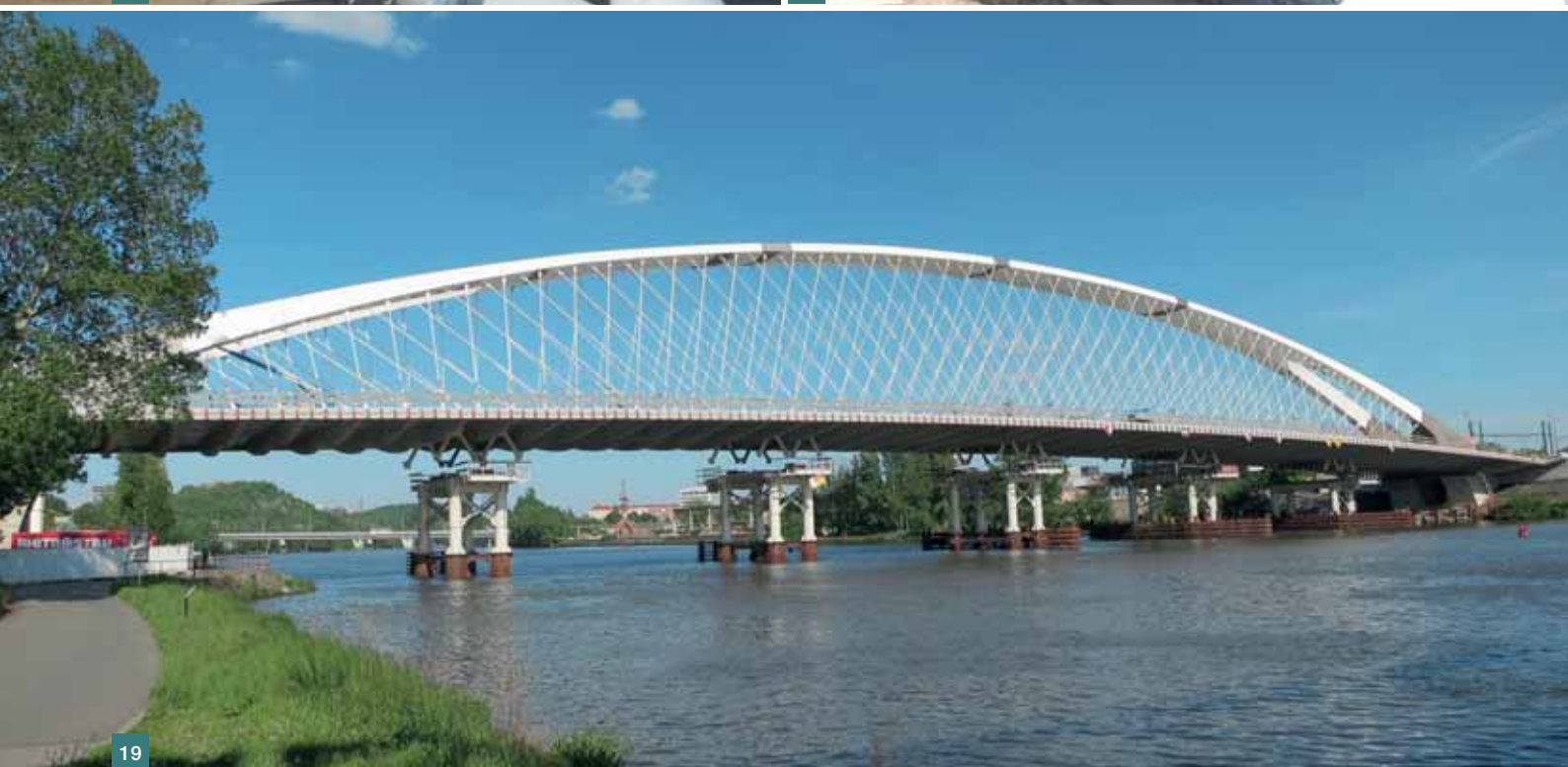
Následně byly síly v závěsech mírně upraveny, zejména v koncových oblastech, kde má oblouk vysokou tu-



17



18



19

host vzhledem k rámovému propojení s mostovkou. Tato úprava měla již minimální vliv na podélné předpětí mostu. Monitoring sil ve všech závěsech (obr. 18) ukázal, že byla dosažena vynikající shoda naměřených sil a sil předpokládaných ve statickém výpočtu. Tím byla dokončena hrubá stavba hlavního pole mostu.

Inundační pole mostu má nezávislou nosnou konstrukci, podepřenou na pilíři P2, který je společný pro obě pole, a na trojské opěře.

Monolitická konstrukce stavěná na pevné skruži je předepnuta v podélném a příčném směru. Objem použitého betonu je asi 1 200 m³. Původní záměr betonovat konstrukci z betonu

C50/60 XF2 celou najednou byl upraven z důvodu rizika s ohledem na výkyvy počasí, dodávky betonu a lidského faktoru. Konstrukce byla v podélném směru rozdělena přibližně na třetiny, které se betonovaly postupně.

Betonáž padla do relativně teplého období konce léta 2011, kdy bylo dokonce nutné chladit beton při betonáži koncových příčniců s masivním průřezem. K chlazení byl použit tekutý dusík aplikovaný do automáchačů. Dosáhlo se tak snížení teploty betonu o cca 5 °C [9].

Konstrukce má šířku cca 30 m s proměnným příčným sklonem. K hutnění povrchu byla použita vibrační lišta. K omezení vzniku trhlin ve velké plo-

še byla použita polypropylénová vlákna a mimořádně pečlivé ošetřování betonu ihned po betonáži, které spočívalo v aplikaci nástřiku proti odpařování vody z betonu. Povrch byl ihned po zavadnutí betonu zakryt geotextilií a PE fólií.

Po dokončení betonáže třetího dílu se konstrukce předpínala. Složitý tvar se vlivem předpínání deformuje v podélném i příčném směru. Bylo proto nutné nalézt kombinovaný postup současného odskrůžování a předpínání, aby nedošlo v některých místech k přetížení skruže a jejímu poškození.

Po dokončení nosných konstrukcí pokračují v současné době (červen 2013) práce na dalších konstrukcích.



20

Izolace mostu je stříkaná, vyrábějí se ocelové chodníkové konzoly a zábradlí, připravuje se betonáž pevné betonové dráhy pro tramvaje, instalace dilatačních závěrů, odvodnění a dalších konstrukcí. Též se zajišťuje odsátí vlhkosti z komory oblouku, která bude kompletně uzavřena, aby nedocházelo k vnitřní korozi.

BETONOVÉ ČÁSTI MOSTU

V hlavním poli mostu plní betonové konstrukce zásadní nosné funkce. Beton je hlavním materiálem pro desku mostovky a pro táhlo oblouku. Na kvalitu těchto konstrukcí byly proto kladey mimořádné požadavky.

Prefabrikované příčnický

Prefabrikované příčnický (obr. 20) přenášejí zatížení z monolitické desky prostřednictvím zabetonovaných ocelových prvků do táhla mostovky (obr. 21).

Délka příčnicků s obdélníkovým průřezem širokým pouze 0,5 m je téměř 30 m. Výška průřezu je proměnná, od 0,4 do 1,5 m. Příčnický jsou z betonu C70/85 XF2 a jsou silně vyztuženy betonářskou výztuží. Dále jsou předepnutý dvěma 9lanovými kabely se soudržností, které mají vždy jednu kotvu pasivní cca ve vzdálenosti 6 m od konce příčnicku (obr. 22) a jednu aktivní kotvu v čele příčnicku.

Do příčnicků jsou zabetonovány závěsné ocelové prvky (obr. 21). Geometrie mostu vyžaduje, aby závěsné prvky byly vždy v přesně dané poloze, která je shodná vždy jen u dvou příčnicků symetricky umístěných vzhledem k polovině mostního pole.

Betonáž příčnicků ve výrobě v Brandyse nad Labem byla velmi náročná, protože hustá výztuž komplikovala ukládání betonu, zejména v oblasti pasivní kotvy předpínacího kabe-

lu. Mimořádná pozornost byla věnována kontrole všech pracovních operací a přesnosti osazení závěsných prvků.

Kabely systému SUSPA jsou elektroizolační (jako všechny ostatní kabely na mostě). Napínání kabelů příčnicků probíhalo ve dvou fázích. První část předpětí byla aplikována ve výrobě, aby byly příčnický pro přepravu a montáž částečně předepnutý. Druhá část předpětí byla aplikována po jejich připojení na ocelovou část táhla, tedy až po podepření v definitivní poloze. Tato výrobní komplikace se projevila kladně v redukci ztrát předpětí.

Monolitické části hlavního pole

Monolitické části mostovky jsou z betonu pevnostní třídy C50/60 XF2 (táhlo XF4). Koncevé příčnický jsou velmi masivní (průřezové rozměry cca 1,8 x 4 m), zatímco deska mostovky je ve velké části pouze 280 mm tlustá.

Obr. 20 Prefabrikované příčnický na skládce ■

Fig. 20 Precast transversal beams in the storage area

Obr. 21 Ocelový prvek zabetonovaný v příčnicku

■ Fig. 21 Steel element embedded in the transversal beam

Obr. 22 Výztuž v oblasti pasivní kotvy ■

Fig. 22 Reinforcement around the passive anchor

Obr. 23 Výztuž v koncevé oblasti mostovky

■ Fig. 23 Reinforcement of the end area of the bridge deck

Obr. 24 Model táhla oblouku ■ Fig. 24 Model of the tie of the arch

Obr. 25 Model táhla po rozřezání ■ Fig. 25 Model of the tie of the arch after cutting



21



22



23

Koncové příčnický, betonované po osazení ocelových patek oblouku, jsou velmi hustě vyztuženy, zejména v oblasti kotev podélného předpětí. V koncové oblasti se křížují kabely podélného a příčného předpětí a je zde umístěno velké množství betonářské výztuže (obr. 23). Vzhledem k rozměrům konstrukce bylo nutné sledovat vývoj hydratačního tepla.

Požadované tvarování konstrukce vyžadovalo velmi složité bednění. Zakřivené tvary neumožňovaly použít systémové bednění, celé bednění bylo individuální, přizpůsobené navrženým tvarům. Bednění standardních úseků desky mostovky o délce 16 m (čtyři pole mezi příčnicí) bylo zvedáno z lodí a zakotveno do předem připravených kotev v prefabrikovaných příčnicích a do závěsů pomocného nosníku na mostovce. Mimořádná pozornost byla věnována těsnění bednění u pří-

níků, aby nedošlo k pronikání cementového mléka a znečištění příčnicíků.

Původní představa, že betonáž bude probíhat symetricky od obou konců mostního pole, byla později z časových důvodů modifikována a symetricky neprobíhala. To však nemělo téměř žádný vliv na statické působení mostu.

Po betonáži jednotlivých dílů mostovky byly tyto příčně předepnuté. Kabely firmy VSL Systémy CZ pro příčné předpětí byly elektroizolační 4lanové v plochých kanálcích. Podélné předpětí mohlo být aplikováno až po dokončení betonáže celé konstrukce.

Po betonáži úseku desky mostovky se v dalším záběru betonovalo táhlo oblouku. Jeho ocelová část byla již opatřena kabelovými kanálky pro 37lanové kabely a betonářskou výztuží. Složitý tvar ocelové části táhla komplikoval betonáž, protože omezoval přístup betonu do jednotlivých částí prů-

řezu. V ocelové části byly ze statických důvodů vynechány pouze malé otvory pro dopravu betonu.

Táhlo z betonu C50/60 XF4 bude vystaveno účinkům rozmrazovacích solí při přímém ostřiku při projíždění vozidel. Proto byla do betonu k omezení vzniku raných trhlin brzy po betonáži přidána polypropylénová vlákna. Nebylo však možné použít samozhutnitelný beton, protože povrch táhla je v podélném i příčném sklonu, který ve výsledku dosahuje až 8 %.

Obavy z nedokonalého probetonování konstrukce vedly k nutnosti ověřit možnosti betonáže na modelu v měřítku 1:1 (obr. 24). Na modelu byly ověřeny vlastnosti betonu i postup plnění bednění tak, aby došlo k úplnému vyplnění celého prostoru. Model byl po ztvrdnutí betonu rozřezán, aby byla odhalena případná problémová místa (obr. 25). Na základě získaných zkuš-



24



25

ností bylo táhlo betonováno. Bylo dosaženo vysoké kvality povrchu a téměř 100% omezení trhlin. Nutno připomenout, že vlivem následného podélného předpětí by byly i případné trhliny pravděpodobně opět zavřeny.

Betonová výplň zárodků oblouku

Betonový oblouk je velmi plochý, proto je oblouková vodorovná síla větší, než kdyby byl oblouk navržen klasicky. V místě zárodku je tato síla v rovnováze s tahovou silou v táhle oblouku. Proto jsou reakce oblouku do podpěr pouze svislé.

V zárodku oblouku vzniká složitá napjatost. Původní záměr přenést požadovaná napětí pomocí ocelové konstrukce vyžadoval, aby zárodek byl velmi hustě vyztužen pomocí přivařených výztuh. Další podružná napětí vznikala v podkotevních oblastech velkých 37lanových kabelů kotvených právě v zárodku oblouku. Proto se jevílo jako optimální vyplnit ocelový zárodek vysokopevnostním betonem, který umožňuje plynulý roznos napětí v zárodku včetně podkotevních oblastí. Mohlo být sníženo množství ocelových výztuh a zjednodušila se tím výroba ocelové, již tak dosti složité, konstrukce. Spřažení betonu a ocelové konstrukce je zajištěno pomocí trnů a betonářské výztuže.

Pro tuto speciální konstrukci byl navržen beton třídy C80/95. Vzhledem k nutnosti vyplňovat nepřístupný prostor byl beton připraven jako samozhutnitelný a konstrukce byla plněna od spodu pomocí čerpadel. Vzhledem k značné výšce konstrukce (cca 8 m) bylo navrženo postupné plnění ve čtyřech vrstvách, což vedlo k omezení vysokého hydrostatického tlaku betonu.

Velká pozornost byla věnována návrhu odvodu vzdušných otvorů. I po redukci výztuh jejich zbylé množství vyžadovalo umístění mnoha odvodu vzdušných otvorů tak, aby se podařilo vyplnit betonem skutečně celý prostor zárodku.

Dalším faktorem bylo sledování vývinu hydratačního tepla. Byly zkoušeny dvě receptury s různými cementy (CEM I 42,5 a CEM III/B 32,5 SV). U směsi s cementem CEM III byly teploty přirozeně nižší (cca o 5 °C), ale dosažené konečné pevnosti byly srovnatelné (po 28 dnech více než 100 MPa, po 90 dnech téměř 120 MPa).

Plnění ocelové konstrukce se složitým tvarem bylo též považováno za rizikovou operaci. Proto byl vytvořen

Obr. 26 Kotvy kabelů v táhle oblouku s monitorováním
 Fig. 26 Anchors of the prestressing cables in the tie with monitoring

Obr. 27 Most při povodni 3. června 2013
 Fig. 27 The bridge at the time of flooding June 3, 2013



26

opět model z překližky, který simuloval složitý tvar ocelové konstrukce včetně kabelových kanálků. Tento model byl vybetonován betonem navrženého složení a pomocí vývrtů bylo ověřeno, že betonáž byla zdařilá. Zkušenosti získané při betonáži modelu byly velmi cenné a umožnily úspěšnou betonáž zárodků mostní konstrukce. Byla použita dvě čerpadla a současně probíhalo plnění konstrukce ze dvou stran.

Předpínání

Most převádí tramvajovou trať, v blízkosti je elektrifikovaná železnice a tunely metra. Jde tedy o oblast, která je exponovaná z hlediska výskytu bludných proudů. Vzhledem k významu konstrukce bylo navrženo předpětí s nejmodernějším zajištěním jeho dlouhodobé trvanlivosti. Ve smyslu doporučení *fib* má předpětí nejvyšší ochranu PL3. Všechny kabely jsou umístěny v plastových kanálkách, mají ochráněné kotvy a jsou elektricky izolované. Jsou vybaveny měřeními, které umožňuje sledovat jejich elektrický odpor vzhledem k okolní konstrukci (obr. 26). Tento systém umožňuje identifikaci poruchy během provozu mostu a přijetí případných opatření.

Podélné předpětí přenáší tahovou sílu vyvolanou reakcemi oblouku a navíc zajišťuje trvalou tlakovou rezervu v betonové mostovce. Je složeno z řady kabelů umístěných v desce mostovky a v táhle oblouku. Jsou použity kabely s různým počtem lan od 37, které jsou přímo v táhle oblouku, až po malé sedmilanové kabely umístěné v desce mostu.

Aplikace podélného předpětí ve třech stadiích vyplynula z požadavku na

efektivní působení konstrukce během výstavby. Zároveň takový postup vedl k minimálnímu ovlivnění předpětí spolupůsobením se závěsy a k omezení dlouhodobých ztrát předpětí, protože dopínání třetí etapy bylo realizováno po poměrně dlouhé době, kdy proběhla již část ztrát vlivem relaxace napětí v kabelech a vlivem smršťování a dotvarování betonu. V době konečného dopnutí kabelů byl již beton mostovky starší a jeho následné objemové změny budou již menší. Podélné předpětí bylo kompletně dodáno firmou VSL Systémy CZ.

Příčné předpětí desky je realizováno z plochých 4lanových kabelů systému VSL. Pouze předpětí v prefabrikovaných příčnicích má systém SUSPA, který je též elektricky izolační.

OCELOVÉ KONSTRUKCE

Základní ocelovou konstrukcí mostu je oblouk. Je tvořen komorovou konstrukcí s proměnným průřezem. Jeho návrh a výstavba patřily k nejsložitějším na mostě. Neprůlezná konstrukce vyžadovala vytvoření postupu svařování tak, aby byla zajištěna požadovaná kvalita, přestože nemohlo být svařováno uvnitř oblouku. Přitom značné tloušťky plechů kladly na svařování mimořádné nároky. Horní a dolní pás má tloušťku 60 mm, vnější stěny 50 mm a vnitřní stěny 40 mm. V zárodcích jsou tloušťky plechů větší až 80 mm. Byla použita i různá kvalita oceli (podélné plechy S420 ML a ostatní konstrukce S355 NL).

Výroba probíhala převážně u dvou výrobců (Metrostav – dílny v Horních Počernicích a MCE – výroba ve Slaném). Oba výrobci se pak podíleli i na montáži přímo na mostě. Všechny

spoje umožňují nedestruktivní kontrolu nosných svarů.

Závěsy jsou realizovány z tyčí Mac-Alloy různých průměrů od M76 až po M105 z materiálu s mezí kluzu 520 MPa. Tyče včetně kotevnic zařízení (vidlice s čepem) byly zvláště ověřovány na působení při únavovém namáhání na tři miliony cyklů při rozkmitu napětí 130 MPa.

Protikoroziční úprava všech konstrukcí je navržena na koroziční zatížení dle TP 84. Jsou použity různé nátěrové systémy. Obecně lze nátěrový systém charakterizovat jako sestavu základního nátěru s vysokým obsahem zinku, dvou základních nátěrů a vrchního nátěru v odstínu bílé barvy. V exponova-

ných místech, včetně závěsů, je protikoroziční ochrana posílena o další vrstvy, popř. je doplněno žárové zinkování.

MONITORING MOSTU

Konstrukce je tenkostěnná a byla stavěna netradičním postupem. Pro její analýzu byla použita řada numerických modelů. Proto bylo nutné navrhnout monitorovací systém, který by ověřil, zda jsou předpoklady výpočtů správné a reálné. Během stavby konstrukce jsou proto její hlavní části monitorovány a některá sledování budou pokračovat i během provozu konstrukce. Monitoring má několik částí, které se navzájem doplňují.

Geodetické sledování geometrie kon-

strukce bylo využíváno pro kontrolu výstavby po celou dobu. Kromě geodetů dodavatele na stavbě pracuje specializovaná firma CCE.

Druhým systémem je tenzometrické sledování konstrukce. Tenzometry jsou zabudovány v mostovce, na oblouku a závěsech. Program zajišťuje firma Pontex. Předpokládá se, že část tenzometrů zůstane v provozu i během provozu mostu.

Během instalace a rektifikace závěsů bylo firmou EXCON, která celý proces instalace závěsů a rektifikace sil navrhla a realizovala, prováděno zvláštní měření sil v závěsech.

Monitoring předpínacích kabelů byl již zmíněn dříve.



27



Projekt/foto: mosty rolovací dráhy letiště Frankfurt nad Mohanem, SRN
Consulting engineers Dr. Binnewies, Hamburg

» Více o softwaru RIB na statiku stavebních konstrukcí se dozvíte na www.rib.cz
email: info@rib.cz
telefon: +420 241 442 078



Komplexní software na statiku železobetonových a předpjatých prefabrikovaných mostů

Navzdory omezeným rozpočtovým zdrojům můžete i Vy se softwarem RIB navrhovat optimální řešení:

- prefabrikované mosty a skeletové konstrukce,
- železobetonové a předpjaté štíhlé sloupy, mostní pilíře,
- prefabrikované a monolitické železobetonové základy,
- prefabrikované a monolitické opěrné stěny,
- hloubená a protlačovaná potrubí.

Účastníci výstavby

| | | |
|---|--|---|
| Autorský tým Trojského mostu | Ing. L. Šašek, CSc., a Ing. J. Petrák, Mott MacDonald CZ, s. r. o., a Ing. arch. R. Koucký a Ing. akad. arch. L. Kábrt, architekt. kancelář Roman Koucký | |
| Projektant RDS | Mott MacDonald, Ing. L. Šašek, CSc., Ing. P. Nehasil | |
| Projektant ocelové konstrukce | Excon, V. Janata, D. Gregor | |
| Architektura a 3D koordinace | Roman Koucký architekt. kancelář, R. Koucký, L. Kábrt | |
| Projektant výsunu a supervize zhotovitele | Novák & Partner, L. Vráblík, M. Šístek | |
| Koordinátor projektů MO Blanka | Satra, a. s., A. Burovič | |
| Správce stavby | IDS, a. s., J. Kalíšek, L. Fuchs, J. Plachý | |
| Zhotovitel mostu | Metrostav, a. s. | |
| | vedení projektu: A. Tvrz, Z. Račan, P. Koukolík | |
| | příprava projektu: R. Brož, V. Hájek, P. Guňka experti zhotovitele: J. L. Vitek, M. Škaloud | |
| Výsun mostu a manipulace s montážními dílci | Metrostav, a. s., T. Wangler, J. Lukeš | |
| Zhotovitel OK | Metrostav, a. s., J. Hátle, L. Pokorný, J. Olenič, L. Gurný MCE Slaný, a. s., J. Svoboda, V. Michalík | |
| Zhotovitel založení | Zakládání staveb, a. s., J. Ludvíček | |
| Geodetické práce | Metrostav, a. s., J. Beneš, M. Hanzl CCE Praha, J. Pohan, J. Bouček | |
| Monitoring | Pontex, s. r. o., T. Klier, T. Mička | |
| Dodavatel | betonu | TBG Metrostav, a. s., M. Mazurová, R. Coufal |
| | prefabrikovaných příčníků | SMP CZ, a. s., J. Richt, J. Šimůnek |
| | závěsů mostu | Tension Systems, s. r. o., J. Schlossbauer |
| | předpětí mostu | VSL Systémy CZ, P. Beňo |
| | hydraulika a konzultací pro manipulaci s břemeny | MTEK, s. r. o., Freyssinet CZ, Ikema, s. r. o. |
| | bednění monolitických konstrukcí těžkých zkruží | Česká Doka, s. r. o. Metrostav, a. s., D. Stempák, J. Padrta |

Literatura:

- [1] Šašek L. a kol.: Projekt Trojského mostu, Sb. 17. mezin. symp. Mosty 2012, Sekurkon 2012
- [2] Vitek J. L. a kol.: Výstavba Trojského mostu v Praze, Sb. 17. mezin. symp. Mosty 2012, Sekurkon 2012.
- [3] Hátle J.: Výstavba Trojského mostu v Praze, Silnice a železnice 2/2012
- [4] Vitek J. L., Brož R., Tvrz A.: Construction of the network arch bridge in Prague, Proc. of the fib symp. 2012 Concrete structures for sustainable community, Stockholm, June 2012, 159–162
- [5] Gregor D. a kol.: New Troja Bridge in Prague – Concept and Structural Analysis of Steel Parts, Steel Structures and Bridges 2012 – 23rd Czech and Slovak Intern. Conf., in Elsevier Procedia Eng., Volume 40, pp. 131–136
- [6] Janata V. a kol.: New Troja Bridge in Prague – Structural Solution of Steel Parts, Steel Structures and Bridges 2012 – 23rd Czech and Slovak Intern. Conf., in Elsevier Procedia Eng., Volume 40, pp. 159–164
- [7] Vitek J. L. a kol.: Výstavba nového Trojského mostu v Praze, časopis Stavitelství 11–12/12
- [8] Šašek L., Janata V.: Bridge, Prague, Czech Republic – design and construction of the world's largest network bridge – Bridges 2013, April 2013 Birmingham
- [9] Chmelíková K.: Problematika chlazení betonu kapalným dusíkem, Beton TKS 4/2012, str. 8–70

DOČASNÉ OCELOVÉ KONSTRUKCE

K výstavbě mostu (zejména hlavního pole) musela být použita řada dočasných ocelových konstrukcí. Nejvíce viditelné byly ocelové dočasné podpory ve Vltavě a ocelová příhradová konstrukce ztužující most v době, kdy nepůsobil oblouk a závěsy.

Dodavatel zvažoval různé postupy výstavby a došel k závěru, že použitá technologie využívá nejméně dočasných konstrukcí ze všech vyhodnocovaných variant výstavby. Některé z těchto konstrukcí musely být navrženy individuálně a jiné využívaly inventární materiál (např. věže PIŽMO). Velké procento manipulací vyžadovalo vývoj a výrobu menších speciálních konstrukcí, např. zavážecí vozíky pro dopravu ocelových dílů oblouku na mostní desku, rámy pro osazení zvedacích hydraulických válců pro zavěšení oblouku, dočasné klouby pro montáž krajních dílů oblouku atd.

Nyní, když už je většina závažných a rizikových operací dokončena, je nutné podotknout, že i při volbě jiné technologie výstavby by byl objem dočasně využívaných konstrukcí zcela jistě srovnatelný a s vysokou pravděpodobností ještě větší než v realizované variantě.

Letošní červnové povodně (obr. 27) prokázaly, že obava z nich byla na místě a že při zvoleném realizovaném postupu výstavby by ji neohrozily v žádném stadiu.

ZÁVĚR

Trojský most v Praze patří mezi největší mosty u nás. Jeho konstrukční systém je funkční v definitivní kompletní formě, avšak nikoli během výstavby. Proto byl postup výstavby předmětem dlouhých diskusí a byla vyhodnocována řada alternativ.

Mimořádná pozornost byla věnována bezpečnosti a spolehlivosti postupu výstavby s vyhodnocením různých rizik, včetně povodňového rizika. Zkušenosti prokázaly, že takový postup byl zvolen správně, a proto nedošlo k žádným okolnostem, které by jak výsledné dílo, tak i jeho výstavbu významně ohrožovaly. Pečlivé zvážení nejrůznějších vlivů a podrobná supervize projektových prací, numerické i experimentální ověřování inovativních technologií se jednoznačně vyplatilo. Jasně se prokázalo, že týmová práce mnoha projektantů s dodavateli umožnila postavit i takto složitou mostní konstrukci spolehlivě při splnění všech technických parametrů.

Dokončení mostu se předpokládá

koncem roku 2013 a uvedení do plného provozu se plánuje společně s dokončením celého tunelového komplexu Blanka.

Během výstavby byly využity výsledky výzkumného projektu TIP č. FR-TI3/531 podporovaného MPO ČR.

Fotografie z archivů firmy Metrostav, a. s., a Excon, a. s.

Prof. Ing. Jan L. Vitek, CSc., FEng.
e-mail: vitek@metrostav.cz



Ing. Robert Brož, Ph.D.
e-mail: robert.broz@metrostav.cz

Ing. Petr Koukolík
e-mail: koukolik@metrostav.cz



Bc. Alexandr Tvrz
e-mail: tvrz@metrostav.cz

všichni: Metrostav, a. s.
Koželušská 2246, 180 00 Praha 8
tel.: 266 709 317