

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební

Rozvojové projekty Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR
Rozvojové projekty mladých týmů – RPMT 2014



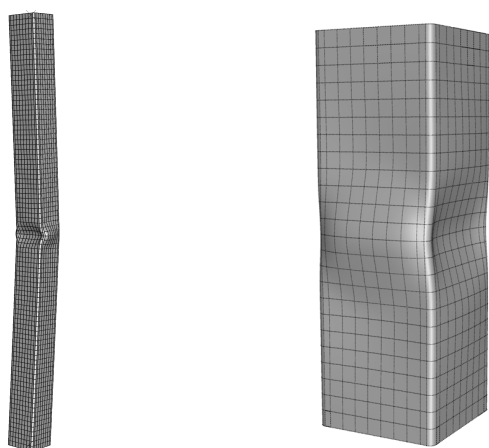
Projekt:

Využití pokročilého modelování konstrukcí v magisterském studiu

Hlavní řešitel: Ing. Michal Jandera, Ph.D.
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Výstup: Numerický model v programu *Abaqus*, jeho verifikace a validace

Analýza štíhlého průřezu a sloupu z korozivdorné oceli



Vypracovali: Ing. Michal Jandera, Ph.D., Ing. Martin Prachař
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Praha, 2014

Obsah

Obsah	2
1 Úvod	3
2 Popis problému	3
3 Tvorba skriptu	7
4 Porovnání jednotlivých druhů analýz s experimentem	11
4.1 Lineární pružnostní analýza (LA)	11
4.2 Geometricky nelineární pružnostní analýza (GNA)	11
4.3 Geometricky nelineární pružnostní analýza s imperfekcemi (GNIA)	11
4.4 Geometricky a materiálově nelineární analýza (GMNA)	11
4.5 Geometricky a materiálově nelineární analýza s imperfekcemi (GMNIA)	11
5 Ruční výpočet a porovnání	12
6 Celkové porovnání	15
Reference	17

1 Úvod

Tento studijní materiál si dává za cíl seznámit čtenáře s modelováním v programu ABAQUS a využitím numerických simulací pro různé druhy analýz ocelových konstrukcí. Detilnější komentáře a popis zadání do programu lze nalézt v dokumentu „Analýza nosníku štíhlého průřezu za požáru“. Popis analýz je shrnut v tabulce 1.

Druh analýzy	Ohybová teorie	Materiál	Geometrie
Lineární pružností analýza (LA)			
Lineární bifurkační analýza (LBA)	lineární	lineární	ideální
Geometricky nelineární pružnostní analýza (GNA)	nelineární	lineární	ideální
Materiálově nelineární pružnostní analýza (MNA)	lineární	nelineární	ideální
Geometricky a materiálově nelineární analýza (GMNA)	nelineární	nelineární	ideální
Geometricky nelineární pružnostní analýza s imperfekcemi (GNIA)	nelineární	lineární	imperfektní
Geometricky a materiálově nelineární analýza s imperfekcemi (GMNIA)	nelineární	nelineární	imperfektní

Tab. 1: Druhy analýz dle ČSN EN 1993-1-7 [2]

Typ zvolené analýzy je vždy závislý na řešeném problému a do značné míry ovlivňuje jeho výsledky. Z hlediska uvážení účinků přetvořené geometrie lze postupovat lineárně (rovnice rovnováhy jsou sestaveny na počáteční geometrii konstrukce), nebo geometricky nelineárně. Geometricky nelineární analýza používá rovnice rovnováhy na deformované konstrukci a nelineární geometrické vztahy (přibližně lze použít lineární geometrické vztahy jako u lineární analýzy a řešení se potom nazývá teorie 2. řádu; naopak lineární analýza se označuje jako řešení 1. řádu) [3].

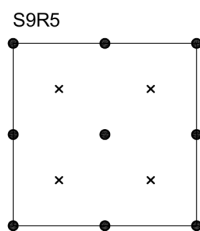
2 Popis problému

Předmětem úlohy je stanovit únosnost krátkého sloupku, kde je vliv vzpěru zanedbatelný a jeho únosnost se tedy rovná únosnosti průřezu, dále pak dlouhého sloupu, kde je vliv vzpěru třeba uvažovat (ikdyž i zde je poměrně malý).

Úloha je provedena na základě experimentů provedených Gardnerem a publikovaných v [4]. Jedná se o sloupky z korozivzdorné oceli 1.4301 a průřezu čtvercové trubky 150x150x4 mm. Takový průřez je štíhlý a dle normy EN 1993-1-4 [1] charakterizován jako štíhlý (třída 4) a je u něj nutné uvážit vliv lokálního boulení.

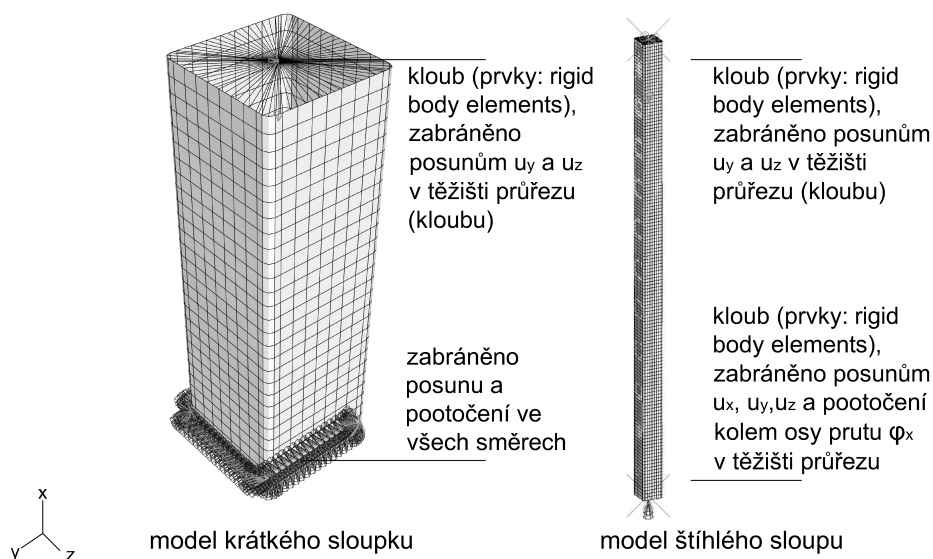
Pro model byl s ohledem na štíhlost stěny výrazně převyšující poměr šířky ku tloušťce hodnotu 15 byl zvolen deskostěnnový prvek S9R5. Ten na rozdíl od běžnějšího prvku S4 využívá devíti uzlů, kvadratické aproximace a redukované integrace. Schéma uzlů a untegračních bodů je na obr. 1. Důvodem k jeho použití byla kromě efektivního času výpočtu zejména možnost modelovat co nejvěrněji geometrii zakřivení v rozích.

Model pro krátký a dlouhý sloup uvažoval odlišné okrajové podmínky v souladu s provedeným výpočtem. Zatím co u krátkého sloupku nebylo v jedom podepření dovoleno natočení průřezu, u dlouhého sloupu byl pomocí roznášecích desek vytvořen kloub na



Obr. 1: Použitý deskostěnnový prvek S9R5

obou koncích. Roznášecí desky jsou modelovány pomocí tzv rigid edelemnt, tedy tuhých prvků. Okrajové podmínky jsou patrné z obr. 2.



Obr. 2: Okrajové podmínky pro krátký a dlouhý sloup

Geometrie průřezu je uvažována následujícími rozměry.

Šířka	Výška [mm]	Tloušťka [mm]	Vnitřní poloměr rohu [mm]	Délka krátkého sloupu [mm]	Délka dlouhého sloupu [mm]
150,4	150,0	3,77	5,8	450	1999,8

Tab. 2: Geometrie sloupu

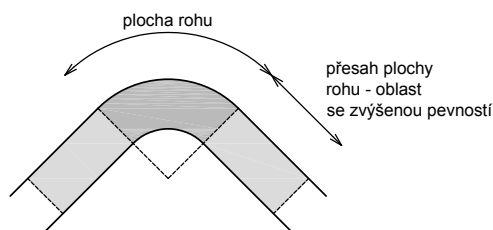
Pracovní diagram korozivzdorné oceli je výrazně nelineární. K jeho definici byl využit dvoustupňový Ramberg-Osgoodův diagram [4] dle vztahu:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n, \quad \sigma \leq \sigma_{0.2} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \left(0,008 - \frac{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}} \right)^{n'_{0.2,1.0}} + \varepsilon_{0.2}, \quad \sigma \geq \sigma_{0.2} \quad (2)$$

Kde $\sigma_{0.2}$ je smluvní mez kluzu, $\sigma_{1.0}$ napětí odpovídající 1% protažení, n a $n'_{0.2,1.0}$ jsou parametry charakterizující průběh zpevnění, E_0 počáteční a $E_{0.2}$ tečný modul pružnosti v místě $\sigma_{0.2}$.

U za studena tvářených profilů jsou navíc vlivem tváření zvýšeny pevnostní charakteristiky materiálu. Tato plocha je definována plochou zakřivení rožírěnou o plochu stojiny délky rovné dvojnásobku tloušťky (obr. 3).



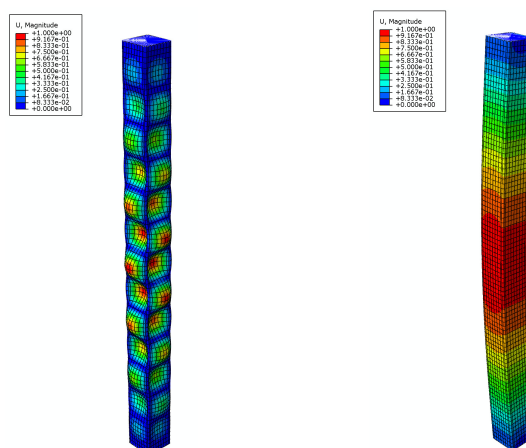
Obr. 3: Plocha zvýšené pevnosti vlivem tváření

Charakteristiky materiálu byly uvažovány dle tab. 3.

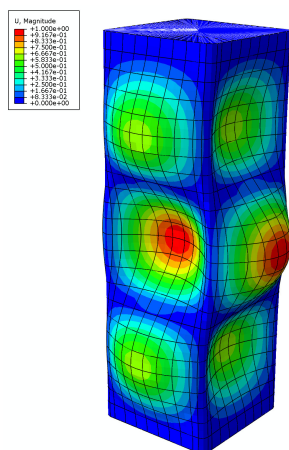
	E_0 [GPa]	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	$\sigma_{1.0}$ [MPa]	n [-]	$n'_{0.2,1.0}$ [-]
Rovná část	195,4	294,0	366,0	4,5	2,3
Rohová část	194,0	563,0	649,0	5,2	3,5

Tab. 3: Materiálové vlastnosti při pokojové teplotě

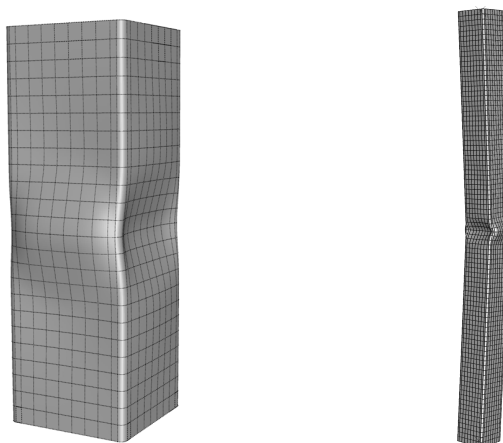
Vzhledem k řešenému problému byl jako tvar počátečních imperfekcí použit nejnižší lokální a globální (u dlouhého sloupu) způsob vybočení ze stabilitní analýzy, obr. 4 a 5. Amplituda imperfekce vychází z naměřených hodnot. Pro lokální tvar byla rovna 0,084 mm, pro globální 0.2 mm.



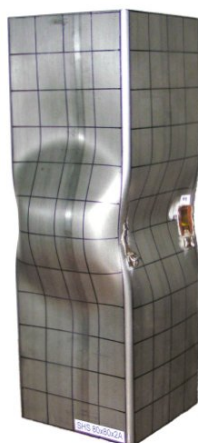
Obr. 4: Lokální a globální vlastní tvar vybočení pro dlouhý sloup



Obr. 5: Vlastní tvar vybočení pro krátký sloup



Obr. 6: Deformovaný tvar krátkého a dlouhého sloupu po dosažení únosnosti



Obr. 7: Příklad deformovaného tvaru krátkého sloupu

3 Tvorba skriptu

Místo skriptu popisující celý numerický model řešeného problému zde budou uvedeny jednotlivé příkazy užitý pro vytvoření numerického modelu. Skladba příkazu bývá následující. V prvním řádku je uveden samotný příkaz, který bývá doplněn dalšími parametry dle typu příkazu. Ve druhém řádku jsou uvedeny konkrétní údaje týkající se zadávaného příkazu. Jednotlivé parametry vždy musí být odděleny čárkou. Desetinným oddělovačem je tečka.

Užitečnou pomůckou pro lepší orientaci ve skriptu může být vytvoření poznámky. Autorovu poznámku je možné do textu zapsat pomocí symbolu **. Např.:

****Dolní pásnice**

Zadání uzlu:

***NODE**

1 ,0 ,10 ,20

První řádek: *NODE vlastní příkaz (symbol * vždy značí začínající příkaz). Druhý řádek 1. Unikátní číslo uzlu. 2. – 4. Souřadnice uzlu ve smyslu $(x,y,z)=(0,10,20)$.

Někdy je třeba uzlům přiřadit stejné vlastnosti (např. teplotu, deformaci, atd.). V tomto případě se s výhodou použije následující příkaz umožňující seskupit uzly do jedné množiny (setu).

Seskupení uzlu do setu, či pojmenování unikátního uzlu:

***NSET ,NSET= A**

1 , 2 , 3

První řádek:

*NSET vlastní příkaz. Dodatkem NSET =A, přiřazujete jméno nově vzniklému setu uzlů (A).

Druhý řádek:

Uzly, které budou do setu přidány.

Pro usnadnění práce, tak aby nemusely být zadávány všechny uzly příkazem *NODE, je možné uzly vygenerovat pomocí příkazu *NFILL.

Generování uzlů:

***NFILL ,NSET=POLE1**

A ,B ,2 ,5

První řádek:

*NFILL vlastní příkaz. Dodatek NSET=POLE1 nám pojmenuje vygenerované pole uzlů (POLE1).

Druhý řádek:

1. Set uzlů tvořící první hranici generované oblasti
2. Set uzlů tvořící druhou hranici generované oblasti
3. Počet intervalů mezi hranicemi.
4. Nárůst v číslování (označení) uzlu

Zadání plošného prvku (elementu):

***ELEMENT ,TYPE= S9R5**

1 ,1 ,3, 9, 7, 2, 6, 8, 4, 5

První řádek: *ELEMENT vlastní příkaz. Parametr TYPE= označuje typ použitého plošného prvku. Druhý řádek: 1. Unikátní označení prvku. 2.– 5. Uzly vymezující daný element.

Pokud máme definovaný jeden element, je možné další vygenerovat (podobně jako u uzlů). Generování elementů:

```
*ELGEN ,ELSET=EPOLE1  
1 ,4 ,1 ,1
```

První řádek:

*ELGEN vlastní příkaz. Dodatek ELSET=EPOLE1 nám pojmenuje skupinu vygenerovaných elementů (EPOLE1).

Druhý řádek:

1. Číslo základního elementu.
2. Počet elementů, které budou generovány v řadě, zahrnující základní element.
3. Přírůstek v číslech uzlů z elementu na element.
4. Přírůstek v číslování elementů v řadě, z elementu na element.

(Pomocí příkazu *ELGEN je možné generovat elementy i ve dvou směrech)

Definování tloušťky elementu a přiřazení materiálu:

```
*SHELL SECTION ,ELSET= EPOLE1 ,MATERIAL=rovna  
3.77
```

První řádek:

*SHELL SECTION vlastní příkaz. Dodatek ELSET=EPOLE1 říká kterým elementům (EPOLE1) budou vlastnosti přiřazeny. Poslední položka přiřazuje materiál.

Druhý řádek:

Tloušťka elementu v (mm).

Zadání imperfekcí je důležitým krokem numerických simulací. Níže je naznačena varianta, kdy imperfektní tvar je zaveden obdobou vlastních tvarů, spočtených ve stabilitní analýze.

Zadání imperfekcí obdobou vlastního tvaru:

```
*IMPERFECTION ,FILE=elasticbuckling ,STEP=1  
1 ,0.084
```

První řádek:

*IMPERFECTION vlastní příkaz. Parametr FILE= odkazuje na jméno souboru, ze kterého bude vlastní tvar načten (soubor získaný při stabilitní analýze). Pro jaký krok mají být dané vlastnosti načteny, stanovíme parametrem STEP=.

Druhý řádek:

1. Číslo vlastního tvaru.
2. Amplituda imperfekce (mm).

Podle zvoleného typu analýzy definujeme pracovní diagram.

Definování materiálu:

```
*MATERIAL ,NAME=rovna  
*ELASTIC  
195400 ,0.3  
*PLASTIC  
50 ,0
```


První řádek:

*MATERIAL vlastní příkaz. Dále pak jméno materiálu (rovna), kterému budou vlastnosti přiřazeny.

Druhý řádek:

*ELASTIC příkaz, sloužící k nadefinování pružných vlastností materiálu.

Třetí řádek:

Zde je uveden modul pružnosti a Poissonovo číslo, popřípadě další vlastnosti.

Čtvrtý řádek:

*PLASTIC příkaz, sloužící k nadefinování plastických vlastností materiálu.

Pátý řádek:

1. Mez kluzu

2. Plastické poměrné přetvoření

(Dále možno opakovat ve stejném duchu další body pracovního diagramu a jím příslušné plastické přetvoření)

Definování okrajových podmínek:

*BOUNDARY

A ,1 ,6

První řádek:

*BOUNDARY vlastní příkaz.

Druhý řádek:

1. Uzly, kterým je omezení přiděleno

2. První omezený stupeň volnosti

3. Poslední omezený stupeň volnosti ¹

Výpočet je možno rozdělit do několika kroků (STEP). V každém je pak např. možné aplikovat část zatížení.

Definování kroku:

*STEP ,NLGEOM ,INC=150

První řádek:

*STEP vlastní příkaz. Použití parametru NLGEOM nastaví geometricky nelineární analýzu (vliv druhého řádu) v daném kroku. Vynecháním tohoto parametru je nastavena geometricky lineární analýza. Posledním parametrem nastavujeme maximální počet inkrementů v daném kroku, viz dále.

Pokud se nám jedná o výpočet kritického zatížení, použijeme stabilitní analýzu:

*BUCKLE ,EIGENSOLVER=lanczos

První řádek:

*BUCKLE vlastní příkaz. Parametrem EIGENSOLVER= nastavujeme způsob výpočtu vlastních tvarů, zde je to Lanczosova metoda. Další možností je iterace podprostoru.

V případě statické analýzy:

*STATIC

0.001 ,1 ,0.0005 ,0.01

¹ Čísla 1 až 6 odpovídají stupňům volnosti ve smyslu: 1 - posun ve směru osy x; 2 - posun ve směru osy y; 3 - posun ve směru osy z; 4 - natočení kolem osy x; 5 - natočení kolem osy y; 6 - natočení kolem osy z

První řádek:

*STATIC vlastní příkaz. Je možné doplnit o parametr RIKS, čímž získáme sestupnou větev na zatěžovacím diagramu, viz zde.

Druhý řádek:

1. Délka počátečního inkrementu
2. Délka kroku
3. Minimální délka inkrementu
4. Maximální délka inkrementu

Zatížení je možno definovat předepsaným posunem či pootočením, nebo působící silou.

Zatížení posunem:

*BOUNDARY

B ,2 ,2 ,50

První řádek:

*BOUNDARY vlastní příkaz.

Druhý řádek:

1. Uzly kde je deformace předepsána
2. První stupeň volnosti kde je deformace umožněna
3. Poslední stupeň volnosti kde je deformace umožněna
4. Velikost deformace v [mm]

Zatížení silou:

*CLOAD

B ,2 , -1000

První řádek:

*CLOAD vlastní příkaz.

Druhý řádek:

1. Uzly kde je zatížení předepsáno
2. Směr působení zatížení
3. Velikost zatížení v [N]

Pro lepší dostupnost výsledků je možné je nechat vypsát do „history output“.

*OUTPUT ,HISTORY

Žádané deformace a napětí je však třeba nadefinovat.

*NODE OUTPUT ,NSET=B

U2, UR3

První řádek:

*NODE OUTPUT vlastní příkaz. Parametrem NSET= definujeme uzly, pro která má být požadovaná deformace zanesena do databáze.

Druhý řádek:

Posuny a pootočení, které budou vykresleny.

*ELEMENT OUTPUT ,NSET=E_POLE1

MISES

První řádek:

*ELEMENT OUTPUT vlastní příkaz. Parametrem NSET= definujeme element(y), pro která má být (v tomto případě) miesovo srovnávací napětí zaneseno do databáze.

Deformace a přetvoření, která nebyla definována, je možné najít ve „field output“ což je trochu pracnější.

Nadefinováním všech parametrů modelu byl získán vstupní soubor pro numerickou simulaci tzv. „input file“ (koncovka souboru musí být ve tvaru .inp). Spuštění výpočtu je pomocí následujícího příkazu z příkazové řádky (případně přímo z Abaqus/CAE:

```
abaqus job=JMENO VSTUPNÍHO SOUBORU interactive
```

4 Porovnání jednotlivých druhů analýz s experimentem

Výsledky numerických simulací vybraných analýz jsou porovnány na následujících grafech.

4.1 Lineární pružnostní analýza (LA)

Výpočet podle teorie 1. řádu. Chování materiálu lineární (postačí definovat modul pružnosti a Poissonovo číslo). Geometrie konstrukce ideální. Vnitřní síly a přetvoření spočtené touto analýzou budou shodné s výsledky např. deformační metody.

4.2 Geometricky nelineární pružnostní analýza (GNA)

Výpočet podle teorie 2. řádu. Chování materiálu lineární. Geometrie konstrukce ideální. Vzhledem k povaze zatížení je průběh grafu do značné míry shodný s pružnostní analýzou.

4.3 Geometricky nelineární pružnostní analýza s imperfekcemi (GNIA)

Výpočet podle teorie 2. řádu. Geometrie konstrukce imperfektní. Chování materiálu lineární. Geometrie konstrukce imperfektní. Zavedením imperfekcí do modelu dochází k rychlejšímu nárůstu deformace pro stejné zatížení.

4.4 Geometricky a materiálově nelineární analýza (GMNA)

Výpočet podle teorie 2. řádu. Geometrie konstrukce ideální. Chování materiálu nelineární.

4.5 Geometricky a materiálově nelineární analýza s imperfekcemi (GMNIA)

Výpočet podle teorie 2. řádu. Geometrie konstrukce imperfektní. Chování materiálu nelineární.

5 Ruční výpočet a porovnání

GEOMETRIE

$$t := 3.77 \text{ mm}$$

šířka

$$b := 150 \text{ mm}$$

výška

$$h := 150.4 \text{ mm}$$

vnitřní poloměr

$$r_i := 5.8 \text{ mm} \quad \phi_w := 90 \text{ deg} = 1.571$$

rovné části

$$b_c := b - 2 \cdot (r_i + t) = 130.86 \cdot \text{mm}$$

$$h_c := h - 2 \cdot (r_i + t) = 131.26 \cdot \text{mm}$$

plocha

$$A_g := t \cdot \left[2 \cdot b_c + 2 \cdot h_c + 4 \cdot \phi_w \cdot \left(r_i + \frac{t}{2} \right) \right] = 2.158 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

těžiště průřezu

$$\Delta z := \frac{h}{2} = 75.2 \cdot \text{mm}$$

MOMENT SETRVAČNOSTI

momenty setrvačnosti dílčích částí

$$I_{y,b} := \frac{1}{12} \cdot b_c \cdot t^3 + b_c \cdot t \cdot \left(\Delta z - \frac{t}{2} \right)^2 = 2.652 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{y,h} := \frac{1}{12} \cdot t \cdot h_c^3 + h_c \cdot t \cdot \left(\Delta z - \frac{h}{2} \right)^2 = 7.105 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

všechny rohy ke středu

$$I_{y,r} := \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \left[(r_i + t)^4 - r_i^4 \right] + 2 \cdot \pi \cdot \left[(r_i + t)^2 - r_i^2 \right] \cdot \left(\frac{h_c}{2} \right)^2 = 1.574 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_y := 2 \cdot I_{y,b} + 2 \cdot I_{y,h} + I_{y,r} = 8.2996 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

M A T E R I Á L

rovná část roh

$$f_{y,f} := 294 \text{ MPa} \quad f_{y,c} := 563 \text{ MPa}$$

$$E_{0,f} := 195.4 \text{ GPa} \quad E_{0,c} := 194.0 \text{ GPa}$$

plocha rohů + 2t

$$A_c := 4t \cdot \left[2 \cdot t + \phi_w \cdot \left(r_1 + \frac{t}{2} \right) \right] = 295.742 \cdot \text{mm}^2$$

$$f_y := \frac{A_c \cdot f_{y,c} + (A_g - A_c) \cdot f_{y,f}}{A_g} = 330.858 \cdot \text{MPa}$$

$$E_0 := \frac{A_c \cdot E_{0,c} + (A_g - A_c) \cdot E_{0,f}}{A_g} = 195.208 \cdot \text{GPa}$$

ÚČINNÁ PLOCHA

horní pásnice

$$k_\sigma := 4.0 \quad \psi_h := 1.0$$

$$\xi_{\sigma} := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_{y,f}} \cdot \frac{E_{0,f}}{210 \text{ GPa}}} = 0.862$$

poměrná štíhlost

$$\lambda_{p,b} := \frac{\frac{b_c}{t}}{28.4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = 0.709$$

$$\rho_b := \min\left(\frac{0.772}{\lambda_{p,b}} - \frac{0.125}{\lambda_{p,b}^2}, 1.0\right) = 0.841$$

$$b_{\text{eff}} := \rho_b \cdot b_c = 109.99 \cdot \text{mm}$$

$$\lambda_{p,h} := \frac{\frac{h_c}{t}}{28.4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = 0.711$$

$$\rho_h := \min\left(\frac{0.772}{\lambda_{p,h}} - \frac{0.125}{\lambda_{p,h}^2}, 1.0\right) = 0.839$$

$$h_{\text{eff}} := \rho_h \cdot h_c = 110.09 \cdot \text{mm}$$

$$A_{\text{eff}} := A_g - 2 \cdot t \cdot [h_c \cdot (1 - \rho_h) + b_c \cdot (1 - \rho_b)] = 1.84 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$N_{\text{Rk}} := (A_{\text{eff}} - A_c) \cdot f_{y,f} + A_c \cdot f_{y,c} = 620.416 \cdot \text{kN}$$

nebo s využitím LBA

$$\sigma_{\text{cr}} := \frac{1004.3 \text{ kN}}{A_g} = 465.293 \cdot \text{MPa}$$

$$\lambda_p := \sqrt{\frac{f_{y,f}}{\sigma_{\text{cr}}}} = 0.795$$

$$\rho := \min\left(\frac{0.772}{\lambda_p} - \frac{0.125}{\lambda_p^2}, 1.0\right) = 0.773$$

$$A_{\text{eff,w}} := A_g - 2 \cdot t \cdot (h_c + b_c) \cdot (1 - \rho) = 1.711 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$N_{\text{Rk,w}} := (A_{\text{eff,w}} - A_c) \cdot f_{y,f} + A_c \cdot f_{y,c} = 582.445 \cdot \text{kN} \quad (\text{bez součinitele spolehlivosti})$$

$$N_{\text{test}} := \frac{713 \text{ kN} + 726 \text{ kN}}{2} = 719.5 \cdot \text{kN} \quad N_{\text{FEM}} := 685.8 \text{ kN}$$

Porovnání výsledků ručního výpočtu a numerické simulace s experimentem:

$$\frac{N_{\text{Rk}}}{N_{\text{test}}} = 0.81 \quad \frac{N_{\text{FEM}}}{N_{\text{test}}} = 0.953$$

V Z P Ě R

$$L_{cr} := 1999.8 \text{ mm}$$

$$N_{cr} := \frac{\pi^2 E_0 \cdot I_y}{L_{cr}^2} = 3.998 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$N_{\text{Rk}} := 3428.4 \text{ kN}$$

$$\lambda := \sqrt{\frac{N_{\text{Rk}}}{N_{cr}}} = 0.412$$

rovinný vzpěr, uzavřené průřezy

$$\alpha := 0.49$$

$$\lambda_0 := 0.4$$

$$\phi := 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\lambda - \lambda_0) + \lambda^2] = 0.588$$

$$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0.993$$

$$N_{b,Rk} := \chi \cdot N_{\text{Rk}} = 578.295 \cdot \text{kN} \quad (\text{bez součinitele spolehlivosti})$$

$$N_{b,\text{test}} := 692 \text{ kN} \quad N_{b,\text{FEM}} := 670.93 \text{ kN}$$

Porovnání výsledků ručního výpočtu a numerické simulace s experimentem:

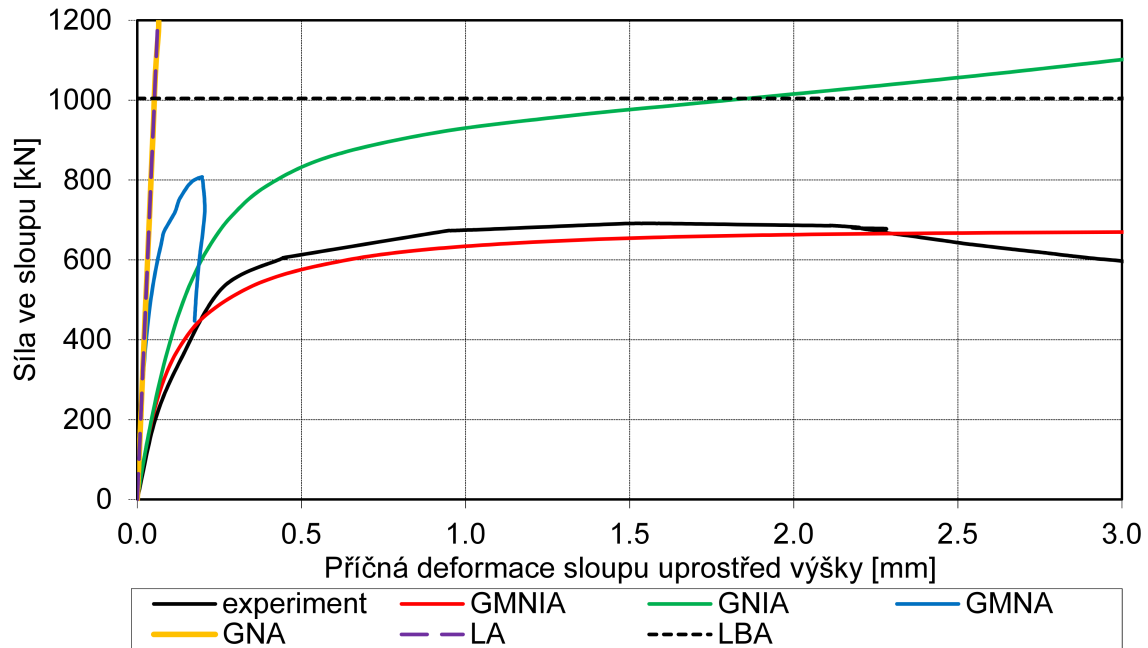
$$\frac{N_{b,Rk}}{N_{b,\text{test}}} = 0.836 \quad \frac{N_{b,\text{FEM}}}{N_{b,\text{test}}} = 0.97$$

Vliv vzpěru stanovený zkouškou a numerickým výpočtem:

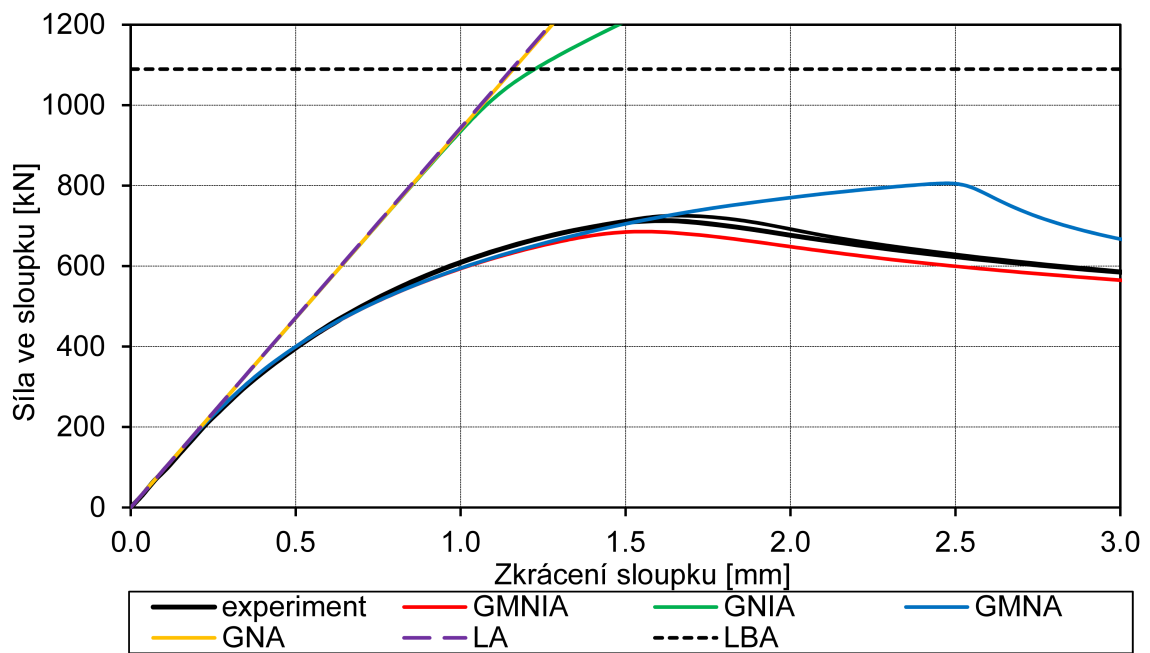
$$\chi_{\text{test}} := \frac{N_{b,\text{test}}}{N_{\text{test}}} = 0.962 \quad \chi_{\text{FEM}} := \frac{N_{b,\text{FEM}}}{N_{\text{FEM}}} = 0.978$$

6 Celkové porovnání

Na obr. 8 a 9 jsou ukázány všechny výše popsané druhy analýz v porovnání s experimenty. Skutečné působení nejlépe vystihuje analýza GMNIA, která umožňuje zohlednit nelinearitu materiálu i imperfektní tvar konstrukce. Jak bylo ukázáno, je však nezbytné mít dostatek informací o imperfektním tvaru konstrukce a dostatečně výstižný materiálový model. Nevýhodou této analýzy je doba výpočtu. Z výsledků je patrné, že numerické modely dávají dobrou shodu s experimenty. Posouzení podle současného eurokodů se v tomto případě jeví mírně konzervativní.



Obr. 8: Výsledek různých analýz pro model dlouhého sloupu



Obr. 9: Výsledek různých analýz pro model dlouhého sloupku

Reference

- [1] *ČSN EN 1993-1-4 Eurokod 3 – Navrhování ocelových konstrukcí, Část 1-4: Doplňující pravidla pro korozivzdorné oceli.* ČNI, 2007.
- [2] *ČSN EN 1993-1-7. Eurokod 3 – Navrhování ocelových konstrukcí, Část 1-7: Příčně zatížené deskostěnové konstrukce.* ČNI, 2007.
- [3] *Navrhování ocelových konstrukcí, příručka k ČSN EN 1993-1-1 a ČSN EN 1993-1-8, Navrhování hliníkových konstrukcí příručka k ČSN EN 1999-1.* ČKAIT, Praha, 2009, ISBN 978-80-87093-86-3.
- [4] Gardner, L.: *A new Approach to structural stainless steel design.* Ph.d. thesis, Imperial College London, 2002.