

Piší o betonu a někdy i o zdivu ...

Jeden z mála deštivých dnů letošních prázdnin jsem věnovala prohlížení nahromaděných odborných časopisů s podobným zaměřením, jaké má tento časopis. Při prohlížení připravených tiskovin z posledních měsíců mne zaujaly nejen mnohé příspěvky svým obsahem, stylizací a zajímavým podáním odborné problematiky, ale pochopitelně mě také zajímalo, zda jména autorů znám. Svaz výrobců pórobetonu ve spolupráci s VUT Brno a ČVUT Praha připravuje vydání potřebných vysokoškolských skript o používání pórobetonu, která budou k dispozici již pro školní rok 1999/2000.

Ve čtvrtém čísle loňského roku časopisu SANACE se můžeme seznámit se zajímavou problematikou v článku „Ochrana proti korozi při opravách betonu: retrospektiva a výhled“. Autory jsou páni Emmons a Vaysburd, v USA uznávaní odborníci v oblasti sanací betonových konstrukcí. O technologii řezání železobetonových stěn bankovního trezoru o síle 1,0 m se můžete dočíst v článku Ludka Černého v tomtéž čísle SANACE. V květnovém čísle letošního roku píše Jiří Dohnálek v příspěvku „Evropské normy – definice“ o připravovaných evropských normách o výrobcích a systémech pro ochranu a opravy betonových konstrukcí. Jelikož stávající české normy v této oblasti neexistovaly, bude této problematice přidělena podskupina ČSN 732100 EN 1504 a znění norem bude převzato od EU.

Série zajímavých příspěvků o technologii drátkobetonu je zveřejněna ve STAVEBNÍCH LISTECH v číslech 6, 7, 8/99. Autoři tím propagují jejich příručku se směrnicí k této problematice, kterou nyní vydává ČBZ a ČKAIT.

V této spolupráci je připravena také kniha o dějinách betonového stavitelství v Čechách v 19. století. V časopise BETON 1/99 je zveřejněn článek se stejnou, ale užší tematikou „Průmyslové stavitelství v Čechách v 19. století“.

V exkluzivním časopise STAVBA 4/99 je zajímavý rozsáhlý článek „Nový kód výrobní kázně: česká průmyslová architektura 90. let“. V tomtéž čísle v pravidelné rubrice „Právo“ jistě mnohé soudní znalce zaujme Milik Tichý svými tradičně vystižnými postřehy v článku „Znalci a jejich posudky“.

V časopise MATERIÁLY PRO STAVBU 3/99 je uveřejněn úvodní článek k připravované sérii „Vlhkost zdiva a její odstraňování“ od Helmuta Webera. Analýzou stavu stavebních konstrukcí po požáru v roce 1998 a návrhem sanačních opatření se zabývá velmi konkrétní článek Václava Kuplíka „Požár výškové administrativní budovy v Mostě“.

Článků, které stojí za přečtení je mnoho, jen mít čas je čist. Snad následující upozornění budou inspirovat k listování v odborném tisku alespoň ve vzácných volných chvílích.

Věra Prokopová

Nadjezd nad rychlostní komunikací R-52 Rajhrad Mikulov

Arch Bridge Crossing the Brno-Mikulov Expressway

Jiří Stráský, Ilja Hustý

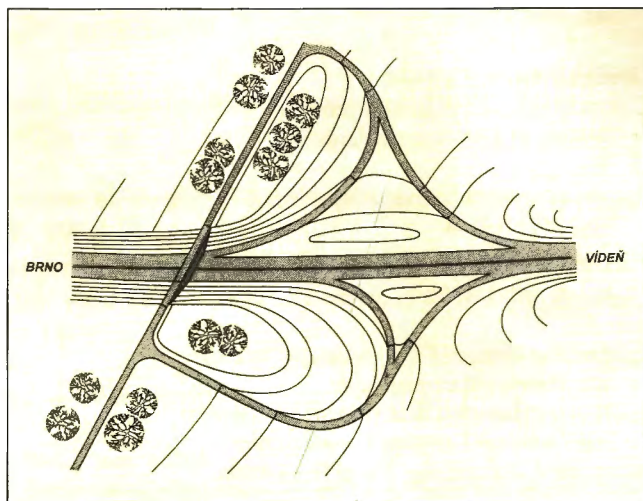
Mostní konstrukce tvořená ocelobetonovým obloukem a mostovkou z předpjatého betonu je popsána z hlediska architektonického a konstrukčního řešení, statického působení a technologie výstavby. Dále jsou uvedeny výsledky podrobných zatěžovacích zkoušek ověřujících statické a dynamické chování konstrukce.

An arch bridge formed by a steel tube in filled with concrete that support a post-tensioned concrete deck of the channel section is described in terms of its architectural and structural solution, process of construction and static and dynamic analyses. Design assumptions and quality of the workmanship were verified by static and dynamic loading tests.

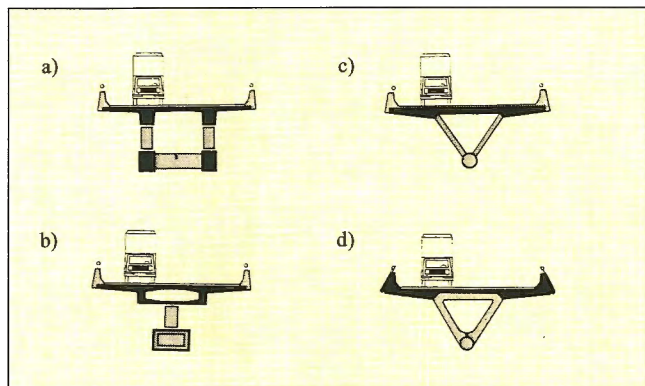


Obr. 1 – Dokončený most / Completed structure

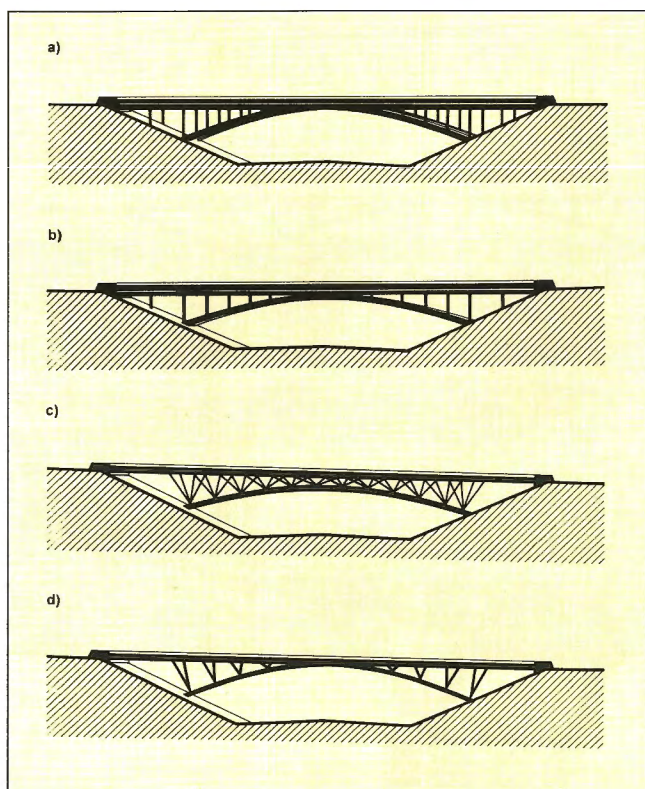
V roce 1996 byla dokončena stavba obloukového mostu tvořeného ocelovou rourou vyplněnou betonem a mostovkou z předpjatého betonu (obr. 1). Návrh kombinuje ocel s betonem tak, aby bylo využito předností obou materiálů, to je velké únosnosti a rychlosti montáže ocelové konstrukce s tvárností a monoliticitou betonové konstrukce.



Obr. 2 – Situace / Plan of the crossing



Obr. 3 – Studované konstrukce / Studied structures



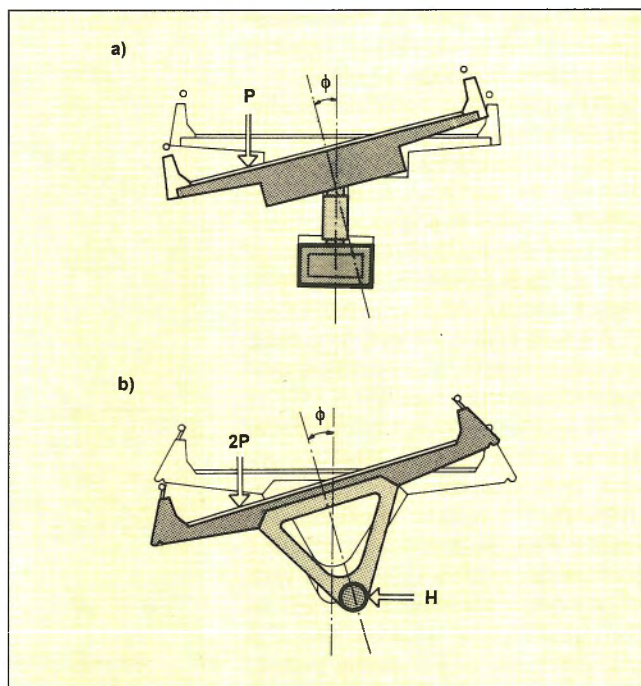
Obr. 4 – Šikmý pohled na studované konstrukce / Studied structures – skew view

Konstrukce mostu získala 1. cenu za realizované stavby v letech 1994-1997 od České a Slovenské společnosti pro ocelové konstrukce, ocenění *Vynikající betonová konstrukce za rok 1995-96* od České společnosti pro beton a zdivo a ocenění *Most roku* od Ministerstva dopravy.

Protože jak projekt, stavba, tak i následné presentace vyvolaly diskusi zpochybňující působení ocelobetonového oblouku, rozhodli se autoři článku uveřejnit souhrnnou informaci o mostě až po jeho ověření bezporuchovým tříletým provozem.

Návrh konstrukce

Místní komunikace III/39528 ve výšce přibližně 14 m překračuje poblíž Rajhradu pod šikmým úhlem rychlostní komunikaci Rajhrad Mikulov (obr. 2). Výška konstrukce nad terénem volala po obloukové konstrukci, šikmé křížení po osovém podepření mostovky. V projektu jsme se snažili skloubit tyto požadavky s požadavkem na úspornou a estetickou konstrukci vyžadující minimální údržbu.



Obr. 5 – Porovnání deformací konstrukcí: a) konstrukce 3b, b) konstrukce 3d / Comparison of the deformations of the structures: a) structure 3b, b) structure 3d

S ohledem na dobré geologické poměry byly v projektu zvažovány nejen klasické trémové konstrukce o třech nebo čtyřech polích, ale také konstrukce obloukové. Byli jsme přesvědčeni, že pro dané přemostění lze navrhnout úspornou obloukovou konstrukci. Abychom určili optimální uspořádání, vypracovali jsme návrhy čtyř typů obloukových konstrukcí:

a) oblouk tvořený dvěma žebry podporujícími dvojtrémovou mostovku (obr. 3a). S ohledem na šikmé křížení jsou oblouky i podpěry vzájemně posunuty,

b) oblouk tvořený úzkou ocelovou komorou podporující v ose mostu betonový komorový nosník (obr. 3b). Mostovka je v kroucení vetknuta jen v krajních opěrách,

c) oblouk tvořený ocelovou rourou spojenou s deskou mostovky prostorovou příhradovinou tvořenou ocelovými trubkami [1] (obr. 3c),

d) oblouk tvořený ocelovou rourou spojenou s parapetní mostovkou trojúhelníkovými vzpěrami (obr. 3d).

Protože je most situován v křižovatce, je viditelný nejen v čelním pohledu, ale i z rozdílných úhlů z ramp. Z obr. 4, kde jsou mostní konstrukce vykresleny v šikmém pohledu, je zřejmé, že konstrukce podle obr. 3a a 3c nemají jednotný řád, konstrukční prvky jsou neuspořádané a proto jsou tyto konstrukce z estetického hlediska nepřijatelné.

Naopak konstrukce uvedené na obr. 3b a 3d, mají jednoduché a čisté uspořádání. Proto byly více rozpracovány. Předběžné výpočty ukázaly, že ačkoliv konstrukce 3d má otevřený průřez, vytváří spolu s trojúhelníkovými vzpěrami a obloukem torzně tuhý konstrukční systém (obr. 5b). Dále vnitřní stěny parapetního nosníku mohou přímo tvořit svodidla *New Jersey*. Také oblouk z ocelové roury lze snadno vyrobit. Na druhé straně, nízký komorový průřez, který také vyžaduje svodidla, se těžko kontroluje, je pracný a tedy i drahý (obr. 5a). Proto byla zvolena konstrukce 3d. Ekonomické rozborů dále prokázaly, že tuto obloukovou konstrukci lze postavit za cenu trémové konstrukce.

Abychom zjednodušili výrobu, má oblouk kruhový tvar. Protože od radiálního zatížení nevznikají v kruhovém oblouku ohybové momenty, jsou vzpěry podpírající mostovku uspo-

řádány radiálně (obr. 6). Toto řešení umožnilo redukovat rozpětí krajních polí a eliminovat stojky ve svahu.

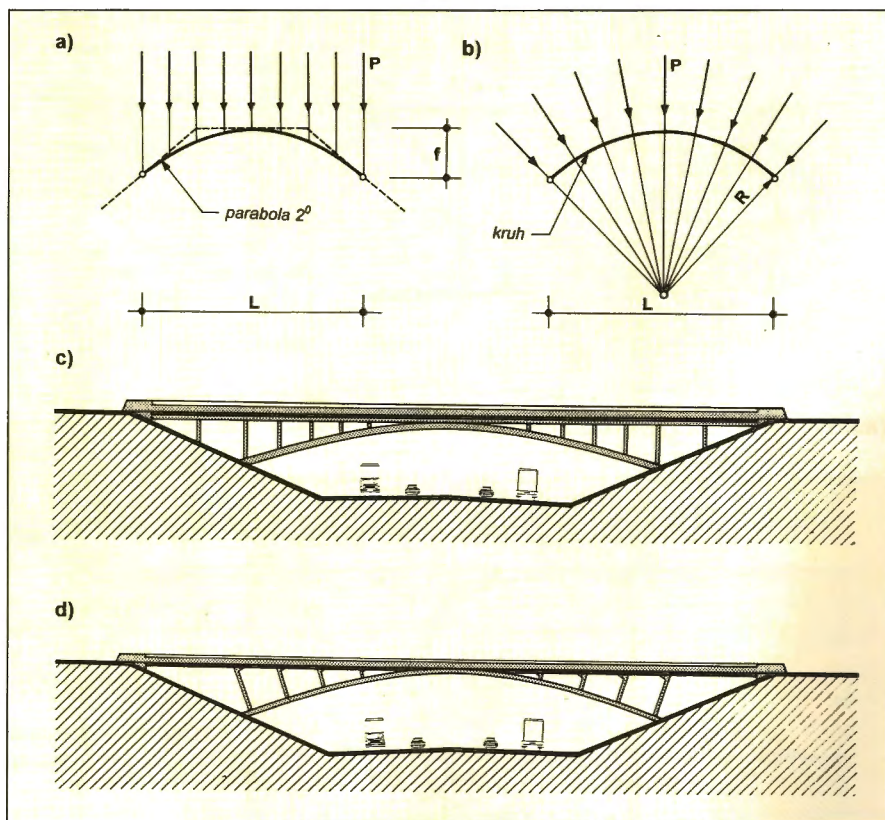
Abychom ztuhlili konstrukci a redukovali vodorovnou sílu v základech, eliminovali jsme klasické opěry. Mostovka je na koncích mostu ztužena příčnickem, který je podepřen šikmými vzpěrami. Oblouk a vzpěry jsou založeny na společném základu, který je pružně vetknut v únosném Bračickém šterkopisku (obr. 7). Navíc je oblouk uprostřed rozpětí ztužen pevným spojením s mostovkou (obr. 8).

Je všeobecně známo, že využitím betonu hustou spirálou nebo uzavřenými kruhovými třmínky (tak zvaným ovinutím – anglicky confinement) vzniká v zatíženém sloupu příznivá prostorová napjatost (obr. 9). Ta však nejen zvyšuje únosnost, ale i plastické přetváření [2], [3]. Únosnost sloupu je pak vyčerpána ne porušením betonu, ale přetržením třmínku. V případě sloupu tvořeného ocelovou rourou vyplněnou betonem ocel tvoří nejen podélnou, ale i příčnou výztuž. Navíc ocelová roura brání vysychání betonu a tak výrazně omezuje vliv smršťování a dotvarování betonu. Následně se tak omezuje redistribuce vnitřních sil. Proto lze maximálně využít tlakové únosnosti betonu. Z těchto důvodů je oblouk tvořen ocelovou rourou vyplněnou betonem.

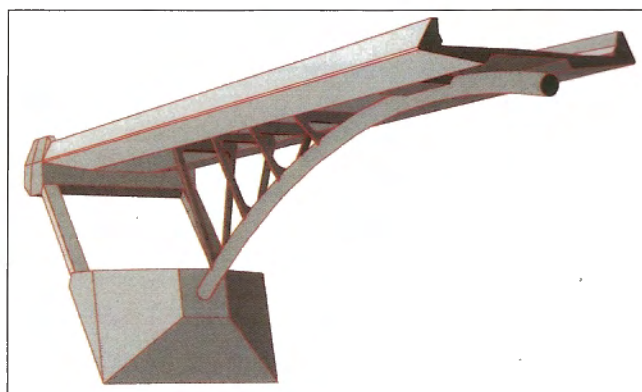
Návrh úmyslně navázal na Mailartovy úsporné obloukové konstrukce tvořené tuhým parapetním nosníkem zajišťujícím stabilitu systému a štíhlým obloukem namáhaným převážně jen tlakem (obr. 10). Navíc jsme využili příčné tuhosti předpjaté mostovky a trojúhelníkových vzpěr k zajištění příčné stability oblouku.

Konstrukční řešení

Ocelobetonový oblouk s rozpětím 67,50 m a vzepětím 8,05 m podpírá prostřednictvím radiálně uspořádaných vzpěr mostovku celkové délky 109,90 m (obr. 11a). Mostovku tvoří parapetní nosník z provzdušněného betonu B 400. Nosník je tvořen dvěma vnějšími nosníky spojenými mostkovou deskou. Nosníky celkové výšky 1,68 m mají vnější stěny skloněny, vnitřní tvar odpovídá tvaru svodidla *New Jersey*. Na koncích mostu je nosník zesílen tak, aby umožnil jednoduché kotvení předpínací výztuže a zároveň vytvořil architektonický vstup do mostu. Mostková deska je v krajních polích plná, ve středních polích je deska mezi jednotlivými vzpěrami vylehčena kazetou (obr. 11b a 11c). Nosník je ve středu mostu v délce 5,175 m monoliticky spojen s obloukem, dále ve směru k oběma koncům mostu je podepřen ocelovými vzpěrami uspořádanými po 5,988 m kolmo ke střednici oblouku. Teoretické rozpětí polí nosníku nad vzpěrami je proto proměnné, od 6,200 do 7,075 m. Na koncích mostu je nosník podepřen šikmými vzpěrami z předpjatého betonu B400 založenými spolu s obloukem ve společných základech (obr. 7). Oblouk je do základu vetknut, vzpěry jsou spojeny s nosníkem i základem vrubovými klouby, které umožňují pootáčení oblouku v podélném směru mostu, brání však pootáčení v jeho příčném směru. Teoretické rozpětí nosníku



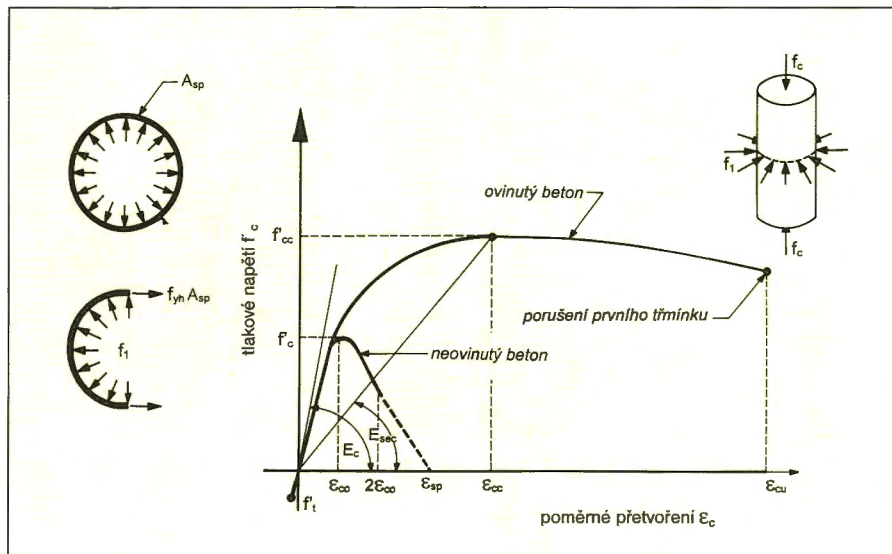
Obr. 6 – Výslednicový tvar a pohled na konstrukce: a) konstrukce 3b, b) konstrukce 3d / Funicular shape and elevation of the structures: a) structure 3b, b) structure 3d



Obr. 7 – Konstrukční řešení – 3D pohled / Structural arrangement – 3D view



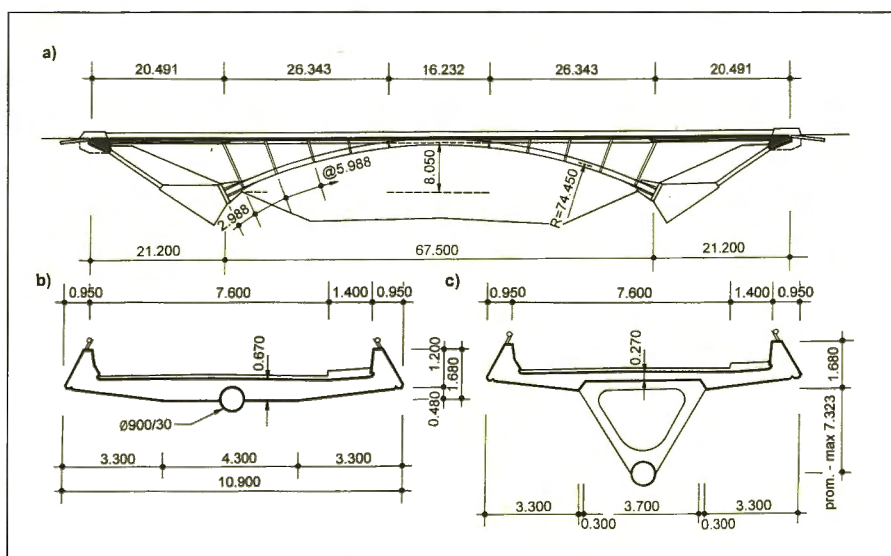
Obr. 8 – Pevné spojení mostovky s obloukem / Fix connection of the deck with the arch



Obr. 9 – Poměrné přetvoření kruhového sloupu s a bez ovinutí / Strain of the circular column with and without confined reinforcement



Obr. 10 – Oblouk a mostovka / Arch and deck



Obr. 11 – Konstruktivní řešení: a) podélný řez, b) příčný řez uprostřed rozpětí, c) typický příčný řez / Structural arrangement: a) longitudinal section, b) section at mid-span, c) typical section

krajních polí (mezi poslední ocelovou a betonovou vzpěrou) je 20,491 m.

Nosník je v podélném směru mostu předepnut průběžnými kabely situovanými jak v okrajových nosnicích, tak i v mostovkové desce (obr. 12 a 13). Krajní pole jsou navíc předepnuta neprůběžnými kabely kotvenými na koncích mostů a ohnutými ve smyčkách situovanými za prvními ocelovými vzpěrami. Nad touto vzpěrou je mostovka také předepnuta čtyřmi příčnými kabely. Základní uspořádání betonářské výztuže je zřejmé z obr. 12d – g, kde je také uvedena poloha předpínací výztuže. Pohled na předpínací a betonářskou výztuž je na obr. 13.

Oblouk je tvořen ocelovou rourou o průměru 900 mm se stěnami tloušťky 30 mm, který je dodatečně vyplněn betonem B 500. Jeho střednici tvoří polygon, který v uzlech vzdálených 2,00 m

sleduje kruh o poloměru 74,75 m (obr. 14). Roura má u pat uzavřené náběhy délky 6,550 m a výšky 300 až 500 mm. Dále je u pat ztužena příčnými výztuhami a konzolami pro přenesení sil z rektifikačních lisů. Roura je přivařena k patním plechům přikotveným k základům. V patních deskách jsou čtyři otvory pro umístění rektifikačních hydraulických lisů.

Ocelová roura je vyrobená z tlustých plechů jakosti 11503 zkružených do segmentů délek 2000 mm. Ve vrcholu jsou svařeny tupým svarem. Každý segment je u konců příčně ztužen dvěma páskovými výztuhami zajišťujícími geometrický tvar a přenos smykových sil mezi betonem a ocelí (obr. 15).

Ocelové vzpěry jsou tvořeny dvěma stojkami komorového průřezu spojenými u mostovky příčle. Vzpěry i příčle jsou vyplněny betonem B 500. Vzhledem ke skutečnosti, že příčle má konstantní délku, je příčný sklon stojek proměnný (obr. 16). U krátké vzpěry č. 5 stojka a příčle splývají v jeden prvek. S ohledem na omezení ohybových namáhání od teplotních změn, mají vzpěry co nejmenší tuhost. Proto je tloušťka stojek proměnná – od 200 do 350 mm. Dolní konce vzpěr jsou k oblouku přivařeny tupými svary, horní konce jsou zabetonovány v mostovce. Vnější povrch ocelové konstrukce oblouku i vzpěr je chráněn nátěrovým systémem provedeným na otryskaný povrch.

Protože beton v rouře nemůže vysychat, projekt požadoval, aby beton měl co možná nejmenší obsah zbytkové vody, která by mohla v zimě zmrznout. S ohledem na technologii betonáže byla směs navržena s vodním součinitelem 0,34 a se superplastifikátorem a zpomalovačem tuhnutí [4].

Základy mostu tvoří dvě betonové patky navrhované z prostého betonu. Patky mají tvar trojúhelníku jak v podélném řezu, tak i v půdorysu. Jsou založeny v únosném šterkopisku v hloubce přibližně 10 m pod terénem. Patky jsou v místě vetknutí oblouku doplněny prefabrikovanou roznásecí deskou z betonu B 500 a hustou betonářskou výztuží zachycující příčný tah, který vyniká

při roznosu zatížení z oblouku do celého průřezu základu. Hustá betonářská výztuž je také navržena v místě připojení koncových vzpěr i v místě kotvení předpínacích kabelů koncových vzpěr.

Postup stavby

S ohledem na redukci skruže byl v místě stavby proveden jen minimální zářez. U patek byl výkop proveden jen v omezeném prostoru tak, aby výkop nahradil bednění patek (obr. 17a). Před betonáží patek byly pečlivě osazeny a rektifikovány prefabrikované roznašecí desky. Po vybetonování základů byly vybedněny a vybetonovány koncové vzpěry.

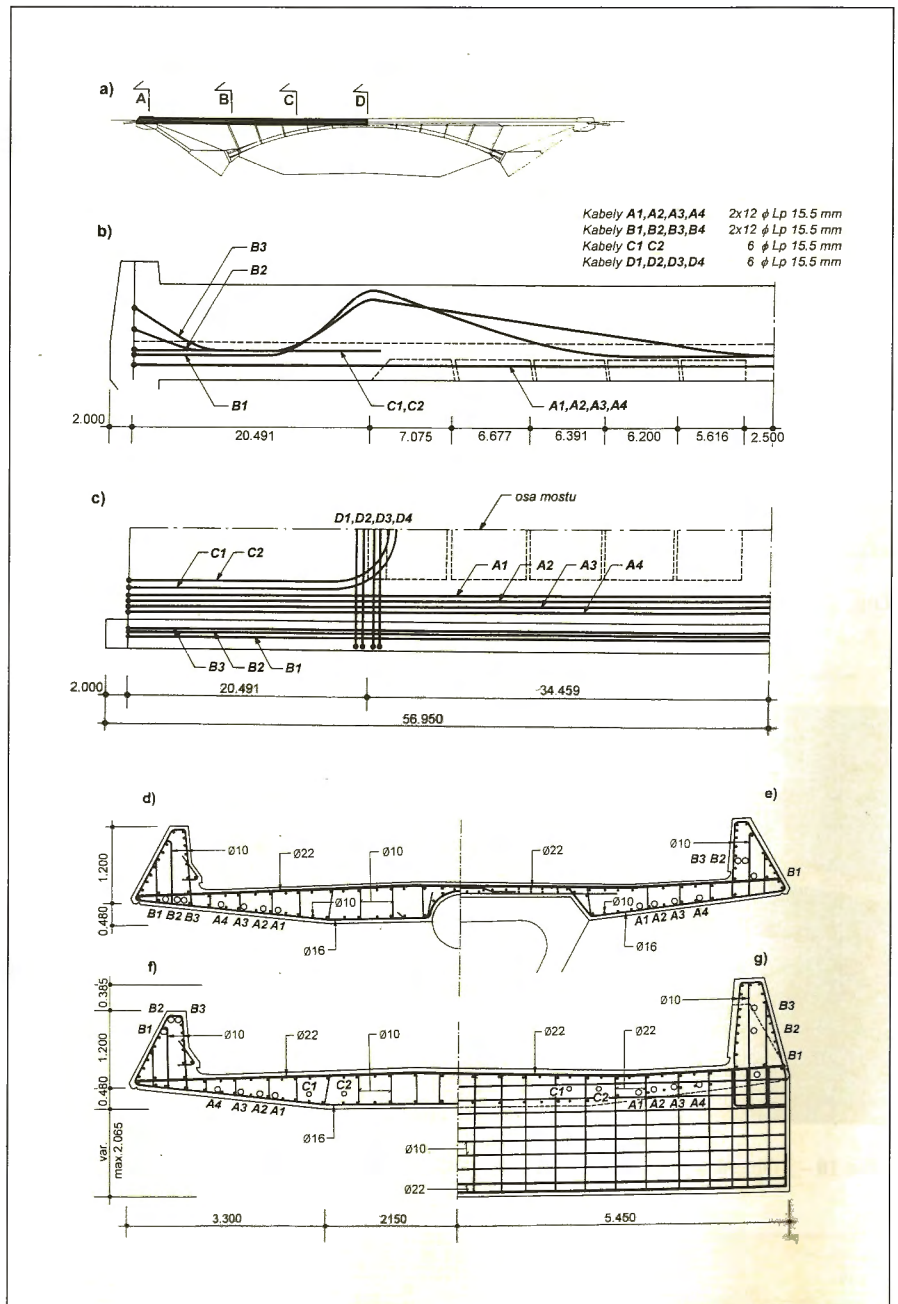
Ocelový oblouk byl montován od patek ke středu mostu ze segmentů délky 12 m. Nejdříve byly osazeny těžké patní segmenty s ocelovou patkou a výztuhami (obr. 18), potom následovala montáž typických segmentů (obr. 19). Při montáži byly obloukové segmenty podepírány montážními podpěrami. Montované segmenty byly pečlivě osazeny a montážně spojeny šrouby. Potom byly provedeny tupé svary, oblouk byl montážně vetknut do základů a montážní podpěry byly odstraněny. Stabilita oblouku v příčném směru mostu byla zajištěna dvěma středními podpěrami, které však oblouk ve svislém směru nepodpíraly.

Po smontování oblouku byly osazeny a koutovými svary přivařeny ocelové vzpěry (obr. 16 a 17b). Poloha vzpěr byla zajištěna montážním zavětrováním.

Následně se oblouk a vzpěry vybetonovaly (obr. 17c). Beton byl vytlačován od patek směrem k jeho vrcholu, kde na oblouk navazovaly tři trubky. Střední nízká trubka měla uzavírací ventil, který se uzavřel po vytlačení povrchového betonu. Betonáž pokračovala do doby vyplnění tří metrů vysokých krajních trubek. Hydrostatický tlak v těchto trubkách tak zajistil dostatečné ztuhnutí betonu (obr. 20).

Po vybetonování oblouku se smontovala skruž, osadila se betonářská a předpínací výztuž a mostovka se spolu s koncovými příčnicí najeďnou vybetonovala (obr. 17d a 21). Také návrhu betonové směsi i postupu betonáže mostovky se věnovala mimořádná pozornost. Vlastní nepřetržitá betonáž byla provedena pod nezávislou kontrolou Doc. Ing. Ivailo Terzijského, CSc. a Ing. Rudolfa Helly, CSc. z VUT-FAST, kteří kontrolovali směs každého mixu a nepřipustili použití směsi, která by neodpovídala projektu.

Pro omezení tahových napětí od smrštění betonu se po dosažení 40% krychelné pevnosti betonu mostovka částečně předepnula. Po dosažení 80% pevnosti se mostovka postupně předepnula na projektované napětí. Předpínání probíhalo současně s rozpíráním oblouku a odskrůžováním mostovky (obr. 17e). Rozepření oblouku bylo provedeno ještě jednou po odeznění pružných deformací základové půdy. Potom se



Obr. 12 – Předpínací a betonářská výztuž v mostovce: a) schematický podélný řez, b) podélný řez, c) půdorys, d) příčný řez D, e) příčný řez C, f) příčný řez B, g) příčný řez A / Prestressing and reinforcing steel in the deck: a) schematic elevation, b) longitudinal section, c) plan, d) section D, e) section C, f) section B, g) section A

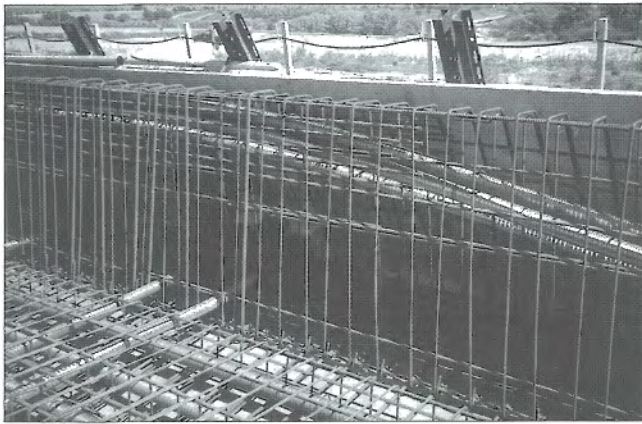
spárá mezi obloukem a základem vyplnila plastbetonem a obetonovala se základová patka ocelové konstrukce.

Následovaly dokončovací práce, dokončení zářezu pod mostem a zatěžovací zkouška (obr. 17f).

Statická a dynamická analýza

Konstrukce mostu tvoří uzavřený statický systém, u kterého se všechny prvky podílí na přenosu vnějšího zatížení (obr. 22). Iterace konstrukce mostu s podložím byla vystižena podepřením základu Winklerovým podložím dostatečně přesně modelujícím nesoudržnou základovou půdu.

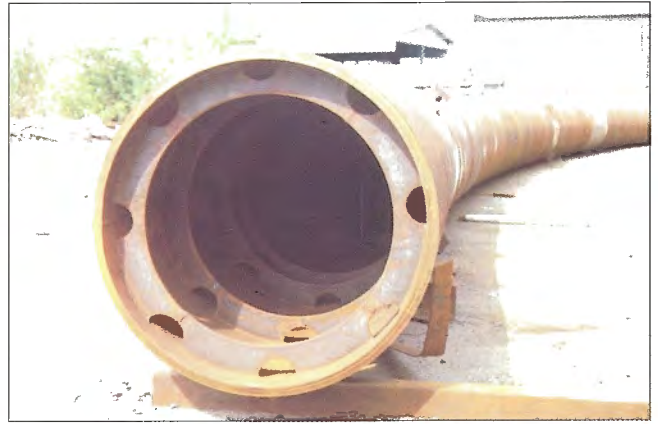
V návrhu se předpokládalo plné spolupůsobení ocelového oblouku s betonovou výplní. Tento předpoklad vyplývá ze skutečnosti, že beton oblouku je od provozního zatížení namáhán



Obr. 13 – Předpínací a betonářská výztuž v trámu nad první vzpěrou / Prestressing and reinforcing steel in the edge girder above the first strut

jen napětím, které je menší než dovolené namáhání betonu v tahu. Zatížení z nosné konstrukce je přenášeno do oblouku prostřednictvím vzpěr, které přímo navazují na vnitřní prstenčové výztuhy. Protože beton se musí deformovat stejně jako ocelová roura, přenáší se zatížení nejen do oceli, ale také do betonu. Kroucení je přenášeno z oceli do betonu v místě vzpěr prostřednictvím vodorovných výztuh situovaných v místě vzpěr v rouře.

Vzhledem ke skutečnosti, že beton v rouře nemůže vysychat, téměř se nesmršťuje a také velmi málo dotvaruje. Tato skutečnost byla ověřena jak teoreticky, tak i na modelech měření poměrných přetvoření na realizovaných konstrukcích [5], [6]. Vliv dotvarování a smršťování betonu byl analyzován programovým systémem TDA vyvinutým Ing. Jaroslavem Navrátilem, CSc. a Ing. Stanislavem Suským [7]. Vlastní výpočet provedl Ing. Jaroslav Navrátil. Program je dostatečně ověřen nejen rozsáhlými parametrickými studiemi, ale i úspěšnými realizacemi u nás a ve Spojených státech [8], [9]. Při podrobné statické analýze byla konstrukce řešena pro funkce smršťování a dotvarování podle doporučení CEB-FIP z roku 1990. Časová analýza sleduje postupnou výstavbu konstrukce a udává nám deformace i vnitřní síly ve všech sledovaných časových uzlech. Vlivem dotvarování a smršťování betonu dochází k přerozdělení vnitřních sil mezi betonem a ocelí oblouku. Upozorňujeme, že toto přerozdělení nevyvolává



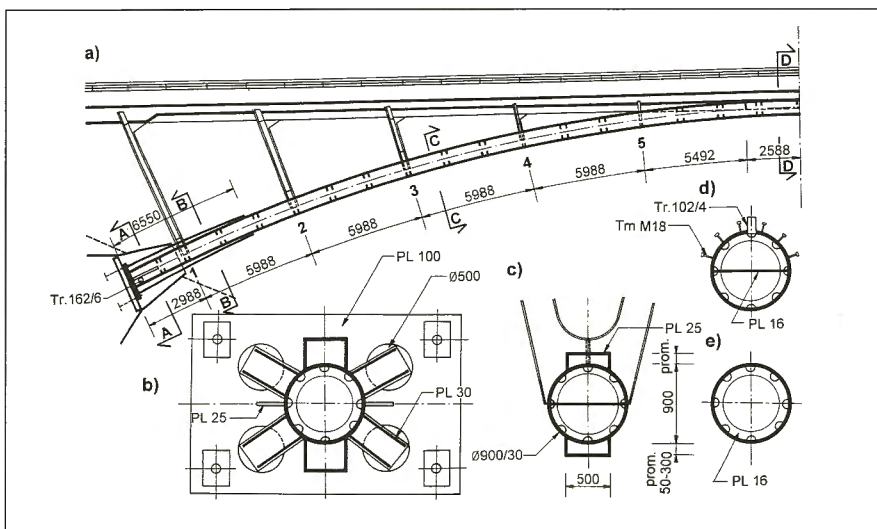
Obr. 15 – Ocelový oblouk / Steel arch

smykové napětí mezi ocelí a betonem a realizuje se v místě podepření oblouku.

Mostovka, vzpěry i oblouk byly modelovány rovnoběžnými prvky vystihujícími působení betonu, konstrukční oceli a betonářské výztuhy (obr. 23). Předpínací výztuž byla modelována lomenými prvky nahrazující její spojitý průběh. Tyto prvky nejsou při předpínání součástí matice konstrukce, po jejím předepnutí jsou do matice tuhosti konstrukce přičteny. Časově závislou analýzou konstrukce byly získány v každém časovém uzlu vnitřní síly ve všech prvcích.

Vliv přerozdělení vnitřních sil lze vyjádřit změnou pracovního součinitele n – tedy změnou poměru modulů pružnosti oceli a betonu. Pro zatížení stálé má pracovní součinitel velikost $n = 5,45$ v čase t_0 a $n = 8,20$ v čase t_{∞} . Hodnota pracovního součinitele pro krátkodobé účinky – nahodilé zatížení a změny teploty – je $n = 5,45$. Pro porovnání uvádíme, že u klasických betonových konstrukcí, které volně vysychají, se pracovní součinitel uvažuje hodnotou $n = 15$. Výsledky analýzy odpovídají výsledkům dlouhodobých měření poměrných přetvoření betonu pylonu č. 1 zavěšeného mostu přes Labe u Poděbrad, který provádí VÚIS Bratislava. Změna poměrných přetvoření v čase je zde velmi malá – řádově 10^{-6} .

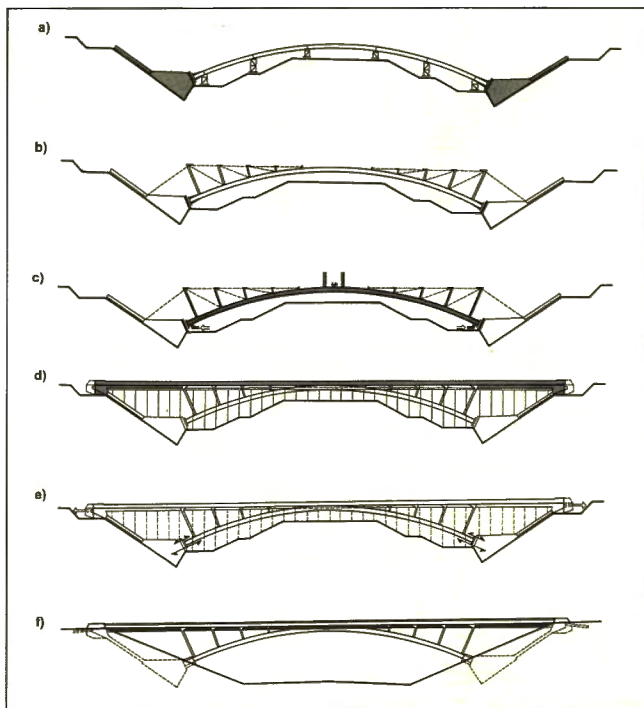
Pro předběžný návrh byla konstrukce řešena jako rovinný rám programem DEFOR, jako roštová konstrukce programem STARCON a jako deskostěnová konstrukce programem



Obr. 14 – Ocelový oblouk: a) podélný řez, b) řez A-A, c) řez B-B, d) řez C-C, e) řez D-D / Steel arch: a) longitudinal section, b) section A-A, c) section B-B, d) section C-C, e) section D-D



Obr. 16 – Oblouk a vzpěry / Arch and struts



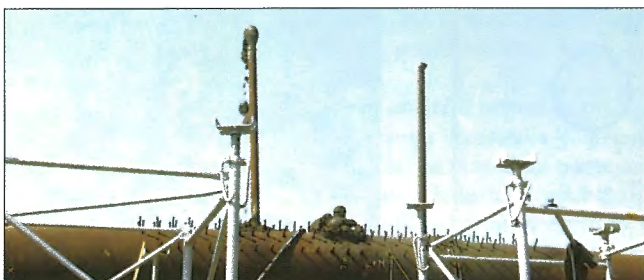
Obr. 17 – Postup výstavby / Construction sequences



Obr. 18 – Pata oblouku / Arch spring



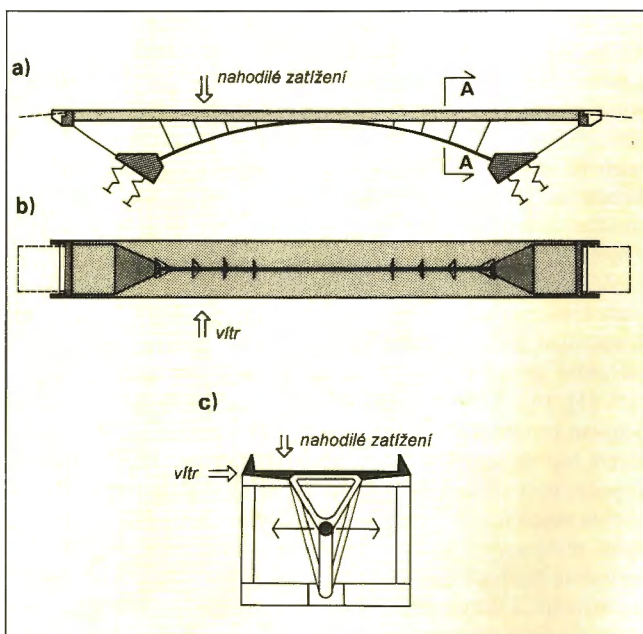
Obr. 19 – Montáž obloukového segmentu / Erection of an arch segment



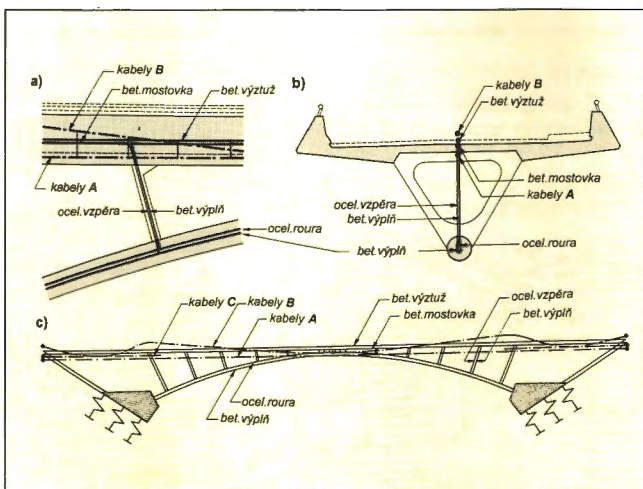
Obr. 20 – Betonáž oblouku / Casting of the arch



Obr. 21 – Betonáž mostovky / Casting of the deck



Obr. 22 – Statická funkce: a) podélný řez, b) půdorys, c) příčný řez / Static function : a) elevation, b) plan, c) cross section



Obr. 23 – Výpočtový model pro časově závislou analýzu konstrukce programem TDA: a) podélný řez, b) podélný řez části konstrukce, c) příčný řez / Calculation model for the time-dependent analysis of the structure by TDA program: a) elevation, b) partial elevation, c) cross section

ANSYS. Analýza potvrdila, že pro návrh konstrukce lze použít rámové řešení. Proto byla konstrukce podle povahy zatížení analyzována jako rovinný (2D), popřípadě prostorový (3D) rám. Rámové řešení konstrukce bylo znovu ověřeno na prostorové konstrukci sestavené z prostorových a deskostěnových prvků programem ANSYS.

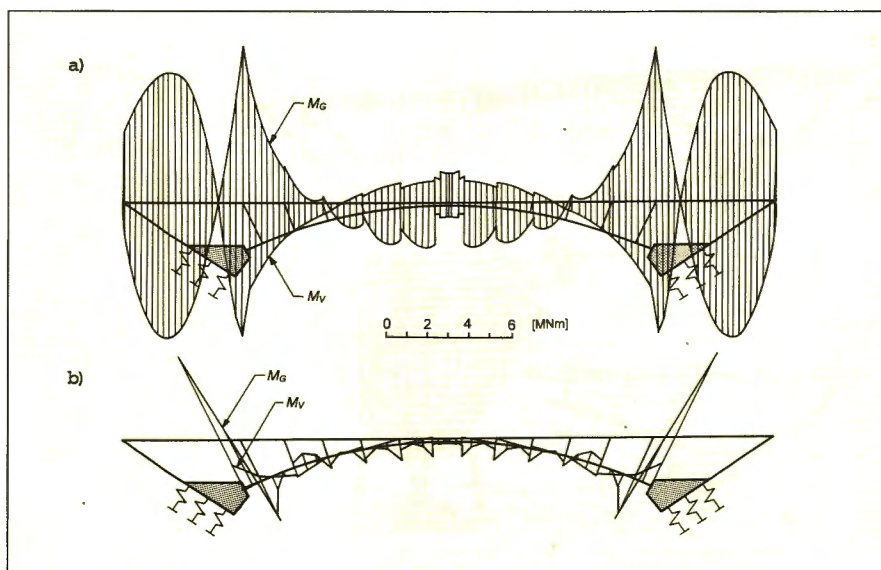
Pro účinky, které vyvozují maximální ohybové účinky ve vswislém směru mostu, to je pro zatížení stálé, vliv předpětí, nahodilé zatížení a teplotní změny, byla konstrukce řešena jako rovinný rám podepřený Winklerovým podložím. Účinky od nahodilého zatížení byly určeny vyhodnocením příčinkových čar statických veličin. Výsledky řešení sloužily především pro posouzení normálových napětí a pro určení mezní únosnosti průřezů nosné konstrukce.

Z obr. 24, kde jsou uvedeny ohybové momenty v mostovce a oblouku od zatížení stálého a od předpětí je zřejmé, že předpětí poměrně dobře vyrovnává (balance) účinky zatížení stálého. Jenom u patky, kde je oblouk zatížen velkou silou z krajního pole, se nepodařilo eliminovat ohybový moment. Proto byl v této části navržen krátký náběh a byla zvýšena rektifikační (rozpínací) síla. Ohybové momenty od síly $R = 1000$ kN jsou uvedeny na obr. 25. Obr. 26 uvádí obálku ohybových momentů od nahodilého zatížení.

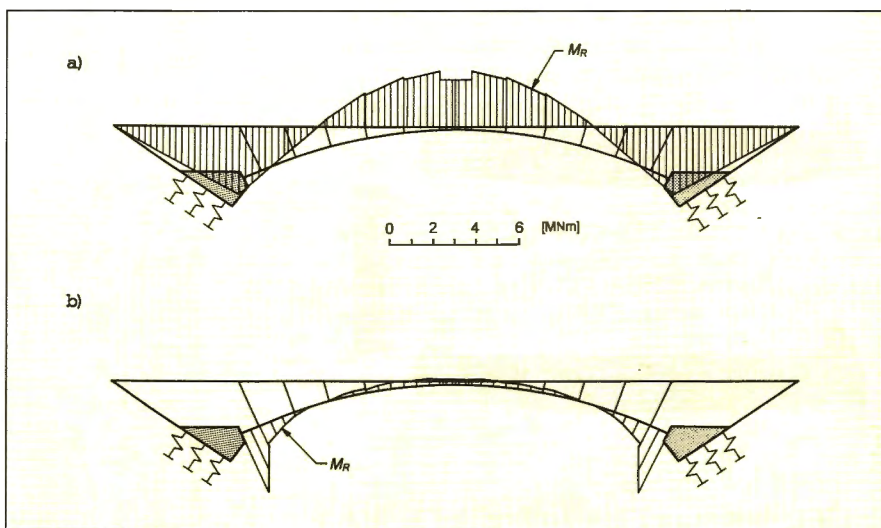
Pro účinky, které vyvozují kroucení, popřípadě maximální ohyb ve vodorovném směru mostu, to je pro nahodilé zatížení situované na polovině mostu a pro účinky větru, byla konstrukce řešena jako prostorový rám. Výsledky řešení sloužily především pro posouzení hlavních napětí v prvcích konstrukce mostu.

Prostorové působení konstrukce a výpočet vlastních tvarů byl proveden programovým systémem ANSYS (obr. 27). Programový systém, který je založen na metodě konečných prvků, umožňuje vystihnout prostorové působení konstrukce, kombinovat různé typy prvků a vystihnout skutečné okrajové podmínky. Betonová mostovka a základy byly modelovány prostorovými prvky, deskostěnové prvky modelovaly ocelové vzpěry, trubkové prvky modelovaly ocelový oblouk a betonovou výplň a prutové prvky modelovaly koncové betonové vzpěry a Winklerovo podloží. Analýza programem ANSYS byla provedena Ing. Petrem Hradilem pod vedením Doc. Ing. Jaroslava Žáka, CSc. v rámci řešení Grantového projektu GAČR 103/96/1635.

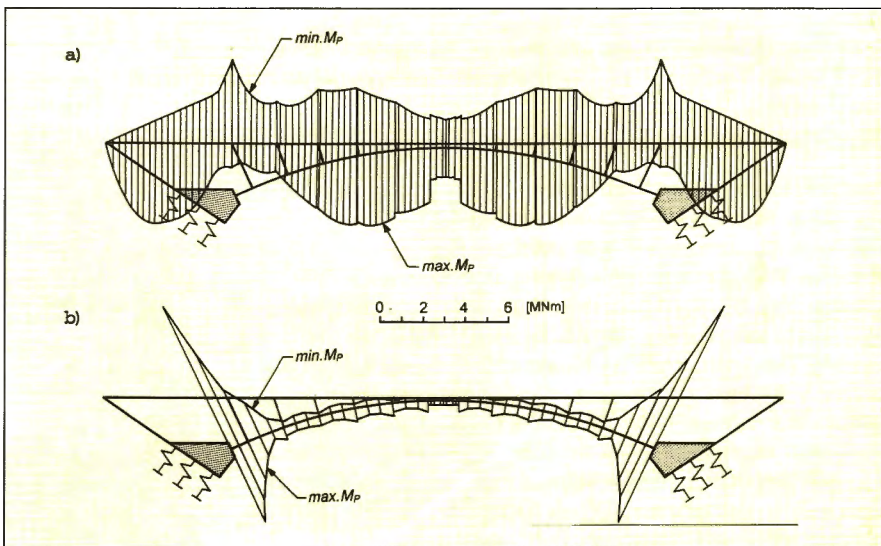
Pro ilustraci uvádíme některé výsledky řešení. Obr. 28 ukazuje průběh napětí



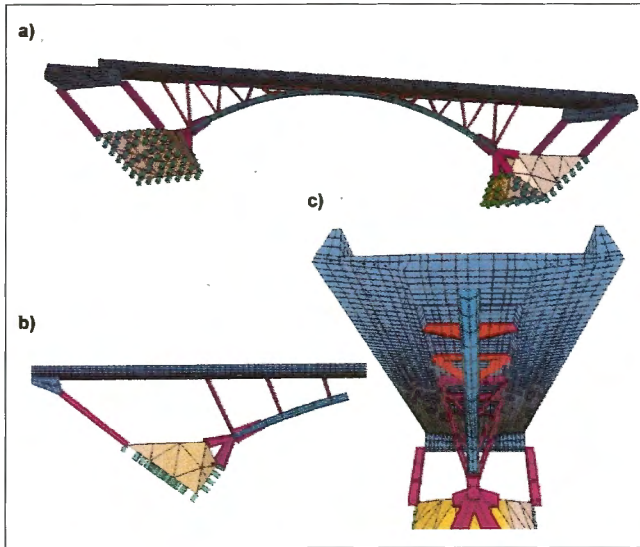
Obr. 24 – Ohybové momenty od zatížení stálého (G) a od předpětí (V): a) mostovka, b) oblouk / Bending moments due to the dead load (G) and post-tensioning (V): a) deck, b) arch



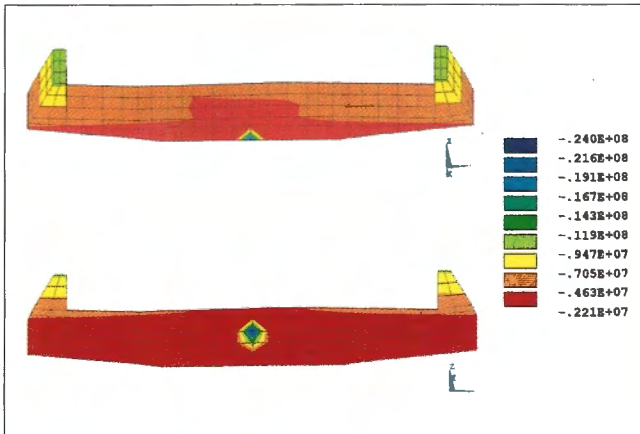
Obr. 25 – Ohybové momenty od rozeptření: a) mostovka, b) oblouk / Bending moments due to the jacking: a) deck, b) arch



Obr. 26 – Obálka ohybových momentů od zatížení nahodilého (P): a) mostovka, b) oblouk / Bending moment envelopes due to the live load (P): a) deck, b) arch



Obr. 27 – Analýza programovým systémem ANSYS – výpočtový model: a) šikmý pohled, b) podélný řez části konstrukce, c) příčný řez / *ANSYS analysis – calculation model: a) skew elevation, b) partial elevation, c) cross section*



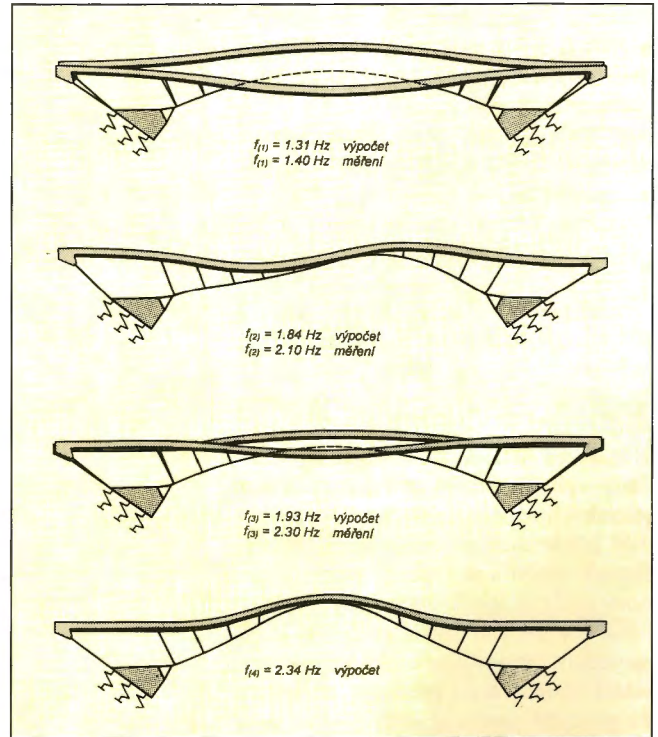
Obr. 28 – Analýza programovým systémem ANSYS: podélná normálová napětí uprostřed rozpětí od zatížení stálého / *ANSYS analysis – longitudinal normal stresses at mid-span due to the dead load*

v průřezu uprostřed rozpětí, kde prutové řešení dává nesprávné výsledky. Vlastní tvary a frekvence jsou uvedeny na obr. 29.

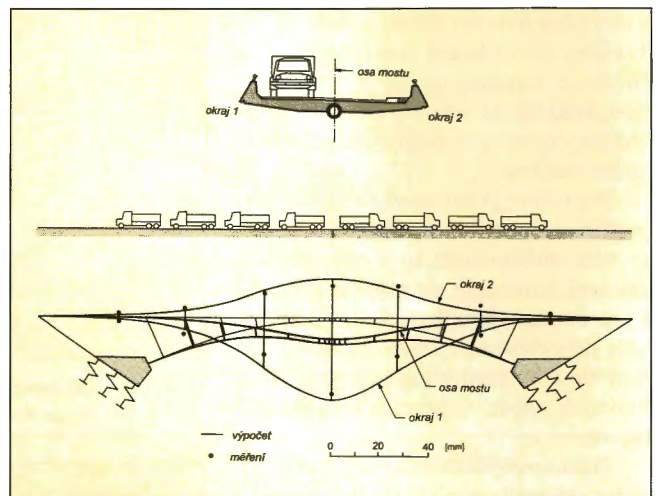
Statické a dynamické zkoušky

Předpoklady výpočtu a kvalita stavby byly ověřeny podrobnými statickými a dynamickými zkouškami. Konstrukce byla ve dvou zatěžovacích stavech zatížena osmi vozidly situovanými tak, aby v konstrukci vyvodily maximální ohyb a kroucení. Účinnost zatížení byla 69 %. V prvním zatěžovacím stavu, kdy vozidla byla situována ve dvou pruzích na jedné polovině mostu, byl vyvozen maximální ohybový moment jak v oblouku, tak i v mostovce. V druhém zatěžovacím stavu, ve kterém byla vozidla situována v jednom pruhu u svodidla po celé délce mostu, bylo vyvozeno maximální kroucení (obr. 30). Shoda naměřených a vypočítaných hodnot byla velmi dobrá. Naměřené deformace sledovaly vypočtený tvar, jejich hodnota byla menší než vypočtená, přičemž rozdíly byly vždy menší než 10 %.

Při dynamické zkoušce byly ověřeny první tři vlastní tvary a frekvence, změřen logaritmický dekrement útlumu a určen



Obr. 29 – Analýza programovým systémem ANSYS: vlastní tvary a frekvence / *ANSYS analysis - natural frequencies*



Obr. 30 – Zatěžovací zkouška pro maximální kroučící zatížení / *Load-ing test for maximum torsion*



Obr. 31 – Dokončená konstrukce / *Completed structure*

dynamický součinitel. Rozdíly ve vypočtených a změřených vlastních frekvencích byly menší než připouští norma. Logaritmičtý dekrement útlumu se pohybuje v rozmezí 0,113 až 0,163. Dynamický součinitel pro hladké jízdy se pohybuje v rozsahu 1,01 až 1,13, pro jízdy přes překážky v rozsahu 1,115 až 2,118. Přímě pojížděná místa vyhoví i požadavku pro drážní vozidla. Kritická rychlost je 10 až 12 km/hod. I v oblasti dynamiky konstrukce vyhovuje požadavkům norem.

Závěr

Při návrhu i realizaci mostu se všichni zúčastnění snažili navrhnout úspornou a estetickou konstrukci využívající nejnovějších poznatků z teorie navrhování i technologie výroby (obr. 31). Obloukový most s rozpětím 67,50 m byl postaven za stejnou cenu jako tradiční nadjezdy s rozpětími 20 m. Dodavatel postavil tuto mimořádnou konstrukci za 21 milionů Kč, tedy za 21 tisíc Kč/m². Realizace mostu prokazuje, že estetická konstrukce může být také velmi ekonomická.

Zúčastnění:

<i>Investor mostu:</i>	SIÚ Brno
<i>Koncepce řešení:</i>	Prof. Ing. Jiří Stráský, CSc., P.E.
<i>Projekt mostu:</i>	STRÁSKÝ, HUSTÝ A PARTNEŘI, Inženýrská kancelář, s. r. o.
<i>Projekt O.K.:</i>	Ferrcon, inženýrská kancelář
<i>Spolupráce:</i>	VUT-FAST Brno, Ústav betonových a zděných konstrukcí
<i>Kontrola projektu:</i>	Prof. Ing. Miroslav Horák, CSc. a Prof. Ing. Zdeněk Šmerda, CSc.
<i>Dodavatel mostu:</i>	Dosta, a. s. Brno
<i>Dodavatel O.K.:</i>	Hutní montáže Ostrava

Literatura:

- [1] Wirlogeux, M., Bouchon, E., Berthelley, J., Resplendino, J.: The Antrenas Tubular Arch Bridge, France. *IABSE Journal*, Volume 7, No 2, May 1997.
- [2] Priestley, M. J. N., Seible, F., Calvi, G. M.: Seismic Design and Retrofit of Bridges. John Wiley & Sons, Inc. New York 1996.
- [3] Nakai, H., Matsui, S., Yoda, T., Kurita, A.: Trends in Steel – Concrete Bridges in Japan. *Structural Engineering International, IABSE*, Volume 8, No 1, February 1998.
- [4] Hela, R., Bodnárová, L.: Technologie betonáže mostu D 205 Silnice R/52. Betonářské dny. Pardubice 1996.
- [5] Strasky, J.: Design and Construction of Cable-Stayed Bridges in the Czech Republic. *PCI JOURNAL*, November-December 1993.
- [6] Franc, J., Strasky, J., Zak, J.: Die Stahlpylone der Schrageilbrücke über die Elbe bei Podebrady. *Stahlbau* 4 / 1990, BRD.
- [7] Strasky, J., Navratil, J., Susky, S.: Time dependent analysis of progressively erected structures. ECCE Symposium Computers in the practice of building and civil engineering. Lahti, Finland, September 1997.
- [8] Wanders, S. P., Maday, M. A., Redfield, C., Strasky, J.: Wisconsin Avenue Viaduct - Design-Construction Highlights. *PCI JOURNAL*, September-October 1994.
- [9] Stráský, J., Navrátil, J.: Nový viadukt v Milwaukee, USA. *Beton a zdivo*. 1995/2.

*Prof. Ing. Jiří Stráský, CSc., P. E., Vysoké učení technické, stavební fakulta, Údolní 53, 602 42 Brno, STRÁSKÝ, HUSTÝ A PARTNEŘI, Inženýrská kancelář, s. r. o., Bohunická 50, P. B.641, 639 41 Brno
Ing. Ilja Hustý, STRÁSKÝ, HUSTÝ A PARTNEŘI, Inženýrská kancelář, s. r. o., Bohunická 50, P. B.641, 639 41 Brno*

O dobrých vlastnostech vyztuženého betonu (2)

Praha 1909 – Z důvodů jednodlotosti a tuhosti staveb z vyztuženého betonu, jakož i pro svou pružnost, doporučují se stavby z armovaného betonu pro kraje stíhané častými zemětřeseními, kteréžto katastrofy oddělují jako spravedlivý soudce dobré od zlých, dobré stavby zachovávající a špatné ničící. A bylo skutečně za veliké nedávné katastrofy v San Francisku (r. 1906) pozorováno, že stavby tohoto způsobu nedoznaly vážnější úhony, ač okolní budovy z jiného materiálu byly zničeny (obr. 1). Aby stavba v podobných okolnostech tvořila skutečný celek, doporučuje se založiti ji na souvislé základní desce... (Z knihy *Vyztužený beton – jeho upotřebení a výpočty* hlavně k účelům pozemního stavitelství, napsali F. Klokner a J. Fidler, vydali vlastními náklady v Praze 1909).

Petr Hájek



Obr. 1 – Vnitřek železobetonové budovy Akademie věd v San Francisku krátce po zemětřesení a požáru v roce 1906 / Interior of RC building of Academy of Science in San Francisco after earthquake and fire in 1906