

Hynek Šertler

Stanovení spolehlivosti stávajících železničních mostů

Klíčová slova: *spolehlivost, pravděpodobnostní přístup, provozní zatížitelnost, diagnostika, pravděpodobnost poruchy, index spolehlivosti.*

1. Úvod

Současný stav zejména ocelových mostních konstrukcí v důsledku zanedbanosti údržby je neradostný [2]. I když se podařilo v rámci rekonstrukce prvního koridoru přestavět celou řadu přestárých a nevyhovujících mostů, je počet nevyhovujících mostů v síti ČD tak velký, že to vede stále k většímu rozsahu pomalých jízd a tím ke zpomalování dopravy a ke snižování výkonnosti tratí. Se špatným stavem mostů bezprostředně souvisí i bezpečnost provozu. Skutečnost, že zatím nedošlo z titulu špatného stavu mostů k vážnějším haváriím, vede někdy méně zasvěcenou veřejnost k nebezpečnému optimizmu o značných rezervách v únosnosti mostů. Některé případy vážných poruch, které se v poslední době vyskytly a které jen díky včasným zásahům údržovacích složek DDC nevedly k vážnějším nehodám, jsou varující. Nedostatek finančních prostředků neumožní ani v blízké budoucnosti tento problém řešit.

Bude proto třeba hledat cesty, jak prodloužit životnost stávajících mostů, aniž by tím byla ohrožena bezpečnost provozu. Prvním předpokladem pro splnění tohoto úkolu je určit spolehlivost provozovaných mostů s ohledem na jejich údržovací stav, stáří i vytížení provozem. Dalším úkolem je zjistit zbytkovou životnost konstrukcí, popřípadě rozsah oprav, nutných k jejímu prodloužení. Ve snaze pomoci správním orgánům ČD řešit tento problém, pracuje tým pracovníků katedry dopravní infrastruktury Dopravní fakulty Jana Pernera ve spolupráci s ÚTAM ČAV Praha na výzkumné úloze "Spolehlivost konstrukcí dopravních staveb", pro kterou se podařilo získat finanční podporu v rámci GA ČR.

Hynek Šertler, Prof. Ing. DrSc., nar. 1933. Absolvent VUT Brno, Stavební fakulta, obor konstruktivně dopravní. Prof. mostů na DFJP Univerzity Pardubice, vedoucí katedry dopravní infrastruktury.

2. Současný stav

Stanovení únosnosti stávajících mostních konstrukcí podle platných předpisů [11] je založeno na deterministickém přístupu. I když tyto předpisy formálně vycházejí z metodiky mezních stavů, má ve skutečnosti určení jak materiálových, tak i zatěžovacích a geometrických vlastností charakter deterministických hodnot. Podklady k této normě byly zpracovány kolektivem pracovníků katedry mostů a stavebních konstrukcí Stavební fakulty Vysoké školy dopravy a spojů v Žilině, jejímž členem autor tohoto příspěvku tehdy byl. Při tvorbě tohoto předpisu se vycházelo z údajů a koncepce tehdy platné normy pro navrhování [4] a zatížení [3] s určitými korekcemi, stanovenými odborným odhadem. Pokud se týče mezního stavu únosnosti, směřuje přepracovaná norma především k výpočtu *zatížitelnosti* jednotlivých konstrukčních prvků a spojů, přičemž

zatížitelnost konstrukce je dána nejmenší zatížitelností jejích prvků. *Zatížitelností* se rozumí poměr rezervy únosnosti konstrukce pro nahodilé krátkodobé zatížení k účinkům smluvního krátkodobého nahodilého zatížení, kterým je zpravidla zatěžovací vlak UIC 71. Ve starších přepočtech je tímto smluvním zatížením zatěžovací vlak C. Potřebné vztahy pro zatížitelnost jsou v [11]. Proti normě pro navrhování mostních konstrukcí zohledňuje norma pro přepočet vliv aktuální hladiny zatížení na velikost redukčních součinitelů prvků, namáhaných na tlak. Při stanovení výpočtových pevností starších mostních konstrukcí se vycházelo z údajů v mostních řádech, platných v době navrhování konstrukce. Dovolena namáhání tam uvedená byla převedena na výpočtové pevnosti v poměru stupňů bezpečnosti. tehdejší a současné (v době tvorby [11]) normy. Zatížitelnost sloužila pro zatřídění mostů a pro stanovení přechodnosti aktuálního provozního zatížení po mostě. Konkrétní zatížení je charakterizováno *účinností*, t.j. poměrem účinků aktuálního zatížení k účinkům smluvního zatěžovacího vlaku (např. UIC 71). Účinnostní tabulky, popř. grafy byly na tehdejších Správách drah pro běžné dopravní prostředky k dispozici. Dnes je výpočet přechodnosti plně zautomatizován pomocí výpočtové techniky programem CASANDRA, vytvořeným pracovníky SUDOP Praha [6]. Hlavním přínosem ON v době jejího zrodu bylo postavení tohoto dokumentu na metodice mezních stavů, na které byla založena norma pro navrhování. V současné době došlo k totální revizi normy pro navrhování i zatížení mostních konstrukcí a prohloubil se teoretický základ metodiky mezních stavů, založený na pravděpodobnostním pojetí. Současně se otevřela možnost masového použití výpočtové techniky při přepočtech konstrukcí. Z tohoto úhlu pohledu se jeví současná norma pro přepočty mostních konstrukcí jako zastaralá.

3. Nové trendy v posuzování spolehlivosti

3.1. Pravděpodobnostní koncepce

Jakoukoliv konstrukci navrhujeme z *materiálů*, jejichž *charakteristické vlastnosti můžeme stanovit jen s určitou pravděpodobností* a které se budou měnit s časem, budou podléhat degradaci v důsledku koroze, únavy, atd. *Ještě obtížnější je to s odhadem návrhového zatížení*. Jeho intenzita kolísá v průběhu dne, ročních období, ale i roků. Změny v minulosti i současnosti můžeme měřit a analyzovat pomocí *matematické statistiky*. Změny v budoucnosti můžeme jen předpokládat a přesnost odhadu bude záviset na časovém horizontu předpokládané životnosti. To vše nás vede k tomu, že se budeme muset spokojit při návrhu i posuzování konstrukcí s tím, že spolehlivost je *náhodně proměnná* veličina, kterou můžeme stanovit jen s určitou pravděpodobností. Toto poznání vedlo k nutnosti opustit *deterministické* metody při posuzování konstrukcí a nahradit je metodami *pravděpodobnostními*.

Základem pravděpodobnostní koncepce je tedy nahrazení součinitelů bezpečnosti, které byly stanoveny na základě zkušeností a byly ovlivněny teoretickou fundovaností a konstrukčním citem odborníků, návrhovou pravděpodobností poruchy, popřípadě návrhovým indexem spolehlivosti. Spolehlivost konstrukce v moderním pojetí je funkcí množiny náhodně proměnných parametrů a je proto též náhodně proměnnou veličinou. Její návrhovou hodnotu můžeme určit z míry rizika porušení konstrukce, kterou při návrhu konstrukce připustíme. Základy teorie spolehlivosti lze najít v četných publikacích např. [8]. Konkrétní aplikace metody najde čtenář v [7] Podrobněji o teorii spolehlivosti při aplikaci na posuzování stávajících konstrukcí pojednává [18].

Konstrukci označujeme za spolehlivou, pokud plní bezchybně funkci, pro kterou byla navržena po celou předpokládanou dobu životnosti. Mírou spolehlivosti je tzv. *rezerva spolehlivosti* $G(t)$, která je funkcí času a má charakter náhodně proměnné veličiny, závislé na vektoru náhodně proměnných parametrů. Pravděpodobnostní metoda první úrovně, která je základem dnešní verze koncepce *mezních stavů*, kodifikované v normách pro navrhování, redukuje počet parametrů na dva

$$G(t) = R(t) - S(t) \geq 0 \quad (1)$$

Zatížení jemuž je konstrukce vystavena, reprezentované parametrem $S(t)$ má zpravidla několik složek různé intenzity, rozptylu a významnosti. Např. u mostních konstrukcí je můžeme roztrždit na zatížení stálé s velmi malým rozptylem, zatížení nahodilé dlouhodobé, jehož rozptyl je větší, zatížení nahodilé krátkodobé (vozidla) a zatížení vyplývající z působení vnějšího prostředí (sníh, vítr, tepelné změny) s rozptylem značně větším. U železničních mostů převládá co do intenzity zatížení krátkodobé nahodilé $S_T(t)$, které proto můžeme vyčlenit z ostatního zatížení. Potom můžeme psát

$$S(t) = \sum S_i(t) + S_T(t) \quad (2)$$

Odolnost $R(t)$ závisí na pevnostních charakteristikách, geometrických charakteristikách příčného řezu konstrukčních prvků, na degradaci materiálu vlivem prostředí a na udržovacím stavu konstrukce. U tlačných prvků v případě, že snížení odolnosti v důsledku vzpěru a lokálního boulení dílčích stěn vyjadřujeme redukčními součiniteli je odolnost funkcí náhodně proměnných geometrických i strukturálních imperfekcí. Je jí možno regulovat údržbou a opravami.

Dosadíme-li (2) do (1), dostaneme po úpravě

$$z_T = [R(t) - \Sigma S_i(t)] / S_T(t) \geq 1 \quad (3)$$

Tento výraz, který je základní charakteristikou při posuzování stávajících konstrukcí je v (Šertler, 1996) označen jako **provozní zatížitelnost** a jeho podrobnou analýzou se zabývá výzkumný tým katedry dopravní infrastruktury DFJP Univerzity Pardubice. Tento pojem je nutno odlišit od **zatížitelnosti** obvykle užívané v normách, která je založena na deterministickém přístupu a je vztažena k normalizovanému zatížení, např. zatěžovacímu vlaku UIC 71.

Jako míra spolehlivosti se standardně používá **pravděpodobnost poruchy**, nebo **index spolehlivosti**. Vycházíme-li z (1), je pravděpodobnost poruchy dána vztahem:

$$P_f = P(G < 0) \quad (4)$$

Vycházíme-li z (3), je pravděpodobnost poruchy dána vztahem:

$$P_f = P(z_T < 1) \quad (4a)$$

Kritériem spolehlivosti je v tomto případě podmínka

$$P_f < P_{fd} \quad (5)$$

kde P_{fd} je návrhová pravděpodobnost poruchy, závisící na významnosti konstrukce a důsledcích případné havárie, na plánované době života, popř. zbytkové životnosti, na druhu poruchy u stávajících konstrukcí a na hustotě a kvalitě prohlídek. Stanovení návrhové pravděpodobnosti poruchy je jedním z nejcitlivějších a nejobtížnějších problémů použití pravděpodobnostní koncepce v praxi.

Podrobně je tato otázka analyzována v [1] a v.[12].

Index spolehlivosti β

Je dán podílem střední hodnoty rezervy spolehlivosti a směrodatné odchylky této funkce. Pokud použijeme pro rezervu rozdílový tvar podle (1) dostaneme

$$\beta = (m_R - m_S) / (s_R^2 + s_S^2)^{1/2} \quad (6a)$$

kde indexy označují příslušnost k jednotlivým parametrům ve výrazu (1).

Pokud jsou náhodně proměnné veličiny dány v log-normálním rozdělení, uvádí se pro β tvar

$$\beta = \ln(m_R/m_S) / (v_R^2 + v_S^2)^{1/2} \quad (6b)$$

zde v_R a v_S jsou variační koeficienty odolnosti a odezvy na zatížení

Kritérium spolehlivosti je potom vyjádřeno tvarem

$$\beta \geq \beta_d \quad (7)$$

kde β_d je návrhový index spolehlivosti, závisící na podobných okolnostech, jako návrhová pravděpodobnost poruchy. Je zpravidla nultého řádu.

Index spolehlivosti nemá všeobecnou platnost. Platí jen ze předpokladu, že rezerva spolehlivosti má normální rozdělení. Přesto se ho v publikovaných návrhových postupech používá častěji než pravděpodobnosti poruchy pro svou názornost a praktičnost.

Pro vlastní simulaci rezervy spolehlivosti podle výrazu (1), popř.(3) se nejčastěji používá metoda MONTE-CARLO. Tu také používá ve svých pracích autor tohoto příspěvku. Její nevýhodou je fakt, že vyžaduje značně velké množství simulací, což může činit potíže při složitějších výpočetních modelech a při velmi malých hodnotách pravděpodobnosti poruchy. Mírou přesnosti a spolehlivosti této metody v závislosti na kvalitě statistických souborů vstupních parametrů se zabývá [19]. Výhodnější je pro tyto případy metoda LHS (*Latin Hypercube Sampling*), publikovaná např. [15].

Plně pravděpodobnostní metody tvoří vyšší úroveň teorie spolehlivosti, tak jak je výše popsáno. Pro výpočet spolehlivosti potom potřebujeme softwarové vybavení a výkonný počítač. Je možno dosáhnout úspornějšího návrhu, protože polopravděpodobnostní metody dále popsané jsou vždy na straně bezpečné. K dokonalosti tyto metody dovedl Marek [7] a jeho spolupracovníci.

Podle druhu porušení prokazujeme spolehlivost porušení houževnatým lomem s předcházejícími značnými trvalými deformacemi, porušení vysokocyklovou popř. nízkocyklovou únavou, porušení křehkým lomem. Bezpečnost proti porušení houževnatým lomem prokazujeme při výpočtu prvního mezního stavu, t.j. mezního stavu únosnosti a při stanovení provozní zatížitelnosti. Pro výpočet životnosti, popř. zbytkové životnosti a intervaly prohlídek vycházíme zpravidla z porušení únavou [16].

3.2 Metoda dílčích součinitelů spolehlivosti

Polopravděpodobnostní metody tvoří přechod mezi deterministickými a plně pravděpodobnostními metodami. Využívají formální postup a některé pojmy, známé z deterministických metod. Jsou tedy výhodné zvláště pro inženýrskou praxi. Polopravděpodobnostní přístup byl všeobecně akceptován při tvorbě euronorem a je znám jako metoda parciálních součinitelů spolehlivosti. Jednotlivé náhodně proměnné parametry se zpracovávají statisticky odděleně. Návrhové hodnoty těchto parametrů se určí jako kvantily, stanovené s parciální návrhovou pravděpodobností, odvozené návrhové z pravděpodobnosti poruchy P_{fd} podle vztahu (4). Parciální součinitele spolehlivosti, vyjadřující odchylky extrémních hodnot náhodně proměnných parametrů od nominálních hodnot, jsou zpravidla v normách tabelizovány a formálně se tak výpočet přibližuje k deterministickému pojetí. Normy pro navrhování uvádějí parciální součinitele spolehlivosti zatížení, dále označovány součinitele zatížení $\gamma_{F,i}$, diferencované podle druhu zatížení a parciální součinitele spolehlivosti materiálu γ_M , diferencované podle způsobu namáhání a míry přípustné plastifikace průřezu. Některé výpočtové postupy, ve snaze co nejvíce zjednodušit výpočet, redukují počet součinitelů spolehlivosti na jeden, čímž se formálně výpočet převádí na výpočet podle stupně bezpečnosti. Součinitel spolehlivosti má ale v tomto případě kvalitativně vyšší úroveň, protože byl určen s využitím pravděpodobnostních metod

Bayley [20] např. uvádí polopravděpodobnostní způsob výpočtu, užívaný ve Švýcarsku a v Belgii pro evaluaci stávajících konstrukcí. V zásadě se konstrukce počítá podle platných norem např. [5] a náhodná proměnnost se vyjádří korekčním součinitelem zatížení. Kalibrace se provede tak, aby pravděpodobnost poruchy zůstala stejná jako při normovém zatížení. Podmínka spolehlivosti se potom dá vyjádřit vztahem

$$S_d = S(\gamma_G \cdot G_m) + \frac{S(\gamma_Q \cdot Q_r)}{\alpha_Q} \leq \frac{R}{\gamma_R} \quad (8)$$

Zde $\gamma_G, \gamma_Q, \gamma_R$ jsou součinitele spolehlivosti stálého a nahodilého zatížení a součinitel spolehlivosti materiálu podle norem, α_Q je korekční součinitel, vyjadřující odlišnosti od normových předpokladů.

4. Zvláštnosti stávajících mostních konstrukcí

Při návrhu nových konstrukcí je míra nejistoty mnohem větší než u konstrukcí v provozu. Hlavní odlišnosti přepočtů stávajících konstrukcí od návrhu nových konstrukcí jsou tyto:

- Jejich materiálové vlastnosti i udržovací stav, odezvu na zatížení, jakož i provozní podmínky můžeme určit mnohem přesněji diagnostikou a inspekcemi. Zde je rozhodující kvalita inspekci a časový interval mezi jednotlivými prohlídkami, což musíme při přepočtu zohlednit. Při náročnějších přepočtech můžeme odebrat vzorky materiálu a stanovit zkouškami jejich mechanické vlastnosti. Pokud známe rok výroby a výrobce mostní konstrukce, můžeme využít výsledky zkoušek z analogických, dříve sledovaných objektů.
- Můžeme zjistit případné trhliny, zjistit jejich charakter a rychlost šíření. Postup degradace materiálových vlastností, změny geometrie konstrukce a průřezových hodnot můžeme při přepočtech průběžně sledovat, změny zavádět do výpočtu a korigovat tak předpoklady, za kterých byl proveden návrh konstrukce.
- Časový interval, na který konstrukci posuzujeme, je mnohem kratší než návrhová životnost u nových konstrukcí. Zatím co nové konstrukce navrhujeme ve smyslu (ENV,1993) na dobu 100 roků, přepočet provádíme na dobu omezenou. Zpravidla je to doba mezi dvěma hlavními prohlídkami tak, abychom mohli výsledky přepočtu aktualizovat na základě výsledků inspekce. Rozptyl návrhových parametrů za celou dobu životnosti konstrukce bude tedy mnohem větší než pro dobu platnosti přepočtu.

5. Diagnostika mostních konstrukcí

Jak je z předchozí kapitoly patrné, má diagnostika pro správné určení spolehlivosti prvořadý význam. Předmětem tohoto příspěvku není vyčerpávajícím způsobem popsat problematiku diagnostiky. Potřebné informace jsou např. v publikaci [17]. Chci jen upozornit na některé zásady, které mohou podstatně ovlivnit spolehlivost výsledků diagnostiky a stanovení spolehlivosti vůbec.

Diagnostika je součástí systému správcovské činnosti provozních složek DDC, jehož účelem je dodržet předpoklady, za kterých byla konstrukce navržena, popř. provádět jejich korekci v případě změněných podmínek. Patří sem periodické prohlídky, hlavní prohlídky, zatěžovací zkoušky, analýza výsledků diagnostiky, přepočet se zapracováním výsledků diagnostiky, údržba a rekonstrukce. V tomto globálním systému se jednotlivé položky navzájem podmiňují, zanedbání jednoho článku se projeví na zvýšených nákladech v článku druhém. Tak např. zanedbání diagnostiky a údržby systému proti korozní ochraně se projeví nejen oslabením průřezových ploch korozí napadených prvků a následným snížením jejich zatížitelnosti, ale v případě důlkové koroze i snížením únavové pevnosti v důsledku iniciace vrubů. To má za následek zkrácení doby života. Obnovení spolehlivosti na požadovanou míru, popřípadě opětovné prodloužení doby života si zpravidla vyžádá enormní zvýšení nákladů na opravy a rekonstrukce.

Kvalita diagnostiky záleží především na lidském činiteli, to jest na odborné vyspělosti a zkušenosti členů týmů, provádějících revizi. Zejména vedoucí takových týmů by měli být na takové odborné úrovni, aby rozuměli konstrukci, byli schopni vystihnout nealgorické body konstrukce a zaměřit na ně při revizi zvýšenou pozornost. Zkušenosti z vykonaných prohlídek ukazují, že únavové trhliny jsou zpravidla zjištěny až v druhé polovině fáze jejich růstu, popřípadě v jejich konečné fázi, těsně před nezadržitelným rychlým růstem s následnou havárií.

Kvalita diagnostiky závisí dále na úrovni diagnostického zařízení. Kromě běžných diagnostických prostředků na mechanické čištění, zvýrazňovačů případných trhlin, měřidel geometrických rozměrů a tlouštěk by měly mít diagnostické týmy k dispozici přístroje na detekci vnitřních vad, jako je ultrazvuková defektoskopie a rentgen. Vhodné jsou sonární metody, schopné indikovat vnitřní vady konstrukce. Metoda akustické emise se s úspěchem používá pro diagnostiku tlakových potrubí a ve Francii i pro diagnostiku mostů. Součástí moderního diagnostického zařízení je i přenosný počítač s patřičným softwarovým vybavením pro přímé ukládání výsledků prohlídky.

Úspěch diagnostiky podstatně ovlivní důkladná příprava před její realizací. Projekt diagnostiky by měl obsahovat náčrtek konstrukce s vyznačením míst potenciálních závad. Mělo by předcházet též prostudování výsledků předcházejících prohlídek zejména v případě trhlin, aby bylo možno sledovat a analyzovat jejich růst.

Důležitý je správný a přesný záznam závad. Program CASANDRA poskytuje možnost ukládat přímo při revizi závady do databanky závad. V budoucnu bude tato databanka důležitým pomocníkem pro predikci potenciálních závad. Jako velmi prospěšné se jeví provést rozřídění závad podle jejich četnosti a lokalizace a na základě této analýzy provést kategorizace detailů, avizující potenciálního nebezpečí závad.

6. Modelování stávajících mostních konstrukcí

6.1 Modelování dynamické odezvy

Účinky provozního zatížení na mostní konstrukce mají výrazně dynamický charakter. Matematická simulace těchto účinků si proto vyžaduje výpočetní modely, které co nejdříve vyjadřují skutečnost. Tomu nejlépe vyhovují *dynamické* modely, ve kterých dochází k interakci vozidel a mostní konstrukce. Přitom třeba modelovat pojíždějící dopravní prostředky a dopravní konstrukce včetně podpěr a podloží jako systém. To vyžaduje týmovou práci odborníků z oboru dopravních prostředků a dopravní infrastruktury. Předpoklady pro takovou spolupráci jsou na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice vytvořeny a problematika interakce dopravních prostředků a dopravní infrastruktury je náplní institucionálního výzkumného úkolu, který je od r. 1999 na fakultě řešen.

Interaktivní dynamické výpočtové modely, které by vystihovaly věrně dynamickou odezvu i v detailech konstrukce, vyžadující zpravidla použití metody konečných prvků nebo jiné finitní metody, mohou být pro účely spolehlivostní analýzy s velkým počtem simulací příliš časově náročné a mohou být pro aplikaci pravděpodobnostní spolehlivostní analýzy vážnou překážkou. Zůstanou proto i nadále *kvazistatické* výpočetní modely aktuální. Přitom je třeba věnovat velkou pozornost *dynamickému* součiniteli. Ten musí zohlednit okrajové podmínky vyšetřovaných prvků, t.j. vazby na sousední prvky v konstrukci a vliv rychlosti vlaků. Vzorce pro dynamické součinitele uváděné v normách pro zatížení mostů, zohledňující pouze rozpětí konstrukčního prvku nejsou dostatečně přesné.

Jisté potíže při užití kvazistatických výpočtů činí modelování prvků, které při použití prostorových výpočetních modelů zastávají více funkcí. Příkladem jsou nosníky mostovky u mostů s prvkovými mostovkami, které spolupůsobí s hlavními nosíky. Zpravidla se účinky spolupůsobení zavádí s dynamickým součinitelem hlavních nosníků.

6.2 Rovinné výpočetní modely

Statické systémy mostních konstrukcí a s tím související konstrukční řešení odrážejí stav teorie konstrukcí v době, ve které byly navrženy. Ve starších konstrukcích je konstrukce pojata jako množina převážně prutových a nosníkových prvků, z nichž každý zastává zcela jedinečnou funkci. Vzájemné vazby byly zpravidla pojaty velmi zjednodušeně a ne vždy byly při konstrukčním řešení zohledněny. Tak například připojení výplňových prutů hlavních nosníků na pásové pruty v důsledku velkého počtu nýtů, potřebných pro připojení, činilo z předpokládaného kloubového připojení prutu připojení tuhé. Excentricity připojení prutů, které vznikaly ve snaze vyhnout se styčnickovým plechům a připojit pruty přímo na pásy zpravidla tvaru T se při výpočtu zanedbávaly. To dnes při přepočtech ve snaze dodatečně tyto vlivy zohlednit činí jisté potíže, protože dodatečná napětí z toho plynoucí jsou značná. Dnešní normy proto připouští při zavedení těchto účinků zvýšenou návrhovou pevnost.

Jiným příkladem je připojení podélníků na příčníky, které se staticky považovalo za kloubové, přenášející pouze posouvající sílu. Z toho důvodu nebyly pásy podélníků v místech příčníků propojeny. Relativně vysoké přípoje stojiny podélníků však evokují sekundární ohybové momenty, které musí přenést značně zeslabený průřez. Tuhost připojení se ještě zvyšuje při použití vysokopevnostních šroubů. Vyskytlo se i takové připojení, kde byly navrženy ve směru vodorovném oválné otvory ve stojině, aby byl umožněn vodorovný posun v místě jednotlivých spojovacích prostředků, dotažení šroubů bylo však tak tuhé, že žádný posun neumožnilo. Složená, značně vysoká napjatost z toho plynoucí spolu s konstrukčními vruby potom vedla k únavovým lomům.

I přes tyto nepřesnosti dávají zpravidla rovinné výpočtové modely uspokojivé výsledky a jsou vhodné tam, kde to značně zkrátí strojový čas, což může být při citlivostních analýzách důležité. Je tomu například u roštových soustav nebo u složitějších příhradových, rámových nebo obloukových konstrukcí. Vždy je však třeba věnovat velkou péči vzájemným vazbám jednotlivých rovinných soustav.

6.3 Prostorové výpočetní modely

Dnešní výpočtová technika a dostupné softwarové vybavení umožňují modelovat konstrukce jako prostorové a tím se více přiblížit jejich skutečnému působení. Ale i to má svá úskalí. Velkou pozornost je třeba věnovat modelování uzlů. Většina výpočetních programů umožňuje modelovat vzájemné připojení prvků buď jako kloubové nebo tuhé. Ve skutečnosti většinu přípojí je možno klasifikovat jako polotuhé spoje s nelineárním vztahem sil a deformací. Většina programů není pro nelineární výpočet vybavena a když je, vyžaduje to tak velký strojový čas, že tento způsob není pro mnohonásobně opakované simulační výpočty použitelný. V budoucnosti bude třeba věnovat tomuto problému pozornost, experimentálně stanovit pracovní diagramy charakteristických detailů a na základě ověřovacích výpočtů a citlivostních analýz a parametrických

studií provést zatřídění jednotlivých detailů tak, aby se při použití lineárního výpočtu nepřesnosti minimalizovaly.

Důležité je prostorové modelování pro výpočet tlacených prutových popřípadě plošných systémů pro výpočet kritického stavu konstrukce, z něhož lze ve smyslu nových norem pro navrhování mostů určit redukční součinitele jednotlivých tlacených prvků. Programové produkty by za tímto účelem měly být vybaveny stabilitními moduly a moduly pro výpočet podle teorie II. řádu.

6.4 Modelování poruch

Nepříznivý vliv provozu se může projevit změnou celkové geometrie a úložných podmínek konstrukce, což je třeba respektovat při konstrukci výpočetních modelů pro globální analýzu. Ke změně geometrie dochází často v poddolovaném území, popřípadě v důsledku přírodních katastrof. Změna geometrie se nepříznivě projeví například u torzně tuhých konstrukcí nárůstem sekundárních kroutících momentů a uvolňováním ložisek u tlacených prvků nárůstem geometrických imperfekcí, snižujících odolnost. Tyto vlivy je možno zavést do výpočtu použitím teorie druhého řádu. Oslabení korozi je nutno při globální analýze respektovat jen při plošné korozi, postihující větší část vyšetřovaného prvku. Lokální oslabení korozi je naopak nutno respektovat při vyšetřování napjatosti. Podstatně mohou ovlivnit tvorbu výpočetních modelů změny v uložení konstrukcí. Nepříznivě se může projevit omezení volného pohybu u pohyblivých ložisek, popřípadě dosednutí čela konstrukce na závěrné zídky. V tomto případě je při modelování nutno začlenit i vliv interakce konstrukce a podpěr.

Při výpočtu konstrukcí na únavu a zbytkovou životnost je třeba věnovat mimořádnou pozornost modelování lokálních poruch, zvláště při použití teorie mechaniky lomu.

6.5 Verifikace výpočetních modelů

O správnosti volby výpočetního modelu se můžeme přesvědčit měřeními na skutečné konstrukci. Zatěžovací zkoušky poskytují jen obraz o chování konstrukce jako celku a i to v omezené míře, často není možno použít zatížení s dostatečně velkou účinností. U svařovaných konstrukcí tak nedochází k odbourání vnitřních pnutí. K němu pak dochází postupně v důsledku provozu, což se projevuje nárůstem, popřípadě redistribucí napětí i deformací v čase. Pro spolehlivostní analýzu je nutno dát přednost dynamickým zatěžovacím zkouškám, kterými verifikujeme modelování dynamické odezvy zvláště při kvazistatických výpočtech. Pro ověření napjatosti a únavy je nutno měřit i poměrné deformace ve vybraných detailech. Nejspolehlivější verifikací jsou dlouhodobá měření odezvy mostů na provozní zatížení. Popis takového měření je v [18]. Podrobný popis a vyhodnocení tohoto měření je v diplomové práci Ing. B. Culka z r.1998, která je k nahlédnutí na katedře dopravní infrastruktury DFJP Univerzity Pardubice.

7. Evaluace stávajících mostů

Zatímco pro návrh nových konstrukcí je pravděpodobnostní přístup dostatečně rozvinut, pro posuzování stávajících konstrukcí je teprve v počátcích. Dále uvádíme některé výpočtové postupy, publikované v poslední době:

Nowak [9] publikoval výsledky grandiózního výzkumu provedeného v USA, jehož cílem bylo stanovit provozní spolehlivost stávajících dálničních mostů. Omezil se na trémové mosty ocelové, spřažené, železobetonové a předpjaté železobetonové mosty. Provedl statistickou analýzu všech základních náhodně proměnných veličin. Tabelaizované jsou bias faktory λ (poměr průměrné a nominální hodnoty sledované veličiny) a variační koeficienty v . Rozlišuje se mezi stálým zatížením u prvků vyrobených v dílně a na staveništi a dlouhodobým nahodilým zatížením. Při výpočtu statistických charakteristik nahodilého zatížení provozem se zohledňuje rozpětí a časová perioda, pro kterou je analýza provedena. Výsledky jsou uvedeny pro rozpětí 3 až 60 m. Vyšetřování bylo provedeno pro různé časové periody (1 rok, 5 a 75 roků). Nominální zatížení bylo bráno

podle AASHTO; λ s rozpětím stoupá (1,37 až 1,78 pro časovou periodu 1 rok), v se s rozpětím prakticky nemění (1,14); λ s prodlužováním časové periody stoupá. Odolnost je určena podle vztahu

$$R=R_n MFP \quad (9)$$

kde R_n je nominální pevnost, M vyjadřuje pevnostní odchylky, F rozměrové odchylky a P vliv přesnosti analýzy. Je zajímavé, že vliv přesnosti analýzy je větší než vliv rozptylu pevnosti. Při spolehlivostní analýze se vycházelo ze vztahu (1) a (6b).

Spolehlivost stávajících mostních konstrukcí se stala námětem řešení výzkumné úlohy v rámci GA ČR, zpracovávané kolektivem pracovníků katedry dopravní infrastruktury DFJP Univerzity Pardubice. Výsledky byly prezentovány na jiných fórech [13], jsou zde proto uvedeny jen některé hlavní výsledky. Byly specifikovány zvláštnosti pravděpodobnostního přístupu při posuzování stávajících konstrukcí, bylo analyzováno provozní zatížení na vybrané železniční trati snímkováním skutečného zatížení v období jednoho týdne, přičemž byl využit systém CEVIS, používaný u ČD, byla provedena matematická simulace provozní zatížitelnosti podle (3) s využitím metody MONTE-CARLO. Byla provedena analýza návrhové pravděpodobnosti poruchy a návrhové indexy spolehlivosti s ohledem na věk konstrukce, způsob prohlídek a její udržovací stav jak pro silniční, tak i pro železniční mosty a byly provedeny kontrolní výpočty. Bylo zjištěno, že v určitých případech je možno novým přístupem oproti dosavadnímu deterministickému pojetí dosáhnout úspor až 20 %. Úskalím metody je zatím nedostatečná databáze vstupních údajů pro statistické vyhodnocení.

Po dlouhém váhání zvláště ze strany západoevropských zemí je dnes při tvorbě norem pravděpodobností přístup všeobecně akceptován a tvoří základ nově vznikajících euronorem (ENV, 1993).

Zajímavým pokusem o použití pravděpodobnostního přístupu při posouzení dálničních mostů v Kanadě je kanadská norma pro přepočet dálničních mostů [1] Návrhový index spolehlivosti β_d je zde funkcí významnosti posuzovaného prvku pro selhání celého systému, způsobu poruchy, druhu inspekce a zatížení.

8. Závěr

V důsledku nedostatku finančních prostředků na investice a rekonstrukce objektů dopravní infrastruktury nabývá posouzení stávajících konstrukcí v poslední době na významu. Deterministické metody jsou již zastaralé, neodpovídají duchu dnešních norem pro navrhování a neumožňují plně využít všechny rezervy konstrukcí. Posouzení stávajících konstrukcí má svoje specifika, která je nutno při výpočtu zohlednit. Pravděpodobnostní metody umožňují přílehavější a přesnější stanovení spolehlivosti konstrukcí. Pro jejich aplikaci v praxi však bude třeba především, naplnit databáze statistických parametrů, vstupujících do výpočtu. Je třeba říci, že použití moderních výpočtových metod umožňuje jen přesnější stanovení spolehlivosti provozovaných mostních konstrukcí a odhalení skrytých rezerv, v žádném případě však neopravňuje k tomu, aby nebyla prováděna potřebná údržba a rekonstrukce mostů, které jsou v dezolátním stavu, nebo které svým konstrukčním řešením nevyhovují novým provozním podmínkám. Příkladem může být přestavba některých mostů s mostnicemi na prvním železničním koridoru, které i přes svoji relativně vysokou zatížitelnost ohrožovaly bezpečnost jízdy při vysokých rychlostech.

Příspěvek vyplynul z řešení výzkumné úlohy č. 103/97/0139s podporou GAČR

Literatura:

- [1] ALLEN, D. E.: Canadian highway bridge evaluation: reliability index. Canadian Journal of Civil Engineering 1992, str. 987-991
- [2] ČERMÁK, M.: Stav mostů ve správě ČD. In: Mosty 1998, sborník ze 3. mezinárodního sympózia, Brno 1998, str. 9-14
- [3] ČSN 73 6203: Zatížení mostů. Vydavatelství ÚNM Praha, 1986
- [4] ČSN 73 6205: Navrhování ocelových mostních konstrukcí. vydavatelství ÚNM Praha,

- [5] ENV 1993-1-1 EUROCODE 3. Design of steel structures. Part 1.1: General rules and rules for buildings. Brussels, CEN 1992
- [6] KRÁSA, D.: Programový systém CASANDRA. In: Železniční mosty - správa a výstavba. Sborník příspěvků. Vydala SUPOP Praha a.s., 1995, s. 27-31
- [7] MAREK, P. et al. (1995): Simulation-Based Reliability Assessment for Structural Engineers. CRC Press, Boca Raton, Florida
- [8] MRÁZIK, A.: Teória spoľahlivosti ocelových konštrukcií, nakl. VEDA, Bratislava 1998
- [9] NOWAK, A.: Reliability-based EVALUATION of existing Bridges. In IABSE Colloquium Copenhagen 1993, Remaining Structural Capacity, str. 275-282
- [10] NOWAK, S.: Calibration of LRFD Bridge Code. Journal of Structural Engineering, august 1995, p.1245-1251
- [11] ČD SR 5(S): Určování zatížitelnosti železničních mostů
- [12] ŠERTLER, H.-VIČAN, J.-SLAVÍK, J.: Spolehlivost stávajících mostních konstrukcí. In: Nové požadavky na stavby a jejich spolehlivost, 1994
- [13] ŠERTLER, H.-VIČAN, J.-SLAVÍK, J.: Compression Resistance of Steel Structure Members. In: Stability of Steel Structure Vol. I. Ed. Miklós Iványi, Budapest 1995, str. 1/71-1/77
- [14] ŠERTLER, H.-VIČAN, J.: Nové přístupy k hodnocení stávajících železničních mostů. Nová železniční technika 1996, č. 1, s. 9-11
- [15] TEPLÝ, B. - NOVÁK, D.: Consequence of uncertainty of input data on engineering software reliability. Software for Engineering Workstations, 1989, Volume 5, January p. 33-34
- [16] TOMICA, V.: Intervaly prohlídek konstrukcí se zaměřením na únavové trhliny. In: Sborník z konf. Ocelové konstrukce a mosty 97, str. 4-67
- [17] TOMICA, V.-SOKOLÍK, A.-ZEMKO, Š.: Údržba a rekonštrukcia mostov. Alfa Bratislava, 1992
- [18] VIČAN, J. - ŠERTLER, H.: Hodnocení nosných konstrukcí stávajících železničních mostů. In: Sborník z konf. 18th Czecho-Slovak International Conference on Steel Bridges '97, str. 41-46
- [19] MENČÍK, J.: Analýza a vytváření spolehlivosti konstrukcí. In Sborník z konference Engineering Mechanics 97 (Svratka 97) ÚTAM AV ČR, Praha, díl I, str. 141-146
- [20] BAILEY, F.: Traffic Action Effect Reduction Factors for Bridges Evaluation. In: IABSE WORKSHOP LAUSANNE 1997 "Evaluation of Existing Steel and Composite Bridges". IABSE Reports-, Volum 76, 1997, Zürich, str. 79-87