

BRAZILSKÉ ZKUŠENOSTI SE ZESÍLENÍM ŽELEZOBETONOVÉHO OBLOUKOVÉHO MOSTU PŘES ŘEKU PARAGUAÇU BRAZILIAN EXPERIENCE OF STRENGTHENING OF A REINFORCED CONCRETE ARCH BRIDGE OVER THE RIVER PARAGUAÇU

**PROTASIO FERREIRA CASTRO, SÉRGIO M. FERREIRA
ALMEIDA, JAIRO ROBERTO CAMPOS SANTOS**

Článek se věnuje několika významným hlediskům návrhu zesílení mostu „2. července“ a s ním spojených stavebních postupů. Most se nachází na řece Paraguaçu na silnici BR-116/BA ve státě Bahia (Brazílie). Návrh mostu vytvořil inženýr Félix E. H. Von Ranke. Vzhledem ke zvláštnosti konstrukčního řešení byl tento systém nazván po svém autorovi „nosník von Ranke“. Působení konstrukce mostu se stalo časem nedostatečné pro zajištění požadovaného provozu a v červnu 1999 došlo ke snížení jeho zatížitelnosti. Příspěvek popisuje zvláštnosti konstrukčního systému mostu, jeho poškození a koncepci návrhu zesílení. Závěrem jsou popsány nejdůležitější detaily návrhu zesílení.

This paper shows few, but significant, aspects of "2 de Julho Bridge" strengthening design and construction procedures. The bridge is located on the river Paraguaçu, BR-116 highway, in the State of Bahia (Brazil). Engineer Félix E. H. Von Ranke designed the bridge. The particularity of the structural system was named for him as „Von Ranke beam“. However, the "2 de Julho Bridge" structural performance became too deficient to provide adequate service over time and by June of 1999 load-carrying capacity was limited. The singularities of the "2 de Julho Bridge" structural system, the event of damages and the design conception are described. Finally, the most important details of the strengthening design are shown.

Most „2. července*)“ na silnici BR-116/BA ve státě Bahia jižně od města Feira de Santana byl na popud Brazilské federální silniční správy (DNER) podroben v květnu 1999 stavebnímu průzkumu. Prvky nosné konstrukce vykazovaly poškození a nedostatečné konstrukční působení, a to především ve druhém poli ve

směru od města Feira de Santana. Pole je označeno jako P1-P2.

Cílem stavebního průzkumu mostu bylo zhodnotit stav konstrukce a také bezpečnostní riziko s ohledem na současnou zatížitelnost mostu. Uvedený požadavek byl stanoven v důsledku obav o bezpečnost konstrukce, poškození a na stáří mostní konstrukce. Sanační práce měly být prováděny na základě pozorovaných anomálií. Z tohoto důvodu měl stavební průzkum mostu poskytnout informace k návrhům:

- časového harmonogramu činností
- opravy vrstev
- nahrazení ochranného systému
- nahrazení stavebních prvků
- zvýšení zatížitelnosti mostu
- zvýšení celkových užitečných vlastností mostu.

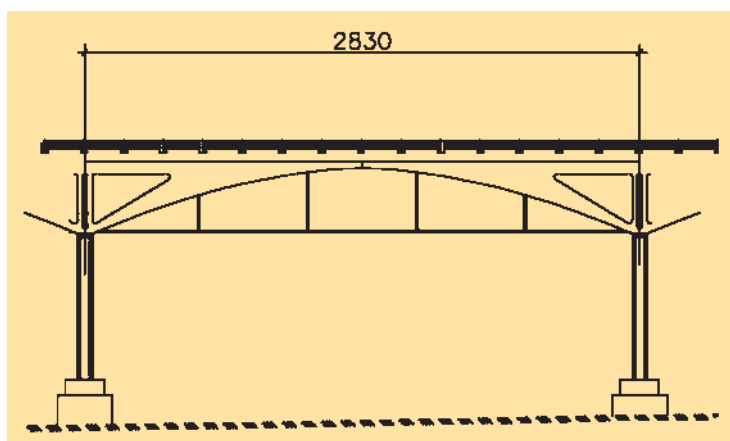
Most navrhl v roce 1947 inženýr Felix E. H. Von Ranke. Stavba byla dokončena v roce 1948 společností B. Dutra e Cia Ltda. V 80. letech 20. století byla provedena sanace mostu firmou Jatocrete Ltda. Ve stejné době byl opravován podobný most na silnici BR-163 přes řeku Vermelho ve státě Mato Grosso, který navrhl stejný inženýr, a to z důvodu podobných závad konstrukce a nebezpečí z nedostatečné zatížitelnosti. Most „2. července“ přes řeku Paraguaçu má v dnešní době průměrnou intenzitu provozu 7 000 vozidel denně, z nichž 70% tvoří těžká nákladní vozidla.

Běžné mosty odporují jednoduché definici jako člověkem vytvořené předměty. Právě ty nejdůmyslnější jsou tvořeny ručně na místě, ty nejvíce si podobné vykazují mezi sebou rozdíly a právě ty nejvíce zřejmě skrývají překvapení. Zkušenost může být velmi drahým učitelem, avšak nikdo naštěstí nemusí znovu projít všemi poznatky předchozích inženýrů a architektů. Člověk

Obr 1 Celkový pohled na most

Fig. 1 Overall view of the bridge





Obr. 2 Typický oblouk a příčný řez mostem
Fig. 2 Typical span and cross section of the bridge

byl schopen vyvinout širokou a působivou technologii právě pro svou schopnost přejímat zkušenosti – dobré i špatné – a stavět podle zaznamenaných zkušeností ostatních.

POPIS MOSTU

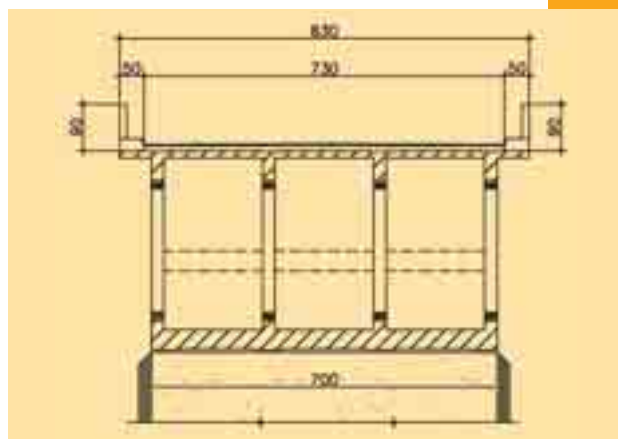
Někteří lidé tvrdí, že krása je součástí oka pozorovatele, a je to pravdivé rčení. Zvláště, pokud se týká návrhu mostů, protože celá konstrukce musí být od počátku navrhována s ohledem na estetické hodnoty. Po dokončení projektu je už prakticky nemožné udělat z ošklivé konstrukce krásnou. Projekt Von Ranka vedl k vytvoření krásného mostu (obr. 1).

Most „2. července“ má celkovou délku 268 m, mostovku širokou 8,3 m a devět obloukových polí délky 28,3 m. Na obou koncích jsou navrženy opěry. Obr. 2 ukazuje jedno pole a typický příčný řez uplatněný ve všech polích. Most byl navržen na staré brazilské zatížení, a to třídu 24 t. To znamená normové zatěžovací silniční vozidlo se soustředěným zatížením 4 t v šesti bodech a dvěma rovnoměrnými zatíženími, z nichž jedno, 4 000 Pa, působí před a za vozidlem a druhé, 3 000 Pa, je přičně rozložené podél vozidla.

Každé pole mostu je tvořeno trojklobovým obloukem s táhlem. Čtyři podélná žebra na spodní straně desky mostovky jsou ve vrcholu oblouku propojena se čtyřmi výztužnými žebry na horní ploše oblouku. Nad podporou je mostovka spojena s patou oblouku svislým prvkem. Z podporového styčnicku vycházejí tři betonové prvky: svislé spojení s mostovkou, vlastní oblouk a vodorovné táhlo. Vodorovné betonové táhlo je v oblouku zavěšeno pomocí čtyř rovnoměrně rozmístěných betonových závěsů.

Oblouková nosná konstrukce spočívá na poměrně štíhlých sloupech, ale tuhost sloupů vyhovovala návrhovým příručkám a normám. Konstrukční systém byl navržen tak, aby do sloupů byla přenášena pouze svislá osová zatížení. Vodorovná reakce v podporovém styčnicku oblouku byla vyvážena vodorovným táhlem a do vrcholu sloupů se žádný vodorovný účinek zatížení nepřenesl. Jako ložisková podložka pro styčníky v patě oblouku byla použita olověná deska. Vodorovná zatížení byla přenášena do obou opěr, které byly na tyto účinky navrženy.

Účelem betonových prvků působících jako táhlo bylo také přenést účinky pohyblivého zatížení v případě, kdy je pole mostovky pod maximálním provozním zatížením a žádné užité zatíže-



ní na obě sousední pole nepůsobí. Tažené betonové prvky měly velký význam v době výstavby mostu, dokud postranní pole nebyla ještě dokončena a upevněna jako tříklobový styčník.

Mostní sloupy přenášejí svislé zatížení přímo do základových prvků, tj. do krátkých pilot opírajících se o skalní podloží.

PRŮZKUM POŠKOZENÍ MOSTU

V obloukových prvcích tvořících nosnou konstrukci byly zjištěny vážné konstrukční závady, které se nacházely především ve druhém poli ve směru od Feira de Santana. Závažné poškození betonu bylo nalezeno zejména na konstrukci obloukového nosníku poblíž podpěrné sekce na sloupu P2.

V důsledku porušení betonových prvků došlo k průhybu mostovky. Mezi druhým a třetím polem mostu byl zaznamenán v úrovni nosné konstrukce rozdíl 70 mm. Po vzniku poruchy vrchol sloupu nesl obloukovou konstrukci, aniž by docházelo k účinnému přenosu osových zatížení. S rozvojem poškození konstrukce a s tím souvisejících změn docházelo za současného nárůstu pohyblivého zatížení ke zvyšování nárazového zatížení a vibrací, což dále vedlo ke zhoršování stavu betonu a konstrukce, a nakonec mohlo dojít až ke zhroutilí příslušné části mostu.

Paty oblouku, jehož táhlo nepřeneslo vodorovné tahové síly se vzepřely o sousední pole. Působící vodorovné síly byly tak veliké, že lokálně došlo v kontaktní oblasti k drcení betonu a také k zásadnímu narušení návrhové koncepce dalšího pole a celého mostu.

Následkem popsanych poškození hrozilo při nerovnováze vodorovných sil vážné nebezpečí zřícení konstrukce. Boční účinek, tj. vodorovná síla na vrcholu sloupu P2, která byla stanovena na 90 t, by stačila ke stržení přinejmenším dvou polí mostu.

Mostní konstrukce ve skutečnosti přenesla rozdělené účinky do několika konstrukčních prvků. Nicméně sledované odchylky chování konstrukce upozornily na její nedostatečnou rovnováhu. Porušení v oblasti podporového styčnicku na vrcholu sloupu způsobila zvýšení účinků od tření, kterými byla udržována slabá (nejistá) rovnováha vodorovného zatížení v tříklobovém styčnicku. Síly byly přenášeny do sousedních obloukových polí P1-P2.

Vynucená rovnováha vznikla v důsledku účinků přenášených do sousedních oblouků, způsobila několik vážných poškození i na konstrukčních prvcích přilehlých polí. Porušení betonu v oblasti podporového obloukového styčnicku bylo natolik rozsáhlé, že došlo k uvolnění a vyklouznutí kotevní desky vodorov-



Obr. 3 Pohled na porušený tříkloubový obloukový styčník

Fig. 3 Aspects of the tri-hinge arch knot

ného táhla. Vyztužené betonové táhlo zůstalo spojeno s kotevní deskou přes deset ocelových prutů průměru 25 mm. Porušením betonu (materiálu) ve styčníku přestal betonový prvek plnit svou konstrukční funkci. Tažený betonový prvek byl deformován svou vlastní tíhou, která vytrhla závěsné prvky z klenby (obr. 3 a 4). Trhliny a degradace betonu vedly k dalšímu snižování únosnosti konstrukce.

Zjištěné vady lze shrnout do následujících bodů:

- U čtyř polí z devíti se ukázala podobná poškození vodorovných betonových táhel (tj. uvolnění táhla v důsledku poškozené kotevní desky). Dvě ze čtyř polí mají závěsné prvky stržené.
- Při prohlídce ostatních pěti polí byla zjištěna degradace betonu konstrukčních prvků v blízkosti podpěr následkem zatékání vody z mostního závěru. Tříkloubový obloukový styčník, vodo-

rovne tažené betonové prvky a vrchol sloupu vykazují známky degradace betonu.

- V několika oblastech nosné mostní konstrukce byla pozorována koroze výztužných prutů.
- Na vnějším povrchu obloukové desky bylo možno zjistit zatékání vody.
- Asfaltová vrstva vozovky vykazovala vážná poškození v pokročilém stadiu, např. vážné příčné nerovnosti, vrypy a výmoly, způsobující nárazové zatížení mostní konstrukce při průjezdu nákladního automobilu.

POSTUP SANAČNÍCH PRACÍ

Průzkum na místě prokázal, že vážné poškození konstrukce polí P1-P2 by vedlo ke zřícení celého mostu. Scénář porušení ukázal na nezbytnost oprav a zesílení mostu, což bylo žádoucí pro prodloužení životnosti mostu. Jelikož obsáhlejší řešení nebylo možné (např. nahrazení celého mostu), měly být opravy nebo zesílení cenově nejefektivnějším řešením.

První fáze sanace

Jako první byl upraven provoz na mostě nejvyšší dovolenou rychlostí 20 km/h a minimální povolenou vzdáleností mezi dvěma vozidly 20 m. K prosazení těchto podmínek byla vybudována z obou stran řada příčných prahů (retarderů). Také byla instalována dopravní světla k řízení jednosměrného provozu.

Po dopravně-provozních úpravách následovalo budování dočasných konstrukčních prvků. Na vrchol sloupu P2 bylo osazeno ložisko, o které byly opřeny konce oblouku. Betonový

Obr. 4 Pohled na deformované betonové táhlo a utržené závěsy

Fig. 4 Aspect of bent tie concrete and pulled down hung elements



prvek podporového styčnicku byl dočasně zesílen pomocí injekce a bylo zajištěno jeho připevnění k vybudovanému ložisku. Veškeré trhliny byly vyplněny epoxidovou pryskyřicí a poté byly ocelové a neoprenové polštáře spojeny hmoždinkami s obloukovým styčnickem.

Dále byly provedeny následující úpravy:

- Omezení obloukového kloubu umístěného ve středu pole P1-P2. Výztužná injektáž betonových nosníků o délce 11 m uložených v oblasti středu pole P1-P2, což změnilo původní systém oblouků na spojitý oblouk. Poté byla dilatační spára rovněž vyplněna epoxidem.
- Místo kotevnic betonových prvků byl instalován ocelový tažený prvek (čtyři pruty Dywidag o průměru 32 mm) ke každé klenbě druhého pole (P1-P2). Betonové tažené prvky pak byly strženy.

Druhá fáze sanace

Byly provedeny tyto činnosti:

- Na mostě byly zachovány požadované provozní požadavky (omezená rychlost, stanovená vzdálenost mezi dvěma vozidly a jednosměrná doprava řízená pomocí dopravních světel).
- Zpevnění trojkloubového oblouku, které však bylo provedeno již během počáteční fáze.
- Změna původního obloukového konstrukčního systému na spojitý oblouk (vybetonováním monolitického betonového nosníku a vyplněním dilatační spáry epoxidem).
- Ložisko ze železobetonu pro nahrazení kotevního betonového prvku taženým ocelovým (Dywidag) prvkem.
- Zvedání veškerých podporových obloukových styčnicků s využitím jejich spojení s obloukovou deskou.
- Zvedání spodní části svislého prvku podporového obloukového styčnicku.
- Vyrovnání pole P1-P2 pomocí hydraulického zvedáku vzepřeného proti nosnému prvku vybetonovanému ve vrcholu sloupu P2 (vyrovnávání bylo prováděno až po konstrukčním zesílení pole P1-P2).

Třetí fáze sanace

Již bylo řečeno, že zatímco krása zůstává na povrchu, ošklivost zasahuje až do morku kostí. Zdá se, že toto rčení platí i o navrhování mostů.

Před konstrukčním návrhem bylo možno načrtnout pouze obecné estetické zásady. Posléze se estetická rozhodnutí uplatnila v souvislosti s návrhem na zesílení, kdy byla vyvažována požadavky na bezpečnost, funkčnost a ekonomičnost. Byla provedena následující estetická opatření:

- Zábradlí a chodník pro pěší byly strženy.
- Existující mostní svodidlo bylo změněno na svodidlo typu New Jersey.
- Drážka na odvádění vody byla navržena se zábranou typu New Jersey.

Nakonec byla vytvořena asfaltová vrstva vozovky v kvalitě, která vyhoví očekávaným požadavkům a stupni bezpečnosti mostu.

NÁVRHOVÝ MODEL PRO OPRAVY A ZESÍLENÍ

K počítačové analýze mostu „2. července“ metodou konečných prvků (MKP) byl vytvořen rámový konstrukční návrhový model se šedesáti uzly a osmdesáti pruty. Pro uskutečnění economic-

Literatura:

- [1] Pontis Consultoria e Projetos Ltda – “Relatório do Projeto e Superviço de Recuperação e Reforço da Ponte sobre o Rio Paraguaçu”, Rio de Janeiro, 1999

kého, finančně efektivního návrhu zesílení byla v přípravě statického výpočtu uvažována únosnost třídy 36 t. To představuje standardní silniční zatěžovací vozidla se třemi nápravami, každou se soustředěným zatížením 2 x 6 t a také dvě rovnoměrná zatížení, jedno – 4 000 Pa – před a za vozidlem a druhé – 3 000 Pa – bočně rozdělené podél vozidla. Současné brazilské mostní normy už toto silniční zatížení neuvážují.

Tento MKP model s různými mezními okrajovými podmínkami byl použit k analýze původní mostní konstrukce po zesílení, přičemž původní trojkloubový oblouk byl nyní uvažován jako dvoukloubový (prostřední kloub byl omezen). Porovnání výsledků analýzy ukázalo, že oblouky získaly konstrukční účinnost, jak pro vnější, tak pro vnitřní účinky. Kromě toho se zvýšila jejich tuhost. Ohybové momenty působící v oblasti s omezenými klouby byly převzaty výztužnými pruty. Vodorovné síly na obloukovém styčnicku spočívajícím na sloupech byly omezeny. Navržená zesilující konstrukce zvýšila tuhost soustavy. Snížení užitého zatížení přispělo k dalšímu snížení vibrací.

Na závěr analýzy MKP je možné říci, že výhodou původního konstrukčního systému mostu byl jeho snadný výpočet vzhledem k jednoduchému konstrukčnímu systému jednotlivých polí. Pro dobu, kdy byl most navržen, byla právě snadnost výpočtu konstrukčního systému výhodou podstatnou.

ZÁVĚREČNÉ POZNÁMKY

Původní konstrukční systém mostu „2. července“ představoval ve své době velmi promyšlenou návrhovou koncepci. Nicméně, jak prokázal počítačový program využívající MKP, stabilita trojkloubového oblouku byla založena na mostovce a vodorovném betonovém táhle. Vážné poškození rozhodujících konstrukčních prvků je možné připisovat nedostatečné údržbě, stejně jako nárůstu nápravového zatížení nákladních vozidel a zvýšení intenzity provozu. Za těchto obtížných podmínek se most „2. července“ a jeho padesát let provozu stává výzvou pro současné navrhovatele konstrukcí a systémů řízení.

Autoři děkují Stephánii Kingové za připomínky a podporu a CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) – Národnímu výboru pro výzkum, za podporu výzkumu.

Prof. Protasio Ferreira Castro, PhD

e-mail: pcastro@iis.com.br

Sérgio M. Ferreira Almeida, MSc.

oba: Universidade Federal Fluminense

Rio de Janeiro, Brazílie

e-mail: sergio-m@uol.com.br

Jairo Roberto Campos Santos

PONTIS Consultoria e Projeto Ltda

e-mail: pontis@centroin.com.br

**) Brazílie se stala nezávislou 7. září 1822. Avšak ve státě Bahía, kde most stojí, se portugalské jednotky držely až do 2. července následujícího roku, takže Bahía slaví nezávislost tento den.*