

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV KOVOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

Ing. Miroslav Bajer, CSc.

**ANALÝZA VYBRANÉHO TYPU
KONSTRUKCE S UVÁŽENÍM PODDAJNOSTI
ŠROUBOVANÝCH PŘÍPOJŮ**

TEZE HABILITAČNÍ PRÁCE

BRNO 2001

© 2001 M. Bajer

ISBN 80-214-1878-8

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA 4

1. ÚVOD 5

2. STYČNÍKY V PRUTOVÝCH KONSTRUKČNÍCH SOUSTAVÁCH 6

2.1. Závislost ohybového momentu na natočení styčníku.....6

2.2. Klasifikace přípojů nosníků na sloup podle tuhosti při natočení8

2.3. Klasifikace přípojů nosníku na sloup podle momentové únosnosti.....9

2.4. Ohybová tuhost.....10

2.5. Patky sloupů10

2.5.1. Výpočtová únosnost v centrickém tlaku.....11

2.5.2. Únosnost patky sloupů.....11

2.5.3. Ohybová tuhost patky sloupu12

3. PROGRAMOVÉ SYSTÉMY ANSYS, NEXIS 12

3.1. Obecný popis výpočtového modelu13

4. ANALÝZA PRUTOVÉ KONSTRUKCE 14

4.1. Obecně.....14

4.2. Analýza vybraného typu konstrukce15

5. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZY KONSTRUKCE 18

5.1. Sledování závislostí na analyzované konstrukci18

5.2. Grafické znázornění některých sledovaných závislostí.....19

6. ZÁVĚR 22

LITERATURA 23

ABSTRACT 24

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Miroslav Bajer se narodil 5. dubna 1957 v Přerově. Vysokoškolská studia ukončil na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně v roce 1981 obhajobou diplomové práce na oboru „Konstrukce a dopravní stavby“ na Katedře stavební mechaniky.

Po absolvování vysoké školy byl zaměstnán v organizaci DRUPOS, podniku pro projektování, inženýrskou činnost a technickou pomoc. Zde pracoval ve výpočetním středisku, kde spolupracoval na projektech řešených organizací, a to zejména po stránce programátorské.

V roce 1982 byl přijat do interní vědecké aspirantury, kterou absolvoval na Katedře stavební mechaniky. V průběhu interní vědecké aspirantury vedl cvičení z předmětů Statika, Pružnost a pevnost, Pružnost a plasticita. V tomto období také spolupracoval na řešení výzkumných úkolů publikoval odborné články. V roce 1986 obhájil disertační práci na téma „Aplikace moderních numerických metod při statickém řešení úloh s jednostrannými vazbami“.

V roce 1985 byl přijat konkursem za odborného asistenta Katedry kovových a dřevěných konstrukcí FAST VUT, kde působí doposud. Průběžně zajišťuje přednášky a cvičení na oborech „Konstrukce a dopravní stavby“ a „Pozemní stavby“ z předmětů Kovové a dřevěné konstrukce, Speciální kovové konstrukce, Automatizace inženýrských úloh, Využití výpočetní techniky při navrhování ocelových konstrukcí, Dopravní stavby a konstrukce, Vybrané statě z kovových konstrukcí a Automatizace navrhování kovových konstrukcí. Vedle přednášek a cvičení vede rovněž diplomové práce a práce v rámci Studentské tvůrčí činnosti.

V letech 1986 až 1988 absolvoval studium základní pedagogiky vysoké školy v dalším zvyšování kvalifikace učitelů vysokých škol, v roce 1987 pracoval v rámci odborné stáže v organizaci STAVOPROJEKT v Brně. Od roku 1994 je autorizovaným inženýrem pro obory Mosty a inženýrské konstrukce a Statika a dynamika staveb.

Je členem České komory autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, Svazu inženýrů a Vědeckotechnické společnosti pro sanaci staveb a péči o památkové objekty. V rámci Fakulty stavební zastává funkci předsedy Oborové rady oboru Konstrukce, je členem Rady studijního programu a členem a místopředsedou komise pro státní závěrečné zkoušky.

ANALÝZA VYBRANÉHO TYPU KONSTRUKCE S UVÁŽENÍM PODDAJNOSTI ŠROUBOVANÝCH PŘÍPOJŮ

1. ÚVOD

V prutových konstrukčních soustavách je patrná značná různorodost používaných typů styčníků. Ty se od sebe liší tvarem, konstrukčním uspořádáním, tj. svým skutečným působením. Při sestavování výpočtových modelů prutové soustavy lze styčnící pokládat buď za dokonale tuhé nebo ideálně kloubové. Dokonale tuhé styčnící nepřipouštějí žádné pootočení mezi připojovanými prvky a přenášejí z nosníku do sloupu ohybový moment. Naopak ideálně kloubové styčnící pootočení připouštějí a nepřenášejí z nosníku do sloupu žádný ohybový moment.

Skutečné chování styčníků leží mezi těmito dvěma limitními případy – tuhé styčnící nejsou nikdy plně ohybově spojené a kloubové styčnící vždy částečně přenášejí ohybový moment.

Při popisu skutečného působení styčníků (tzn. stanovení jejich ohybové tuhosti a momentové únosnosti) lze v současnosti vycházet buď z platných normativních dokumentů (např. [3], [4]), z experimentálního výzkumu, event. z numerické analýzy (u jiných typů styčníků, než jsou uvedeny v normách).

Pro analýzu konstrukce s uvážením skutečných parametrů jejich styčníků lze výhodně využít numerického řešení různými programovými systémy.

Habilitační práce se zabývá analýzou skutečného chování prutové konstrukční soustavy se zvláštním zaměřením na působení šroubovaných přípojů, a to buď mezi dílčími prutovými prvky nebo v kotvení prutové soustavy ke spodní stavbě.

Problematikou skutečného chování prutové soustavy lze rozdělit do dvou základních skupin:

Do první skupiny patří popis základních charakteristik přípoje (ohybové tuhosti a momentové únosnosti) izolovaného styčnící. Toto lze určit pomocí algoritmů, uvedených v normativních dokumentech (např. [3], [4]), které byly vytvořeny na základě experimentálního výzkumu a numerické analýzy styčnící. Tyto algoritmy jsou omezeny na průřezy typu I, H.

Do druhé skupiny problémů patří analýza konstrukcí s uvážením skutečného chování styčníků, tedy stanovení, jak se v důsledku respektování poddajnosti spojů v prutových soustavách mění rozdělení vnitřních sil a deformací analyzované konstrukce, tzn. jak skutečné chování styčnící ovlivňuje dimenze připojovaných profilů.

V současné době je celkem podrobně stanovena metodika výpočtu charakteristik pro izolovaný styčnící v konstrukční soustavě. Tento styčnící je však řešen izolovaně, bez vzájemné návaznosti na konstrukční uspořádání zbývajících částí konstrukce. Zda a do jaké míry se všechny tyto skutečnosti navzájem ovlivňují a jak se v závislosti na nich mění rozložení vnitřních sil a deformací, je předmětem této práce. Ohybová tuhost styčnící v konstrukční soustavě je dána typy jednotlivých dílčích částí styčnící, tuhost styčnící v uložení je navíc v některých případech charakterizována tuhostí podloží a betonového základu.

Jak je patrné z definice řešeného problému, je velmi složité tuto úlohu řešit experimentálně, neboť se jedná o modely konstrukcí většího rozsahu. Experimenty se obvykle provádějí pouze pro izolované styčnící, které lze v laboratorních podmínkách jednoduše ověřovat. Z tohoto důvodu byla zvolena metoda, vycházející z numerického řešení zvolených typů konstrukcí programovými systémy ANSYS a NEXIS. Oba programové systémy umožňují matematické modelování styčnící (a jejich dílčích částí) v potřebném rozsahu, přičemž systém NEXIS je běžně používaný pro praktické projektování ocelových konstrukcí, zatímco systém ANSYS se využívá především u náročnějších úloh – zejména u řešení detailů.

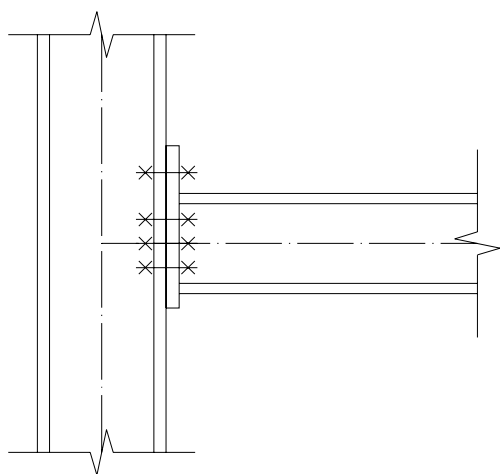
2. STYČNÍKY V PRUTOVÝCH KONSTRUKČNÍCH SOUSTAVÁCH

Při řešení styčnicku (stanovení ohybové tuhosti a momentové únosnosti) se styčnick obvykle dělí na jednotlivé dílčí části – komponenty. Podstatou metody komponentů [3] je rozdělení styčnicků na komponenty, které se dle svých vlastností vzájemně ovlivňují. Při tomto matematickém přístupu lze styčnick velice dobře modelovat vhodnými konečnými prvky, které se co nejvíce blíží vlastnostem jednotlivých komponentů styčnicku. Poněvadž tento postup však není pro rozsáhlejší konstrukce z hlediska časové náročnosti a zejména náročnosti na kapacitu použité výpočetní techniky reálný, volí se obvykle zjednodušená předběžná metoda klasifikace s odhadem účinku interakce na chování dílčí části styčnicku – komponentu. Proto rozlišujeme komponenty dle typu namáhání (tah, tlak, smyk), přičemž každý komponent je popsán závislostí deformace δ na působící síle F . Tento vztah lze v závislosti na zvoleném typu pracovního diagramu materiálu zjednodušit na definování počáteční tuhosti k_i , únosnosti F_i a tažnosti δ_{sd} . Jednotlivé komponenty jsou potom nahrazeny pružinami, které je třeba definovat jednak tuhostmi a jednak přesnou polohou vzhledem k ostatním komponentům při definování styčnicku.

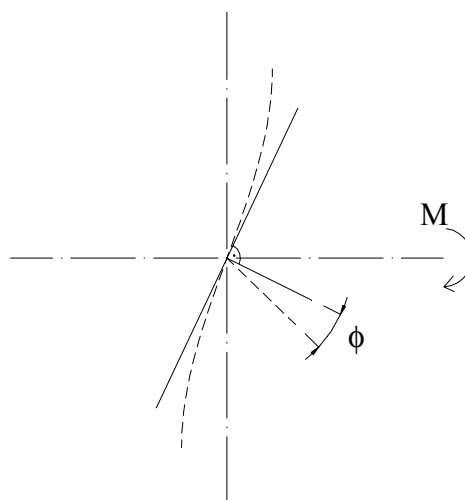
Metodou komponentů lze popsat pracovní diagram styčnicku, který je možné sestavit z dílčích pracovních diagramů jednotlivých komponentů.

2.1. Závislost ohybového momentu na natočení styčnicku

Pro přibližné vyjádření skutečného působení může být přípoj (např. nosníku ke sloupu) představován pružinou, která spojuje osu spojovaných prvků (např. osu sloupu a osu nosníku) v teoretickém průsečíku. Předpokládá se, že spojované prvky jsou z průřezů I nebo H.

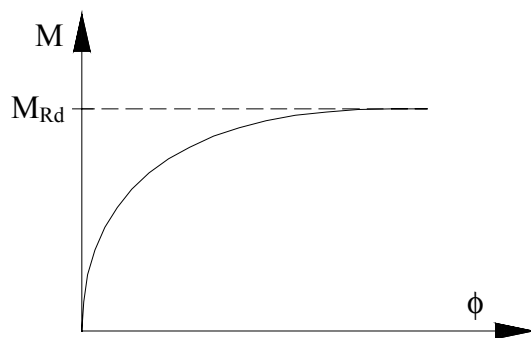


Obr. 1: Přípoj sloup – příčel.

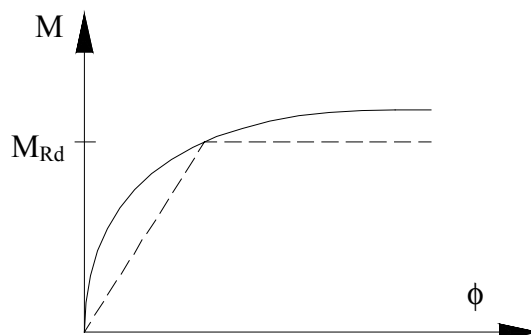


Obr.2: Natočení styčnicku ϕ při působení ohybového momentu M .

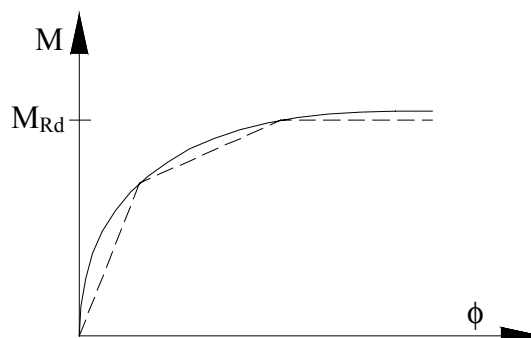
Závislost působícího momentu M na natočení přípoje ϕ je nelineární. Přibližně lze výpočtovou závislost momentu na natočení aproximovat vhodnou křivkou. Obvykle se volí vyjádření po částech lineární (např. bilineární nebo trilineární). Přitom platí, že křivka aproximované závislosti $M - \phi$ se má nacházet pod křivkou skutečné závislosti.



Obr. 3: Nelineární závislost ohybového momentu na natočení styčnicku.



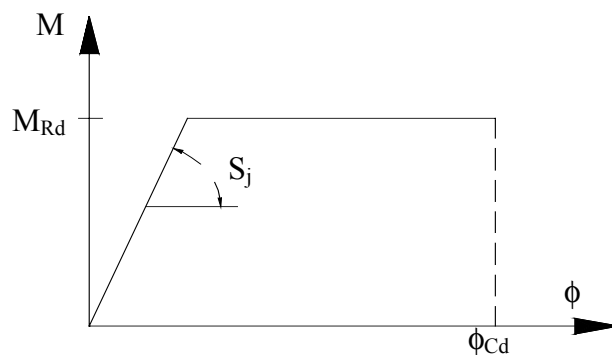
Obr. 4: Bilineární závislost ohybového momentu na natočení styčnicku.



Obr. 5: Trilineární závislost momentu na natočení styčnicku.

Z grafu závislosti ohybového momentu na natočení styčnicku lze definovat tyto parametry:

- a) Momentovou únosnost M_{Rd} ,
- b) Tuhost při natočení S_j ,
- c) Mezní natočení ϕ_{Cd} .



Obr. 6: Závislost $M - \phi$, parametry M_{Rd} , S_j , ϕ_{Cd}

2.2. Klasifikace přípojí nosníků na sloup podle tuhosti při natočení

Obecně lze klasifikovat přípoje podle tuhosti při natočení v souladu s [4] jako:

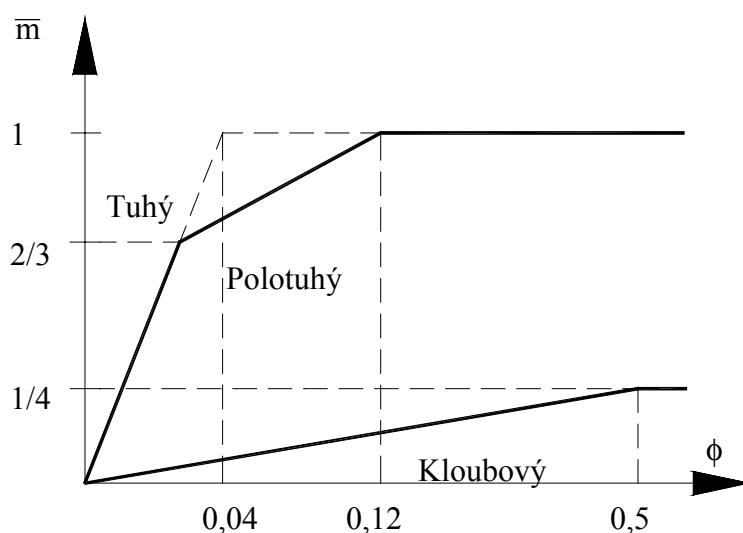
- nominálně kloubové,
- tuhé,
- polotuhé.

Nominálně kloubový přípoj je takový, jestliže tuhost při natočení S_j splňuje podmínku:

$$S_j \leq 0,5 \cdot \frac{E \cdot I_b}{L_b} \quad (1)$$

kde: L_b je délka přípojovaného prvku,
 I_b je moment setrvačnosti přípojovaného prvku,

Přípoj lze pokládat za tuhý (v porovnání s přípojovaným prvkem), jestliže vzestupná část křivky závislosti momentu na natočení přípoje leží nad horní křivkou uvedenou v následujících dvou obrázcích.



Obr. 7: Nevztyžené rámové soustavy.

jestliže $\bar{m} < \frac{2}{3}$: $\bar{m} = 25 \cdot \bar{\phi}$ (2)

jestliže $\frac{2}{3} < \bar{m} \leq 1$: $\bar{m} = \frac{(25 \cdot \bar{\phi} + 4)}{7}$ (3)

kde: $\bar{m} = \frac{M}{M_{pl,Rd}}$: $\bar{\phi} = \frac{E \cdot I_b \cdot \phi}{L_b \cdot M_{pl,Rd}}$ (4)

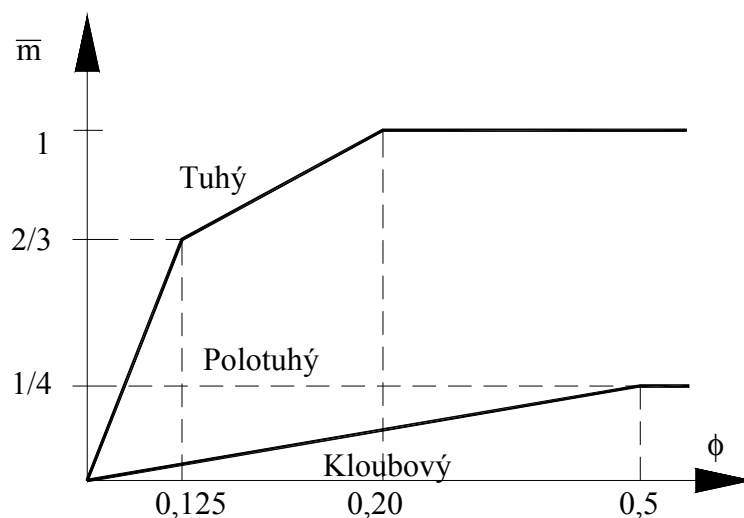
Poznámka: Hranice uvedené na výše uvedeném obrázku mohou být použity pro takové nevztyžené rámové soustavy, ve kterých je pro každé podlaží splněna podmínka:

$$\frac{K_b}{K_c} \geq 0,1 \quad (5)$$

kde: K_b je průměrná hodnota $\frac{I_b}{L_b}$ pro všechny nosníky připojené v uvažovaném podlaží nahore,

K_c je průměrná hodnota $\frac{I_c}{L_c}$ pro všechny sloupy v uvažovaném podlaží, přičemž:

I_b, I_c je moment setrvačnosti nosníku, sloupu
 L_b, L_c je rozpětí nosníku, výška podlaží pro daný sloup



Obr.8: Vyztužené rámové soustavy.

jestliže $\bar{m} < \frac{2}{3}$: $\bar{m} = 8 \cdot \bar{\phi}$, (6)

jestliže $\frac{2}{3} < \bar{m} \leq 1,0$: $\bar{m} = \frac{(20 \cdot \bar{\phi} + 3)}{7}$, (7)

kde: $\bar{m}, \bar{\phi}$ se určí podle (4).

Jako polotuhý by měl být uvažován přípoj nosníku na sloup tehdy, jestliže vzestupná část křivky závislosti momentu na natočení leží mezi příslušnými křivkami (viz předešlé dva obrázky). V případě, že zároveň splňuje požadavky na kloubový přípoj, je možné ho jako nominálně kloubový spoj uvažovat.

2.3. Klasifikace přípojů nosníku na sloup podle momentové únosnosti

Přípoje na sloup mohou být také zaříděny v souladu s [4] podle momentu únosnosti jako:

- nominálně kloubové přípoje,
- přípoje s částečnou únosností,
- přípoje s plnou únosností.

O **přípoj nominálně kloubový** se jedná tehdy, jestliže jeho výpočtová únosnost M_{Rd} je menší než 0,25 násobek plastické momentové únosnosti nosníku $M_{pl,Rd}$ a má-li přípoj dostatečnou schopnost natočení.

O **přípoj s plnou únosností** se jedná tehdy, jestliže jeho výpočtová únosnost M_{Rd} se nejméně rovná plastické momentové únosnosti nosníku $M_{pl,Rd}$ a má-li přípoj odpovídající schopnost natočení. V případě, že $M_{Rd} \geq 1,2M_{pl,Rd}$, není třeba kontrolovat odpovídající schopnost natočení.

O **přípoj s částečnou únosností** se jedná tehdy, jestliže jeho výpočtová únosnost M_{Rd} je menší než plastická momentová únosnost nosníku $M_{pl,Rd}$.

Rozhodující pro stanovení momentové únosnosti styčnicku jsou únosnosti komponentů v tažené oblasti. Dále uvedený postup pro určení momentové únosnosti předpokládá, že současně působící osová síla N_{Sd} v připojovaném prvku nepřesáhne 10 % plastické únosnosti $N_{pl,Rd}$.

Momentová únosnost $M_{j,Rd}$ šroubovaného styčnicku s čelními deskami se určí podle [3] ze vztahu:

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r \cdot F_{tr,Rd} \quad (8)$$

kde: $F_{tr,Rd}$ je účinná únosnost r-té řady šroubů,
 h_r je vzdálenost r-té řady šroubů od středu tlaku.

Výsledná únosnost $F_{tr,Rd}$ nesmí překročit únosnost komponentů v tlaku a ve smyku.

2.4. Ohybová tuhost

Ohybovou tuhost styčnicku lze určit z poddajnosti jeho základních komponentů, což je možné vyjádřit jejich dílčími součiniteli k_i (uvedenými v části „Stanovení součinitelů tuhosti k_i pro základní komponenty styčnicku“). Jsou-li použity šroubované spoje s čelní deskou v tahu, potom lze kombinovat součinitele tuhosti k_i jednotlivých základních komponentů v souladu z částí „Stanovení ramene vnitřních sil“.

V případě, že osová síla N_{cd} v připojovaném prvku nepřekročí 10% jeho únosnosti $N_{pl,Rd}$, lze pro moment $M_{j,Sd} < M_{j,Rd}$ stanovit ohybovou tuhost styčnicku S_j dle vztahu:

$$S_j = \frac{E \cdot z^2}{\mu \cdot \sum_i \frac{1}{k_i}}, \quad (9)$$

kde: k_i je součinitel tuhosti i-tého komponentu,
 z je rameno vnitřních sil,
 μ je tvarový součinitel tuhosti

$$\mu = \frac{S_{j,ini}}{S_j}. \quad (10)$$

Počáteční ohybovou tuhost styčnicku pro $\mu = 1$ lze určit ze vztahu:

$$S_{j,ini} = \frac{E \cdot z^2}{\sum_i \frac{1}{k_i}}. \quad (11)$$

Tvarový součinitel tuhosti μ se určí:

$$a) \text{ je-li } M_{j,Sd} \leq \frac{2}{3} M_{j,Rd}, \text{ potom } \mu = 1, \quad (12)$$

$$b) \text{ je-li } \frac{2}{3} M_{j,Rd} < M_{j,Sd} \leq M_{j,Rd} \text{ potom } \mu = \left(\frac{\xi \cdot M_{j,Sd}}{M_{j,Rd}} \right)^\psi, \quad (13)$$

kde: ψ je součinitel druhu přípoje:
 $\psi = 2,7$ pro svarový přípoj, pro šroubovaný přípoj s čelní deskou,
 $\psi = 3,1$ pro šroubový přípoj s úhelníky na pásnici,
 ξ vyjadřuje hodnotu součinitele počátku nelineární části křivky. Obvykle $\xi = 1,5$ (obdobně, jako pro plastifikaci desky v ohybu).

2.5. Patky sloupů

Při návrhu kotvení sloupů patní deskou je možné postupovat podle [4], [23]. Princip návrhu tlačené části patky spočívá ve výpočtu únosnosti betonové patky pod poddajným patním plechem v podrcení. V případě kombinace osové síly a ohybového momentu je nutné posoudit únosnost tažené části přípoje podle [4] – příloha A2.

Při výpočtu kotvení sloupu s nevyztuženým patním plechem je třeba uvažovat následující komponenty:

- betonový blok v tlaku,
- kotevní šroub ve smyku,
- patní plech v ohybu a kotevní šrouby v tahu,
- pásnice a stěna sloupu v tlaku.

2.5.1. Výpočtová únosnost v centrickém tlaku

Výpočtová únosnost v centrickém tlaku se stanoví podle [23]

$$F_{Rd,c} = A_{eff} \cdot f_j, \quad (14)$$

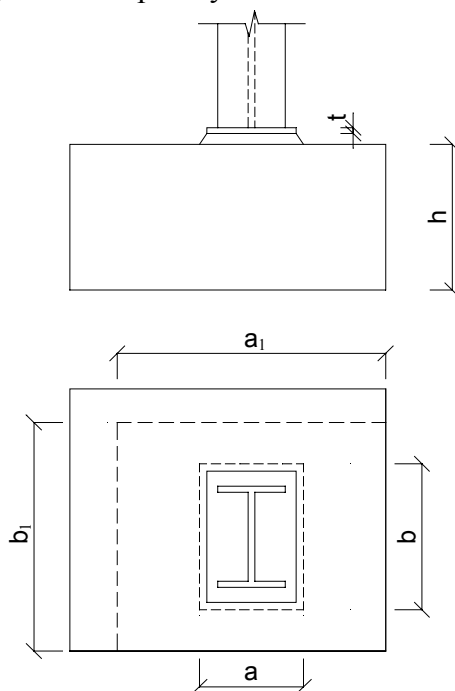
kde: A_{eff} je výsledná náhradní tlačena plocha pod patní deskou;
 f_j je pevnost betonu v podrcení v koncentrovaném tlaku pod poddajnou patní deskou.

$$f_j = \beta_j \cdot k_j \cdot f_{cd}, \quad (15)$$

kde: f_{cd} je výpočtová hodnota pevnosti betonu základů v tlaku,
 β_j je součinitel spoje. $\beta_j = 2/3$ v případě, že charakteristická pevnost malty v podlití není menší než 0,2 charakteristické pevnosti betonového základu a tloušťka maltového podlití není větší než 0,2 násobek nejmenšího šířkového rozměru ocelové patky,

$$k_j = \sqrt{\frac{a_1 \cdot b_1}{a \cdot b}}, \quad (16)$$

kde: a, b jsou rozměry patní desky,
 a_1, b_1 jsou rozměry efektivní plochy.

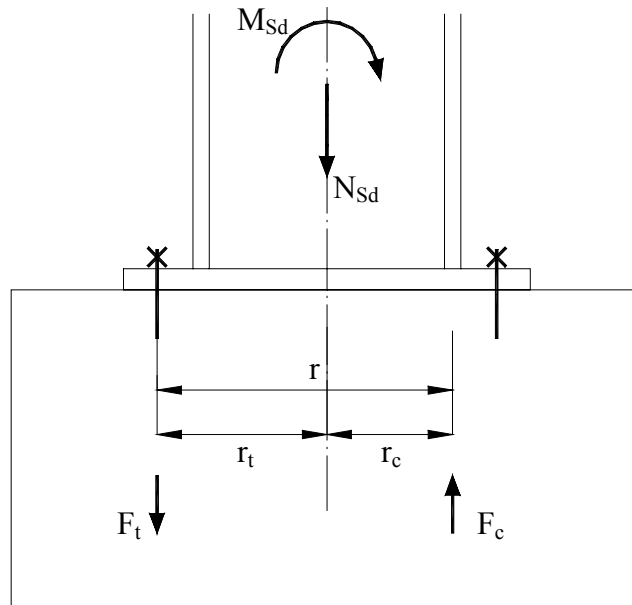


Obr.9: Rozměry patní desky a betonového základu.

2.5.2. Únosnost patky sloupů

V případě, že předpokládáme polohu reakce tlačené části patní desky vždy v ose tlačené pásnice sloupu, (viz následující obrázek), lze momentovou únosnost podle [23] zjednodušeně vyjádřit ve tvaru:

$$M_{Rd} = \min \left\{ \frac{F_{t,Rd} \cdot r}{1 - \frac{r_c}{M_{Sd} / N_{Sd}}}; \frac{F_{c,Rd} \cdot r}{1 + \frac{r_t}{M_{Sd} / N_{Sd}}} \right\} \quad (17)$$



Obr.10: Model patní desky.

2.5.3. Ohybová tuhost patky sloupu

Ohybovou tuhost patky sloupu lze zjednodušeně stanovit podle [23] takto:

Pro $r_c < e < \alpha$ bude

$$S_j = \frac{e}{e - a} \cdot \frac{E \cdot z^2}{\mu \cdot \sum \frac{1}{k_i}}, \quad (18)$$

kde:
$$e = \frac{M_{Sd}}{N_{Sd}} = \text{konst.}, \quad (19)$$

$$\mu = (1,5 \cdot \gamma)^{2,7} \quad (20)$$

je součinitel tvaru křivky pro patní plech,

$$\gamma = \frac{1 + \frac{r}{2 \cdot e}}{e + \frac{r}{2 \cdot e}} \quad (21)$$

zahrnuje vliv poměru ohybových momentů.

3. PROGRAMOVÉ SYSTÉMY ANSYS, NEXIS

Programový systém ANSYS patří mezi programy, umožňující analýzu konstrukcí metodou konečných prvků. Lze jej provozovat jak na osobních počítačích, tak i na výkonných pracovních stanicích. Systém má poměrně dobrou dostupnost uživatelských i teoretických manuálů a pracuje s ním stále více uživatelů.

Po zrušení embarga na tento produkt se dostal na náš trh v roce 1992, kdy byl zaveden na vysokých školách, vědeckých pracovištích a v různých odvětvích průmyslu. Od tohoto roku je tento systém k dispozici i na Fakultě stavební VUT v Brně, a to jak pro výuku, tak pro výzkumné projekty a granty včetně komerčního využití. V současné době je využívána verze ANSYS 5.6.

Programový systém NEXIS patří mezi integrální modulární systémy pro výpočty metodou konečných prvků a dimenzování konstrukcí.

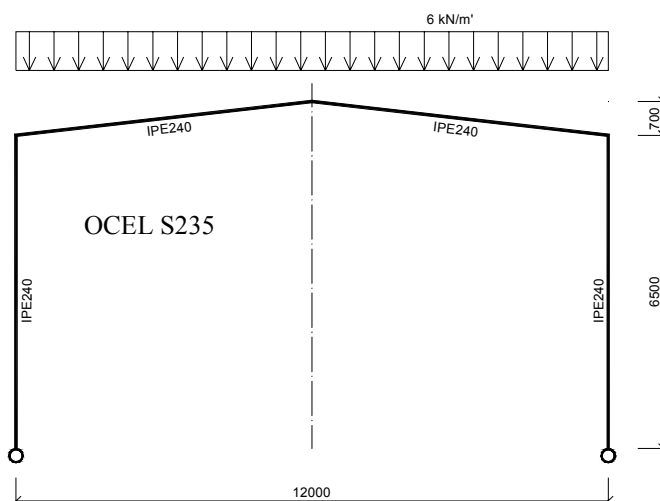
Programový systém NEXIS je produktem firmy SCIA CZ, s. r. o.

Systém umožňuje otevření několika projektů konstrukcí současně, přičemž v reálném čase lze spustit jednu instalaci programu NEXIS, ve které může být otevřeno více projektů.

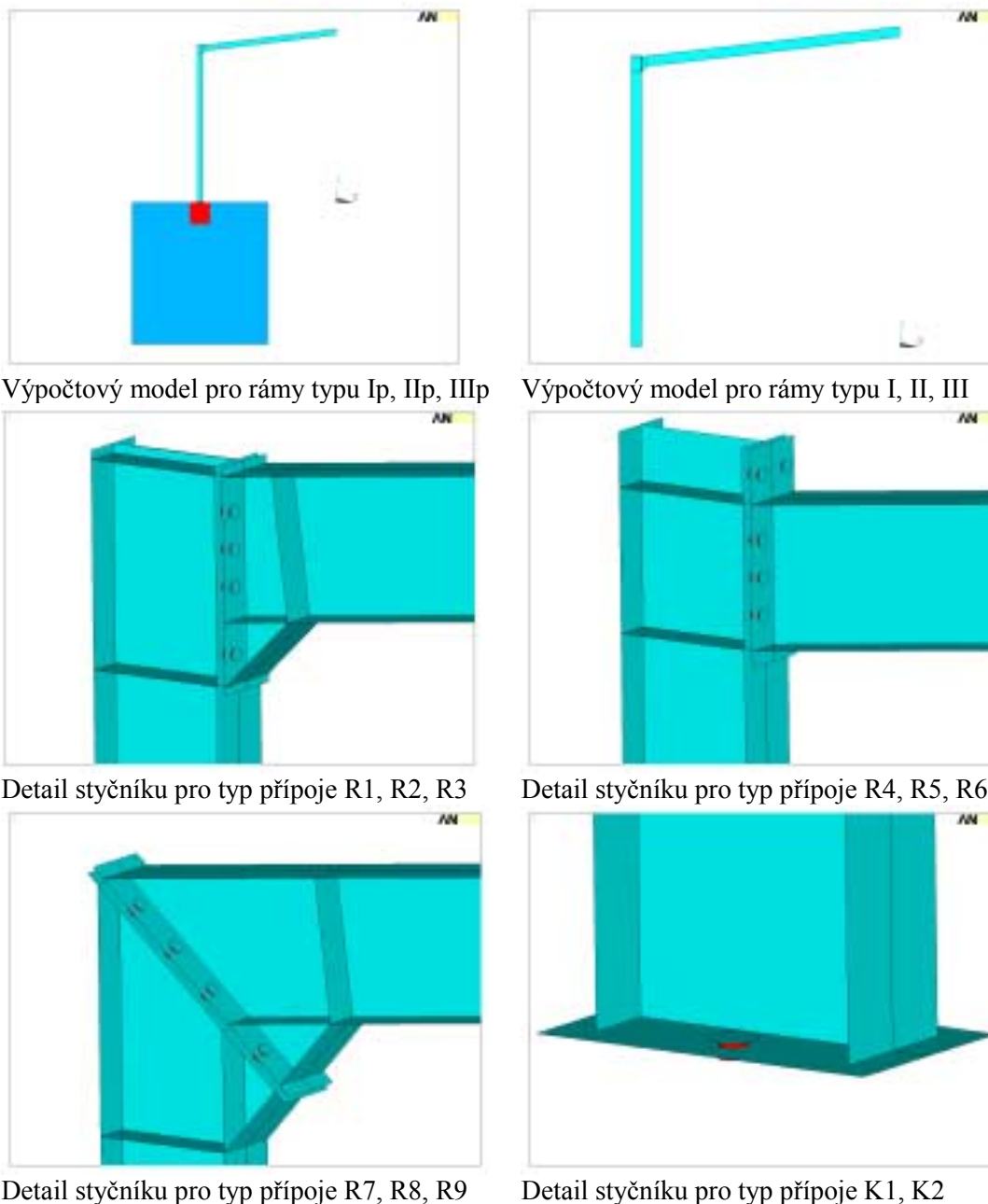
3.1. Obecný popis výpočtového modelu

Cílem plánované analýzy bylo sledovat vliv uspořádání šroubových spojů na celkové chování ocelové prutové konstrukce. V praxi se pro určování vnitřních sil, napětí a deformací ocelových konstrukcí používají nejčastěji prutové modely. Rámová konstrukce je nahrazena pruty, procházejícími střednicí sloupu a příčle; geometrie profilu je určena průřezovými charakteristikami. MKP model zjednodušující skutečnou konstrukci, není schopen popsat až na prutové prvky detail šroubového připojení prutů. Pruty zde mohou být připojeny kloubově (spojené pruty mají v daném místě společné posuny) nebo tuze (společné posuny i rotace). Většina programů dnes již umožňuje i poddajné spojení, společné posuny, nespojitě pootočení – pruty, reprezentující sloup a příčel, jsou spojeny přes pružinu, která umožňuje částečný přenos zpravidla ohybových momentů mezi spojenými pruty.

Pro stanovení napětí ve šroubech, v čelních deskách v okolí šroubů nebo v místě připojení desky k válcovanému profilu, je nutné použít podrobnější model a přesnější výpočetní postup. Pro řešení dané úlohy byl aplikován MKP systém ANSYS 5.6. Zvolená analýza byla zaměřena na chování šroubových spojů rámové konstrukce. Pro řešení byl využit model na bázi deskostěnových a prostorových prvků. Z důvodů enormních nároků modelu s prostorovými prvky na výpočetní kapacitu byl zvolen méně náročný, přesto dostatečně výstižný deskostěnový model. Model profilu IPE 240, ze kterého byl navržen sloup i příčel, byl vytvořen ze střednicových ploch pásnic a stojiny. Tento model byl pokryt deskostěnovými prvky. Ve vyšetřovaných místech (patní a čelní desky, rámový roh) a v místech, kde se předpokládá vznik koncentrace napětí (okolí šroubů, výztuh), byla vytvořena jemnější struktura prvků, aby byl MKP model schopen poskytnout podrobné rozložení napětí v těchto oblastech. Model rámu byl zatížen spojitým svislým zatížením 6 kN/m půdorysného průmětu. Schema modelu rámu je znázorněno na následujícím obrázku 11. Výpočtové modely a detaily styčnicků modelované v systému ANSYS jsou uvedeny na obrázku 12.



Obr.11: Schema modelu rámu.



Obr. 12: Výpočtové modely a detaily styčnicků sestavené programovým systémem ANSYS.

4. ANALÝZA PRUTOVÉ KONSTRUKCE

4.1. Obecně

Při výpočtu prutových konstrukcí včetně návrhu přípojů se zpravidla rozhoduje mezi dvěma extrémy – dokonalým rámovým spojením nosníků a sloupů nebo ideálním kloubem. Tyto dva základní typy tuhostí styčnicku bývají obvykle uvažovány jak u „vnitřních“ styčnicků konstrukce, tak i v kotvení ocelové konstrukce ke spodní stavbě. Ve skutečnosti leží „reálná tuhost“ vždy mezi těmito dvěma extrémy. Lze tedy konstatovat, že tuhost, únosnost a tažnost styčnicků má vliv na chování prutové konstrukce jako celku.

V praxi lze při výpočtu prutové konstrukce jako celku použít několik možností přístupu k výpočtu:

- Reálné tuhosti styčnicků zanedbat a do výpočtu je zavést pouze jako styčníky „dokonale tuhé“ nebo „ideálně kloubové“.
- Předem si navrhnout typy přípojí a podle nich dále stanovit ručním výpočtem tuhost navržených styčnicků (dle platných normativních dokumentů) a s takto získanou tuhostí provést výpočet.
- Výpočtový model konstrukce řešit takovým programovým systémem, který je schopen tuhosti styčnicku stanovit dle přesně definovaných charakteristik styčnicků a s těmito tuhostmi dále počítat. Po provedení výpočtu je pak nutné kontrolovat, zda není překročena výpočtová únosnost styčnicku $M_{j,Rd}$.
- Tuhost a únosnost styčnicku – jedná-li se o neobvyklé přípoje – zjistit experimentálně v laboratoři, popřípadě výpočtem izolovaného styčnicku programovým systémem pro analýzu konstrukcí metodou konečných prvků, jak je uvedeno např. v [34]. S takto získanou tuhostí dále provést výpočet konstrukce.
- Pro analýzu konstrukce jako celku použít programový systém pro analýzu metodou konečných prvků. Tento systém ovšem musí umožnit dostatečně přesně definovat jednotlivé komponenty přípojí. Potom tuhost spoje není nahrazena tuhostí pružiny, ale každý spoj je definován skutečnou geometrií a fyzikálními vlastnostmi jeho dílčích částí.

4.2. Analýza vybraného typu konstrukce

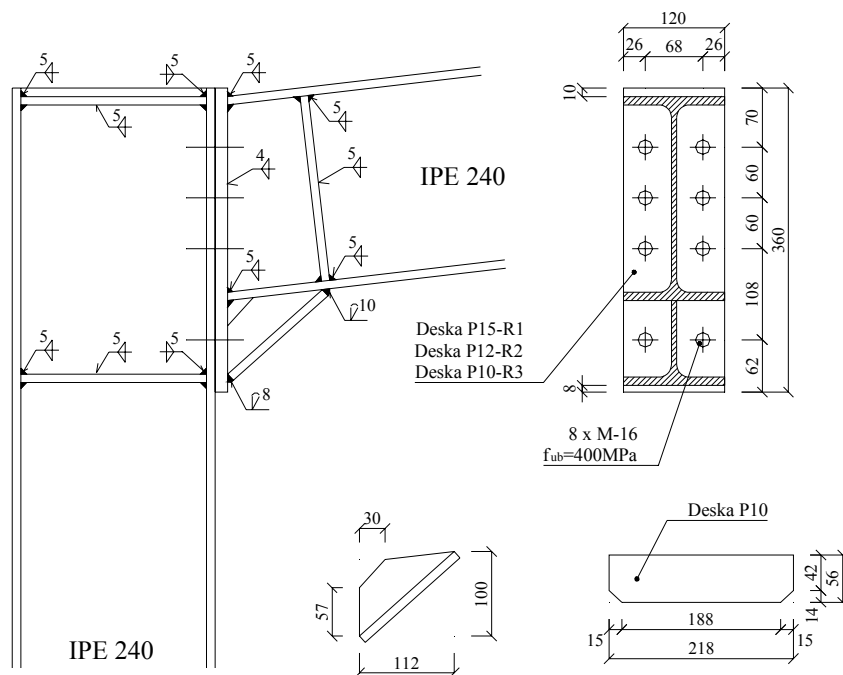
V práci je provedena analýza rovinného rámu o jednom poli s kloubovými patkami. Sloup i příčel jsou po celé délce zajištěny proti ztrátě příčné a torzní stability. Zvolený rám byl řešen některými výše uvedenými postupy.

Byly řešeny tyto varianty:

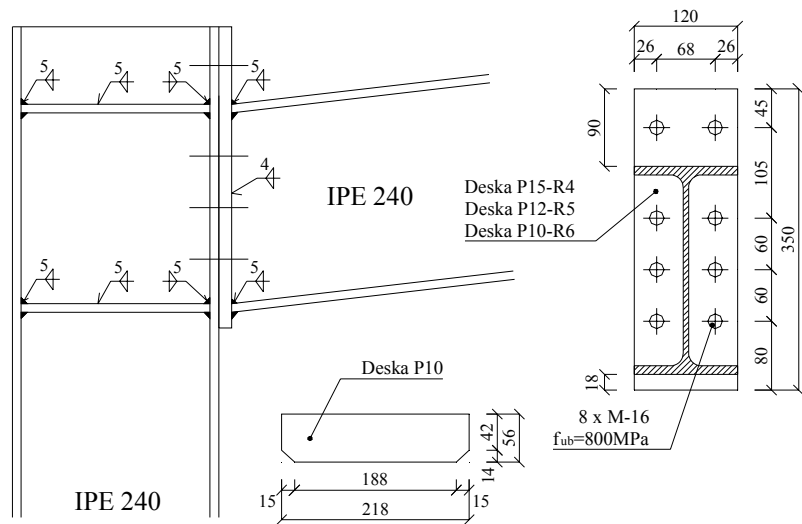
Tuhost v kotvení a rámovém rohu byla uvažována pro tyto typy přípojí:

- rámový roh typu R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9
- kotvení typu K1, K2

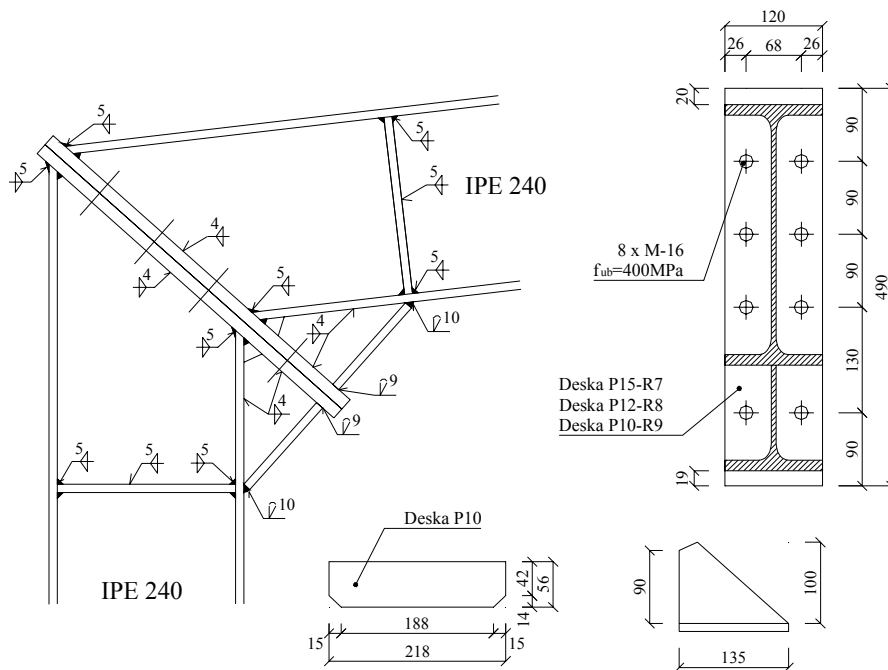
Typy přípojí (R1 až R9, K1, K2) jsou znázorněny na následujících obrázcích:



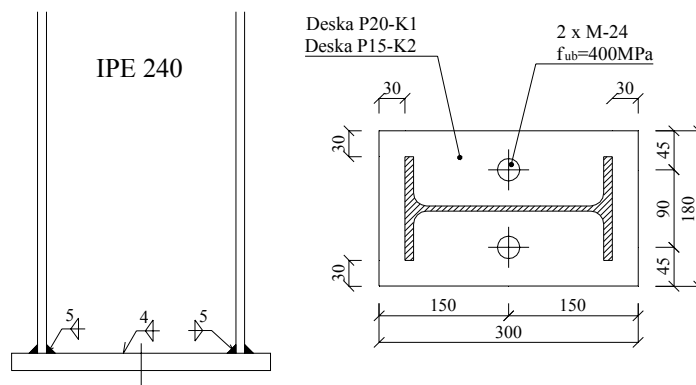
Obr. 13: Přípoj typu R1, R2, R3



Obr. 14: Připoj typu R4, R5, R6

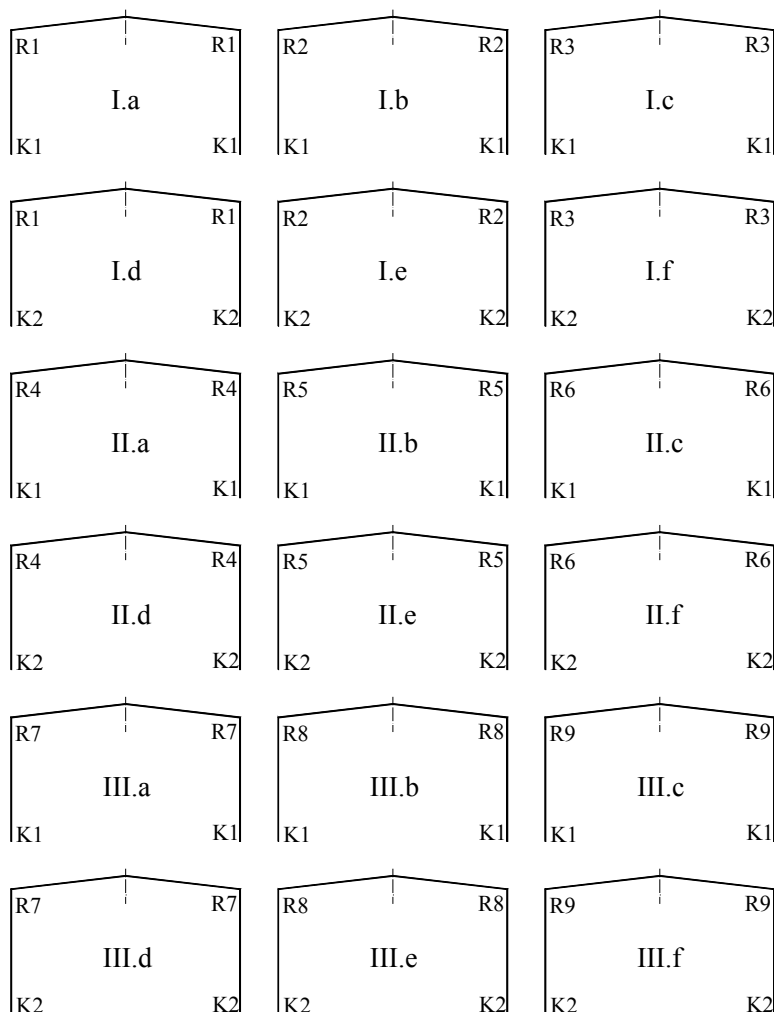


Obr. 15: Připoj typu R7, R8, R9



Obr. 16: Připoj typu K1, K2

Kombinací výše uvedených typů přípojuů dostaneme následující typy rámu:



Obr.17: Typy rámu

Výše uvedené typy rámu byly řešeny bez a se spolupůsobením betonové patky a podloží. Podloží je charakterizováno následujícími parametry:

- C_{1x} pružný odpor proti posunutí u ,
- C_{1z} pružný odpor proti posunutí w ,
- C_{2x} pružný odpor proti deformaci $\frac{\partial u}{\partial x}$.

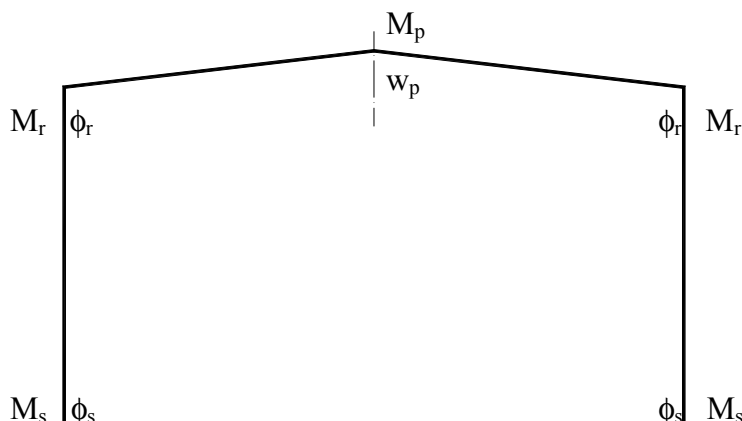
Rámy typu: I.a, I.b, I.c, I.d, I.e, I.f,
 II.a, II.b, II.c, II.d, II.e, II.f,
 III.a, III.b, III.c, III.d, III.e, III.f,

po zahrnutí vlivu betonové patky a podloží do výpočtu jsou označeny jako:

Ip.a, Ip.b, Ip.c, Ip.d, Ip.e, Ip.f,
 IIp.a, IIp.b, IIp.c, IIp.d, IIp.e, IIp.f,
 IIIp.a, IIIp.b, IIIp.c, IIIp.d, IIIp.e, IIIp.f,

5. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZY KONSTRUKCE

Systémem ANSYS bylo v rámci této práce vytvořeno 36 lineárních variant (viz obr. 17), 6 fyzikálně a geometricky nelineárních (rámy typu I.a, Ip.a, II.a, IIp.a, III.a, IIIp.a) a 3 varianty kontaktní úlohy se zohledněním fyzikální nelinearity (rámy typu I.a, II.a, III.a). Aby bylo možné potvrdit výsledky získané jinými postupy, např. programem NEXIS, event. ručním výpočtem dle [3], [4], bylo nutno použít níže popsané postupy. Vyhodnocovanými veličinami byl svislý průhyb příčle w_p uprostřed jejího rozpětí, natočení příčle ϕ_r v místě připojení příčle ke sloupu, natočení sloupu ϕ_s v jeho patě. Z vnitřních sil v centru zájmu figuroval ohybový moment M_p uprostřed rozpětí příčle, M_r v rámovém rohu a M_s v patě sloupu – viz obr. 18.



Obr. 18: Sledované veličiny na analyzovaném rámu.

5.1. Sledování závislostí na analyzované konstrukci

Výsledky, získané řešením různých typů ráků zvolenými metodami, byly zpracovány do tří skupin pomocí grafů.

První skupina grafů znázorňuje závislost mezi ohybovým momentem, a to buď v rámovém rohu resp. v kotvení, a relativním natočením příčle, resp. sloupu.

V grafu je použito následující značení:

Lin Nexis:	Lineární výpočet programem NEXIS.
Nelin Nexis:	Geometricky nelineární výpočet programem NEXIS.
Lin ANSYS:	Lineární výpočet programem ANSYS.
Nelin ANSYS:	Geometricky i fyzikálně nelineární výpočet programem ANSYS.
Kontakt ANSYS:	Výpočet programem ANSYS pomocí kontaktních prvků.

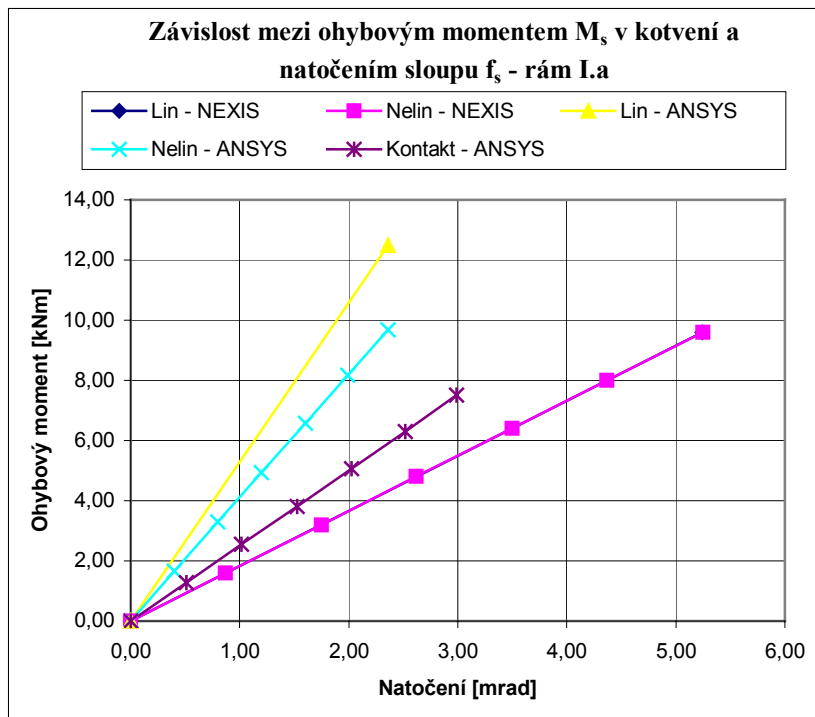
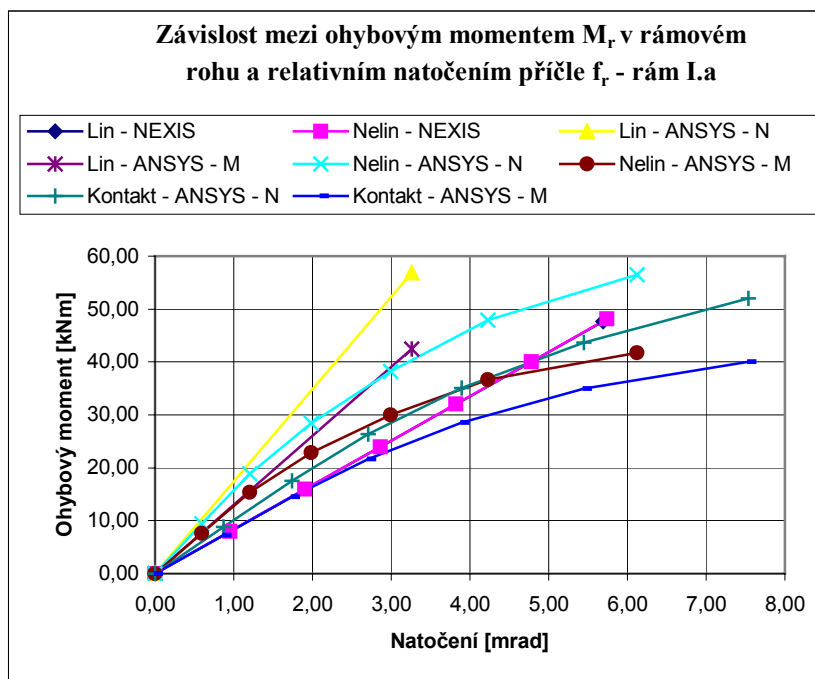
Druhá skupina grafů znázorňuje závislost ohybového momentu na natočení izolovaného styčníku. Vyneseny jsou následující křivky:

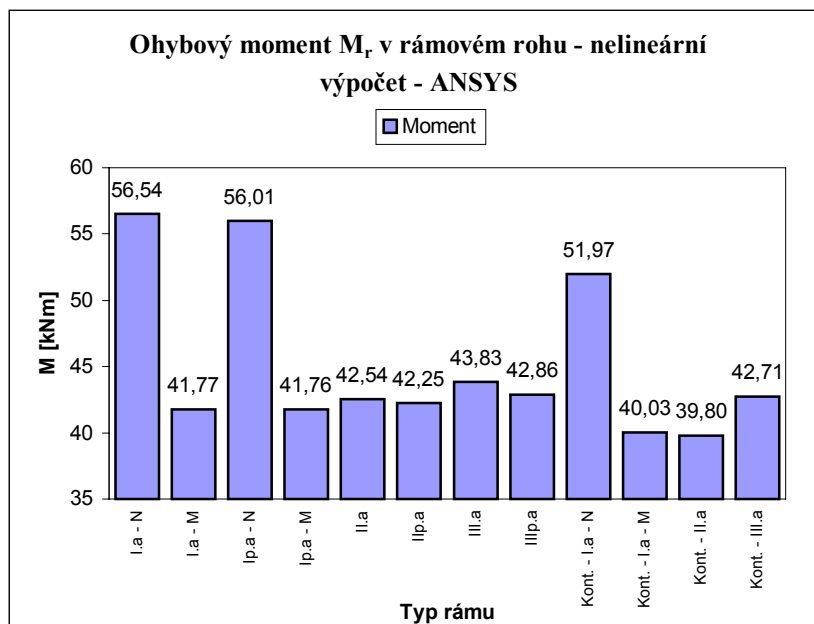
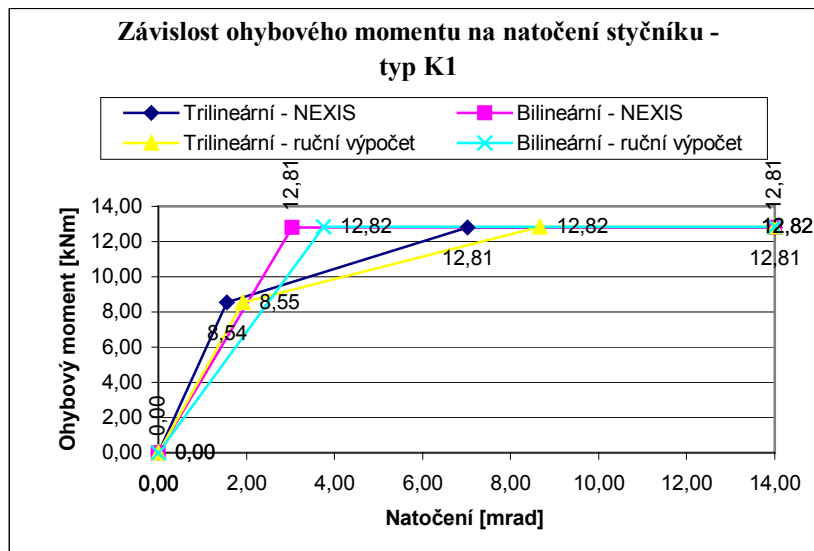
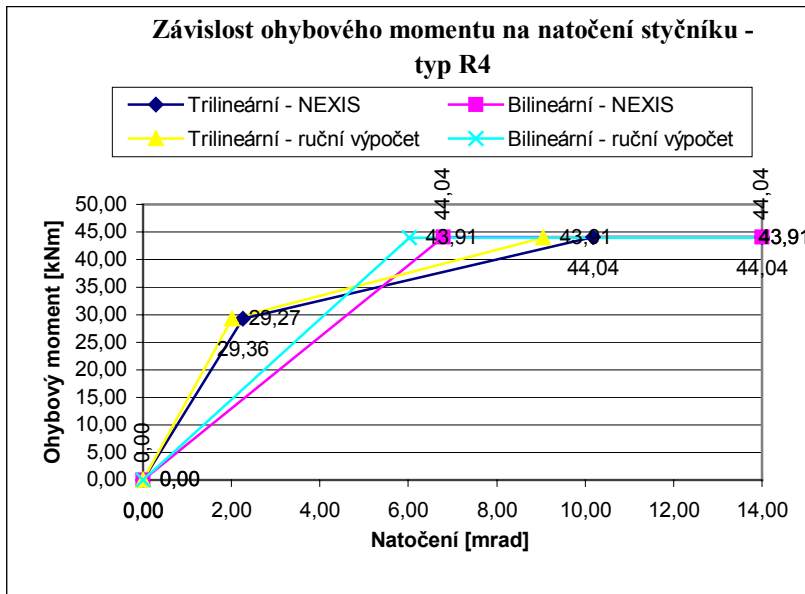
Trilineární – NEXIS:	Značí trilineární závislost vypočtenou modulem PŘÍPOJE EC3 programem NEXIS.
Bilineární – NEXIS:	Značí bilineární zjednodušenou závislost. Tuhost styčníku je brána hodnotou $S_{j,ini}/\eta$ pro všechny hodnoty momentu $M_{j,Sd}$.
Trilineární – ruční výpočet:	Pouze u typu přípoje R4 a K1. Značí ruční výpočet podle [4].
Bilineární – ruční výpočet:	Pouze u typu přípoje R4 a K1: Tuhost styčníku je brána hodnotou $S_{j,ini}/\eta$ pro všechny hodnoty momentu $M_{j,Sd}$. $S_{j,ini}$ vypočteno ručně podle [4].

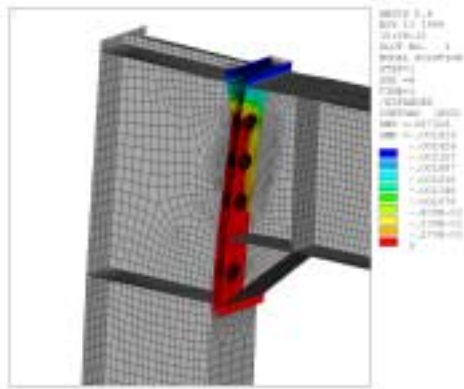
Třetí skupina grafů znázorňuje, jak se mění rozložení ohybových momentů na konstrukci ve sledovaných bodech:

- v rámovém rohu,
 - v kotvení,
 - ve vrcholu příčle,
- a rozložení svislých posunů:
- ve vrcholu příčle.

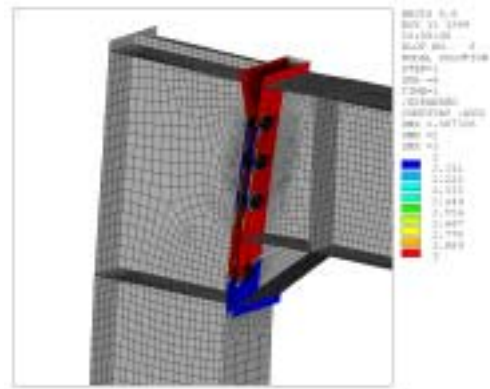
5.2. Grafické znázornění některých sledovaných závislostí



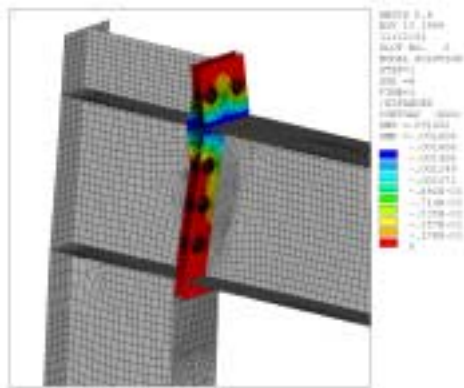




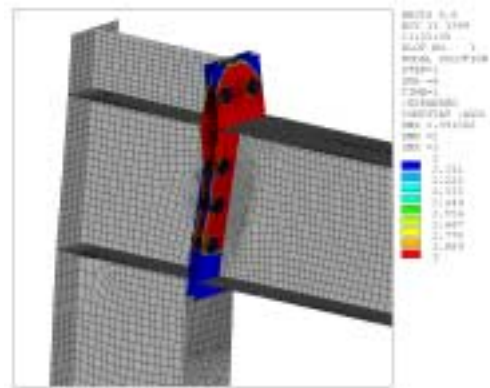
Typ přípoje R1 – kontaktní prvky
Oddálení styčných desek přípoje



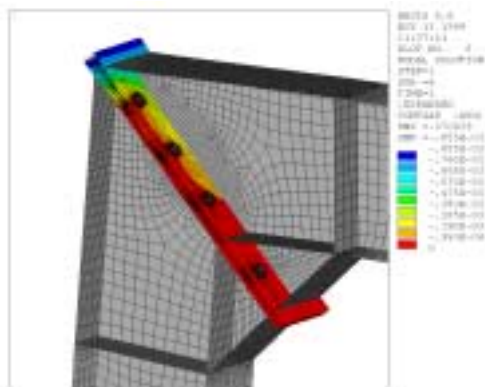
Typ přípoje R1 – kontaktní prvky
Stav přípoje po aplikaci zatížení



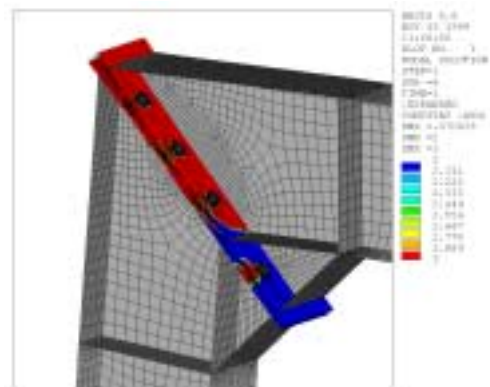
Typ přípoje R4 – kontaktní prvky
Oddálení styčných desek přípoje



Typ přípoje R4 – kontaktní prvky
Stav přípoje po aplikaci zatížení



Typ přípoje R7 – kontaktní prvky
Oddálení styčných desek přípoje



Typ přípoje R7 – kontaktní prvky
Stav přípoje po aplikaci zatížení

Obr. 19: Ukázka grafických výstupů – kontaktní úloha.

6. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést analýzu skutečného působení styčnicků na vybrané prutové konstrukční soustavy s uvážením poddajnosti styčnicků, přičemž se jednalo o styčnický šroubovaný. Pro účely tohoto zkoumání byl zvolen dvoukloubový rám s různým uspořádáním přípojí v rámovém rohu i v kotvení ke spodní stavbě. Byly řešeny jak rámy bez vlivu betonové patky a podloží, tak i rámy s těmito vlivy. Řešení byla provedena různými metodami, a to jednak metodami běžně dostupnými, tak i metodami za použití ne zcela běžných prostředků jak z oblasti hardware tak i software.

Všechny závislosti byly sledovány jak na rámech bez uvážení vlivu betonové patky a podloží, tak i na rámech s tímto vlivem.

Jak je patrné z předešlých kapitol, je možné konstatovat, že pro zvolený typ konstrukce odpovídají sledované veličiny předpokládaným průběhům vyplývajícím z té které tuhosti přípoje, popřípadě jejich kombinacím.

Rozdíly v ohybových momentech v rámovém rohu činí při použití různých přípojí a různých metod výpočtu až 30 %.

Rozdíly v ohybových momentech v kotvení opět při použití různých typů přípojí a různých metod výpočtu až 59 %.

Rozdíly v ohybových momentech ve vrcholu příčle opět při použití různých přípojí a různých metod výpočtu na rámu činí až 24 %.

Svislé posuny ve vrcholu příčle při použití různých typů přípojí a různých metod výpočtu na rámu činí až 30 %.

Výše uvedené výsledky řešení ukazují na to, že je v rámci efektivního využití materiálu na konstrukci žádoucí, aby se výpočet prutových konstrukcí s polotuhými styčnickými stal rozšířenější než je tomu doposud, neboť správná volba tuhosti přípoje může ve svém důsledku vést k takovému přerozdělení vnitřních sil a deformací na konstrukci, že celkový návrh konstrukce vyjde z hlediska hmotnosti a pracnosti ekonomicky výhodněji, než na konstrukci bez použití polotuhých styčnicků.

Je však třeba konstatovat, že doposud zpracovaná metodika výpočtu náhradní tuhosti styčnicku (metoda komponentů) je zpracovaná pouze pro profily typu I, H. Pouze pro tyto typy profilů lze tedy provést zjednodušený výpočet pomocí prutových prvků se zavedením náhradní tuhosti přípoje. V jiných případech je nutné použít výpočet přesnější (např. programovým systémem ANSYS) nebo stanovit náhradní tuhost experimentálně.

LITERATURA

- [1] ČSN 73 1401: *Navrhování ocelových konstrukcí*, ČNI, Praha, 1998
- [2] ČSN P ENV 1993-1-1 (73 1401): *Navrhování ocelových konstrukcí. Část 1.1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČNI, Praha, 1994
- [3] ČSN P ENV 1993-1-1 Změna A2 (73 14 01): *Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1.1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČNI, Praha, 2000
- [4] EUROCODE 3, Part 1.1., Revised Annex J: *Joints in Building Frames*, CEN, Brussels, 1997
- [5] Al-Bermani, F.G.A.-Kitipornchai, S.: *Elastoplastic Nonlinear Analysis of Flexibly Jointed Space Frames*, Journal of Structural Engineering, Vol.118, No.1, 1992
- [6] Anderson, D.-Colson, A.-Jaspart, J.P.-Wald, F.: *Ekonomické styčníky pro ocelové rámy*, Stavební obzor, 10/1993
- [7] Ansys theory reference, eleventh edition, ANSYS release 5.6, SAS IP, Inc., 1999.
- [8] Bajer, M.: *Analýza skutečného působení šroubovaných spojů ocelových konstrukcí*, 19. Česká a slovenská mezinárodní konference „Ocelové konstrukce a mosty 2000“, Vysoké Tatry, SR, 2000
- [9] Bajer, M.: *Elasto-plastic analysis of space steel frames assuming large deformations*, 17. Česko – Slovenská konferencia Ocelové konstrukcie a mosty – 94 – I. Diel, Bratislava, 1994
- [10] Bajer, M.: *K problematice navrhování poddajných spojů ocelových konstrukcí*, Seminář ocelové a dřevěné konstrukce, Brno, 1999
- [11] Bajer, M.: *Vliv poddajnosti šroubovaných spojů na únosnosti ocelových rámových konstrukcí*, XI. mezinárodní vědecká konference, sekce – nosné konstrukce staveb, Brno, 1999
- [12] de Boer, A.-Lu, L.H.: *Numerical Modelling of Welded Connections in Orthotropic Steel Decks*, 2nd International DIANA Conference on Finite Elements in Engineering and Science, Amsterdam, 1997
- [13] Goto, Y.-Miyashita, S.: *New Classification System for Semi-Rigid Connections Considering Overall Behavior of Frames*, IABSE Colloquium, Istanbul, 1996
- [14] Chen, W.F.-Kishi, N.: *Creating Design Application Models from Historical Experimental Database*, Semi-Rigid Connections in Steel Frames, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Bethlehem, 1992
- [15] Chen, W.F.-Wu, F.H.: *Moment-Rotation Relationship of Semi-Rigid Steel Beam-to-Column Connections*, Semi-Rigid Connections in Steel Frames, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Bethlehem, 1992
- [16] Christopher, J.E.-Bjorhovde, R.: *Semi-Rigid Frame Design Methods for Practicing Engineers*, Engineering Journal (First Quarter), 1999
- [17] Kolář, V. – Němec, I.: *Modelling of Soil – Structure interaction*, Academica, Praha, 1989
- [18] Nethercot, D.A.: *Classification of Connections by Type*, Semi-Rigid Connections in Steel Frames, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Bethlehem, 1992
- [19] Šmak, M.: *Problematika skutečného působení a metod navrhování ocelových prutových soustav s poddajnými spoji*, disertační práce, Brno, 2000
- [20] Wald, F.: *Analýza konstrukce s polotuhými styčníky*, Ocelové konstrukce, 1/2000
- [21] Wald, F.: *Návrh styčnicků metodou komponent*, Ocelové konstrukce, 6/2000
- [22] Wald, F.: *Využití poddajnosti styčnicků ocelových skeletů*, Inženýrské stavby 6/1990
- [23] Wald, F.-Sokol, Z.: *Navrhování styčnicků*, ČVUT, Praha, 1999

ABSTRACT

This habilitation deals with the Analysis of the real behavior of a selected type of construction with consideration of semi - rigid connections with a particular view on the effect of bolted connections either between single spatial elements or in anchorage of truss to the substructure.

A considerable difference of used types of joints is evident in the truss structural systems. They are differentiated by shape, constructional arrangement that means by their real behavior. When assembling the calculation models of a truss joints can be considered either absolutely rigid or ideally hinged. Absolutely rigid joints do not allow any rotation between connected members and transfer the bending moment from a beam to a column. On the contrary, ideally hinged joints the rotation allow and do not transfer any bending moment from the beam to the column.

The real behavior of the joints is situated between these limit cases – rigid joints are never fully flexural continuous and hinged joints always partly transfer a bending moment.

When describing the real behavior of joints (that means determination of their flexural rigidity and moment capacity), at present, we can come out from valid standard documents, experimental research of numerical analysis (for other types of joints not mentioned in codes).

Numerical solution by various program systems can be advantageous for the analysis of the construction with the consideration of real parameters of its joints.

The problems of real behavior of a truss can be divided into two basic groups:

The first group contains a description of basic characterizations of a connection (flexural rigidity and moment capacity) of an isolated joint. It can be determinate using algorithms stated in standard documents, which were created on the basis of an experimental research and a numerical analysis of a joint. These algorithms are limited for I and H shaped profiles.

The second group contains an analysis of constructions with considering of real behavior of joints, so that the determination how the division of internal forces and deformations of the analyzed construction are changed owing to a respecting of semi – rigidity of joints in truss systems, that means how the real behavior affects dimensions of connected profiles.

At present, the methodology of calculation of characteristic for isolated joint in a structural system is quite fully determined. Nevertheless this joint is solved separately without reciprocal relationship to a constructional arrangement of remaining parts of construction. The object of this work is to which extent all these facts mutually influence and how they change the distribution of internal forces and deformations. As evident from the definition of the solved problem it is very complicated to solve this task experimentally because the models are of larger scales. This is the reason why a method that comes out of the numerical solution of representative types of constructions by program systems ANSYS and NEXIS was chosen.

The final part of the work contains a comparison of objected dependences according to the used type of bolted connection and to the selected method of solution. There were analyzed:

- dependences between bending moment in the framework corner and relative rotation of the beam, respectively between bending moment and rotation of the column in an anchorage;
- dependences of the bending moment on the rotation of a joint and the change in the internal forces and deformations distribution in the solved construction in the dependence on the used type of connection.