

OD UDRŽITELNOSTI KONSTRUKCE KE KONSTRUKČNÍ ELEGANCI ■ STRUCTURAL SUSTAINABILITY LEADING TO STRUCTURAL ELEGANCE

Akio Kasuga

Elegance mostních konstrukcí je stejně jako římská architektura založena na kombinaci tří základních vlastností – stability, funkčnosti a krásy. Kromě toho poslední technologické inovace přispěly svou vynalézavostí a kreativitou nejen k eleganci konstrukcí, ale navíc i k jejich udržitelnosti. Konstrukce se stává udržitelnou, pokud spojuje konstrukční eleganci s kreativitou. Jaký je vztah mezi konstrukční elegancí a udržitelností? Tento článek se zamýšlí nad tím, jak realizovat elegantnější mosty. ■ As Roman architectures needed three elements, structural elegance of bridges is the combination of three elements – they must be solid, useful and beautiful. Besides, past innovations that added ingenuity and creativity to structural elegance can be considered sustainable. A structure becomes sustainable by combining structural elegance with creativity. What is the relationship between structural elegance and sustainability? This paper considers how to realize more elegant bridges.

Historii mostů provází řada inovací. Nejvýznamnějšími z nich jsou zřejmě vynález drátu v 19. století a výpočty deformační metodou ve 20. století, které dramaticky zlepšily navrhování visutých mostů, a dále vynález předpjatého betonu ve 20. století.

Technologické inovace umožnily výrazně snížit množství použitého materiálu a vedly také k realizaci udržitelných konstrukcí. Příkladem inovací souvisejících s výstavbou mostů jsou Freyssinetův most Plougastel a Finsterwalderova metoda letmé betonáže.

Freyssinet navrhl už v roce 1929 betonový obloukový most o třech polích délky 190 m za 1/3 ceny v té době běžně budovaných ocelových mostů díky opakovanému použití skruže plovoucí na pontonech.

Finsterwalderova metoda betonáže letmo ve spojení s technologií předpjatého betonu významně přispěla k prodloužení betonových mostů a i v dnešní době je jednou z nejpoužívanějších metod pro výstavbu mostů.

Pojem konstrukční elegancie se týká nejen vnější krásy, ale i tak odlišných aspektů, jako je konstrukce a metoda výstavby. Technologické inovace přispěly svou vynalézavostí a kreativitou nejen k eleganci konstrukcí, ale na-



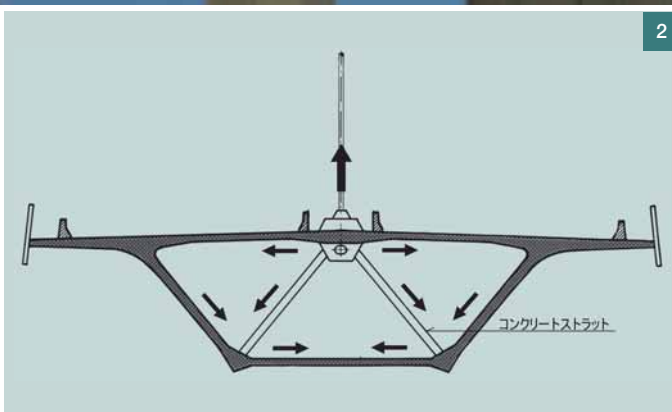
1

Obr. 1 Brotonnský most ■

Fig. 1 Brotonne Bridge

Obr. 2 Příčný řez nosníkem ■

Fig. 2 Girder cross section



2

víc i k jejich udržitelnosti. Jaký je tedy vztah mezi konstrukční elegancí a udržitelností? A měl by každý, kdo navrhuje mosty, hledat konstrukce, které naplňují oba tyto pojmy?

TŘI VLASTNOSTI KONSTRUKČNÍ ELEGANCE

Tři vlastnosti architektury, které zmiňuje Vitruvius ve svém díle *Architektura*, jsou „*utilitas*“ (funkčnost, užitečnost), „*firmitas*“ (stabilita, trvanlivost, solidnost) a „*venustas*“ (krása). Lze je přenést i na mosty jako „funkční krásu“, „krásu konstrukce“ a „krásu tvaru“. Věřím, že právě tyto tři atributy v uvedeném pořadí tvoří prvky konstrukční elegance mostů. Příkladem elegantního mostu s kreativním návrhem je most Brotonne (obr. 1). Jedná se o první zavěšený most s rozpětím pole přes 300 m, s hustě rozmístěnými závěsy v jedné rovině připomínajícími membránu, který je předchůdcem pozdějších vícepolových zavěšených mostů. Konstrukce s příčným řezem hlavního nosníku (obr. 2), který není zvnějšku patrný, společně s jednoduchými samostatnými pylony a transparentním tokem vnitřních sil je neobyčejně racionálním a optimálním řešením. Jde o skutečný model konstrukční elegance. Funkční krása je pochopitelně nejdůležitější, za ní následuje konstrukční krása a posléze krásu tvaru. Jako první zmiňuje konstrukční eleganci mostů Fritz Leonhardt ve své knize „*Bridges*“, která klade důraz na funkční krásu a doporučuje vhodné proporce a detaily mostů.

FUNKČNÍ KRÁSA

Nejdůležitější funkcí silničních mostů je převádět dopravní zatížení. Věřím, že kromě toho se most musí přirozeně začlenit do okolního terénu a prostředí, což je také klíčovým faktorem funkční krásy. Nejvhodnější tvar je určován zohledněním ekonomických kritérií a mnoha dalších podmínek, jako je prostorové vedení trasy, průjezdné nebo plavební profily, délky polí atd. V poslední době se zvyšuje důraz na minimalizaci vlivu stavebních prací na životní prostředí, což může být také považováno za součást funkční krásy.

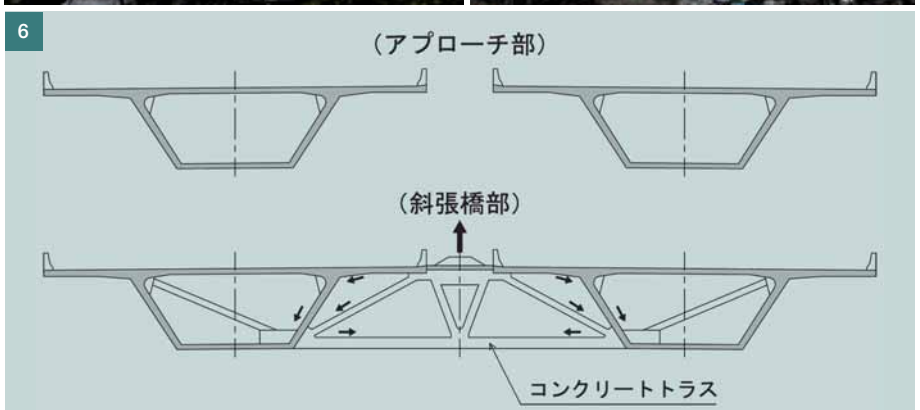
Viadukt Kochertal (obr. 3) je jedním z příkladů funkční krásy. Jedná se o trámový most na osmi pilířích s úrovní vozovky ve výšce 185 m nad řekou a s rozpětím polí 138 m, postavený na základě soutěže. Vítězný projekt, který velmi dobře zapadá do okolí, nebyl finančně nejvýhodnější. Názorně

Obr. 3 Viadukt Kochertal ■ Fig. 3 Kochertal Viaduct

Obr. 4 Viadukt Linn Cove ■ Fig. 4 Linn Cove Viaduct

Obr. 5 Sunnibergský most ■ Fig. 5 Sunniberg Bridge

Obr. 6 Most přes řeku James ■ Fig. 6 James River Bridge





to dokazuje, že je důležité, aby při návrhu nehrálo jedinou roli pouze ekonomické hledisko, ale že je potřeba respektovat i hledisko funkční krásy.

Dalším příkladem je viadukt Linn Cove ve Spojených státech (obr. 4). Tento viadukt vede národním parkem a mezi podmínkami pro výstavbu měl zhotovitel i udělení pokut za kácení stromů. Metoda výstavby proto eliminovala potřebu výstavby přístupových cest, včetně těch, které by vedly k patkám mostu. Veškeré stavební práce byly vykonávány z vrchní části mostu a most byl postaven prakticky bez jakékoli škody na území národního parku. Za důležitý aspekt funkční krásy proto považují soulad funkčnosti a harmonie s okolím.

KRÁSA KONSTRUKCE

Konstrukční krása je ten nejsnáze pochopitelný prvek. Je to výsledek rozumného návrhu konstrukce a zohlednění jednoduchého toku sil. Typickým příkladem je most Sunniberg ve Švýcarsku (obr. 5). Pilíře jsou velmi štíhlé díky použití předpjatých betonových konstrukcí pro pylony a příčnicků. Půdorysně zakřivená mostovka je vetknutá do opěr s využitím horizontálního klenbového efektu.

Příčný řez dříve uvedeného mostu Brotonne je také dobrým příkladem konstrukční krásy. Přenesení diagonálních tahů od závěsů do stěn nosné konstrukce pomocí příhradové konstrukce místo příčnicků umožnilo zjednodušení výstavby a snížení hmotnosti konstrukce. Jean Muller později použil příhradovou konstrukci u mostu přes řeku James v USA, kde použil extrémní způsob přenosu sil mezi závěsy a nosnou konstrukcí. Jedná se o zavěšený most přes řeku s použitím prefabrikovaných segmentů. Byl použit stejný příčný řez segmentů v krajních polích a v zavěšené části mostu, kde jsou dva segmenty spojeny prefabrikovanou příhradovou konstrukcí zajišťující rozno sil (obr. 6). Ačkoliv se jedná o metodu zcela v souladu s teorií konstrukcí, navržení tohoto konceptu v uvedeném rozsahu je složité a současně i velmi kreativní.

Konstrukční krása je transparentní ve svém toku sil a vyžaduje důvtipnost v přenosu sil nejkratšími cestami tak, aby nevznikaly nadbytečné ohybové momenty a smykové síly. Z pohledu inženýra-mostaře se může konstrukční filozofie a koncepce odvodit z konstrukční krásy bez potřeby dalšího vysvětlování. Konstrukční krásu nelze oklamat.

KRÁSA TVARU

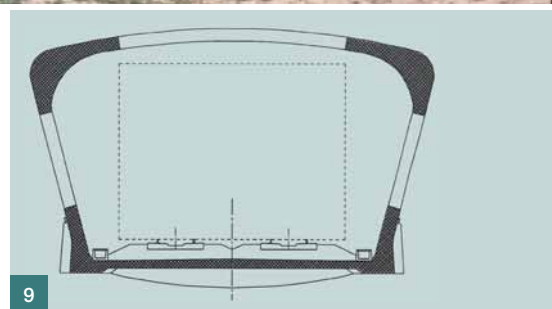
Mohlo by se zdát, že mluvíme-li o konstrukční eleganci, v úvahu je brána pouze krása tvaru, přestože tento atribut má v nejlepší případě podpůrnou roli a základem konstrukční ele-



Obr. 7 Most přes Iseru
Fig. 7 Iserre Bridge

Obr. 8 Most přes řeku Ebro
Fig. 8 Ebro River Bridge

Obr. 9 Příčný řez nosníkem
Fig. 9 Girder cross section



gance je dříve diskutovaná funkční a konstrukční krása. Základní myšlenkou je, že tvar může být vysvětlen působením konstrukce. Existují dva přístupy – první, kdy hlavní projektant má ve své gesci všechny tři elementy (např. ve Španělsku), a druhý, kdy odpovědnost za krásu tvaru má v kompetenci architekt specialista (např. ve Francii). Dobrymi příklady rozdílnosti obou přístupů jsou viadukt Iserre ve Francii (obr. 7) a most přes řeku Ebro ve Španělsku (obr. 8).

Viadukt Iserre je výsledkem spolupráce hlavního projektanta a architekta, kdy tvar pylonu a způsob ukotvení lan spadá do kompetence architekta. Radiální uspořádání lan je konstrukčně nejvýhodnější, ale je složité na sestavení. Je zde patrné estetické řešení ukotvení lan na vrcholu pylonů. Aby bylo dosaženo požadovaného tvaru, byly vytvořeny desítky modelů.

Most přes řeku Ebro je vysokorychlostní železniční most s maximálním rozpětím pole 120 m a požadovanou podjezdnou výškou pod nosnou konstrukcí. V tomto případě je nasnadě řešení s využitím spojitého nosníku komorového průřezu (obr. 9). Nosné prvky elektrického vedení jsou využity jako zavětrování k omezení příčné deformace stěn. Vyříznutím kruhových otvorů ve stojinách došlo k odlehčení konstrukce, ke snížení tahu i tlaku a zamezilo se plýtvání. Nakloněním stojin lehce ven bylo dosaženo odpovídající tuhosti v horní části trámu a zároveň byl zajištěn dostatečný prostor pro ukotvení předepjaté výztuže. Tak bylo dosaženo ideálního stavu – vše, co se týká tvaru, má zároveň i konstrukční význam.

Krása tvaru závisí na osobních preferencích a je samozřejmě velmi subjektivní. Na rozdíl od funkční a konstrukční krásy, které rozumí mostní inženýři bez rozdílu národnosti, krásu tvaru ovlivňuje individuální vnímání každého jedince a klimatické podmínky. Smysl pro krásu se tříbí tím, že se člověk s krásou intenzivně setkává v největší možné míře. Nicméně zdravé konstrukční citění je hlavním předpokladem pro kultivaci tohoto smyslu.



10 11



KONCEPT UDRŽITELNOSTI KONSTRUKCE

Konstrukce a postupy výstavby použité u Freyssineta mostu Plougastel a mostu Brotonne Jeana Mullera byly ve své době optimálním řešením a kreativita jejich řešení nás oslovuje i dnes, aniž by ztratila cokoliv ze své svěžesti. Jak je to možné? Jsem přesvědčen, že ze všech tří atributů konstrukční elegance jsou v těchto stavbách nepřehlédnutelně obsaženy funkční a konstrukční krása. V případě mostu Plougastel byla výstavba obloukového mostu zjednodušena opakovaným použitím skruže na pontonech, což významně snížilo stavební náklady. U mostu Brotonne bylo možné postavit široký zavěšený most s lehkou jednodukovou mostovkou a jednou rovinou závěsů díky použitím přenosu sil ze závěsů do stěn prostřednictvím betonových táhel. Hlavním faktorem bylo kreativní využití zcela nových a originálních postupů. Uplatněné konstrukční metody minimalizují environmentální zátěž, používají minimum materiálů, a mají proto i minimální náklady. Jinými slovy, jsou udržitelné. Z tohoto všeho docházím ke konceptu „udržitelnosti konstrukce“, definovanému jako snaha o konstrukční eleganci se zapojením kreativity již ve stadiu návrhu konstrukce tak, abychom realizovali udržitelný stavební objekt.

Pokud jde o tři aspekty udržitelnosti, minimální dopad na životní prostředí prospívá environmentálnímu aspektu, minimální potřebná údržba aspektu sociálnímu a minimální náklady na životní cyklus aspektu ekonomickému. Abychom tohle vše mohli realizovat, je nezbytný správný návrh a kreativní stavební postup. Představitost a vnímání časových souvislostí jsou nutné, abychom mohli předvídat degradaci stavby v čase. Konstrukce je během svého života udržována opravami a zesilováním, nicméně existuje ještě alternativní možnost, kdy je konstrukce navržena tak, že má sice vyšší vstupní náklady, ale za celý svůj životní cyklus potřebuje jen absolutní minimum nákladů na údržbu. Tyto faktory ovlivňuje projektant spolu s investorem při konzultacích zohledňujících nejnižší náklady na životní cyklus (LCC). Kreativita využitá pro dodržení vstupních nákladů za účelem minimalizace nákladů na údržbu vede i k udržitelnosti konstrukcí.

KONSTRUKČNÍ ELEGANCE A UDRŽITELNOST KONSTRUKCE

Kombinace konstrukční elegance a kreativity je podmínkou pro udržitelnou konstrukci. Následuje několik příkladů konstrukční elegance mostů v Japonsku, které přispěly k environmentálním, sociálním a ekonomickým aspektům udržitelnosti.

Obr. 10 Motýlková stěna ■ Fig. 10 Butterfly web

Obr. 11 Most Takubogawa ■ Fig. 11 Takubogawa Bridge

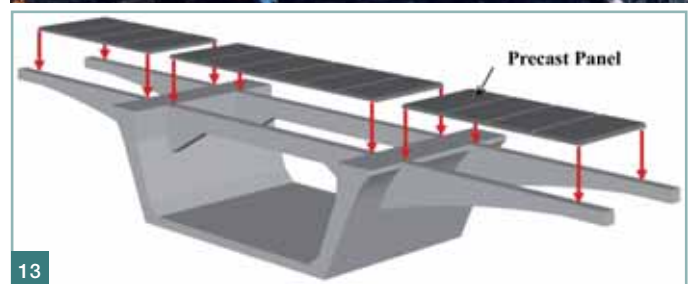
Obr. 12 Viadukt Furukawa ■ Fig. 12 Furukawa Viaduct

Obr. 13 Sestava příčného řezu ■ Fig. 13 Structural composition

Obr. 14 Viadukt Okegawa ■ Fig. 14 Okegawa Viaduct



12



13



14

Most s „motýlkovými“ stěnami nosníků

V Japonsku se staví nový typ mostů nazývaný „Butterfly Web Bridge“. Panely použité pro stěny hlavního nosníku jsou ve střední části zúženy tak, že svým tvarem připomínají motýlí křídla (obr. 10). Prefabrikované předpjaté panely tloušťky 150 mm byly vyrobeny z drátkobetonu s pevností 80 MPa bez betonářské výztuže. Volný prostor uvnitř nosníku usnadňuje údržbu. Poprvé byl tento způsob výstavby použit u mostu Takubogawa (obr. 11), další viadukt byl nedávno dokončen a ve výstavbě jsou i dva dálniční mosty. Zjednodušeným stavebním postupem je možno zkrátit dobu výstavby. Navíc lehká vrchní stavba a menší množství spotřebovaného materiálu činí konstrukci udržitelnou a v porovnání s běžně používanými komorovými nosníky může být snížena produkce CO₂. Technologie „motýlkových“ stěn nosníků umožňuje realizovat nekovový most použitím vláknobetonu v horní a spodní desce a předpínacích kabelů z aramidových vláken.

Prefabrikovaná segmentová konstrukce s průřezem ve tvaru U

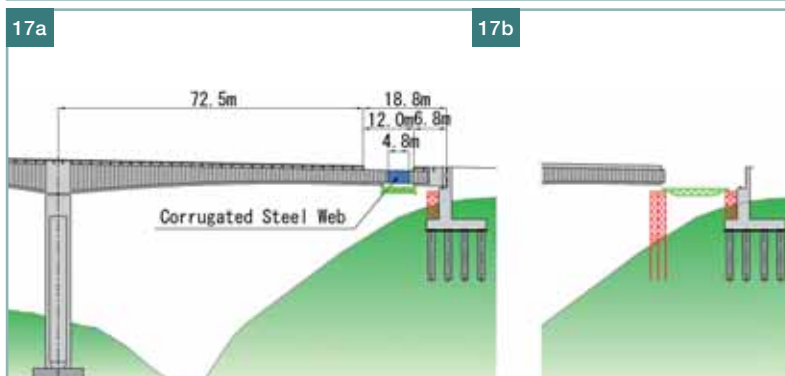
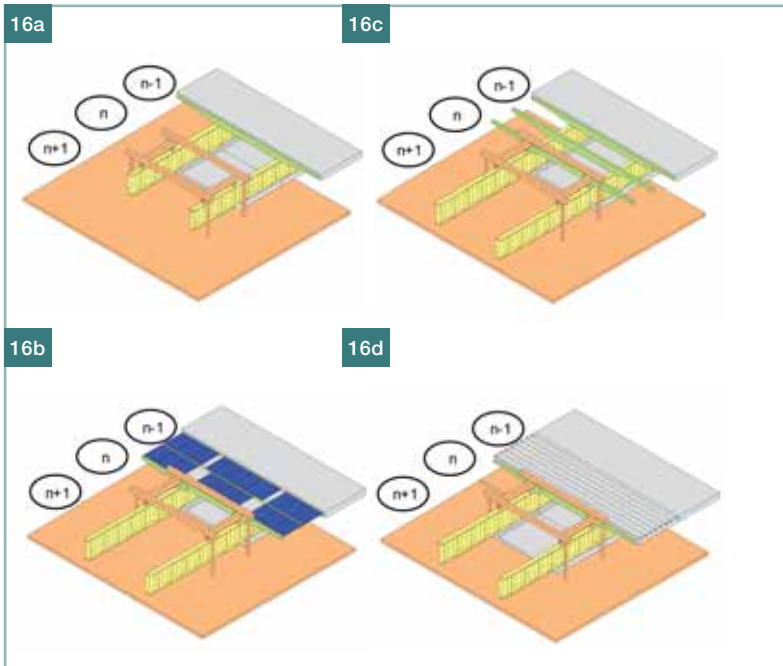
Viadukt Furukawa je mostem, který byl montován postupně po polích ze segmentů s průřezem ve tvaru U s žebry (obr. 12). Po dokončení pole byla horní deska vyrobena z monolitického betonu. Použitím lehčích segmentů byly zmenšeny nároky na montáž a dopravu. Protože výztuž horní desky je spojitá, bez spár mezi jednotlivými segmenty, celková únosnost mostu byla zvýšena a v porovnání s běžnou segmentovou konstrukcí byla spotřeba betonářské výztuže nižší (obr. 13). Tento viadukt může být považován jako udržitelné řešení i proto, že při obrácení postupu výstavby lze nahradit horní desku, což by nebylo možné u obvyklého průřezu. Příkladem uplatnění této metody a metody panelů ve tvaru motýlích křídel je viadukt Okegawa (obr. 14). V případě betonových mostů je pro vytvoření udržitelné stavby nutná významná redukce hmotnosti. Kreativní metody, které toto umožní, jsou základem udržitelnosti konstrukcí.

Unikátní konstrukce mostů se stěnami nosníků z vlnité oceli

V Japonsku existuje více než 150 mostů využívajících stěny z vlnitého plechu. U téměř dvaceti z nich byla použita metoda, která využívá během výstavby nosníky z vlnitého plechu (obr. 15). Doba výstavby je v porovnání s běžným způsobem pomocí betonážního vozíku kratší, protože stavební práce probíhají současně na třech místech – montáž stěn nosníků z vlnitého plechu, betonáž spodní a horní desky (obr. 16). Tato metoda byla použita při výstavbě mostu Akabuchigawa, což umožnilo výstavbu krajního pole přes strmé údolí bez použití dočasných podpěr (obr. 17). Technologie, která umožní zachování okolního prostředí pokud možno nenarušeného, je výsledkem koncepce udržitelnosti konstrukce.

Konstrukční metoda využívající visutých konstrukcí

Unikátní metoda podvěšování, vyvinutá v průběhu více než dvaceti let, umožňuje realizovat účelnou konstrukci jednopolevého spřaženého mostu nebo nosníku s vnějším předpětím. Ocelové prvky s betonovou mostovkou jsou u těchto staveb sestavovány na visutých kabelech. Během výstavby zachycují zemní kotvy horizontální síly od visutých kabelů. Po dokončení mostu jsou tyto síly převedeny na samokotvený systém a působí jako předpínací síly mostovky. Prvním příkladem dálničního mostu, kde byla použita tato technologie, je most Seiun (obr. 18). Další most Seishun (obr. 19) byl postaven technolo-



Obr. 15 Most se stěnami z vlnitého plechu ■ Fig. 15 Corrugated steel web bridge

Obr. 16 Postup výstavby: a) pohyb vozíku, b) uložení prefabrikovaných filigránů, instalace výztuže a předpětí v horní desce, c) montáž stěn z vlnitého plechu a instalace prefabrikovaných žebříků horní desky, d) betonování horní a dolní desky ■ Fig. 16 Construction sequence: a) traveller moving, b) erection of corrugated steel webs and installing top slab precast ribs, c) placing precast panels, assembling re-bars and tendons of top slab, d) casting concrete of top and bottom slab

Obr. 17 Výstavba krajního pole: a) udržitelná výstavba, b) standardní výstavba ■ Fig. 17 Construction of side span: a) sustainable construction, b) ordinal construction

Obr. 18 Most Seiun ■ Fig. 18 Seiun Bridge

Obr. 19 Most Seishun ■ Fig. 19 Seishun Bridge

18



19



gíí nosníku s vnějším předpětím nad další řadou visutých kabelů. Primární lana jsou využívána pro přenesení tíhy mostovky a sekundární předpínací kabely jsou používány ke kompenzaci deformace za provozu. Jednopolový spřažený most nebo nosník s vnějším předpětím může být postaven bez dočasných podpěr nebo skruže, vyžaduje méně výkopových prací než jiné typy mostů a lze tak minimalizovat dopad stavby na životní prostředí. Použití této metody k přemostění hlubokého údolí přináší výhody nejen z hlediska nákladů na výstavbu, ale i z hlediska udržitelnosti.

ZÁVĚR

J. E. Breen z Texaské univerzity ve svém příspěvku na Sympoziu *fib* 1999 varoval, že „omezené mozky a omezující pravidla dusí tvořivost“. Švýcarský projektant mostů J. F. Klein na Sympoziu *fib* 2004 vyslovil pochybnosti nad podstatou projektování, když poukázal na obrovský rozdíl mezi Maillartovým původním statickým výpočtem mostu Salginatobel a současným statickým výpočtem pro navržené zesílení stejného mostu.

Dřívější inovace jsou produktem časů, kdy nebyl k dispozici ani sofistikovaný software, ani dnes dostupné specifikace. Projektanti přemýšleli o tom, jak zajistit bezpečnost pomocí analytických technik využívajících manuální výpočty. Jejich projekty i po mnoha letech stále plní své funkce. Jak se

technologie stále vyvíjí, přijde čas, kdy projektanti budou moci přesně předpovědět životnost mostů, což ovšem neznamená, že tyto mosty budou také elegantní. Vysoce kreativní objekty se stále objevují i v moderní době a inspirují nás. Musíme stále cvičit naši kreativitu a rozvíjet výstavbu mostů, třeba i malými kroky.

Konceptu konstrukční elegance a udržitelnosti konstrukcí popsaným v tomto článku je možné porozumět kvalitativně, v současné době je však není možné vyjádřit kvantitativně. Tyto techniky bude nutno rozvíjet v budoucnosti a jistě se stanou motivačním nástrojem pro projektanty. Stejně jako v minulosti bude vývoj materiálů a konstrukčních postupů vždy napřed před specifikacemi. Pouze přímí účastníci tohoto vývoje budou schopni uvolnit svou kreativitu tak, jako průkopníci před námi. Je jen na nás, abychom s vidinou a cílem konstrukční elegance byli schopni postavit opravdu elegantní most v jakékoli době.

Akio Kasuga

Sumitomo Mitsui Construction Tokyo, Japonsko
e-mail: akasuga@smcon.co.jp



Tento článek byl napsán pro konferenci IABSE, Nara, 2015.

Redakce děkuje autorovi za laskavý souhlas s českým přetiskem.

BETOSAN[®]

DRŽITEL CERTIFIKÁTU ČSN EN ISO 9001 A 14001



alternativa,
kterou oceníte

Materiály na bázi syntetických pryskyřic

**PENETRAČNÍ EPOXIDOVÉ NÁTĚRY
NÍZKOVISKÓZNÍ KOMPOZICE PRO NÁŠLAPNÉ
VRSTVY
KOMPOZICE A PLNIVA PRO VÝROBU
PLASTMALT A PLASTBETONŮ
EPOXIDOVÁ LEPIDLA A PRYSKYŘICE
PRO APLIKACI V NÁROČNÝCH PODMÍNKÁCH
INJEKTÁŽNÍ SYSTÉMY NA POLYURETANOVÉ
BÁZI**

www.betosan.cz

OBCHODNĚ-TECHNICKÁ KANCELÁŘ

Nová cesta 291/40 tel./fax: 241 431 212
140 00 Praha 4 e-mail: praha@betosan.cz