

STABILITY ASSESSMENT OF STEEL FRAMES USING SBRA METHOD

V. Křivý*, P. Marek**

Summary: *This paper is concerned with the reliability assessment of steel frame structures using the probabilistic SBRA method documented in the book (Marek at al., 1996). Advances in computer technology make it possible to utilize the potential of the SBRA method not only for the reliability assessment of simple structures and their components, but also for the reliability assessment of more complex, statically indeterminate frame structures. In this connection attention is paid to the transition from the traditional assessment of buckling strength in compliance with contemporary standards (based on determining buckling lengths and buckling factors) to the SBRA based strength stability concept applying the second order theory.*

1. Úvod

Předmětem příspěvku je aplikace pravděpodobnostní metody SBRA v oblasti stabilitních posudků ocelových prutových konstrukcí. V této souvislosti je věnována pozornost přechodu od tradičního posudku vzpěrné pevnosti podle současných norem (vzpěrné délky, součinitele vzpěrnosti) k pevnostnímu pojetí při respektování účinků zatížení v souladu s teorií druhého řádu. Pozornost je zaměřena především na problematiku vhodného modelování konstrukce pro výpočet účinků zatížení podle teorie druhého řádu, na zavedení nahodile proměnných veličin do výpočtu, na jejich vzájemnou interakci, dále pak na možnosti a způsoby vyhodnocení spolehlivosti prutové konstrukce a jejich částí. Problematika stabilitního posudku spolehlivosti ocelových prutových konstrukcí je v první části příspěvku vysvětlena na posudku modelového šestipodlažního rovinného rámu, viz obr. 1. V druhé části příspěvku jsou uvedeny výsledky srovnávací studie, ve které byl zkoumán vliv uložení sloupů k základové konstrukci (vetknutí, kloubové uložení, polotuhé uložení) a vliv uložení příčlí ke sloupům (monolitické či polotuhé) na posudek spolehlivosti rámové konstrukce a jejich komponent.

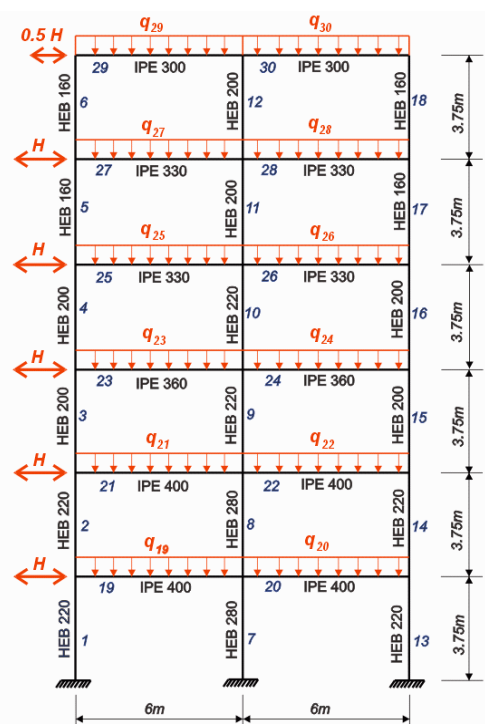
2. Posudek spolehlivosti rámové konstrukce

Schéma rovinné rámové konstrukce zatížené systémem horizontálních sil (od zatížení větrem) a vertikálních rovnoměrně rozložených spojitých zatížení (od zatížení stálého, užitného a zatížení sněhem) je znázorněno na obr. 1. Předpokládá se, že materiálové vlastnosti oceli (mez kluzu), lokální a globální imperfekce prutové soustavy a jednotlivá zatížení jsou

* Ing. Vít Křivý: VŠB-TU Ostrava, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí; L. Poděšť 1875; 708 33 Ostrava-Poruba; email: vit.krivy@vsb.cz

** Prof. Ing. Pavel Marek, DrSc.: ÚTAM AV ČR; Prosecká 76; 190 00 Praha 9 a VŠB-TU Ostrava, Fakulta stavební, Katedra stavební mechaniky; L. Poděšť 1875; 708 33 Ostrava-Poruba; email: marekp@itam.cas.cz

vzájemně statisticky nezávislé veličiny. Délka prutů, průřezové charakteristiky a tuhosti přípojí jsou v uvedeném příspěvku uvažovány jako konstantní hodnoty. Dále se předpokládá, že konstrukce je zajištěna proti vybočení z roviny rámu.



Obrázek 1: Schéma geometrie a zatížení rámu

Jednotlivá zatížení působící na konstrukci jsou uvažována jako vzájemně nezávislá a jsou vyjádřena, v souladu s postupy metody SBRA, křivkami trvání zatížení a odpovídajícími histogramy (Marek at al., 2003). Zatížení jsou blíže specifikována v Tabulce 1. Zatížení užité je složeno ze dvou částí – zatížení nahodilého krátkodobého (např. zatížení osobami) a zatížení nahodilého dlouhodobého (např. nábytek). Histogramy reprezentující jednotlivá zatížení jsou převzaty z databáze uvedené v (Marek at al., 2003). Stálá zatížení byla uvažována tak, že v každém podlaží rámu se předpokládá stejná hodnota zatížení pro levý i pravý trakt budovy. Hodnoty dalších nahodile proměnných zatížení (zatížení nahodilé krátkodobé, nahodilé dlouhodobé a zatížení sněhem) jsou všechna uvažována jako statisticky nezávislá, tj. v jednom podlaží jsou vzájemně nezávislá pro levý a pravý trakt budovy.

Tabulka 1: Zatížení konstrukce

Zatížení			
Symbol	Popis	Maximální hodnota	Použitý histogram
q_{19}, q_{20}	Zatížení stálé	20 kN/m	Dead1.dis
q_{21}, q_{22}	Zatížení nahodilé krátkodobé	15 kN/m	Short1.dis
q_{23}, q_{24}	Zatížení nahodilé dlouhodobé	20 kN/m	Long1.dis
q_{25}, q_{26}			
q_{27}, q_{28}			
q_{29}, q_{30}	Zatížení stálé	20 kN/m	Dead1.dis
	Zatížení sněhem	20 kN/m	Short1.dis
H	Zatížení větrem	45 kN	Wind1.dis

Sloupy rámu jsou navrženy z válcovaných průřezů HEB, příčle z válcovaných průřezů IPE, viz obr 1. Ocel je třídy S235 JRG2. Hodnota meze kluzu oceli f_y je reprezentována histogramem *DS235Fy01.dis*, viz práce (Rozlívka et al., 2003). Přípoje nosníků na sloupy konstrukce jsou uvažovány jako ideálně tuhé, rovněž uložení sloupů k základové konstrukci je uvažováno jako ideálně tuhé.

Má-li být konstrukce posouzena pouze z pevnostního hlediska (bez potřeby vyčíslení vzpěrných délek a stanovení součinitelů vzpěrnosti), je nutné konstrukci posoudit podle teorie druhého řádu, přičemž již od počátku musí být konstrukce sledována se všemi nedokonalostmi – imperfekcemi. V souladu s doporučeními normy (EN 1993-1-1, 2005) je možné všechny typy imperfekcí (geometrické, strukturální a konstrukční) zahrnout do jedné geometrické imperfekce. Tyto tzv. ekvivalentní geometrické imperfekce lze rozdělit do dvou skupin, a sice na globální ekvivalentní geometrické imperfekce prutové soustavy a lokální ekvivalentní geometrické imperfekce prutů.

Ekvivalentní geometrické imperfekce soustavy ve formě počátečního natočení rámu Φ je v řešeném příkladu zavedena pomocí useknutého histogramu s normálním rozdělením $N(\mu = 0, \sigma = 1 / 1103)$ a hraničními hodnotami $\Phi_{Max} = \pm 1 / 368$ (rad). Hodnota Φ_{Max} je stanovena pro posuzovaný rám v souladu s doporučením normy (EN 1993-1-1, 2005). Ekvivalentní geometrické imperfekce prutů jsou podle výše uvedené normy uvažovány počátečním prohnutím prutů s hodnotou maximální výchylky e_0 uprostřed prutu. Pro sloupy rámu jsou hodnoty počátečního průhybu e_0 reprezentovány useknutými histogramy normálního rozdělení $N(\mu = 0, \sigma = 0.005)$ s hraničními hodnotami $e_{0,Max} = \pm 0.015$ (m). Pro příčle rámu jsou hodnoty e_0 vyjádřeny histogramy normálního rozdělení $N(\mu = 0, \sigma = 0.0067)$ s hraničními hodnotami $e_{0,Max} = \pm 0.02$ (m). Hodnoty $e_{0,Max}$ jsou vypočteny podle doporučení uvedených v normě (EN 1993-1-1, 2005).

V dalším textu jsou stručně popsány hlavní principy a postupy pravděpodobnostního posouzení spolehlivosti ocelové rámové konstrukce metodou SBRA. Pozornost je věnována především interakci nahodile proměnných veličin (u rámu je řešena interakce 89 nahodile proměnných), dále zavedení imperfekcí do analýzy konstrukce a pravděpodobnostnímu vyhodnocení únosnosti a použitelnosti konstrukce.

Při posudku konstrukce podle metody SBRA je v každém simulačním kroku vygenerován nový vektor nahodile proměnných veličin (zatížení, mez kluzu oceli, imperfekce). Tento postup umožňuje snadné provedení globální analýzy podle teorie druhého řádu včetně přímého započítání vlivu ekvivalentních geometrických imperfekcí na odezvu konstrukce na zatížení. Je-li analýza konstrukce provedena podle teorie druhého řádu se započtením vlivu lokálních a globálních imperfekcí, pak je možno provést posudek únosnosti jednotlivých průřezů konstrukce pouze z pevnostního hlediska. Stabilitní posudek únosnosti se tak stane více transparentní a jednodušší. Odpadá problematika mnohdy nesnadného a nepřesného určení vzpěrných délek. Například u rámu s polotuhými spoji a polotuhým uložením sloupů může být správné stanovení vzpěrných délek sloupů značně problematické.

Provedení nelineární analýzy konstrukce se započtením vlivu všech imperfekcí je naopak prakticky nemožné podle současného deterministického pojetí, založeného na metodě dílčích součinitelů (EN 1990, 2002). Hlavním problémem je výrazný nárůst možných kombinací lokálních a globálních imperfekcí prutové soustavy. Uvážíme-li vliv všech imperfekcí, je počet možných imperfektních stavů popsán rovnicí $N = 2^{(i+1)}$, kde i je počet prutů soustavy. Pro rám znázorněný na obr. 1 lze nalézt více než 2 miliardy možných kombinací! Tyto imperfektní stavy by se měly dále kombinovat s jednotlivými zatíženími specifikovanými na

začátku kapitoly. K tomuto je nutno navíc dodat, že kombinační vzorce uvedené v (EN 1990, 2002) slouží pouze ke kombinování jednotlivých zatížení, na princip kombinování imperfekcí již není v normě pamatováno. Je tedy zřejmé, že využití metody dílčích součinitelů není příliš vhodné pro pevnostní přístup k řešení stabilitních problémů ocelových prutových konstrukcí. Na druhou stranu pevnostní koncepce ve spojení se simulační metodou SBRA mohou dohromady vytvořit velmi výstižný, efektivní, přitom však transparentní a principiálně jednoduchý aparát k řešení stabilitních problémů prutových konstrukcí.

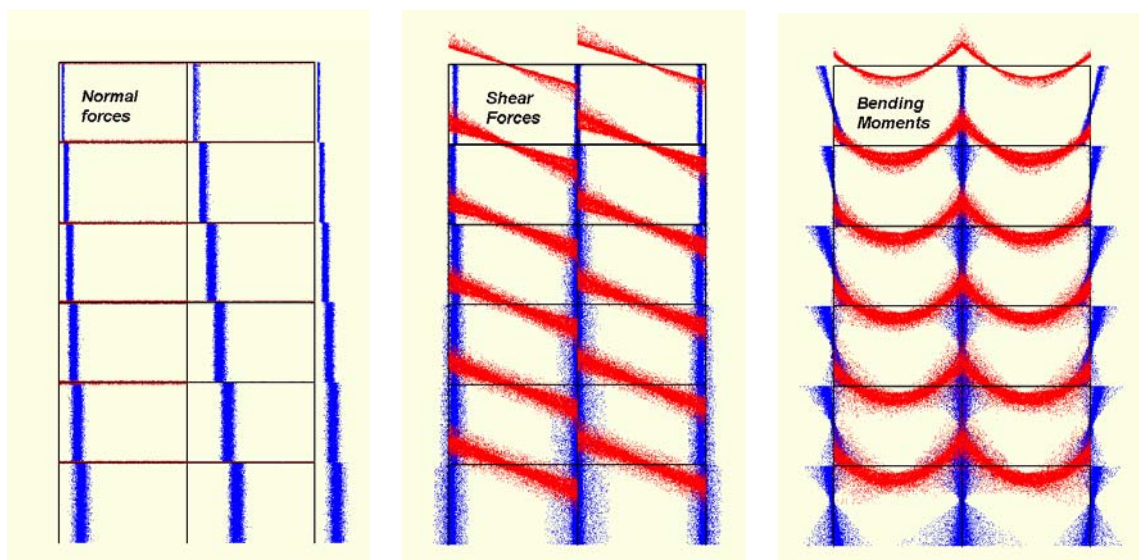
Vyjádření podmínky únosnosti metodou SBRA je obecně založeno na porovnání spočtené pravděpodobnosti poruchy P_f a návrhové pravděpodobnosti P_d pro mezní stav únosnosti. Je-li únosnost posuzovaného průřezu vztažena k dosažení meze kluzu v nejvíce namáhaných vláknech, lze zapsat podmínku spolehlivosti ve tvaru

$$P_f = P[(F_y - \sigma) < 0] < P_d. \quad (1)$$

Za předpokladu pružné odezvy konstrukce na zatížení je hodnota maximálního napětí σ v krajních vláknech průřezu popsána rovnicí

$$\sigma = \text{abs}\left(\frac{M}{W}\right) + \text{abs}\left(\frac{N}{A}\right), \quad (2)$$

kde M (kNm) a N (kN) jsou hodnoty ohybového momentu a normálové síly v posuzovaném průřezu (spočtené podle teorie druhého řádu na imperfektní soustavě), W (m³) a A (m²) jsou příslušné průřezové charakteristiky. Lze předpokládat, že při pružném působení konstrukce budou účinky posouvající síly přeneseny střední, méně napjatou, částí průřezu.

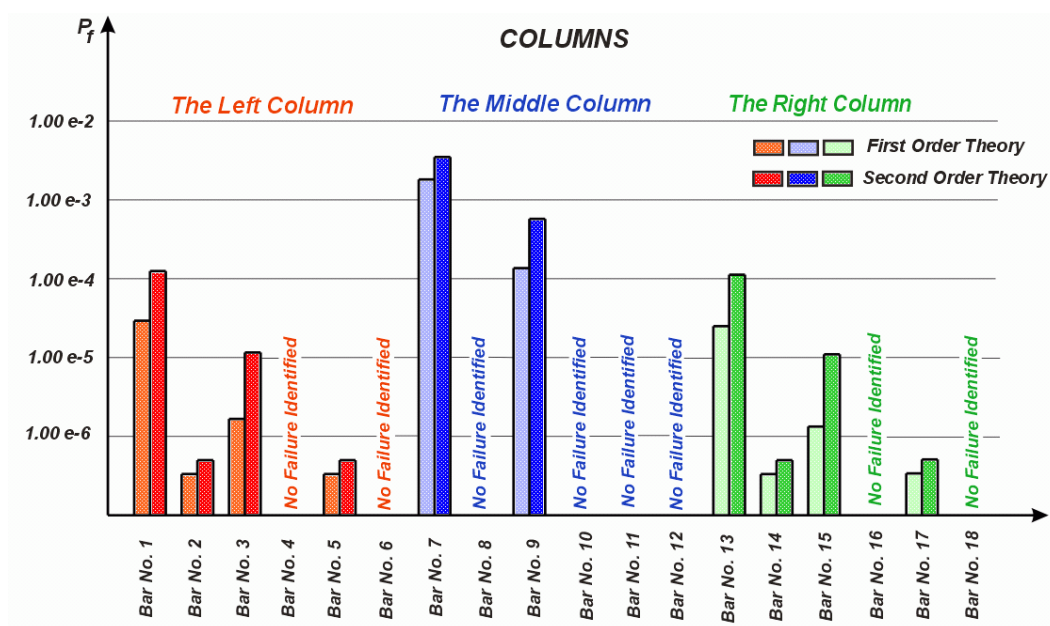


Obrázek 2: Rozptyl vnitřních sil a ohybových momentů

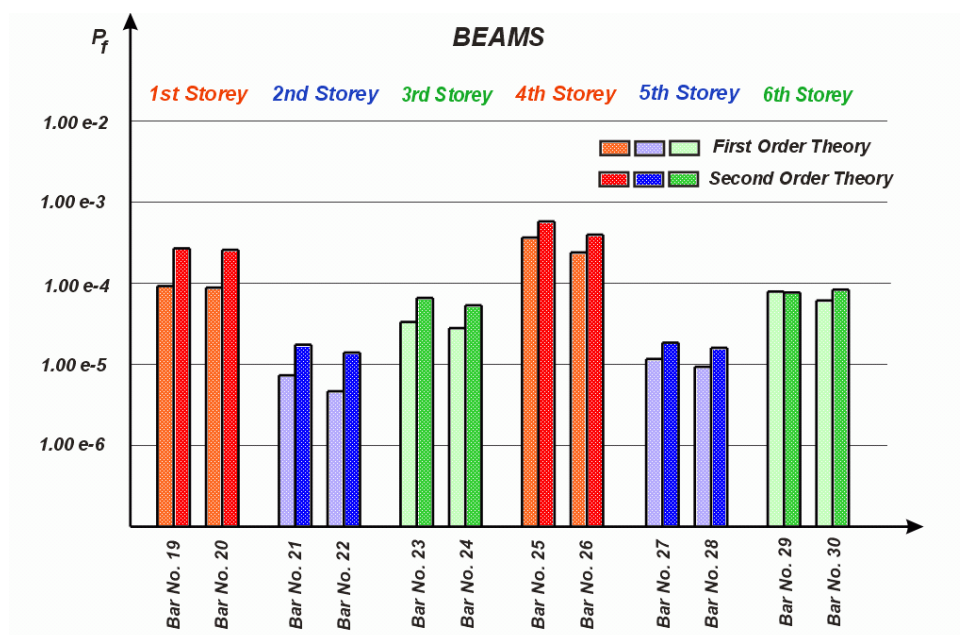
Pro provedení vizuální kontroly výsledků pravděpodobnostní analýzy konstrukce je možné nechat vykreslit rozptyl účinků zatížení pomocí množiny bodů, tzv. „mravenců“, odpovídajících kombinacím jednotlivých vstupních nahodile proměnných veličin. Výsledné rozptyly ohybových momentů a vnitřních sil jsou znázorněny na obr. 2. Průběhy byly získány programem MCD 1.0 (Křivý, 2005).

Posudek únosnosti konstrukce podle rovnice (1) byl rovněž proveden programem MCD 1.0. Prostou metodou Monte Carlo bylo vygenerováno 10 miliónů simulačních kroků.

Aby bylo možno vyjádřit vliv stabilitních účinků (odpovídajících teorii druhého řádu), byl výpočet pravděpodobnosti poruchy proveden ve dvou variantách, tj. podle teorie prvního a druhého řádu. Stabilitní účinky tak lze přímo vyjádřit jako rozdíl ve spočtených pravděpodobnostech poruchy podle obou uvedených postupů. Výsledky studie jsou znázorněny na obr. 3 a 4. Na obrázcích jsou v logaritmickém měřítku vykresleny hodnoty pravděpodobnosti poruchy vztahující se k nejvíce namáhanému průřezu prutu. V grafech uvedených na obrázcích 3 a 4 lze velmi snadno identifikovat pruty, které nesplňují podmínku spolehlivosti (1) nebo naopak pruty, které jsou zbytečně naddimenzovány.

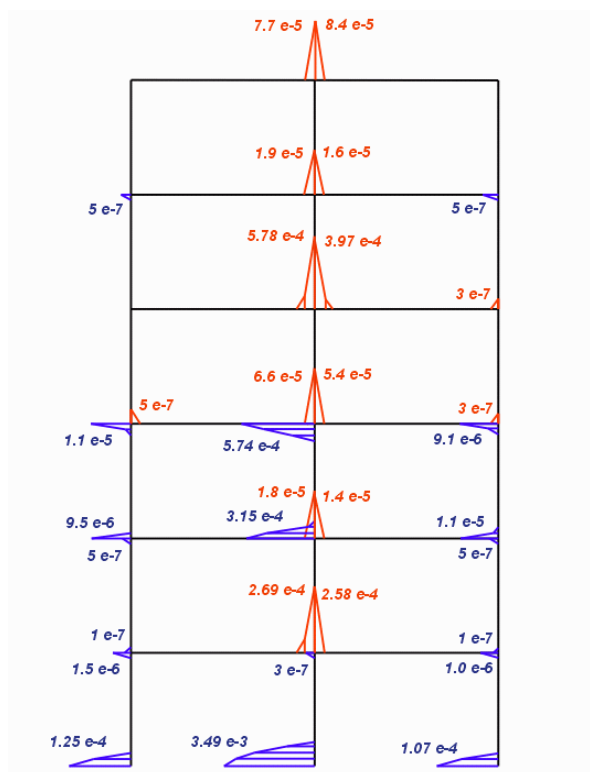


Obrázek 3: Hodnoty pravděpodobnosti poruchy – sloupy



Obrázek 4: Hodnoty pravděpodobnosti poruchy – příčle

Program MCD 1.0 umožňuje provedení výpočtu pravděpodobnosti poruchy v libovolném průřezu posuzované konstrukce. Toho lze využít pro vykreslení výsledků pomocí tzv. „křivek pravděpodobnosti poruchy“, viz obr. 5 (křivky odpovídají výpočtu podle teorie druhého řádu). Pomocí křivek pravděpodobnosti poruchy lze velmi jednoduše identifikovat místa v konstrukci, ve kterých hrozí zvýšené riziko překročení mezního stavu. Statik tak získá rychlý přehled o úrovni spolehlivosti jednotlivých prvků konstrukce. Získaná průběhy pravděpodobnosti poruchy společně se sloupcovými grafy (viz obr. 3 a 4) lze využít pro snadnou a rychlou optimalizaci návrhu prvků konstrukce.



Obrázek 5: Křivky pravděpodobnosti poruchy

Posudek použitelnosti rámové konstrukce je v řešeném příkladu rozdělen do dvou oblastí, tj. na posouzení vodorovného průhybu nejvyšší části rámu a na posouzení svislých průhybů příčlí. Kritérium použitelnosti vztažené k překročení tolerovatelné vodorovné deformace horních styčníků rámu w_{lim} lze zapsat ve tvaru

$$P_f = P[(w_{lim} - w) < 0] < P_d, \quad (3)$$

kde w je hodnota výsledného vodorovného posuvu horních styčníků rámu spočtená podle teorie druhého řádu, P_f je spočtená pravděpodobnost poruchy a P_d návrhová pravděpodobnost pro mezní stav použitelnosti (liší se od P_f pro mezní stav únosnosti). V řešeném příkladu je w_{lim} zavedena hodnotou $w_{lim} = H/200$, kde H je výška rámu. Spočtená hodnota pravděpodobnosti poruchy pro 10 miliónů simulačních kroků je $P_f = 1.85 \cdot 10^{-2}$. Pro srovnání pravděpodobnost poruchy spočtená podle teorie prvního řádu je rovna $P_f = 1.26 \cdot 10^{-2}$.

Posudek použitelnosti vodorovných nosníků lze vztáhnout k překročení dovoleného svislého průhybu příčle $w_{lim,Beam}$. V řešeném příkladu je $w_{lim,Beam}$ zavedeno hodnotou $w_{lim,Beam} = L/300$, kde L je délka příčle. Podmínka použitelnosti je vyjádřena vztahem

$$P_f = P[(w_{\text{lim. Beam}} - w_{\text{Beam}}) < 0] < P_d, \quad (4)$$

kde w_{Beam} je maximální hodnota svislého průhybu příčle spočtena podle teorie druhého řádu (místo maximálního průhybu se může lišit pro jednotlivé simulační kroky). Výsledky posudku použitelnosti příčlí jsou shrnuty v Tabulce 2.

Tabulka 2: Posudek použitelnosti příčlí – hodnoty P_f

<i>Prut č.</i>	P_f	<i>Prut č.</i>	P_f
18	4,0e-3	19	4,1e-3
20	4,1e-3	21	4,1e-3
22	7,7e-3	23	7,6e-3
24	1,62e-2	25	1,61e-2
26	2,06e-2	27	2,05e-2
28	1,79e-2	29	1,80e-2

3. Srovnávací studie

V následující kapitole jsou uvedeny a zhodnoceny výsledky srovnávací studie, ve které byl zkoumán vliv uložení sloupů a příčlí (ideálně tuhé, kloubové, polotuhé) na posudek spolehlivosti rámové konstrukce a jejich prvků. V rámci studie byl proveden pravděpodobnostní posudek spolehlivosti (únosnosti a použitelnosti) rámu znázorněného na obr. 1 při uvažování čtyř různých variant uložení sloupů a příčlí:

1. Rám s ideálně tuhým uložením sloupů k základové konstrukci a s ideálně tuhými přípoji příčlí ke sloupům, viz kapitola 2.
2. Rám s ideálně kloubovým připojením sloupů k základové konstrukci a s ideálně tuhými přípoji příčlí ke sloupům.
3. Rám s polotuhým uložením sloupů k základové konstrukci a s ideálně tuhými přípoji příčlí ke sloupům.
4. Rám s polotuhým uložením sloupů k základové konstrukci a s polotuhými přípoji příčlí ke sloupům.

Hodnoty počátečních ohybových tuhostí $S_{j,\text{ini}}$ pro polotuhé připojení sloupů k základové konstrukci byly odhadnuty podle (Wald & Sokol, 1999). Uvažuje se přípoj s nevyztuženou kotevní deskou tloušťky 30mm a dvěma páry kotevních šroubů, přičemž se předpokládá lineární závislost mezi hodnotou působícího ohybového momentu a příslušným natočením přípoje. Dále se zjednodušeně předpokládá, že hodnoty počáteční ohybové tuhosti $S_{j,\text{ini}}$ jsou stejné pro všechny kombinace ohybového momentu a normálové síly v patce sloupu. U krajních sloupů je hodnota počáteční tuhosti rovna $S_{j,\text{ini}} = 24 \text{ MNm/rad}$, u prostředního sloupu je tuhost $S_{j,\text{ini}} = 36 \text{ MNm/rad}$.

Hodnoty počátečních ohybových tuhostí $S_{j,\text{ini}}$ pro polotuhé připojení příčlí ke sloupům konstrukce (styčník s čelní deskou, třemi řadami šroubů a příčnými výztuhami sloupů) byly odhadnuty podle (Wald & Sokol, 1999) a jsou uvedeny v Tabulce 3. V řešené studii se předpokládá lineární závislost mezi působícím ohybovým momentem a odpovídajícím natočením příčle.

Tabulka 3: Hodnoty ohybových tuhostí pro styčníky příčle-sloup

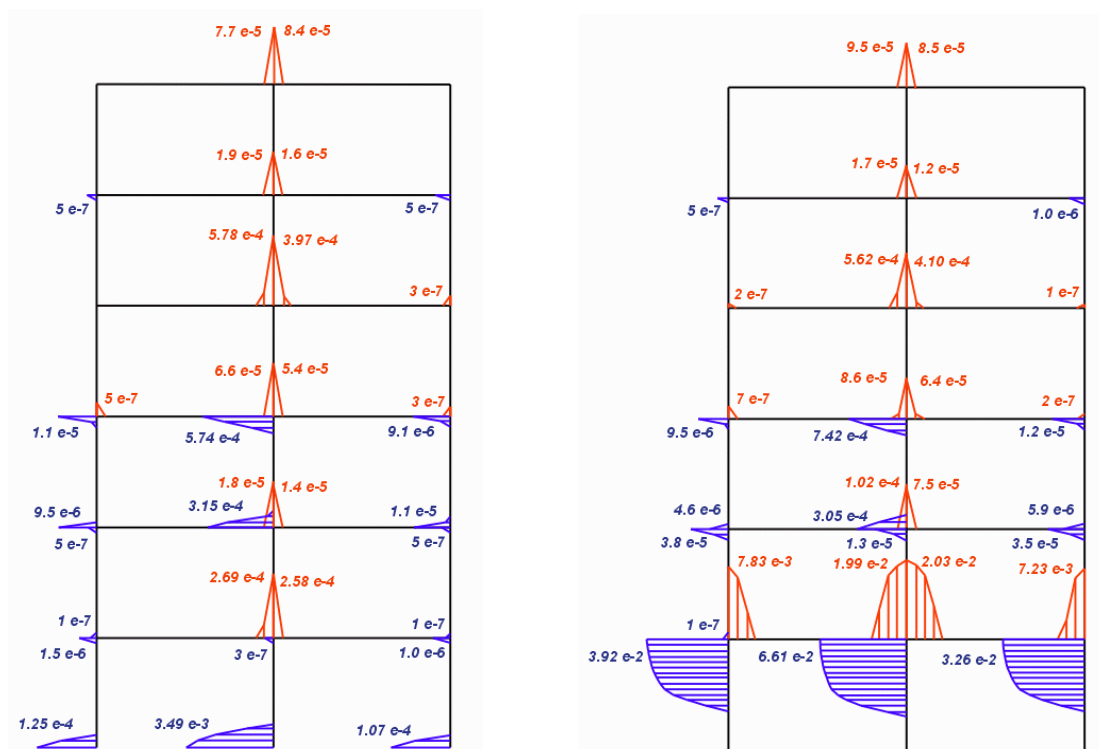
Prut č.	$S_{j.ini} (MNm/rad)$		Prut č.	$S_{j.ini} (MNm/rad)$	
	Levý styčník	Pravý styčník		Levý styčník	Pravý styčník
18	59	224	19	224	59
20	59	224	21	224	59
22	45	135	23	135	45
24	38	114	25	114	38
26	32	106	27	106	32
28	27	88	29	88	27

Výsledky studie z hlediska posouzení mezního stavu únosnosti jsou znázorněny na obr. 6, a obr. 7 pomocí křivek pravděpodobnosti poruchy odpovídajících výpočtu podle teorie druhého řádu. Pravděpodobnosti poruchy byly spočteny podle vztahu (1). Z obrázku lze vyzorovat výrazný vliv typu ukotvení sloupů na hodnoty pravděpodobnosti poruchy především u prutů nacházejících se ve spodní části rámu. Tato spodní část konstrukce je nejvíce ovlivněna typem kotvení sloupů.

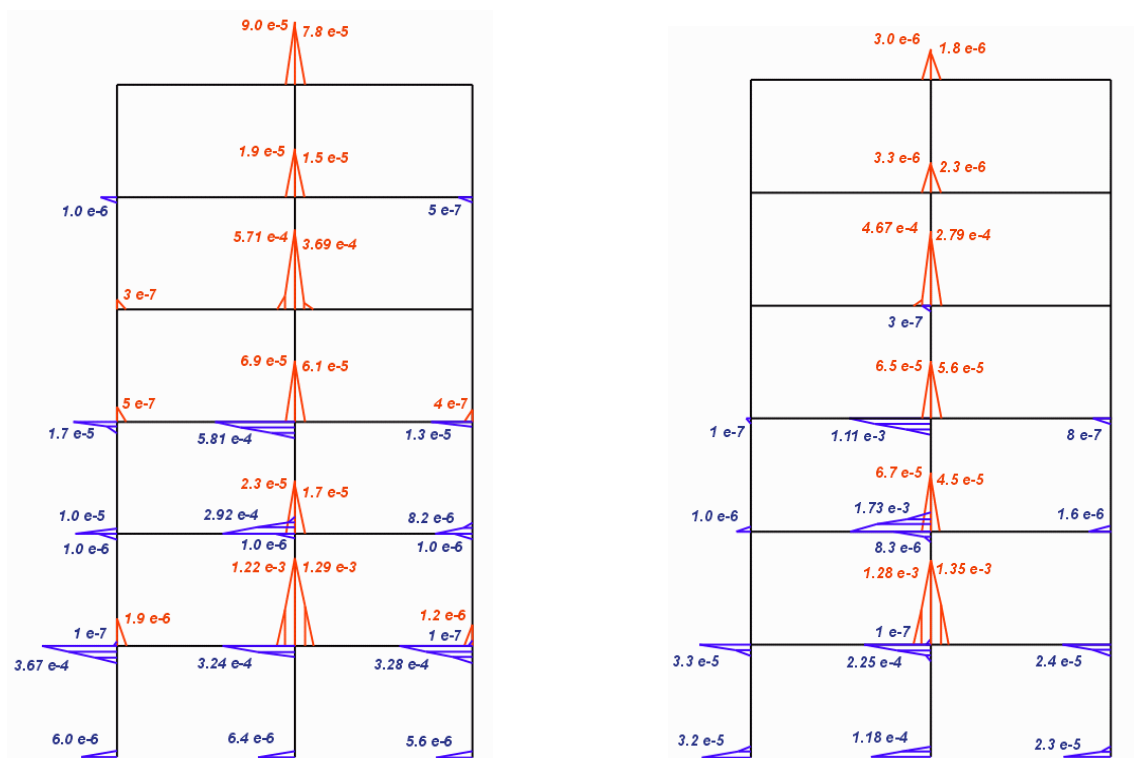
Velmi zajímavé je sledování průběhu křivek pravděpodobnosti poruchy po délce jednotlivých prvků. Největší rozdíly se projevují především u třech sloupů v nejnižším podlaží konstrukce, které jsou vystaveny největším účinkům zatížení. U rámu s dokonale tuhým vetknutím sloupů se místo nejčtenějšího výskytu poruch nachází v oblasti kotvení sloupu, u rámu s ideálně kloubovým připojením jsou nejvíce namáhané průřezy v oblasti přípoje příčlí. Při návrhu konstrukce s polotuhým uložením sloupů jsou místa výskytu pravděpodobnosti poruchy přibližně rovnoměrně rozložena ve spodní i horní části sloupu, přičemž hodnota maximální pravděpodobnosti poruchy je nižší než u předcházejících dvou případů. Toto pozorování lze vysvětlit menšími rozdíly v absolutních hodnotách ohybových momentů působících v místě polotuhého uložení sloupu a v místě přípoje vodorovných nosníků oproti rozdílům v hodnotách ohybových momentů u ideálně vetknutého či ideálně kloubově uloženého rámu.

Především rozdíl ve výsledcích u rámu s polotuhým uložením, které lépe vystihuje skutečné působení přípoje, a ideálně kloubovým uložením lze považovat za velmi významný. Lze tedy vyzorovat, že výstižnější zavedení působení spojů pomocí jejich momentově rotačních charakteristik do analýzy rámu může mít výrazný vliv na výsledné ohodnocení spolehlivosti jednotlivých prvků konstrukce. Pro odhad ohybové tuhosti běžných přípojů existuje v současnosti poměrně značné množství zdrojů (Wald & Sokol, 1999), včetně nové evropské normy (EN 1993-1-8, 2005).

Jako velmi výhodné se při řešení rámu s polotuhými spoji jeví provedení analýzy konstrukce podle teorie druhého řádu, tj. bez potřeby často velmi problematického stanovení vzpěrných délek sloupů. Pravděpodobnostní analýza konstrukce založená na výpočtu podle teorie druhého řádu, jejíž principy jsou blíže popsány v části 2, se tak může stát velmi efektivním nástrojem pro řešení rámu při respektování skutečného působení spojů. Pravděpodobnostní analýza rámu s polotuhými spoji metodou SBRA je uvedena v (Křivý & Marek, 2004), přičemž hlavní pozornost je v článku věnována závislosti mezi hodnotou ohybové tuhosti přípojů a účinky teorie druhého řádu.



Obrázek 6: Křivky pravděpodobnosti poruchy (vlevo: rám s ideálně tuhým uložením sloupů a s dokonale tuhými přípoji příčle-sloup; vpravo: rám s ideálně kloubovým ukotvením sloupů a s dokonale tuhými přípoji příčle-sloup)



Obrázek 7: Křivky pravděpodobnosti poruchy (vlevo: rám s polotuhým ukotvením sloupů a dokonale tuhými přípoji příčle-sloup; vpravo: rám s polotuhým ukotvením sloupů a s polotuhými přípoji příčle-sloup)

Z hlediska posouzení mezního stavu použitelnosti se studie zabývala porovnáním pravděpodobností poruchy odpovídajících překročení přípustného vodorovného posuvu horních styčníků rámu podle vztahu (3). Výsledky studie jsou shrnuty v tabulce 4. Podle očekávání je nejmenší hodnota spočtené pravděpodobnosti poruchy u rámu s vetknutými sloupy, naopak největší hodnota je u rámu s ideálními klouby. Pro možnost vyjádření vlivu teorie druhého řádu na posudek použitelnosti konstrukce jsou v tabulce rovněž uvedeny výsledky získané analýzou konstrukce podle teorie druhého řádu.

Tabulka 4: Hodnoty P_f – vodorovný průhyb rámu

Typ konstrukce	P_f první řád	P_f druhý řád
Vetknutý rám s tuhými přípoji příčle-sloup	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-2}$
Kloubově uložený rám s tuhými přípoji příčle-sloup	$5,36 \cdot 10^{-2}$	$6,86 \cdot 10^{-2}$
Rám s polotuhým uložením sloupů a tuhými přípoji příčle-sloup	$2,09 \cdot 10^{-2}$	$2,68 \cdot 10^{-2}$
Rám s polotuhým uložením sloupů a polotuhými přípoji příčle-sloup	$3,94 \cdot 10^{-2}$	$4,82 \cdot 10^{-2}$

3. Závěr

Předkládaná práce si kladla za cíl seznámit čtenáře s alternativní možností pravděpodobnostního posudku spolehlivosti ocelových prutových konstrukcí metodou SBRA. Rychlý rozvoj a zdokonalování výpočetní techniky společně s rozvojem metody SBRA umožňuje postupný přechod od pravděpodobnostních posudků jednoduchých konstrukcí k řešení složitějších systémů jako jsou například staticky neurčité ocelové rámové konstrukce. Vzhledem k poměrně malým zkušenostem s pravděpodobnostním posudkem těchto konstrukcí je nutno vybudovat nově celý systém pravidel, podmínek a kritérií vedoucích, pokud možno k co nejpřesnější, kvantifikaci spolehlivosti posuzované konstrukce. Tím se ale současně otevírá možnost k přehodnocení a případné revizi některých ze stávajících normativních postupů vzniklých v době, kdy ještě nebylo možno plně využít potenciál výpočetní techniky.

Mezi oblastí, kterým je nutno věnovat zvýšenou pozornost při posudku spolehlivosti ocelových rámových konstrukcí metodou SBRA, patří možnost využití transformačních modelů pro stanovení účinků zatížení na přetvořené konstrukci, tj. výpočet odezvy konstrukce podle teorie druhého řádu. Tento postup umožňuje, kromě výstižnějšího stanovení účinků zatížení na konstrukci (vnitřní síly, deformace aj.), také možný přechod k posudku stabilitní bezpečnosti založenému na pevnostním pojetí při aplikaci teorie druhého řádu. Při výpočtu v souladu s teorií druhého řádu pak při vhodném zavedení ekvivalentních geometrických imperfekcí prutové soustavy a dílčích prutů zcela odpadá potřeba stanovení vzpěrných délek a součinitelů vzpěru. Statické posouzení prutové soustavy se tak výrazně zjednoduší, neboť stačí vyhledat průřezy vystavené největším účinkům zatížení (kombinace ohybových momentů, normálových a posouvajících sil) a v těchto průřezích pak provést vlastní posudek spolehlivosti např. v napětové formě.

V příspěvku jsou také stručně naznačeny možnosti grafického vyjádření výsledků pravděpodobnostní analýzy konstrukce. Pozornost je zaměřena na vyjádření výsledků posudku únosnosti rámové konstrukce pomocí křivek pravděpodobnosti poruchy, které v každém průřezu udávají hodnotu příslušné pravděpodobnosti poruchy. Využití křivek

pravděpodobnosti poruchy je v příspěvku demonstrováno na výsledcích studie, která se zaměřovala na stanovení vlivu různého typu přípojí sloup-základová konstrukce a příčlesloup na posudek spolehlivosti, viz obr. 6 a 7. Pro přehlednost je vhodné výsledky pravděpodobnostní analýzy zobrazit také pomocí sloupcových grafů uvedených na obr. 3 a 4. Oba způsoby vyjádření výsledků lze velmi efektivně využít k optimalizaci návrhu prvků konstrukce. Další možností vykreslení výsledků pravděpodobnostní simulační analýzy konstrukce, které slouží především k vizuální kontrole výsledků a k znázornění rozptylu účinků zatížení v závislosti na nahodilém charakteru vstupních veličin, je znázornění průběhu vnitřních sil, ohybových momentů a odpovídajících napětí pomocí tzv. „mravenců“, viz obr. 2.

4. Poděkování

Projekt byl realizován za finanční podpory ze státních prostředků prostřednictvím Grantové agentury České republiky. Registrační číslo projektu je 103/04/1451. Program MCD 1.0 byl zpracován v rámci řešení projektu Grantové agentury České republiky, registrační číslo projektu 103/05/H036.

5. Literatura

- EN 1990 (2002) *Basis of structural design*, CEN, Brussels.
- EN 1993-1-1 (2005) *Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*, CEN, Brussels.
- EN 1993-1-8 (2005) *Design of steel structures. Part 1-8: Design of joints*, CEN, Brussels.
- Křivý, V. (2005) *Počítačový program MCD 1.0*, VŠB-TU Ostrava, Ostrava.
- Křivý, V., Marek, P. (2004) Posudek spolehlivosti polotuhých styčníků ocelových konstrukcí. *Stavební obzor*, r. 13, č. 5, s. 132-137, ISSN 1210-4027.
- Marek, P., Brozzeti, J., Guštar, M., & Tikalsky, P. (2003) *Probabilistic Assessment of Structures using Monte Carlo Simulation. Basics, Exercises, Software. Second extended edition*. ITAM-CAS, Prague, Czech Republic, ISBN 80-86246-19-1.
- Marek, P., Guštar, M., & Anagnos, T. (1996) *Simulation-Based Reliability Assessment for Structural Engineers*, CCR Press, Boca Raton, Florida, ISBN 0-8493-8286-6.
- Rozlívka, L., Fajkus, M., & Konečný, P. (2003) *Starting a Data-base of Steel Properties Applicable in SBRA Based design*. Kapitola č. 26 v knize [2].
- Wald, F. & Sokol, Z. (1999) *Navrhování styčníků*. ČVUT, Praha, ISBN 80-01-02073-8.