

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav kovových a dřevěných konstrukcí

Ing. Miroslav Bajer, CSc.

**ANALÝZA POLOTUHÝCH STYČNÍKŮ
V OCELOVÝCH KONSTRUKČNÍCH SOUSTAVÁCH**

**THE ANALYSIS OF SEMI-RIGID CONNECTIONS
IN STEEL STRUCTURE SYSTEMS**

Zkrácená verze habilitační práce



BRNO 2005

KLÍČOVÁ SLOVA

ocelové prutové konstrukce, polotuhé styčníky, rotační tuhost, momentová únosnost, natočení styčníku, základní součást styčníku, výpočtový model, numerická analýza, skutečné působení.

KEY WORDS

steel beam structures, semi-rigid joints (connections), rotation stiffness, bending moment carrying capacity, joint rotation, basic joint component, computational model, numerical analysis, real behaviour.

Originál práce je uložen v archivu PVO FAST

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD.....	6
1.1 Předmět a cíl práce.....	6
2 STYČNÍKY V PRUTOVÝCH KONSTRUKČNÍCH SOUSTAVÁCH.....	7
2.1 Závislost ohybového momentu na natočení styčnicku.....	8
2.2 Klasifikace styčnicků nosníku se sloupem podle rotační tuhosti.....	9
2.3 Klasifikace styčnicků nosníku se sloupem podle momentové únosnosti.....	10
2.4 Momentová únosnost styčnicku.....	11
2.5 Rotační tuhost – základní model.....	12
2.6 Patky sloupů.....	12
2.6.1 Únosnost patky sloupů.....	13
2.6.2 Rotační tuhost patky sloupu.....	13
3 PROGRAMOVÉ SYSTÉMY PRO MODELOVÁNÍ STYČNÍKŮ.....	14
3.1 Programový systém Ansys.....	14
3.1.1 Obecný popis výpočtových modelů v systému Ansys.....	14
3.2 Programový systém Nexis.....	15
4 NUMERICKÁ ANALÝZA, VERIFIKACE EXPERIMENTEM.....	16
5 ANALÝZA PRUTOVÝCH KONSTRUKCÍ S POLOTUHÝMI STYČNÍKY	19
5.1 Numerická analýza rámové konstrukce.....	21
5.1.1 Analýza programovým systémem Ansys.....	26
5.1.2 Analýza programovým systémem Nexis s vlivem rotační tuhosti styčnicků.....	27
5.1.3 Vyhodnocení numerické analýzy rámové konstrukce.....	28
5.1.4 Sledované závislosti analyzované konstrukce.....	28
6 ZÁVĚR.....	34
SEZNAM ODKAZŮ NA LITERATURU.....	36
ABSTRACT.....	40

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Ing. Miroslav Bajer, CSc.

Narozen: 5. 4. 1957, Přerov
Pracovní zařazení: odborný asistent Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí Fakulty stavební VUT v Brně
Funkce: vedoucí oboru Konstrukce na Fakultě stavební VUT v Brně



Vzdělání:

Ing. – Fakulta stavební VUT v Brně, obor Konstrukce a dopravní stavby.

CSc. – 1986, téma „Aplikace moderních numerických metod při statickém řešení úloh s jednostrannými vazbami“.

Obor – 39-01-9 Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí.

Zaměření:

Ocelové konstrukce, styčníky ocelových prutových konstrukcí, kotevní styčníky s využitím lepených kotev, modelování ocelových konstrukcí a jejich částí.

Praxe:

Pedagogická praxe

Interní aspirantura na VUT FAST Brno	1. 10. 1982 až 31. 8. 1985
Akademický pracovník-odborný asistent	1. 9. 1985 doposud
Studium základní pedagogiky vysoké školy	1. 9. 1986 až 31. 8. 1988

Odborná praxe

DRUPOS Brno	1. 7. 1981 až 30. 9. 1982
Stavoprojekt Brno	1987 až 1987
Konstrukční činnost v investiční výstavbě	4. 8. 1992 doposud
Projektová činnost v investiční výstavbě	23. 2. 1994 doposud
OK – DESIGN BRNO spol. s r. o.	30. 11. 1994 doposud
Autorizovaný inženýr	16. 2. 1994 doposud

Pedagogická činnost:

Přednášky

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, Automatizace navrhování kovových konstrukcí.

Cvičení a semináře

Kovové a dřevěné konstrukce; Speciální kovové konstrukce, Automatizace inženýrských úloh, Využití výpočetní techniky při navrhování ocelových konstrukcí, Ateliérová tvorba, Ateliérová tvorba VT výpočtů, Vybrané statě z kovových konstrukcí, Specializovaný projekt, Diplomový seminář.

Vedení diplomových a doktorských prací

Každoročně 2 až 4 diplomové práce. V roce 2005 školitel 4 studentů doktorského studijního programu Konstrukce a dopravní stavby.

Řešené výzkumné projekty:

Odpovědný řešitel, spoluřešitel

Od 2005 – Statická a dynamická analýza skutečného působení lepených ocelových kotev (GAČR)

Od 2005 – Analýza skutečného působení šroubových spojů (FRVŠ).

Odborný spolupracovník

Problémy teorie, skutečného působení a metod navrhování kovových a ocelobetonových konstrukcí pro výstavbu a rekonstrukce se zřetelem na harmonizaci evropských a světových normativních dokumentů; Řešení ocelových prutových konstrukcí s jednostrannými vazbami, 1991 (dílčí úkol 37/4). Některé problémy náhodné chování spřažených ocelobetonových nosníků (dílčí úkol 37/5); Některé problémy skutečného působení a rekonstrukcí stavebních objektů (dílčí úkol 27/2); (Ústav kovových a dřevěných konstrukcí, řešitel prof. Ing. Jindřich Melcher, DrSc.).

Výzkumný záměr MŠM reg. č. 261100007 Teorie, spolehlivost a mechanismus porušování staticky a dynamicky namáhaných stavebních konstrukcí; (Ústav kovových a dřevěných konstrukcí, řešitel prof. Ing. Jindřich Melcher, DrSc.).

Spolupráce s praxí:

Realizovaná díla oceněná v mezinárodní odborné veřejné soutěži

- I. cena v sůtaži „O nejlepší realizovanou stavbu“ s ocelovou konstrukcí v ČR a SR v období 1991–1994 v kategorii Občianske a športové stavby – Ocelové konstrukce v areálu BOBY Brno. V kolektivu pod vedením prof. Ing. J. Melchera, DrSc.
- Hlavní cena prof. Faltuse v sůtaži „O nejlepší realizovanou stavbu“ s ocelovou konstrukcí v ČR a SR v období 1991–1994 – Ocelové konstrukce v areálu BOBY Brno. V kolektivu pod vedením prof. Ing. J. Melchera, DrSc.
- 1. miesto v sůtaži o nejlepší realizovanou stavbu s ocelovou konstrukcí v SR a ČR v období 1997–2000 v kategorii Občianske a športové stavby – Správni centrum JIHO-MORAVSKÉ PLYNÁRENSKÉ, a. s., Brno. V kolektivu pod vedením prof. Ing. J. Melchera, DrSc.
- 1. místo v odborné veřejné soutěži GRAND PRIX Obce architektů v kategorii rekonstrukce: Rekonstrukce zámeckého skleníku v Lednici. V kolektivu pod vedením Ing. M. Bajera, CSc.

Další významná realizovaná díla

- Seizmický projekt potrubních tras v JE Mochovce.
- Projekt of steel construction One 24-partion aggregate silo.

Odborná činnost:

Člen ČKAIT, člen ČSSI, člen Vědeckotechnické společnosti pro sanaci staveb a péči o památkové objekty, člen redakční rady časopisu Stavební obzor, autorizovaný inženýr v oborech Mosty a inženýrské konstrukce a Statika a dynamika staveb, školitel v doktorském studijním programu, člen Rady doktorského studijního programu oboru Pozemní stavby, člen komise pro státní doktorské zkoušky na oboru Pozemní stavby, člen Rady studijních programů, předseda Oborové pedagogické rady studijního oboru Konstrukce, vedoucí oboru Konstrukce, člen komise FRVŠ TO G1, vedoucí a recenzent diplomových prací, člen komise pro státní závěrečné zkoušky.

Publikační, posudková, projekční a výzkumná činnost

Vědecký časopis 1×, významné inženýrské a architektonické dílo 6×, zahraniční vědecké konference 17×, tuzemské vědecké a odborné konference 25×, odborný časopis 7×, posudky a expertízy 43×, skripta 3×, přes 100 projektů v oblasti kovových a dřevěných konstrukcí.

1 ÚVOD

Problematika skutečného působení styčnicků v ocelových prutových konstrukčních soustavách patří mezi aktuální problémy návrhu ocelových konstrukcí. Klasický předpoklad ideálního kloubu nebo dokonale tuhého spojení připojovaných prutů ve styčnicku neodpovídá realitě. Stanovením reálných vlastností styčnicku můžeme prokázat zvýšenou únosnost těchto kritických míst konstrukce, kterými styčnický bezesporu jsou. Vezmeme-li v úvahu, že styčnický tvoří cca 30 % ceny ocelové konstrukce, jsou přínosy v poznání vlivu jejich chování důležité i po stránce ekonomické. Výsledky řešení získané s použitím efektivních metod, které toto skutečné působení styčnicků zahrnují, vytvářejí předpoklady pro zabezpečení spolehlivosti, trvanlivosti a hospodárnosti realizovaných ocelových konstrukčních systémů.

1.1 Předmět a cíl práce

Habilitační práce je zaměřena na reálné chování styčnicků. Předmětem práce je analýza skutečného chování styčnicků – zejména šroubovaných – v prutových konstrukčních soustavách. Pod pojmem skutečné chování styčnicku myslíme, že styčnick se nechová jako dokonale tuhý či ideálně kloubový, ale jako polotuhý, s reálnou hodnotou rotační tuhosti. V této práci byla pozornost věnována jak styčnickům vnitřním, tak styčnickům kotevním. Kotevní styčnický byly navíc uvažovány s vlivem betonového základu a podloží. Předmětem práce nebyly styčnický příhradových trubkových konstrukcí. Problematika skutečného působení styčnicků byla řešena ze dvou pohledů.

Prvním základním pohledem na tuto problematiku je popis a stanovení základních charakteristik (rotační tuhosti a momentové únosnosti) izolovaného styčnicku. Tyto základní charakteristiky lze za určitých podmínek stanovit pomocí algoritmů uvedených v normativních dokumentech (např. [3], [4], [5]). Algoritmy popsané v těchto dokumentech byly vytvořeny zejména na základě experimentálního výzkumu. Numerické analýzy těchto typů styčnicků byly vždy verifikovány laboratorním výzkumem. Tyto algoritmy jsou ovšem omezeny pouze na vybrané typy průřezů prutů stýkajících se ve styčnicku, obvykle na průřezy typu I, H a také na předem omezené konstrukční uspořádání těchto styčnicků. Algoritmy pro styčnický s jinými typy prutů, případně pro styčnický s neobvyklým konstrukčním uspořádáním nejsou obvykle dostupné. Předmětem práce také bylo stanovit vliv základu a podloží na chování kotevního styčnicku.

Druhým pohledem na tuto problematiku je analýza skutečného působení prutových konstrukcí jako celku, s uvážením reálného chování styčnicků, tedy stanovení, jak jsou v důsledku respektování vlivu polotuhých styčnicků v prutových konstrukčních soustavách ovlivněny průběhy vnitřních sil a deformací analyzované konstrukce, tzn. jak skutečné chování styčnicků ovlivňuje dimenze připojovaných profilů.

S rozvojem výpočetní techniky lze v dnešní době ve větší míře při analýze konstrukcí nebo jejich částí používat numerické modely založené na prostorové metodě konečných prvků. Toto již není doménou pouze špičkově vybavených pracovišť, ale stále více tento přístup preferuje i odborná praxe.

Cílem práce bylo verifikovat výpočtové modely založené na prostorové metodě konečných prvků, které vystihují skutečné působení styčnicků v ocelových prutových soustavách. Větší pozornost byla přitom věnována styčnickům šroubovaným, kdy přípoj je realizován prostřednictvím čelní desky. Cílem práce bylo také prokázat, že takto navržené numerické modely lze použít při analýze reálné konstrukce, neboť modelové chování styčnicků odpovídá jejich reálnému působení v konstrukci. Poněvadž v případě složitých výpočetních modelů existuje reálné riziko, že takto získané výsledky neodpovídají skutečnému chování modelované konstrukce, v tomto případě styčnicku, je součástí této práce taktéž verifikační výpočet založený na srovnání s již realizovaným experimentem. Cílem tohoto numerického modelu bylo ověřit, zda výsledky numerické analýzy pro tento typ styčnicku jsou ve shodě s výsledky získanými experimentálně. Toto ověření bylo dále zobecněno pro šroubovaného styčnický obdobného typu.

Dalším dílčím cílem práce bylo provést analýzu vybrané reálné konstrukce a vyhodnotit výsledky tohoto řešení při použití rozličných přístupů zavedení skutečného působení styčnicků do výpočtových modelů (pomocí vztahů uvedených v normativních dokumentech, zavedením náhradních rotačních tuhostí styčnicků, stanovením reálného chování styčnicků pomocí modelů založených na prostorové metodě konečných prvků). Významným faktorem taktéž bylo v případě styčnicků kotevních zahrnutí vlivu spolupůsobení ocelové patky s betonovým základem a podložím.

2 STYČNÍKY V PRUTOVÝCH KONSTRUKČNÍCH SOUSTAVÁCH

V ocelových prutových konstrukčních soustavách se běžně používají značně různorodé typy styčnicků. Styčnickem je myšlena soustava jeho základních součástí, které jsou navzájem spojeny tak, že se mezi těmito prvky mohou přenášet příslušné vnitřní síly. Kromě různých typů profilů, které se ve styčnicku spojují, se styčnický vzájemně liší svým tvarem a konstrukčním uspořádáním, tzn., že v reálné konstrukci se liší svým skutečným působením. Kotevní styčnický ocelových konstrukcí jsou navíc ovlivňovány spolupůsobením s betonovým základem a okolním podložím. Styčnický se tedy od sebe obecně liší svými vlastnostmi, čímž myslíme jejich únosnost vzhledem k působení vnitřních sil v připojených prvcích, jejich rotační tuhost a rotační kapacitu.

Při sestavování výpočtových modelů ocelové prutové soustavy je třeba respektovat vliv chování styčnicků na rozdělení vnitřních sil po konstrukci a na celkové deformace konstrukce. Tento vliv lze zanedbat pouze v případě, že je dostatečně malý. Z hlediska pružnostní metody globální analýzy lze styčnický pokládat buď za dokonale tuhé, kloubové nebo polotuhé. Dokonale tuhé styčnický nepřipouštějí žádné pootočení mezi připojovanými prvky a přenášejí z nosníku do sloupu ohybový moment. Naopak ideálně kloubové styčnický jakékoliv pootočení připouštějí a nepřenášejí z nosníku do sloupu žádný ohybový moment.

Skutečné chování většiny styčnicků zpravidla leží mezi těmito dvěma limitními případy, které existují pouze v teoretické rovině – tuhé styčnický nejsou nikdy plně ohybově spojené a kloubové styčnický vždy částečně přenášejí ohybový moment. Styčnický, které se nechovají jako dokonale tuhé, nebo ideálně kloubové, klasifikujeme jako styčnický polotuhé.

Při popisu skutečného působení styčnicků (tzn. stanovení jejich skutečné rotační tuhosti a skutečné momentové únosnosti) lze v současnosti vycházet buď z platných normativních dokumentů (např. [3], [4], [5]), z experimentálního výzkumu, a to buďto experimentálního výzkumu vlastního nebo z dostupných publikovaných výsledků již provedených experimentů, event. z výsledků numerického modelování (např. u jiných typů styčnicků, než jsou uvedeny v normách), tyto výsledky je však třeba verifikovat experimentálním výzkumem.

Pro analýzu ocelové prutové konstrukce s uvažováním skutečného chování jejich styčnicků (zavedením reálné rotační tuhosti styčnicku) lze použít numerické modely s prutovými prvky řešené různými programovými systémy. Postup takové analýzy nosníku a rámu s respektováním polotuhých spojů je uveden např. v [69].

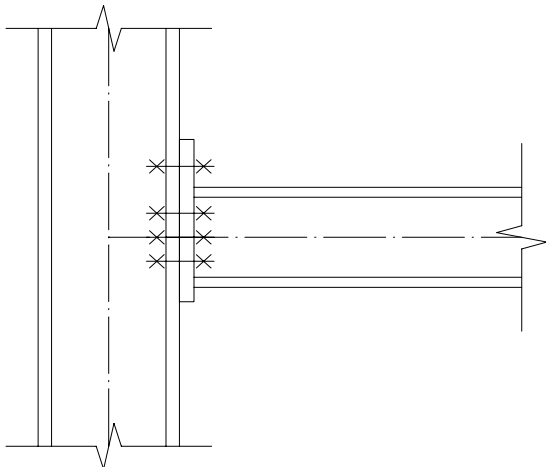
Při takovém postupu tím, že do výpočtu zavedeme rotační tuhost (i když reálnou), nemáme zpravidla dostatek informací o úrovni napjatosti v detailech styčnicku, proto nemůže provádět jeho optimalizaci za účelem lepšího využití materiálu ve styčnicku. Použijeme-li k analýze styčnicku numerické modely založené na prostorové metodě konečných prvků, lze tuto optimalizaci provádět.

Při stanovení skutečných vlastností styčnicku (tedy stanovení jeho skutečné rotační tuhosti a momentové únosnosti) vycházíme z reálných vlastností jeho jednotlivých dílčích částí – tzv. základních součástí styčnicku. V případě, že analýzu styčnicku provádíme podle normativních dokumentů, např. podle [3], je podstatou řešení rozložení styčnicku na základní součásti styčnicku, jejichž reálné vlastnosti se vzájemně ovlivňují. V případě provádění analýzy styčnicku pomocí numerických modelů lze při tomto přístupu styčnick velice dobře modelovat vhodnými konečnými prvky, jejichž vlastnosti se co nejvíce blíží vlastnostem jednotlivých základních součástí styčnicku. Poněvadž tento postup však není pro rozsáhlejší konstrukce z hlediska časové náročnosti a zjevná

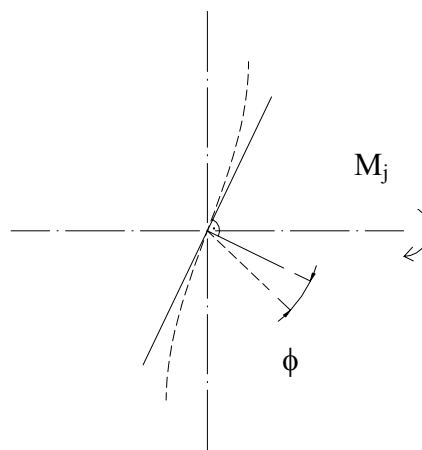
náročnosti na kapacitu použité výpočetní techniky vždy reálný, volí se obvykle zjednodušená předběžná metoda klasifikace s odhadem účinku interakce na chování dílčí základní součásti styčnicku. Z tohoto důvodu rozlišujeme základní součásti styčnicku dle typu namáhání (tah, tlak, smyk), přičemž každá základní součást styčnicku je popsána 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 základní součásti styčnicku jsou potom při výpočtu nahrazeny pružinami, které je třeba definovat nejen tuhostmi, ale taktéž přesnou polohou vzhledem k ostatním základním součástím při definování řešeného styčnicku. Pomocí základních součástí styčnicku lze popsat pracovní diagram styčnicku, který je možné sestavit z dílčích pracovních diagramů jednotlivých základních součástí styčnicku.

2.1 Závislost ohybového momentu na natočení styčnicku

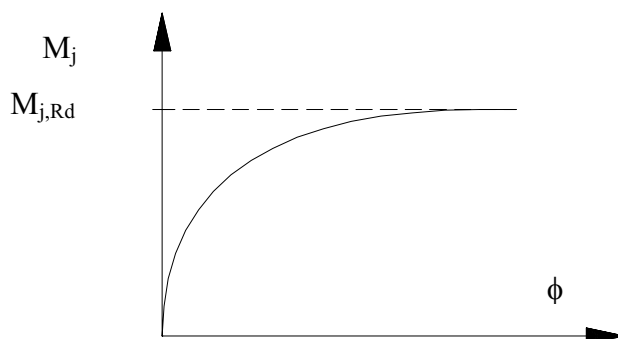
Pro přibližné vyjádření skutečného působení styčnicku může být přípoj (např. nosníku ke sloupu) představován pružinou, která spojuje osu spojovaných prvků (např. osu sloupu a osu nosníku) v teoretickém průsečíku. Předpokládá se, že spojované prvky jsou z průřezů I nebo H. Závislost působícího momentu M_j na natočení přípoje ϕ je nelineární, obr. 2.3. Přibližně lze výpočtovou závislost momentu na natočení aproximovat vhodnou křivkou. Obvykle se volí vyjádření po částech lineární (např. bilineární). Přitom platí, že křivka aproximované závislosti $M_j - \phi$ se má nacházet pod křivkou skutečné závislosti.



Obr. 2.1: Přípoj sloup – příčel.

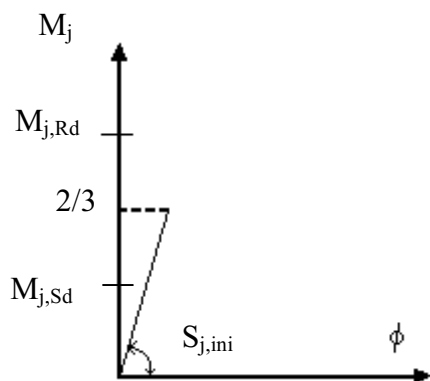


Obr. 2.2: Natočení styčnicku ϕ při působení momentu M_j .

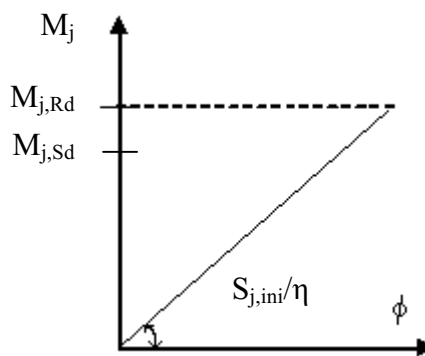


Obr. 2.3: Nelineární závislost ohybového momentu M_j na natočení styčnicku ϕ .

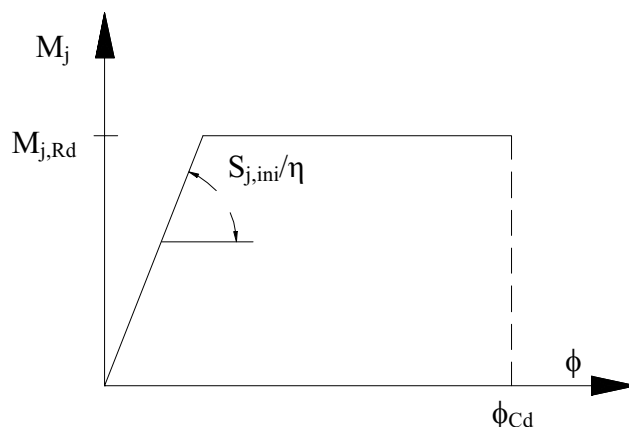
Nelineární řešení lze zjednodušit takto: jestliže moment $M_{j,Sd}$ nepřekročí $2/3 M_{j,Rd}$, viz obr. 2.4a, můžeme uvažovat pro pružnostní globální analýzu počáteční rotační tuhost styčnicku $S_{j,ini}$, v případě, že $M_{j,Sd}$ překročí tuto hranici, viz obr. 2.4b, uvažuje se rotační tuhost styčnicku $S_{j,ini}/\eta$, η je součinitel změny rotační tuhosti.



Obr. 2.4a: $M_{j,Sd} \leq 2/3 M_{j,Rd}$



Obr. 2.4b: $2/3 M_{j,Rd} \leq M_{j,Sd} \leq M_{j,Rd}$



Obr. 2.5: Bilineární závislost $M_j - \phi$, parametry $M_{j,Rd}$, S_j , ϕ_{Cd} .

2.2 Klasifikace styčnicků nosníku se sloupem podle rotační tuhosti

Obecně lze klasifikovat styčnicku podle rotační tuhosti jako:

- kloubové,
- tuhé,
- polotuhé.

Jako kloubový (oblast 3 obrázku 2.6) můžeme klasifikovat takový styčnick, jehož počáteční tuhost při natočení $S_{j,ini}$ splňuje podmínku:

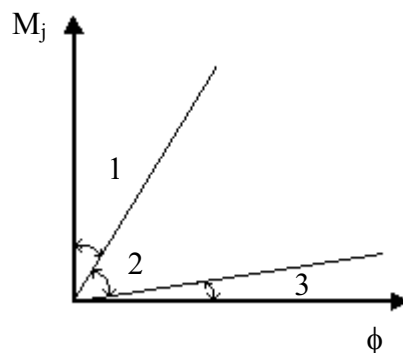
$$S_{j,ini} \leq 0,5 \cdot \frac{E \cdot I_b}{L_b}, \quad (2.1)$$

kde L_b je rozpětí nosníku (vzdálenost os sloupů), I_b je moment setrvačnosti připojovaného prvku (nosníku), $S_{j,ini}$ je počáteční rotační tuhost při natočení v přípoji (vyplývá ze závislosti momentu na natočení).

Styčnick lze klasifikovat jako tuhý (oblast 1 obrázku 2.6), jestliže

$$S_{j,ini} \geq k_b \cdot \frac{E \cdot I_b}{L_b}, \quad (2.2)$$

kde $k_b = 8$ pro rámy vyztužené (pokud vodorovné posuny vyztuženého rámu budou redukovány oproti rámu nevyztuženému nejméně o 80 %), $k_b = 25$ pro rámy nevyztužené, platí-li $\frac{K_b}{K_c} \geq 0,1$, kde K_b je průměrná hodnota $\frac{I_b}{L_b}$ pro všechny nosníky připojené v uvažovaném podlaží nahoře, K_c je průměrná hodnota $\frac{I_c}{L_c}$ pro všechny sloupy v uvažovaném podlaží, přičemž I_c je moment setrvačnosti sloupu, L_c je výška podlaží pro daný sloup.



Obr. 2.6: Klasifikace podle rotační tuhosti.

Jako polotuhý by měl být klasifikován styčnický nosník se sloupem tehdy, patří-li do oblasti 2, viz obrázek 2.6.

2.3 Klasifikace styčnicků nosníku se sloupem podle momentové únosnosti

Styčnický nosník se sloupem mohou být také zaříděny podle momentu únosnosti jako:

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

O styčnický kloubový se jedná tehdy, jestliže jeho moment únosnosti $M_{j,Rd}$ není větší než 0,25 násobek momentu únosnosti požadovaného pro styčnický s plnou únosností.

O styčnický nosník se sloupem s plnou únosností se jedná tehdy, jsou-li splněny pro styčnický ve vrcholu sloupu podmínky

$$M_{j,Rd} \geq M_{b,pl,Rd} \quad \vee \quad M_{j,Rd} \geq M_{c,pl,Rd}, \quad (2.3)$$

v případě styčnický po výšce sloupu podmínky

$$M_{j,Rd} \geq M_{b,pl,Rd} \quad \vee \quad M_{j,Rd} \geq 2M_{c,pl,Rd}, \quad (2.4)$$

kde $M_{b,pl,Rd}$ je plastická momentová únosnost nosníku, $M_{c,pl,Rd}$ je plastická momentová únosnost sloupu.

O styčnick s částečnou únosností se jedná tehdy, jestliže může přenášet ohybový moment, ale nespĺňuje podmínky pro styčnick s plnou únosností.

2.4 Momentová únosnost styčnicku

Rozhodující pro stanovení momentové únosnosti styčnicku jsou únosnosti jeho základních součástí. 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:

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r \cdot F_{tr,Rd} \quad (2.5)$$

kde $F_{tr,Rd}$ je účinná únosnost r-té řady šroubů v tahu, tj. nejmenší z únosností $F_{t,Rd}$:

- pásnice sloupu v ohybu,
- stojiny sloupu v tahu,
- čelní desky v ohybu,
- stojiny nosníku v tahu,

h_r je vzdálenost r-té řady šroubů od středu tlaku.

Účinnou únosnost $F_{tr,Rd}$ r-té řady šroubů je třeba redukovat je dále třeba redukovat pod hodnotu $F_{t,Rd}$ v souladu s [3].

Překročí-li osová síla N_{Sd} 10 % plastické únosnosti $N_{pl,Rd}$, dojde ke zmenšení hodnoty výpočtového momentu únosnosti $M_{j,Rd}$.

Hodnota momentové únosnosti $M_{j,Rd}$ je potom zmenšena o vliv osově síly. Pro šroubované případy, v případě, že N_{Sd} je tahová síla, platí:

$$M_{j,Rd} = M_{j,Rd} - |N_{Sd}| \cdot \frac{h}{2}, \quad (2.6)$$

kde h je vzdálenost mezi středem tlaku a středem tahu v připojeném prutu.

Je-li síla N_{Sd} tlaková, potom platí:

$$M_{j,Rd} = M_{j,Rd} - N \cdot h, \quad (2.7)$$

kde:

$$N = \max\left(0, \frac{|N_{Sd}|}{2} - (F_c - F_{tot})\right), \quad (2.8)$$

kde F_{tot} je součet tahových sil v řadě sloupů na úrovni $M_{j,Rd}$, F_c je nejmenší hodnota z:

- výpočtové smykové únosnosti stojiny sloupu,
- výpočtové tlakové únosnosti stojiny sloupu,
- výpočtové tlakové únosnosti stojiny a pásnice nosníku.

2.5 Rotační tuhost – základní model

Rotační tuhost styčnicku lze určit z tuhostí jeho základních součástí, což je možné vyjádřit jejich dílčími součiniteli k_i . Jsou-li ve styčnicku použity šroubové spoje s čelní deskou v tahu, potom lze součinitele tuhosti k_i jednotlivých základních součástí kombinovat.

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 rotační tuhost styčnicku S_j dle vztahu:

$$S_j = \frac{E \cdot z^2}{\mu \cdot \sum_i \frac{1}{k_i}}, \quad (2.9)$$

kde k_i je součinitel tuhosti i -té základní součásti styčnicku, z je rameno vnitřních sil, μ je tvarový součinitel tuhosti

$$\mu = \frac{S_{j,ini}}{S_j}. \quad (2.10)$$

Počáteční rotační tuhost styčnicku $S_{j,ini}$ pro $\mu = 1$ lze určit ze vztahu:

$$S_{j,ini} = \frac{E \cdot z^2}{\sum_i \frac{1}{k_i}}. \quad (2.11)$$

Tvarový součinitel tuhosti μ se určí takto:

$$\text{je-li } M_{j,Sd} \leq \frac{2}{3} M_{j,Rd}, \quad \text{potom } \mu = 1, \quad (2.12)$$

$$\text{je-li } \frac{2}{3} M_{j,Rd} < M_{j,Sd} \leq M_{j,Rd}, \quad \text{potom } \mu = \left(\frac{1,5 \cdot M_{j,Sd}}{M_{j,Rd}} \right)^\psi, \quad (2.13)$$

kde ψ je součinitel druhu přípoje: $\psi = 2,7$ pro svarový přípoj, $\psi = 2,7$ pro šroubový přípoj s čelní deskou, $\psi = 3,1$ pro šroubový přípoj s úhelníky na pásnici.

2.6 Patky sloupů

Při návrhu kotvení sloupů patní deskou je možné postupovat podle [4], [5], [69]. Princip návrhu tlačené části patky spočívá ve výpočtu únosnosti betonové patky pod poddajným patním plechem v podrčení. V případě kombinace osově síly a ohybového momentu je nutné posoudit únosnost tažené části přípoje.

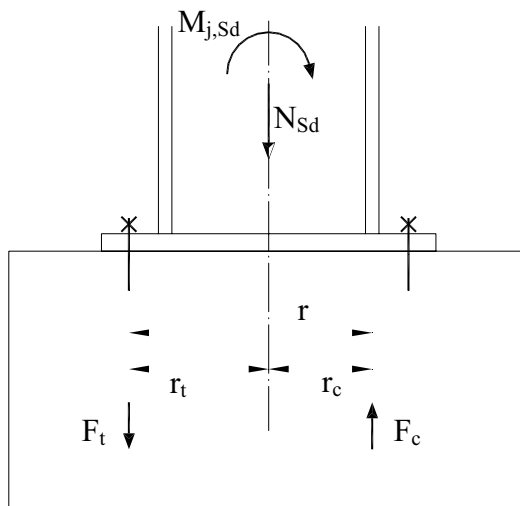
Při výpočtu kotvení sloupu s nevyztuženým patním plechem je třeba uvažovat tyto základní součásti kotevního styčnicku:

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

2.6.1 Únosnost patky sloupů

V případě, že předpokládáme polohu reakce tlačené části patní desky vždy v ose tlačené pásnice sloupu (viz následující obrázek 2.7), lze momentovou únosnost $M_{j,Rd}$ zjednodušeně vyjádřit ve tvaru:

$$M_{j,Rd} = \min \left\{ \frac{F_{t,Rd} \cdot r}{1 - \frac{r_c}{M_{Sd} / N_{Sd}}}; \frac{F_{c,Rd} \cdot r}{1 + \frac{r_t}{M_{Sd} / N_{Sd}}} \right\} \quad (2.14)$$



Obr. 2.7: Model patní desky.

2.6.2 Rotační tuhost patky sloupu

Rotační tuhost patky sloupu lze zjednodušeně stanovit podle [69] takto:

Pro $r_c < e < \alpha$ bude

$$S_j = \frac{e}{e-a} \cdot \frac{E \cdot z^2}{\mu \cdot \sum \frac{1}{k_i}}, \quad (2.15)$$

kde:
$$e = \frac{M_{j,Sd}}{N_{Sd}} = konst., \quad (2.16)$$

$$a = \frac{r_c \cdot k_c - r_t \cdot k_t}{k_c \cdot k_t}, \quad (2.17)$$

$$\mu = (1,5 \cdot \gamma)^{2,7} \quad (2.18)$$

je součinitel tvaru křivky pro patní plech,

$$\gamma = \frac{1 + \frac{r}{2 \cdot e}}{e + \frac{r}{2 \cdot e}} \quad (2.19)$$

zahrnuje vliv poměru ohybových momentů.

3 PROGRAMOVÉ SYSTÉMY PRO MODELOVÁNÍ STYČNÍKŮ

3.1 Programový systém Ansys

Programový systém Ansys patří mezi programy umožňující detailní analýzu konstrukcí metodou konečných prvků.

Z hlediska použití dovoluje programový systém ANSYS řešit úlohy lineární i nelineární, statické či dynamické. Systém obsahuje rozsáhlou knihovnu prvků, které lze dále členit. Umožňuje zvolit takové typy prvků (prut, skořepina, prostor), jimiž lze popsat detailnost řešeného problému.

Programový systém Ansys umožňuje kromě klasických prutových prvků i použití prutových prvků Beam188 a Beam189 vycházející z tzv. GBT (general beam theory). V tomto případě je možné výrazně přesněji popsat chování prutové konstrukce, než při použití „klasických prutových prvků“. Je možné třeba popsat klopení prutu. Popis styčnicku i při použití těchto prvků je nutné provést pomocí prvku s předem danou tuhostí (rotační i smykovou), tu však nejsme schopni určit předem. Z tohoto důvodu se jeví jako nejvhodnější a nejobecnější při modelování polotuhých styčnicků popis desko-stěnovými prvky (a taktéž prostorovými prvky), které umožňují přímo modelovat geometrii a vlastnosti styčnicku a tím i tuhost spoje.

Modely vytvořené systémem Ansys samozřejmě zohledňují interakci normálových sil s ohybovými momenty, tak jak jsou vnímány v prutové teorii. Výsledkem výpočtu je pole napětí a z něho je potom možné dopočítat vnitřní síly prutové analogie.

Uživatelům je k dispozici programový modul CivilFEM, který rozšiřuje možnosti systému, zejména pro stavební praxi. Užívá stejné grafické prostředí a usnadňuje přípravu složitých modelů stavebních konstrukcí. Obsahuje rozsáhlé databáze materiálových vlastností a průřezových charakteristik. Zahrnuje postupy návrhu a posouzení dle normativních předpisů. Vlastnosti stavebních materiálů jsou definovány takto: pro ocelové konstrukce jsou užity předpisy Eurocode 3, americká norma AISD ASD a španělská norma EA – 95. Pro betonové konstrukce předpisy Eurocode 2, americké normy ACI 318 a španělské normy EH. Dále systém umožňuje přípravu a vyhodnocení kombinací zatěžovacích stavů, včetně určení extrémů pro posouzení. Z hlediska času modul CivilFEM zefektivňuje přípravu modelu konstrukcí a taktéž zvyšuje kvalitu projektů.

Modul CivilFEM obsahuje moduly pro navrhování a posouzení stavebních konstrukcí – ocelových, železobetonových a rovněž řeší úlohy geotechniky.

Moduly, pomocí nichž je možné řešit úlohy z geotechniky, jsou schopny řešit stabilitu svahů, pasivní a aktivní zemní tlak. K dispozici je knihovna pružno-plastických vlastností zemin.

Výpočty provedené pomocí programového systému Ansys jsou použitelné jak z hlediska vědeckovýzkumného, tak i z hlediska praktického projektování.

3.1.1 Obecný popis výpočtových modelů v systému Ansys

Cílem provedené numerické analýzy programovým systémem Ansys bylo prokázat, že lze styčnicku ocelových konstrukcí modelovat takovým způsobem, aby výsledky získané matematickým modelováním odpovídaly výsledkům získaným experimentálním výzkumem, tzn. odpovídaly jejich skutečnému působení. Experimentální výzkum však zůstává nadále výrazným verifikačním faktorem numerického řešení této části konstrukce. Neméně významným cílem bylo sledovat vliv uspořádání šroubovaných styčnicků 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 modelování polotuhého 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 však nutné použít podrobnější model a přesnější výpočetní postup. Pro řešení dané úlohy byl aplikován MKP systém Ansys 9.0. Provedená analýza byla zaměřena na modelování polotuhých styčnicků izolovaných i zabudovaných v rámové konstrukci. Pro řešení byl využit model na bázi desko-stěnových a prostorových prvků. Z důvodů enormních nároků výpočtového modelu s prostorovými prvky na výpočetní kapacitu byl zvolen méně náročný, přesto dostatečně výstižný desko-stěnový model (s výjimkou modelování šroubů, betonové patky a podloží). Desko-stěnový model byl zvolen i přesto, že u tohoto typu prvku může být nevěrohodný popis deformací v jejich rovině. Byly tudíž použity desko-stěnové prvky Shell43 a Shell181, které mají doplňkové tvarové funkce, které jsou schopny tyto deformace popsat. Model profilu IPE, který byl použit pro sloup i nosník (příčel), byl vytvořen ze střednicových ploch pásnic a stojiny. Tento model byl pokryt desko-stěnovými prvky. Ve vyšetřovaných místech (např. patní a čelní desky) a v místech, kde se předpokládal vznik koncentrace napětí (např. okolí šroubů, výztuh), byla vytvořena jemnější struktura konečných prvků, aby byl MKP model schopen poskytnout podrobné rozložení napětí v těchto oblastech.

Vhodnost desko-stěnových prvků pro modelování ocelových konstrukcí s velkou globální i lokální štihlostí, tj. s velkým významem stabilitních jevů, byla verifikována s řadou experimentů a publikována v řadě výzkumných studií [41], [42], [43]. Modely takových konstrukcí s použitím desko-stěnových prvků jsou ve velmi dobré shodě s řadou realizovaných experimentů. Proto se dá předpokládat i jejich vhodné chování při popisu styčnicků obsažených v této práci.

Aby model co nejlépe popisoval realitu, byly šrouby modelovány jako prostorové objekty – válec s hlavou a matkou. Použity byly prostorové prvky Solid45. Tyto prvky mají v každém uzlu tři stupně volnosti. Šrouby a desky nejsou ve skutečnosti spojeny tuze, ale jedná se o jednostrannou kontaktní úlohu. Styčným deskám v rohu rámu je bráněno ve vzájemném oddálení šrouby. Mají-li desky tendenci v určitých místech se přiblížit, dosednou zde na sebe. K modelování kontaktů byl použit prvek Contac52, resp. Conta178.

3.2 Programový systém Nexis

Programový systém Nexis patří mezi integrální modulární systémy pro výpočty metodou konečných prvků a dimenzování konstrukcí. Na rozdíl od programového systému Ansys, ve kterém interaktivně tvoříme výpočtový model, v systému Nexis výpočtový model tvoříme převážně výběrem z předem vytvořených knihoven.

Výpočty jsou prováděny metodou konečných prvků a jsou využívány tyto prvky: prutový prvek (standardní dvojuzlový prvek s vlivem smyku), plošný prvek (trojúhelníkový nebo čtyřúhelníkový prvek s vlivem příčného smyku). K dispozici je systémová databáze materiálů.

Při tvorbě výpočtového modelu konstrukce uživatel definuje podpory (podloží), klouby na prutech, tuhé vazby, typy prutů, kabely, křížení prutů.

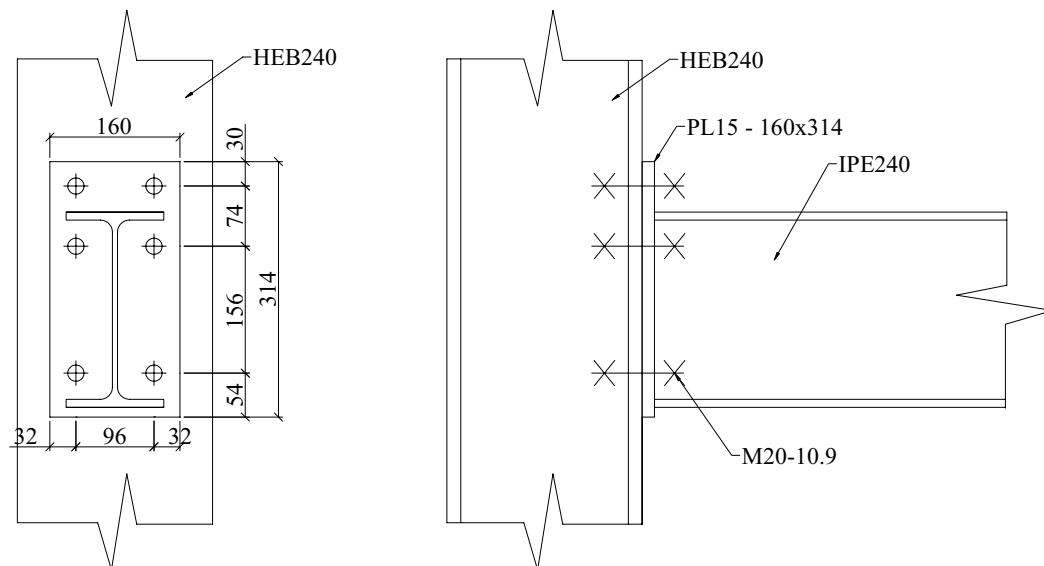
Tyto prostředky umožňují sestavit výpočtový model konstrukce tak, aby co nejvíce odpovídal reálné konstrukci. Výpočet je možné provést jak lineární, tak i nelineární.

Vyhodnotit lze globální deformace konstrukce jako celku, deformace jednotlivých prutů, reakce v podporách, síly na prutech, síly v přípojích, napětí na prutech, posouzení na únavu, 2D deformace v plošných prvcích, 2D síly v plošných prvcích, 2D napětí v plošných prvcích, napětí v základové spáře.

Taktéž lze řešit návrh a posouzení styčnicků ocelových konstrukcí podle [4]. K dispozici je databáze šroubů, čelních desek, výztuh a typů přípojů. Veškeré zadané hodnoty jsou podrobeny automatické kontrole konstrukčních omezení. Při výpočtu konstrukce je zohledněna vypočtená rotační tuhost přípoje podle metodiky uvedené v [4]. Lze řešit styčnický šroubovaný nebo svařovaný, rámový, kloubový či polotuhý.

4 NUMERICKÁ ANALÝZA, VERIFIKACE EXPERIMENTEM

V případě složitých výpočetních modelů (v tomto případě styčníků) existuje reálné riziko, že výsledky neodpovídají skutečnému chování modelované konstrukce nebo její části. Proto je součástí této práce verifikační výpočet. V literatuře [50] je detailně popsán experimentální výzkum šroubovaného styčnicku realizovaný na univerzitě v Coimbre, kdy na stojinu profilu HEB 240 je pomocí šesti šroubů M 20 třídy 10.9 připojena přes čelní desku tl. 15 mm příčel profilu IPE 240, obr. 4.1. Části sloupu, příčle a čelní deska jsou z oceli S 275. Příčel byla zatížena ohybovým momentem v kombinaci s osovou silou.



Obř. 4.1: Uspořádaní styčnicku v rámci experimentu.

V rámci experimentu bylo testováno celkem sedm případů lišících se velikostí osově síly, která působila společně s ohybovým momentem. V kombinaci s ohybovým momentem M_{Sd} byly uvažovány tyto hodnoty normálových sil N_{Sd} .

- $N_{Sd} = 0$ (pouze M_{Sd})
- $N_{Sd} = -10\% N_{pl}$,
- $N_{Sd} = -15\% N_{pl}$,
- $N_{Sd} = -20\% N_{pl}$,
- $N_{Sd} = -27\% N_{pl}$,
- $N_{Sd} = +10\% N_{pl}$,
- $N_{Sd} = +20\% N_{pl}$,

kde N_{pl} značí plastickou únosnost profilu příčle IPE 240.

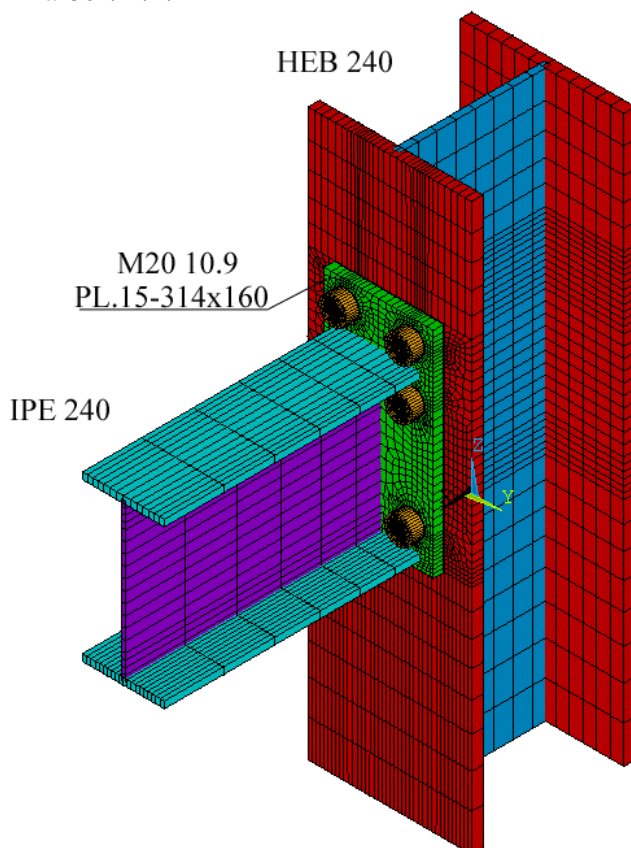
K vhodné verifikaci přispělo i statistické vyhodnocení materiálu stojiny a pásnice příčle i sloupu a koncových desek, které je uvedeno v [50]. S těmito materiálovými charakteristikami bylo uvažováno při numerickém výpočtu.

Cílem navrženého numerického modelu styčnicku sestaveného v rámci této práce bylo ověřit, zda výsledky výpočtu pomocí něho získané jsou ve shodě s hodnotami posunů určenými experimentálně, případně v čem se od nich liší.

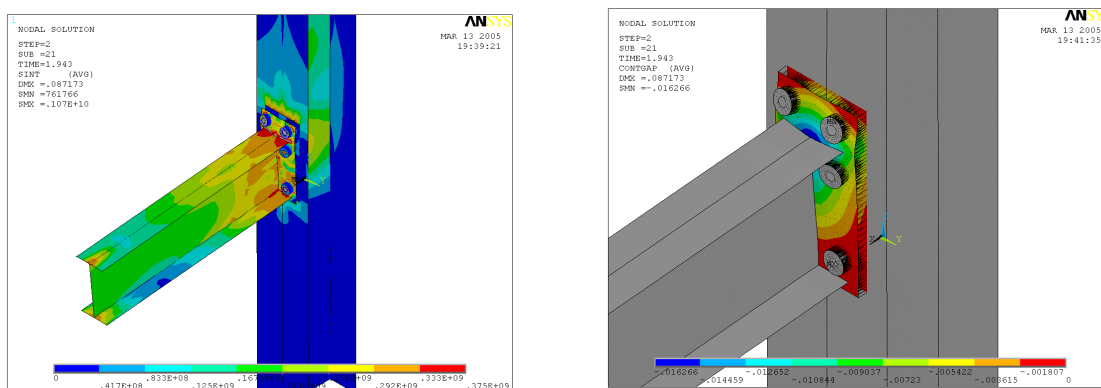
Výška části sloupu byla v sestaveném numerickém modelu uvažována dva metry, osová délka příčle byla jeden metr. V experimentálním přístupu je velice obtížné vnést do systému odpovídající zatížení bez nežádoucích lokálních koncentrací apod. Tento problém v numerickém přístupu do značné míry odpadá, proto nebylo nutné modelovat složitý mechanismus sloužící k zatížení a upevnění zkoumaného styčnicku.

Uzlům na spodní a horní hraně sloupu byly předepsány nulové posuny ve třech směrech, ohybový moment a osová síla byly do příčle vnašeny prostřednictvím adekvátního uzlového silového zatížení na volném konci příčle. Okrajové podmínky byly vneseny dostatečně daleko od sledovaného spoje, aby v oblasti jejich vnesení nedocházelo k poruchám v poli napětí a přetvoření. Z tohoto důvodu byly výše popsané okrajové podmínky shledány dostatečně výstižnými a bylo upuštěno od jejich lepšího přiblížení k popsanému experimentu zohledněním poddajnosti kotvícího přípravku a zatěžovacího mechanismu.

Pro popis nelineárního chování oceli po dosažení meze kluzu byl použit bilineární model s kinematickým zpevněním. Geometrie konstrukce byla popsána s použitím desko-stěnových prvků pokrývajících střednicemi jednotlivých ploch. Výpočtový model použitý k numerickému řešení je uveden na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Výpočtový model styčnicku.



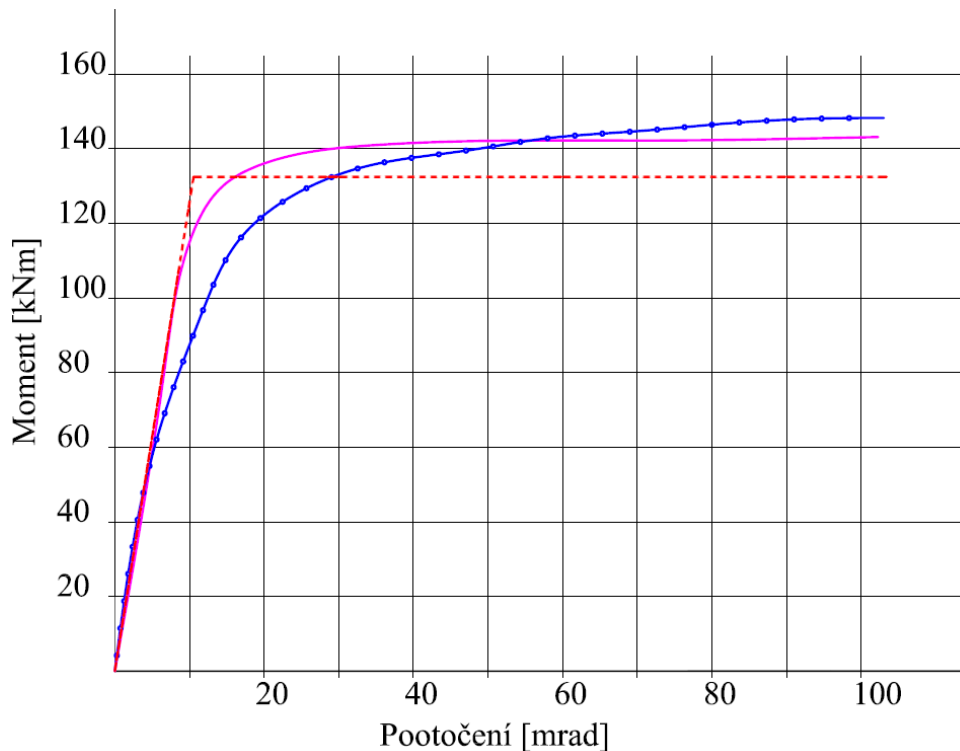
Obr. 4.3: Stav styčnicku po aplikaci zatížení – Srovnávací napětí a oddálení desek.

Pro validaci modelu bylo zvoleno srovnání závislosti ohybového momentu M_{Sd} na natočení příčle styčníku ϕ . Hodnota natočení příčle ϕ byla stanovena ze svislého posunu těžiště koncového průřezu příčle. V tomto ohledu bylo dosaženo velice dobré shody, kterou ilustruje srovnání v grafech na obrázcích 4.4 pro zatěžovací případ M_{Sd} společně s $N_{Sd} = -10\% N_{pl}$ a 4.5 pro zatěžovací případ M_{Sd} společně s $N_{Sd} = -27\% N_{pl}$. Deformovaný stav styčníku po aplikaci zatížení je uveden na obr. 4.3.

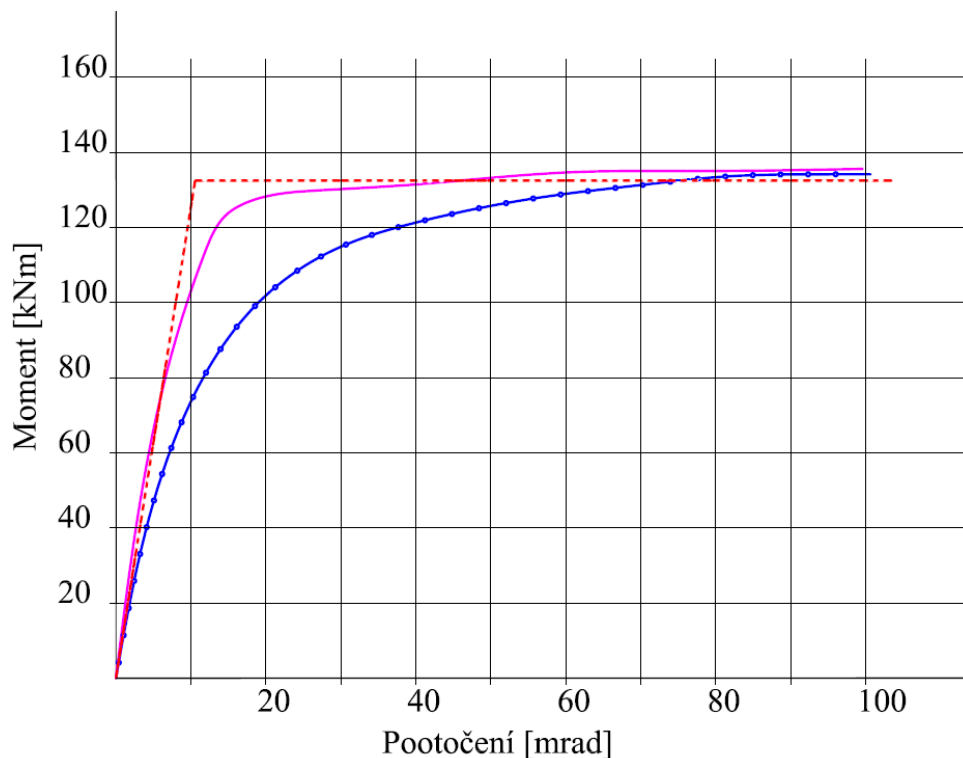
Popis experimentu uvedený v [50] rovněž obsahuje množství informací a výsledků měření napjatosti v těsné blízkosti šroubového spoje. Pole napjatosti v této oblasti je velice nehomogenní s velkými gradienty v mnoha směrech. Napjatost v takto komplikovaných napjatostních poměrech stanovená experimentálně má diskutabilní hodnotu [57]. Proto ke srovnání poměrných přetvoření nebylo přistoupeno.

Srovnání výsledků získaných experimentem a numerickým řešením bylo provedeno na sledování závislosti $M - \phi$. Závislosti získané experimentem a výpočtem podle Eurocode 3 uvedené v [50] jsou porovnány pro jednotlivé zatěžovací případy s výsledky numerického řešení. Zde je provedeno srovnání pro zatěžovací případy M_{Sd} společně s $N_{Sd} = -10\% N_{pl}$, resp. M_{Sd} společně s $N_{Sd} = -27\% N_{pl}$ v následujících grafech na obrázcích 4.4, resp. 4.5. Křivky jsou označeny takto:

- průběh závislosti $M - \phi$ podle experimentu – modrá s kolečky,
- průběh závislosti $M - \phi$ podle Eurocode 3 – červená čárkovaná,
- průběh závislosti $M - \phi$ podle numerického řešení – fialová plná.



Obr. 4.4: Závislost $M - \phi$, M_{Sd} společně s $N_{Sd} = -10\% N_{pl}$.



Obr. 4.5: Závislost $M - \phi$, M_{Sd} společně s $N_{Sd} = -27\% N_{pl}$.

Jak je zřejmé z výše uvedených grafů, je patrná velice dobrá shoda výsledků získaných experimentem a numerickým výpočtem. Touto verifikací výsledků numerického řešení experimentem lze považovat za prokázané, že výsledky získané numerickým výpočtem pro styčníky stejného typu s obdobným uspořádáním, jako má styčník podle obr. 4.1., odpovídají při použití popsaného výpočtového modelu jejich skutečnému chování. Navržené výpočetní postupy je možné tedy aplikovat i na styčníky podle obr. 5.2, 5.3, které byly použity při následné analýze prutové konstrukce.

V případě analýzy rámové konstrukce, obr. 4.1, rozhoduje o celkovém kolapsu konstrukce vysoká štíhlost jejich prutů. Styčníky v tomto případě nejsou plně využity. Naopak při řešení styčníku jako izolované části konstrukce je možné sledovat závislost $M - \phi$ až do kolapsu styčníku, čímž získáme ucelenější pohled na skutečné chování styčníku v průběhu celého zatěžovacího procesu.

5 ANALÝZA PRUTOVÝCH KONSTRUKCÍ S POLOTUHÝMI STYČNÍKY

Při výpočtu prutových konstrukcí se při návrhu styčníků zpravidla rozhoduje mezi dvěma extrémy – dokonalým rámovým spojením nosníků a sloupů nebo ideálním kloubem. Tyto dva základní typy tuhostí styčníku bývají obvykle uvažovány jak u „vnitřních“ styčníků konstrukce, tak i v kotvení ocelové konstrukce ke spodní stavbě. Ve skutečnosti leží „reálná“ rotační tuhost vždy mezi těmito dvěma extrémy. Lze konstatovat, že stanovení skutečné rotační tuhosti, momentové únosnosti a tažnosti styčníků má vliv na reálné chování konstrukce jako celku.

Při praktickém výpočtu prutové konstrukce lze použít několik možností přístupu k výpočtu:

- a) Skutečné rotační tuhosti styčníků zanedbat a do výpočtu je zavést styčníky pouze jako „dokonale tuhé“ nebo „ideálně kloubové“.

- b) Předem zvolit typy styčnicků a pro tyto typy stanovit výpočtem rotační tuhost navržených styčnicků a momentovou únosnost (dle platných normativních dokumentů) a s takto získanou rotační tuhostí provést numerický výpočet.
- c) Výpočtový model konstrukce řešit takovým programovým systémem, který je schopen rotační tuhosti styčnicku stanovit dle přesně definovaných charakteristik styčnicků a s těmito rotačními tuhostmi dále počítat. Po provedení výpočtu je pak nutné kontrolovat, zda není překročena výpočtová únosnost styčnicku $M_{j,Rd}$.
- d) Rotační tuhost a momentovou únosnost styčnicku – jedná-li se o typy styčnicků, jejichž chování nebylo ještě ověřeno laboratorním výzkumem – stanovit experimentálně v laboratoři, tyto výsledky použít k verifikaci numerického modelu izolovaného styčnicku a takto získané výsledky uplatnit při globální analýze konstrukce, např. metodou konečných prvků, jak je třeba uvedeno v [63].
- e) Pro globální analýzu konstrukce použít programový systém umožňující modelování prostorovou metodou konečných prvků. Tento výpočetní systém ovšem musí umožnit dostatečně přesně definovat jednotlivé základní součásti styčnicku. Potom rotační tuhost přípoje není nahrazena tuhostí pružiny, ale každý styčnick je definován skutečnou geometrií a fyzikálními vlastnostmi jeho dílčích částí.

Lze konstatovat, že přístup podle bodu a) je při praktickém navrhování zatím nejběžnější přístup k této problematice. Jedná se o výpočet nejméně náročný a tudíž nejrychlejší, který lze navíc i u nejsložitějších konstrukcí jednoduše kontrolovat běžnými metodami stavební mechaniky. V tomto případě se nejprve vypočtou vnitřní síly na konstrukci a podle jejich velikosti se stanoví dimenze profilů a navrhnu se přípoje.

Při výpočtu prutové konstrukce podle bodu b) je třeba nejprve stanovit alespoň přibližné dimenze základních profilů a hodnoty vnitřních sil v místech styčnicků (obvykle výpočtem podle bodu a). V dalším kroku je třeba definovat, jak budou vypadat styčnický – tzn. stanovit jejich momentovou únosnost a rotační tuhost tak, aby respektovala stanovené vnitřní síly a s vypočtenými rotačními tuhostmi jednotlivých styčnicků provést nový výpočet konstrukce. V případě rozsáhlejší konstrukce s více typy styčnicků a v případě vedlejšího stanovení momentové únosnosti a rotační tuhosti styčnicků je tento postup velmi časově náročný, poněvadž počet kroků opakovaných výpočtů s velikostí a náročností řešené konstrukce narůstá.

Provedení výpočtu konstrukce podle bodu c) lze popsat obdobně jako v případě bodu b) pouze s tím rozdílem, že zvolený programový systém obsahuje modul pro výpočet momentové únosnosti a rotační tuhosti navrženého styčnicku, takže není třeba provádět vedlejší výpočet podle algoritmů uvedených v normativních dokumentech. Toto umožňuje například programový systém Nexis.

Postup výpočtu podle bodu d) lze aplikovat tehdy, chceme-li použít takové typy styčnicků, pro které není jednoduché rotační tuhost dle normativních dokumentů spočítat (např. jiné typy profilů než I nebo H), ale od kterých (nebo alespoň podobných typů) existují výsledky jejich experimentálního ověření. S takto vypočtenou rotační tuhostí potom můžeme pokračovat dále ve výpočtu podle bodu b) nebo c) nebo sestavený prostorový model styčnicku vložíme přímo do výpočtového modelu konstrukce obdobně jako při postupu podle bodu e).

V případě, že máme k dispozici jak programový systém pro analýzu prostorovou metodou konečných prvků (např. systém Ansys), tak i odpovídající hardwarové vybavení, je možné úlohu řešit podle bodu e), tzn. řešit konstrukci jako celek tímto programovým systémem. Zde vliv styčnicku v konstrukci není charakterizován rotační tuhostí náhradní pružiny, ale je řešen komplexně definováním reálných vlastností všech dílčích součástí styčnicku.

5.1 Numerická analýza rámové konstrukce

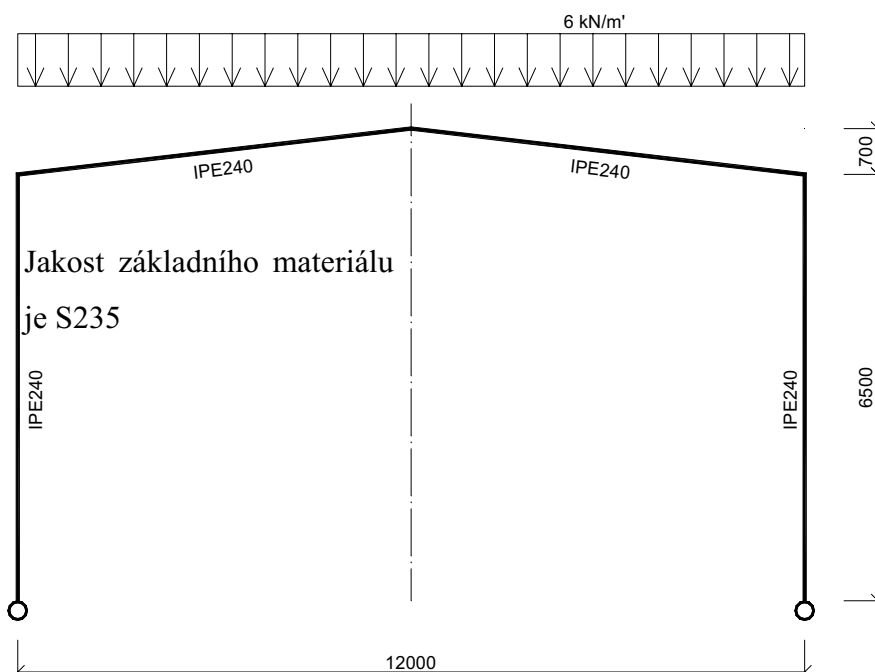
Numerická analýza rámové konstrukce je ilustrativně ukázána na dvoukloubovém rovinném rámu o jednom poli. Byly zvoleny reálné rozměry sloupů i příčle. U takto zvolené štíhlé konstrukce by měla dominantní vliv na únosnost rámu buďto ztráta stability konstrukce jako celku, popř. lokální ztráta stability prutu. Tuto ztrátu stability je možné sledovat na modelu s tzv. „počáteční imperfekcí“. Obecně má větší význam globální imperfekce celé rámové konstrukce, než lokální imperfekce jednotlivých prutů [40]. Jejich vhodné zavedení je však nesmírně diskutabilní. Jednou z cest je provést citlivostní analýzu vlivu jednotlivých předem definovaných imperfekcí. To však vyžaduje výpočet obrovského množství opakovaných modelů.

Hlavním cílem práce ale není sledovat konstrukci jako celek, poněvadž práce je zaměřena na chování styčnicků. Proto byl vliv stabilitních jevů minimalizován. Pro sloup i příčel bylo předpokládáno, že jsou po celé své délce zajištěny proti ztrátě příčné a torzní stability.

Hodnoty reziduálních napětí u válcovaných profilů (v tomto případě IPE), sledované např. v [38] od výrobních a transportních procesů (nerovnoměrného chladnutí), mohou dosahovat až 60 % meze kluzu. Tyto hodnoty jsou rovněž závislé od použité metody jejich měření. Napětí vnesená svařováním jsou velmi odvislá od použité technologie a jejich rozptyl by mohl znehodnotit celou studii.

Pro dále uvedené vybrané typy šroubovaných styčnicků (v rohu rámu a v kotvení) byly sledovány na rámové konstrukci podle obrázku 5.1 změny v rozložení vnitřních sil na konstrukci (ohybových momentů v kotvení, v rohu rámu i uprostřed rozpětí příčle rámu), dále byl sledován svislý posun ve vrcholu příčle a závislost momentu na natočení v kotvení a rohu rámu.

Rámová konstrukce podle obrázku 5.1 byla řešena jak bez vlivu, tak s vlivem betonové patky a podloží.



Obr. 5.1: Analyzovaný rám.

Rám byl zatížen svislým spojitým zatížením 6 kN/m půdorysného průřezu. Osově schéma modelu rámu je znázorněno na obrázku 5.1. Výpočtové modely a detaily styčnicků modelované v systému Ansys jsou uvedeny na obrázku 5.6.

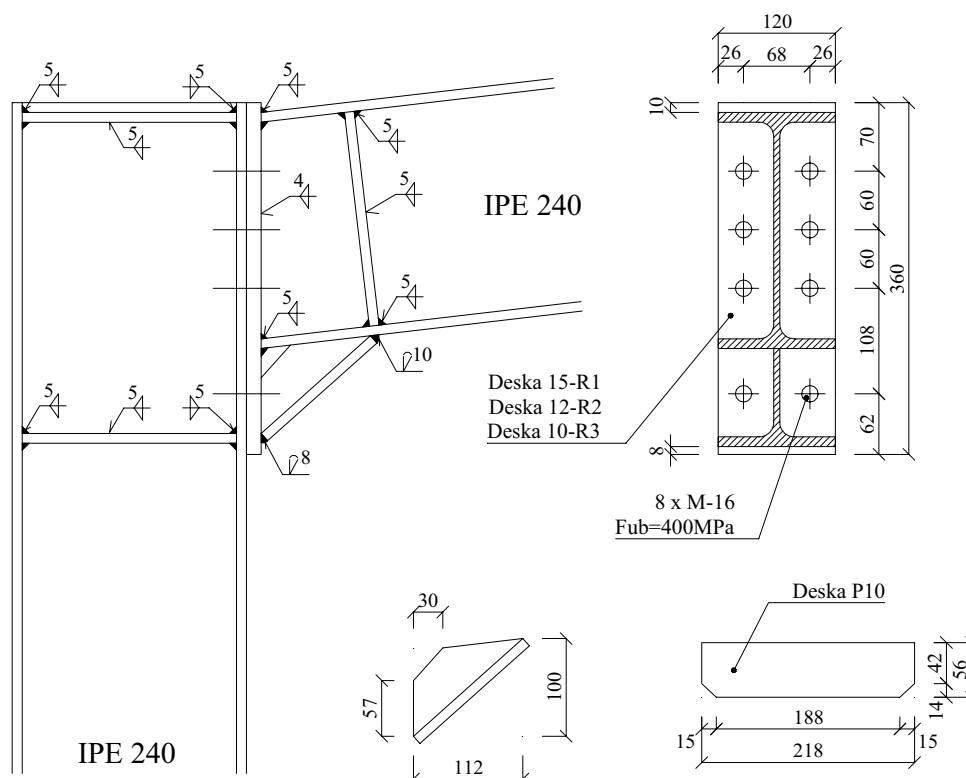
Profily sloupů a příčle rámu byly navrženy pro zvolené zatížení tak, aby byly využity na cca 75 %. Tento prvotní návrh byl proveden bez vlivu polotuhých přípojí.

Byly řešeny tyto varianty styčnicků:

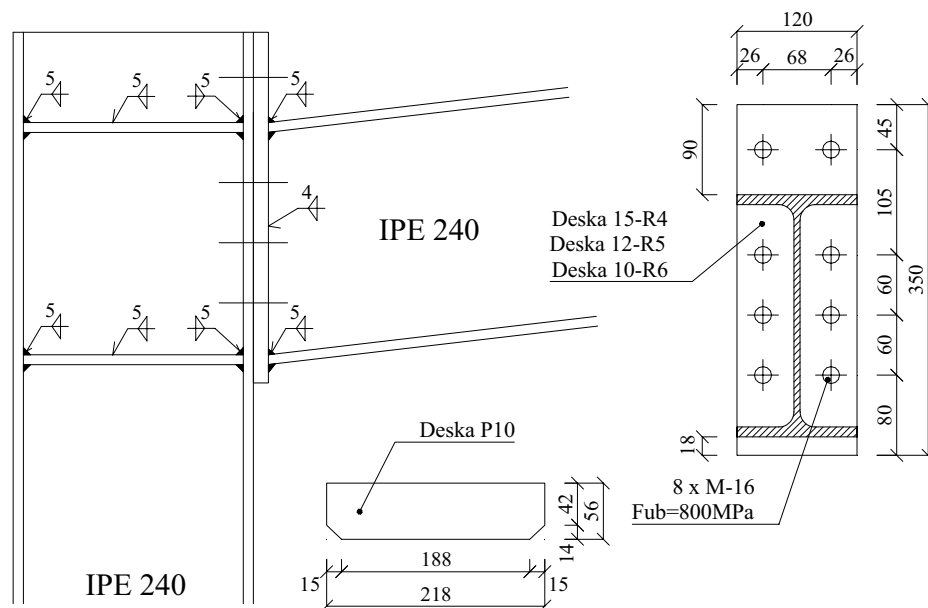
Rotační tuhost v kotvení a rohu rámu byla uvažována pro tyto typy přípojí:

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

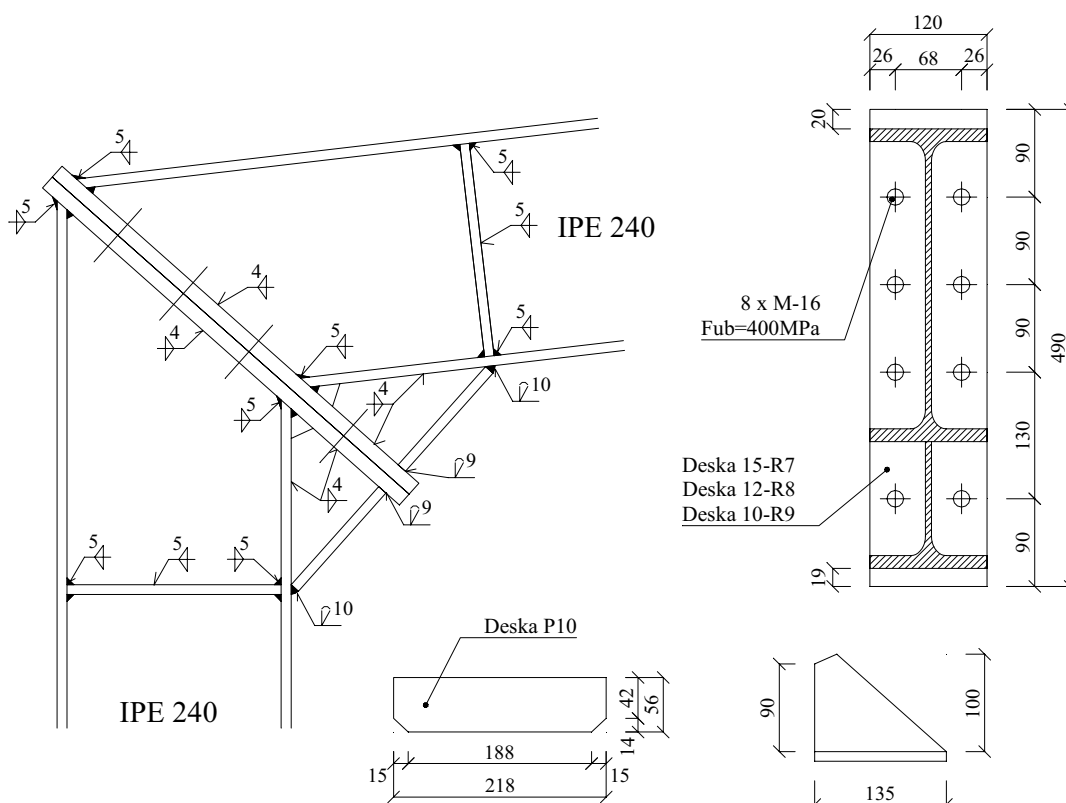
Typy řešených styčnicků (R1 až R9, K1, K2) jsou znázorněny na následujících obrázcích 5.2 až 5.5.



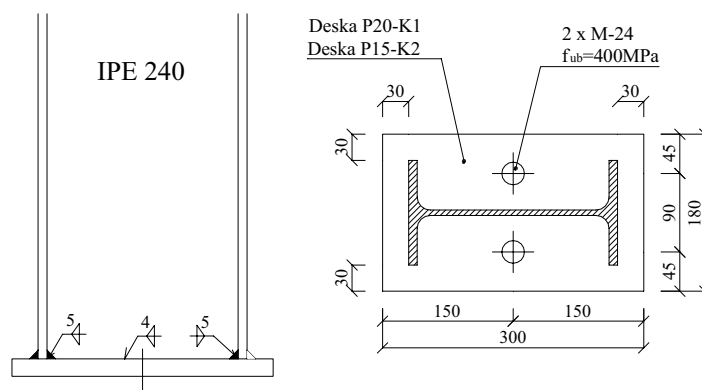
Obr. 5.2: Přípoj typu R1, R2, R3.



Obr. 5.3: Připoj typu R4, R5, R6.



Obr. 5.4: Připoj typu R7, R8, R9.



Obr. 5.5: Přípoj typu K1, K2.

Vzájemnou kombinací výše uvedených typů styčníků obdržíme následující typy rámu:

Typ rámu	Odpovídající typ přípojů	Typ rámu	Odpovídající typ přípojů	Typ rámu	Odpovídající typ přípojů
I.a	R1, K1	II.a	R4, K1	III.a	R7, K1
I.b	R2, K1	II.b	R5, K1	III.b	R8, K1
I.c	R3, K1	II.c	R6, K1	III.c	R9, K1
I.d	R1, K2	II.d	R4, K2	III.d	R7, K2
I.e	R2, K2	II.e	R5, K2	III.e	R8, K2
I.f	R3, K2	II.f	R6, K2	III.f	R9, K2

Typy rámu uvedené v tabulce 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 $\frac{\partial u}{\partial x}$.

Při určení výše uvedených hodnot se vycházelo z [48]:

$$C_1 = \frac{E_0 \cdot (1 - \mu_0)}{H \cdot (1 + \mu_0) \cdot (1 - 2 \cdot \mu_0)}, \quad (5.1)$$

$$C_2 = \frac{E_0 \cdot H}{G \cdot (1 + \mu_0)}. \quad (5.2)$$

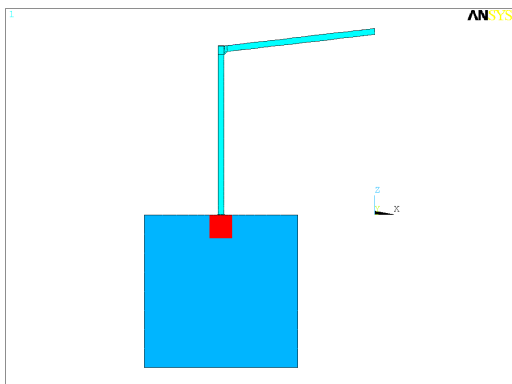
Pro určení hodnot C_1 , C_2 bylo předpokládáno podloží „zvodnělá hlína“ s modulem pružnosti $E_0 = 7,5\text{MPa}$, $\mu = 0,35$ a mocností vrstvy zeminy pod patkou $H = 1,8$ m. Po dosazení do výše uvedených vztahů (6.1), (6.2) obdržíme:

$$C_{1z} = 12,7 \text{ MN/m}^3,$$

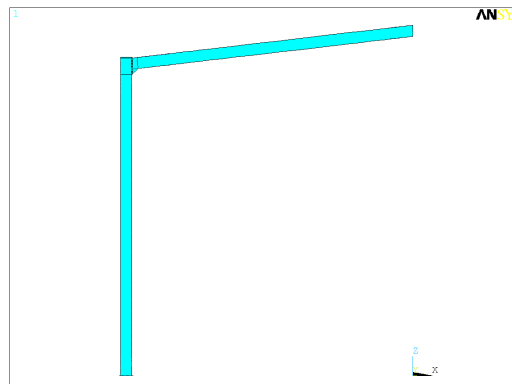
$$C_{1x} \cong 0,1 \cdot C_{1z} = 1,27 \text{ MN/m}^3,$$

$$C_{2x} = 1,66 \text{ MN/m}^3.$$

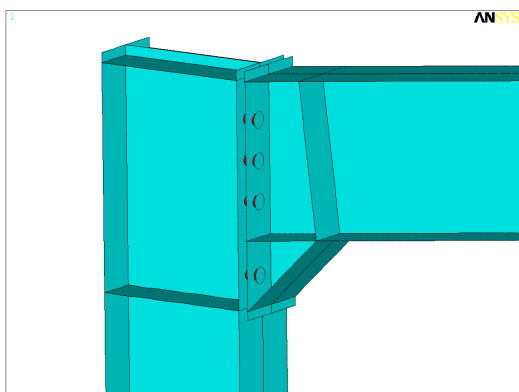
Specifická hmotnost zeminy v podloží byla uvažována $\rho = 1850 \text{ kg/m}^3$, úhel vnitřního tření 21° , přípustné napětí zeminy $\sigma_{oc} = 0,2 \text{ MPa}$, hodnota soudržnosti při efektivním napětí $C_c = 0,010 \text{ MPa}$, hodnota zvodnělé smykové pevnosti $C_{cu} = 0,06 \text{ MPa}$.



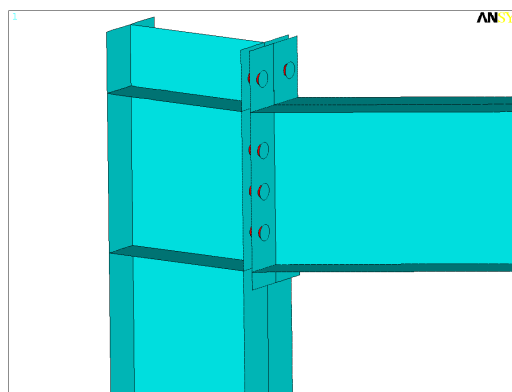
Výpočtový model pro rámy typu Ip, IIp, IIIp



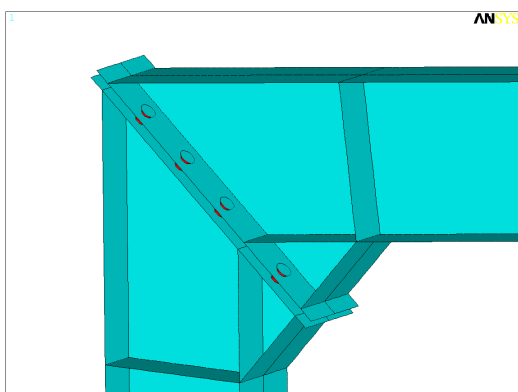
Výpočtový model pro rámy typu I, II, III



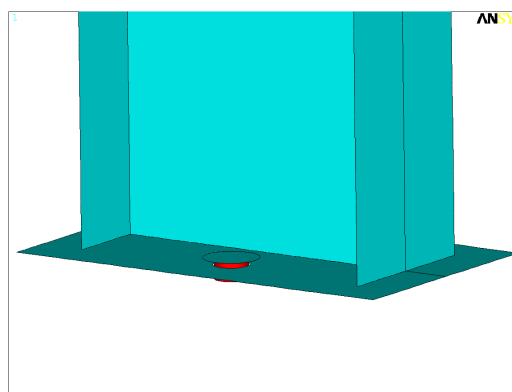
Detail styčnicku pro typ přípoje R1, R2, R3



Detail styčnicku pro typ přípoje R4, R5, R6



Detail styčnicku pro typ přípoje R7, R8, R9



Detail styčnicku pro typ přípoje K1, K2

Obr. 5.6: Výpočtové modely a detaily styčnicků sestavené programovým systémem Ansys.

Betonová patka byla uvažována z betonu o charakteristické pevnosti betonu $f_{ck} = 12,5 \text{ MPa}$, což odpovídá betonu třídy B20 s modulem pružnosti $E_b = 27 \text{ GPa}$, $\mu = 0,15$, $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$.

Rozměr patky byl navržen $900 \times 900 \times 800$ mm. Byl zvolen součinitel koncentrace $k_j = 1,0$ a součinitel spoje $\beta_j = 0,667$.

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, jsou po zahrnutí vlivu betonové patky a podloží do výpočtu 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, přičemž typy použitých přípojí jsou identické s rámy bez vlivu patky a podloží.

Všechny popsané typy ráků byly řešeny následujícími způsoby:

1. Lineární řešení bez vlivu rotační tuhosti styčnicků – programovým systémem Nexis.
2. Lineární řešení s uvážením vlivu vypočtené rotační tuhosti styčnicků dle typů spojů R1 až R9, K1, K2 – programovým systémem Nexis.
3. Geometricky nelineární řešení s vypočtenou rotační tuhostí styčnicků pro šest konstantních přírůstků zatížení – programovým systémem Nexis.
4. Lineární řešení – programovým systémem Ansys.
5. Geometricky a fyzikálně nelineární řešení pro šest konstantních přírůstků zatížení – programovým systémem Ansys.
6. Použití kontaktních prvků – programovým systémem Ansys.

5.1.1 Analýza programovým systémem Ansys

Analýza modelu podle obrázku 5.1 byla rozdělena do tří hlavních částí. V první se předpokládalo dokonale pružné chování základního materiálu i šroubů a vznik pouze malých deformací – geometricky lineární chování.

Pro popis tohoto problému systémem Ansys byl nejprve zvolen desko-stěnový prvek Shell63. Jedná se o čtyř uzlový prvek, v každém uzlu má šest stupňů volnosti – tři posuny u_x , u_y , u_z a tři rotace R_x , R_y , R_z .

Aby se model co nejvíce blížil ke skutečnosti, byly šrouby modelovány jako prostorové objekty – válec s hlavou a matkou. Tento model zajistil roznesení sil ze šroubu na plochu desky prostřednictvím tuhosti reálné matky. Tím byl omezen vznik extrémů napětí vyvolaných pouze špatně modelovaným roznosem nikoliv na plochu matky, ale jen do několika uzlů modelu. Aby bylo možné modelovat co nejpřesněji chování šroubů, byl každý šroub modelován dvaceti prostorovými prvky Solid45. Takto modelovaný dřík šroubu byl schopen zohlednit chování reálně namáhaného spojovacího prostředku – smyk, tah, popř. tlak s ohybem, vliv otláčení apod. Prvky Solid45 mají v každém uzlu tři stupně volnosti – posuny u_x , u_y , u_z . Šrouby a desky nejsou ve skutečnosti spojeny tuze, ale jedná se o kontaktní úlohu, spojení šroubů s konstrukcí bylo tedy uvažováno jako jednostranný problém a byl použit model s kontaktními prvky. Styčným deskám v rámovém rohu je bráněno ve vzájemném oddálení šrouby. Mají-li desky tendenci v určitých místech se přiblížit, dosednou zde na sebe. Takto modelovaný šroub může popsat veškeré posuny a napětí jako šroub skutečný – není zde zaveden žádný zjednodušující předpoklad. Zavést předpětí ve šroubu je možné s použitím konečného prvku Prets179.

Obdobná je situace také u patní desky při zohlednění interakce desky se základovou patkou. Předpokládalo se absolutně nepoddajný základ. Tuhost přípoje byla zohledněna deformací patní desky a kotevního šroubu.

Bylo využito symetričnosti úlohy a byla řešena jen čtvrtina rámu, ve vrcholu příčle byla předepsána rovina symetrie, druhá rovina symetrie byla dána rovinou rámu.

Následně bylo přikročeno k modelování podloží reálné (nikoliv absolutní) tuhosti. Modelována byla betonová patka i dostatečný objem zeminy. Patka i zemina byla opět modelována prostorovými prvky Solid45. Předpokládalo se nulové smykové a tahové napětí na rozhraní beton-zemina. Ke plnění této podmínky byly opět spojeny stupně volnosti ve směru normály kontaktní plochy odpovídajících si uzlů zeminy a betonové patky. Objem zeminy měl rozměr $3,0 \times 6,0 \times 6,0$ m. Bylo stanoveno, že za touto hranicí již nedochází k deformaci zeminy a další zvětšení modelo-

vaného objemu by již nevedlo ke zpřesnění výpočtu. Na této hranici bylo bráněno jen posunům ve směru normál k povrchům zemního tělesa. Na stejných rámech, které byly modelovány bez vlivu poddajnosti základové konstrukce, byl proveden výpočet s výše popsaným zohledněním vlivu základové patky a zeminy. Byly řešeny tři různé typy šroubového připojení sloupu a příčle. U každého z těchto typů bylo řešeno dvanáct variant lišících se tloušťkou desky v rohu a v patě rámu a zohledněním základové konstrukce.

Fyzikálně a geometricky lineární model řešený v první fázi ukázal, že v některých místech rámové konstrukce srovnávací napětí překročilo mez kluzu. Proto bylo v druhé fázi zohledněno nelineární chování materiálu po překročení meze kluzu. Systém Ansys nabízí celou řadu pružně-plastických modelů chování materiálu. Pro běžné oceli je používán bilineární pracovní diagram s kinematickým zpevněním. Pro základní materiál S235 byla mez kluzu stanovena hodnotou 235 Mpa, pro materiál šroubů pak hodnotou 400 MPa (u přípoje typu II 800MPa). Pro oba materiály byl sklon plastické větve 1% v porovnání s pružnou větví. Desko-stěnové prvky Shell63 neumožňují zohlednit pružno-plastické chování materiálu, proto byly nahrazeny prvky Shell43. Jedná se také o čtyř uzlový prvek se šesti stupni volnosti v každém uzlu, proto mohla zůstat síť konečných prvků totožná s modely z první fáze.

Konstrukce byla řešena za předpokladu velkých deformací, tj. rovnováha vnitřních sil byla vyšetřována na zdeformované konstrukci. Směr CP vazeb však zůstává neměnný i po deformaci konstrukce. Konstrukce byla zatěžována postupně s přírůstkem 1 kN/m v zatěžovacím kroku. Řešení desko-stěnového modelu se zohledněním fyzikálně i geometricky nelineárního chování je řádově náročnější, než za předpokladu lineárních vztahů. Model bez uvážení vlivu podloží vedl na soustavu více než 60 000 rovnic, v případě modelu s patkou a podložím se jednalo o soustavu rozsahu 110 000 rovnic. Vzhledem k časové náročnosti byly řešeny pro každý typ rámu jen dvě varianty – jedna s vlivem podložím, druhá bez něj, tzn. celkem 6 typů rámu (I.a, Ip.a, II.a, IIp.a, III.a, IIIp.a).

Přestože byly kontaktní plochy desek stanoveny relativně přesně, bylo přikročeno k modelování kontaktní úlohy i s vlivem smyku. Jedná se o silně nelineární analýzu, která umožňuje pomocí kontaktních prvků určit přesně plochu kde buď dojde ke kontaktu desek nebo kde mají desky naopak tendenci se vzájemně oddálit. Byl použit základní typ kontaktního prvku Contac52. Jedná se o tzv. point to point kontakt, tzn. tento prvek umožňuje vyšetřovat vztah dvou uzlů spojených tímto kontaktním prvkem. Jejich vzájemnému přiblížení je bráněno silou odpovídající tuhosti kontaktního prvku, přičemž oddálení není kladen žádný odpor. V rohu rámu byl sledován kontakt styčných desek, hlavy a matky šroubu s deskami a dříku šroubu s vrtáním. U patní desky se jednalo o kontakt desky s dokonale tuhým podložím, desky s hlavou kotevního šroubu a dříku šroubů s vrtáním. Pro každý typ přípoje byl řešen jeden model s vlivem fyzikální nelinearity, tzn. celkem 3 typy rámu (I.a, II.a, III.a).

5.1.2 Analýza programovým systémem Nexis s vlivem rotační tuhosti styčnicků

Přípoje byly uvažovány typů R1, R2, ..., R9, K1, K2 podle obrázků 5.2 až 5.5. Pro tyto styčnický byla vypočtena momentová únosnost a rotační tuhost styčnicků. S touto rotační tuhostí byl proveden nový výpočet (lineární a geometricky nelineární). Srovnávací výpočet rotační tuhosti a momentové únosnosti pro kout rámu a pro kotvení byl proveden pro styčnický typu R4 a K1 vý-

počtem podle [4]. Ve výpočtu byla uvažovaná hodnota tuhosti styčnicku $\frac{S_{j,ini}}{\eta}$ pro všechny hodnoty momentu $M_{j,Sd}$, přičemž:

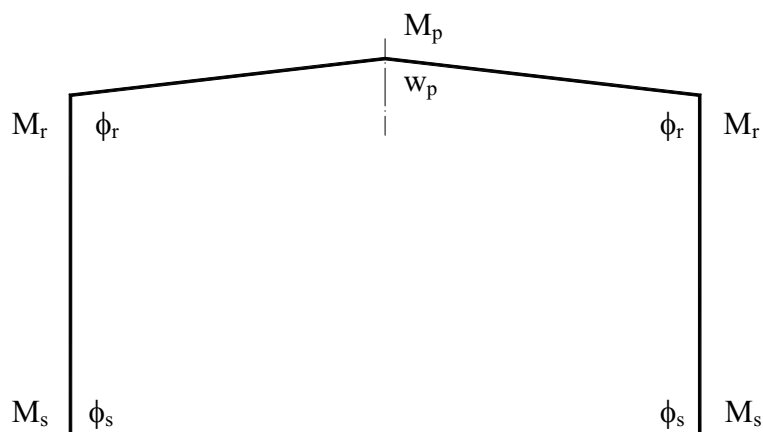
$\eta = 2$ pro přípoj šroubovaný s čelní deskou pro přípoje nosníku se sloupem,

$\eta = 3$ pro přípoj šroubovaný s čelní deskou a pro jiné typy styčnicků.

Toto bylo provedeno pro všechny typy řešených rámu.

5.1.3 Vyhodnocení numerické analýzy rámové konstrukce

Systémem Ansys bylo sestaveno 36 lineárních variant, 6 fyzikálně a geometricky nelineárních variant (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). Sledovanými deformačními 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. Sledovanými veličinami vnitřních sil byl ohybový moment M_p uprostřed rozpětí příčle, M_r v rámovém rohu a M_s v patě sloupu – viz obr. 5.7.



Obr. 5.7: Sledované veličiny na analyzovaném rámu.

Při použití prutové analogie byl celý průřez sloupu či příčle modelován jedním prvkem s osou procházející těžištěm. V případě, že jsme nenahradili celý průřez jedním prvkem, ale deskostěnovými prvky procházejícími osami stojiny a pásnic, pro získání vnitřních sil na sloupu a příčli musíme provést integraci resp. sumaci vnitřních sil na prvcích tvořících geometrii průřezu. Z tohoto důvodu musely být jednoznačně definovány řezy, ve kterých se budou ohybové momenty sledovat. Všechny varianty měly totožné řezy pro určení ohybových momentů M_s v patě sloupu a M_p uprostřed rozpětí příčle. V rohu rámu byl řez pro určení M_r veden příčlí v místě výztuhy (rámy typu III), příčlí podél rohové styčné desky (rámy typu II) a oběma místy (rám typu I).

Systém Ansys umožňuje několik postupů získání ohybových momentů. Byl použit výpočet ohybových momentů přes tabulku ETABLE. Ta byla naplněna hodnotami normálových sil ve směru osy příčle event. sloupu. Sumací součinu hodnoty normálové síly, rozměru příslušného prvku v místě řezu a vzdálenosti těžiště prvku od těžiště průřezu byl stanoven ohybový moment M působící ve sledovaném místě sloupu či příčle.

Relativní natočení příčle v rohu rámu bylo stanoveno jako rozdíl natočení celkového a natočení hlavy sloupu. Pro určení celkového natočení rohu byly zvoleny dva body na ose příčle, z nichž jeden ležel přímo v místě styku IPE profilu a styčné rohové desky a druhý ležel ve vzdálenosti cca 100 mm. Podílem rozdílu svislých posunů a vodorovné vzdálenosti vzhledem k malým hodnotám bylo stanoveno celkové natočení. Pro natočení hlavy sloupu byly zvoleny body v průsečíku os příčle a sloupu a osy sloupu s jeho horním lícem. Podílem rozdílu vodorovných posunů a jejich svislé vzdálenosti bylo určeno natočení hlavy sloupu. Natočení paty sloupu bylo provedeno analogicky. Jako referenční bod pro svislý posun uprostřed rozpětí příčle byl zvolen bod ležící na ose příčle.

5.1.4 Sledované závislosti analyzované konstrukce

Výsledky získané řešením různých typů rámu zvolenými metodami byly zpracovány graficky do tří skupin, některé grafické závislosti jsou zde uvedeny.

Skupina grafů znázorňuje závislost mezi ohybovým momentem, a to buď v rohu rámu, resp. v kotvení, a relativním natočením příčle, resp. sloupu. V grafech jsou vyneseny vždy ty křivky, které byly pro daný typ rámu řešeny příslušnou metodou.

V grafech je použito následující značení:

Lin Nexis: Lineární výpočet programem Nexis.

Nelin Nexis: Geometricky nelineární výpočet programem Nexis.

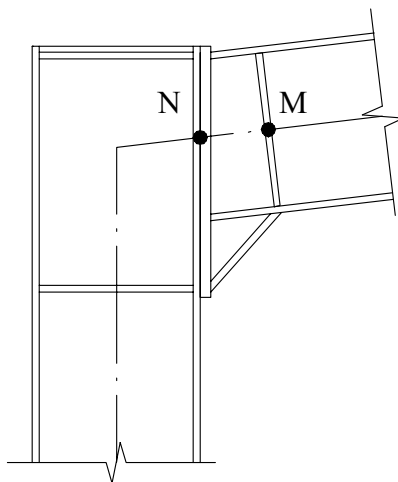
Lin ANSYS: Lineární výpočet programem Ansys.

Nelin ANSYS: Geometricky i fyzikálně nelineární výpočet programem Ansys.

Kontakt ANSYS: Výpočet programem Ansys pomocí kontaktních prvků.

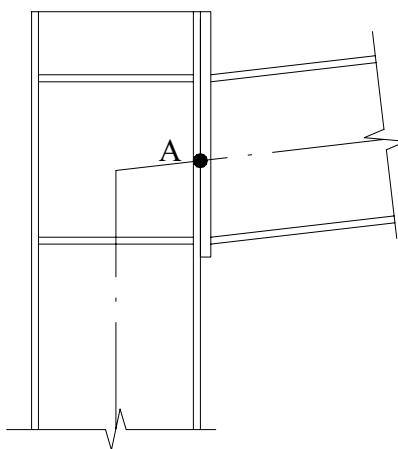
Nelineární výpočet programovým systémem Ansys byl proveden u ráků typu I.a, Ip.a, II.a, IIp.a, III.a, IIIp.a. Výpočet systémem Ansys za použití kontaktních prvků byl proveden pouze u ráků typu I.a, II.a, III.a.

Závislost mezi ohybovým momentem M_r a relativním natočením příčle ϕ_r je sledována u ráků řešených programem Nexis v teoretickém průsečíku os sloupu a příčle, při použití programového systému Ansys je ta samá závislost u ráků typu I sledována v rámovém rohu ve dvou různých bodech M a N (obr. 5.8). Relativním natočením příčle se rozumí rozdíl mezi celkovým natočením příčle a natočením hlavy sloupu.



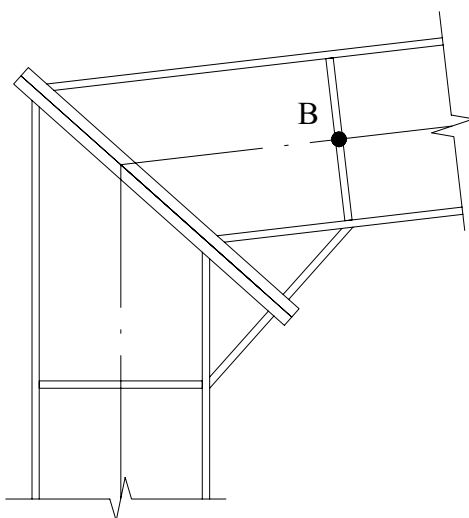
Obr. 5.8: Místa sledování závislosti $M_r - \phi_r$ u ráků typu I.

U ráků typu II je sledována závislost sledována v bodě A (obr. 5.9).



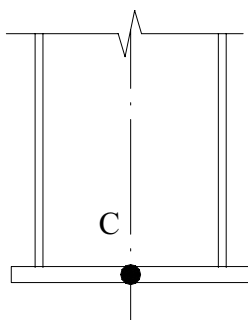
Obr. 5.9: Sledované místo A závislosti $M_r - \phi_r$ u ráků typu II.

U rámců typu III je zkoumaná závislost sledována v bodě B:



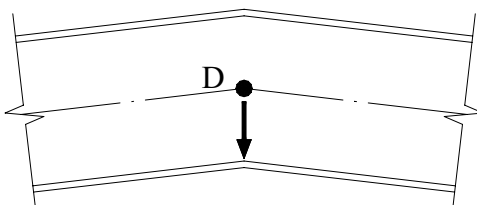
Obr. 5.10: Sledované místo B závislosti $M_r - \phi_r$ u rámců typu III.

V případě kotevního styčnicku je závislost mezi ohybovým momentem a natočením sloupu sledována vždy v bodě C:



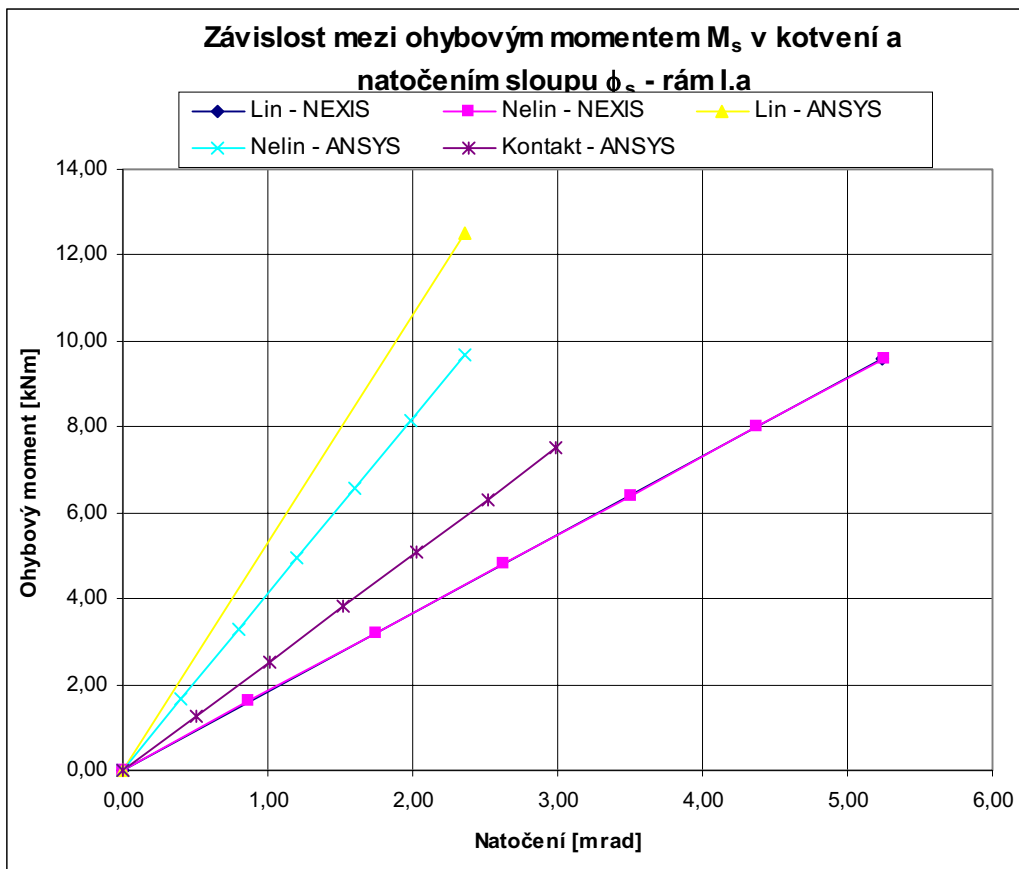
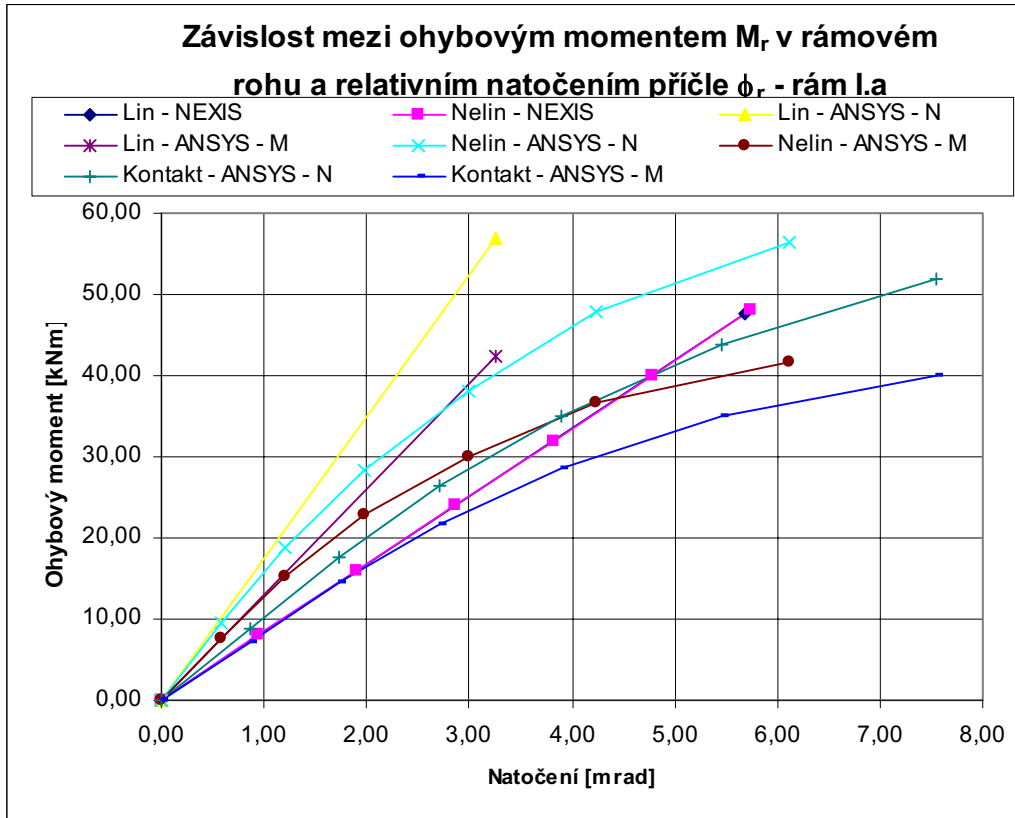
Obr. 5.11: Sledované místo C závislosti $M_s - \phi_s$ u všech typů rámců.

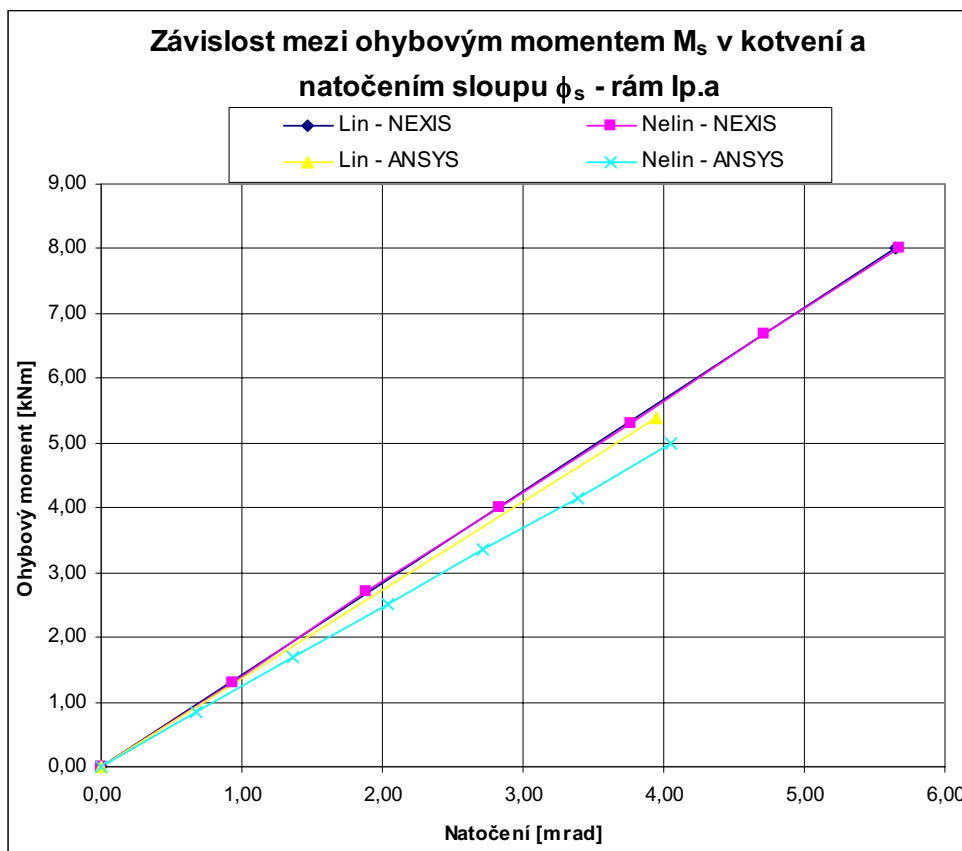
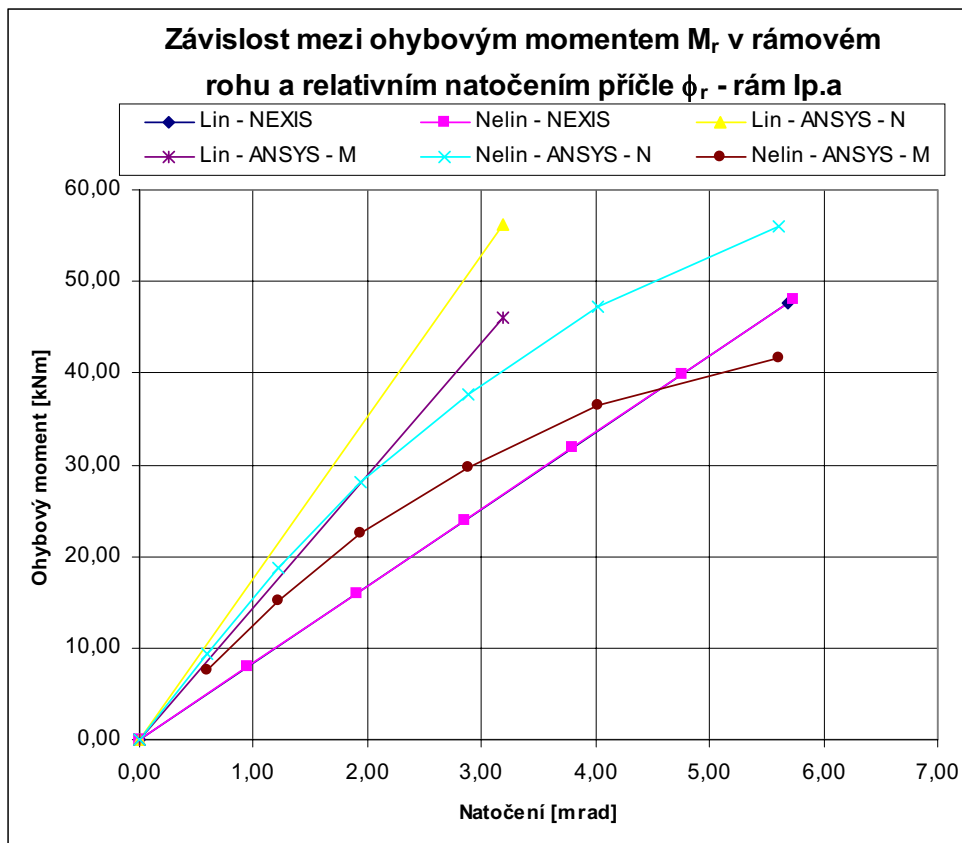
Pro všechny typy rámců jsou ohybové momenty v kotvení M_s a ve vrcholu příčle M_p sledovány v řezech procházejících body C, D, obr. 7.6, obr. 7.7. Ve vrcholu příčle je navíc sledován svislý posun v bodě D.

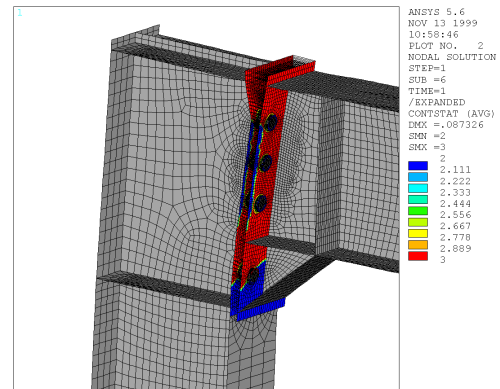
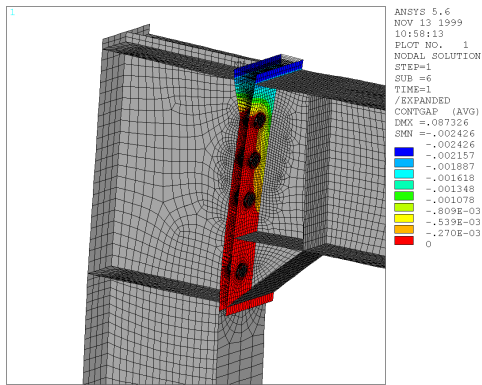


Obr. 5.12: Místo sledování M_p, w_p .

Dále jsou uvedeny grafické závislosti mezi ohybovým momentem M_r v rámovém rohu a relativním natočením příčle ϕ_r a ohybovým momentem M_s v kotvení a natočením sloupu ϕ_s pro rám I.a bez a s vlivem podloží. Na obr. 5.13 je uvedena ukázka grafických výstupů z programu Ansys v případě kontaktní úlohy.

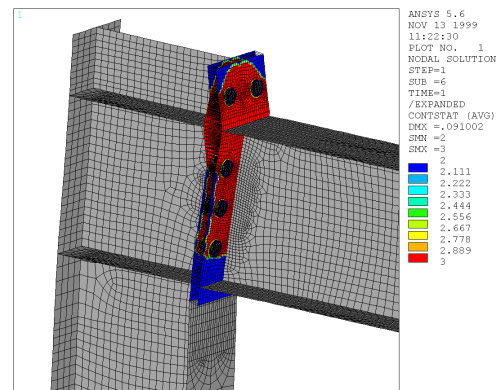
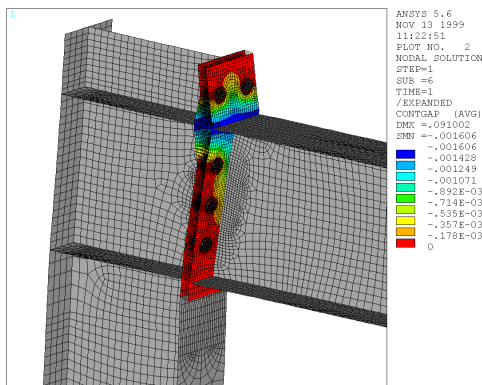






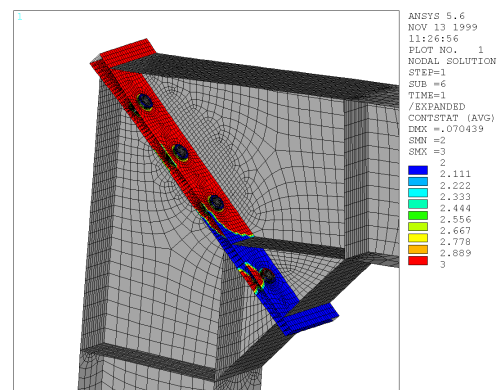
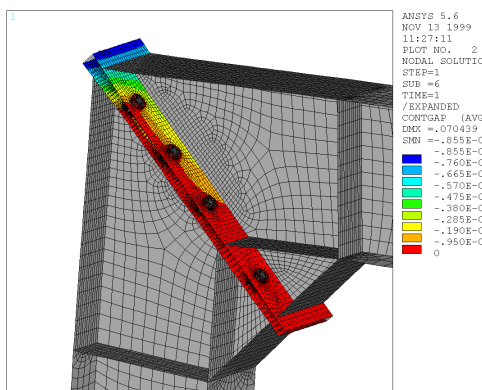
Typ přípoje R1 – kontaktní prvky
 Oddálení styčných desek přípoje

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. 5.13: Ukázka grafických výstupů – kontaktní úloha.

6 ZÁVĚR

Navrhování styčnicků patří v posledních letech k velmi aktuálnímu tématu v oboru ocelových konstrukcí, a to jak v České republice, tak v zahraničí. Jak je zřejmé z části Seznam odkazů na literaturu, bylo na tuto problematiku zaměřeno velké množství vědeckých a odborných konferencí a bylo uveřejněno bezpočet článků v časopisech zaměřených na problematiku skutečného působení ocelových konstrukcí. Ukázalo se totiž, že idealizace styčnicku pouze na kloubové či tuhé zdaleka ne ve všech případech vystihuje jejich skutečné chování.

Návrhové metody používané při řešení ocelových konstrukcí nebo jejich částí si kladou za cíl materiál zabudovaný do konstrukce využívat z co největší míry, samozřejmě při dodržení požadované spolehlivosti konstrukce. Přitom právě chování styčnicků prutových ocelových konstrukcí do značné míry determinuje deformační chování a napjatost vlastního prutového prvku. Aby bylo možné zohlednit v procesu návrhu a posouzení ocelových konstrukcí skutečné hodnoty popisující chování jejich styčnicků, je nutné nejdříve definovat možnosti, jak tyto hodnoty charakterizující jejich skutečné působení stanovit.

Předložená práce měla za cíl se tímto skutečným působením styčnicků zabývat, přičemž v centru pozornosti byl návrh takových efektivních postupů, které toto skutečné působení styčnicků zahrnují. Použití navržených výpočetních postupů vytváří předpoklady pro zabezpečení požadované spolehlivosti, trvanlivosti a hospodárnosti realizovaných ocelových konstrukčních systémů, přičemž nezanedbatelné jsou i faktory ekonomické, poněvadž styčnický tvoří cca třetinu ceny ocelové konstrukce.

Zahrnutí reálných vlastností styčnicků do výpočtu ocelové konstrukce je nutnou podmínkou k optimálnímu návrhu této konstrukce. V podstatě jsou dvě možnosti zahrnutí skutečného působení styčnicků do výpočtu.

První spočívá v tom, že na základě experimentálního výzkumu stanovíme základní výpočtové charakteristiky, které v sobě reálné působení jakýmsi způsobem zahrnují, v tomto případě se jedná zejména o rotační tuhost a momentovou únosnost styčnicku. Vzhledem k tomu, že tyto základní charakteristiky styčnicku jsou ovlivněny reálným chováním jeho základních součástí, je třeba stanovit nejprve jejich vliv na celkové chování styčnicků. Takto postupovat lze však pouze pro určité typy styčnicků, na které byl zaměřen doposud provedený experimentální výzkum a jehož výsledky byly posléze zobecněny pro obdobné typy přípojů ve styčnicku. Nevýhodou tohoto postupu je, že je nutné předem (před výpočtem konstrukce) definovat typy styčnicků (tím i typy profilů, které při návrhu budou použity), stanovit jejich rotační tuhost a momentovou únosnost a tyto následně zahrnout do výpočtu. Při následné změně dimenzí profilů konstrukce je obvykle nutné změnit uspořádání styčnicků, což znamená stanovit jejich novou rotační tuhost a momentovou únosnost a výpočet provádět opakovaně.

Druhá možnost v této práci popsaná spočívá v tom, že skutečné chování styčnicků nezohledníme pouze tím, že nějakou metodou určíme jejich rotační tuhost a momentovou únosnost, ale že jejich reálné chování zohledníme podrobným rozбором na sofistikovaných a výstižných numerických modelech styčnicků a s takto sestavenými modely, které vložíme do konstrukce, následně provedeme numerickou analýzu konstrukce. I v tomto případě je však žádoucí, aby výsledky takto sestaveného výpočtového modelu styčnicku byly verifikovány experimentálním výzkumem. Výhodou tohoto postupu je, že v případě jakékoliv změny uspořádání styčnicku lze dílčí úpravou již sestaveného numerického modelu dosáhnout požadované změny. Nevýhodou naopak jsou vysoké časové nároky výpočtu a tím i nároky na použitý software a hardware, tato nevýhoda se však s neustálým prudkým vývojem v této oblasti velice rychle zmenšuje.

Zásadním rozdílem v obou dvou přístupech je to, že v prvním případě je styčnick v konstrukci idealizován pouze jako uzel, který má předem definované vlastnosti, zatímco v druhém případě je styčnick uvažován jako reálná část konstrukce, kde každá z jeho součástí je nějakým způsobem definována, obvykle pomocí plošných či prostorových prvků s jejich skutečnými vlastnostmi.

Předložená práce si mimo jiné kladla za svůj cíl ukázat, že numerické modely založené na prostorové metodě konečných prvků lze použít při návrhu styčníků, a dále chtěla ukázat, že tento přístup je reálný a má svoje výhody, ale i nevýhody. Toto bylo dokumentováno pro některé typy styčníků. Bylo provedeno srovnání skutečného chování styčnicku modelovaného izolovaně (s okrajovými podmínkami odpovídajícími realizovanému experimentu) a styčnicku, který je součástí konstrukčního systému. Cílem práce také nebylo vytvořit „zcela dokonalý“ numerický model styčnicku, který by v sobě naprosto přesně zahrnoval všechny vlivy, které mohou únosnost styčnicku ovlivnit, ale ukázat, že pokud stanovíme skutečné působení styčnicků tímto způsobem, lze dosáhnout dobré shody výsledků v porovnání s výsledky získanými experimentálním výzkumem. Modelování styčnicků bylo pouze nástrojem k získání hledaných závislostí.

Zvoleny byly takové programové systémy, které v současné době umožňují efektivně řešit problémy tohoto typu, přičemž systém Ansys byl zvolen proto, že umožňuje detailní analýzu konstrukcí metodou konečných prvků (nelinearity, kontakty, vliv spolupůsobení s okolím kotevních styčnicků) a programový systém Nexis proto, že v dnešní době patří mezi nejrozšířenější programové systémy nejčastěji používané při praktických návrzích ocelových konstrukcí a umožňuje zohlednění polotuhých styčnicků ve výpočtu.

SEZNAM ODKAZŮ NA LITERATURU

- [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] EUROCODE 3 : *Design of Steel Structures, Part 1.8. : Design of Joints*, Final Draft, 05 May 2003
- [6] Eurocode 4: *Design of Mixed Structures in Steel and Concrete*
- [7] Al-Bermani, F. G. A. – Kitipornchai, S.: *Elastoplastic Nonlinear Analysis of Flexibly Jointed Space Frames*, Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 1, 1992
- [8] Anderson, D. – Colson, A. – Jaspert, J. P. – Wald, F.: *Ekonomické styčníky pro ocelové rámy*, Stavební obzor, 10/1993
- [9] Ansys theory reference, ANSYS release 9.0, 2004
- [10] Bajer, M. – Dočkal, P.: *Řešení pružnoplastických úloh s jednostrannými vazbami*, IV, Konference numerické metody v mechanice, Vrátna Dolina, 1989
- [11] Bajer, M.: *Analýza skutečného působení šroubovaných spojů ocelových konstrukcí*, 19. Česká a slovenská mezinárodní konference „Ocelové konstrukcie a mosty 2000“, Vysoké Tatry, SR, 2000
- [12] Bajer, M.: *Elasto-plastic Analysis of Space Steel Frames Assuming Large Deformations*, 17. Česko-Slovenská konference Ocelové konstrukcie a mosty – 94 – I. diel, Bratislava, 1994
- [13] Bajer, M.: *K problematice navrhování poddajných spojů ocelových konstrukcí*, Seminář ocelové a dřevěné konstrukce, Brno, 1999
- [14] Bajer, M.: *Řešení ocelových prutových konstrukcí s možností jednostranných vazeb*, 16. celostátní konference o ocelových konstrukcích, Ostrava, 1991
- [15] Bajer, M.: *Vliv poddajnosti šroubovaných spojů na únosnosti ocelových rámových konstrukcí*, XI. mezinárodní vědecká konference, sekce – nosné konstrukce staveb, Brno, 199
- [16] Bajer, M.: *Skutečné působení přípojů v ocelových prutových konstrukcích*. Sborník ze semináře „STATIKA 2001“, Nové město na Moravě, 2001, str. 19–30
- [17] Bajer, M.: *The Analysis of the Influence of the Bolt Connection on the Stress of the Head and foot plates in the Plane Frame*. Zborník prednášok VII. Vedecké konferencie s medzinárodnou účasťou, 8. sekcia, Košice, Slovensko, 2002, 4 strany, ISBN 80-7099-814-8
- [18] Bajer, M. – Kala, J.: *The Influence of Connection Rigidity on the Stress in a Concrete Foot in a Chosen Frame Construction*. Concrete and Concrete Structures, Žilina, Slovensko, 24. 4.–25. 4 2002, 6 stran, ISBN 80-7100-954-7
- [19] Bajer, M. – Kala, J.: *The Analysis of an Interaction of an Anchor Bolt and Concrete in a Foundation Foot*. Concrete and Concrete Structures, Žilina, Slovensko, 24. 4.–25. 4. 2002, 4 strany, ISBN 80-7100-954-7
- [20] Bajer, M.: *The Influence of Rigidity of Beam to Column Bolt Connection with a Chosen Frame Construction*. Proceedings international conference VSU' 2002, Vol I, Sofie, Bulharsko, 29. 5.–31. 5. 2002, 8 stran, ISBN 954-91127-1-3
- [21] Bajer, M. – Kala, J.: *The Influence of the Location of the Beam Stiffeners on the Bolt Strain in a Bolted Joint Analysis*. Proceedings international conference VSU' 2002, Vol I, Sofie, Bulharsko, 29. 5.–31. 5. 2002, 4 strany, ISBN 954-91127-1-3

- [22] Bajer, M. – Kala, J.: *Anchorage HILTI placing analysis-Comparision design standard and computational model. Proceedings international conference VSU' 2003 jubilee international conference*, Sofie, Bulharsko, 30. 10.– 1. 11. 2003, 4 strany, ISBN 954-911271-3
- [23] Bajer, M. – Kala, J.: *Examination of steel column concrete foot and soil foundation interaction*, Proc. of Abstracts First International Conference on Engineering Failure Analysis, ICEFA 2004, 12.–14. July 2004, Lisabon (Portugal)
- [24] Bajer, M. – Kala, J.: *The Analysis of the Influence of the Location of Beam Stiffeners on the Strain in a Frame Bolted Joint*. Zborník prednášok VII. Vedecké konferencie s medzinárodnou účasťou, 8. sekcia, Košice, Slovensko, 2002, 4 strany, ISBN 80-7099-814-8
- [25] Bajer, M. – Kala, J.: *The Fixed Anchor of a Steel Column Analysis*, Sborník z 3rd International Conference on Advaced Enginnering Design AED, 1–4 June 2003, Prague, Czech Republic
- [26] Bajer, M.: *Analýza ocelových lepených kotevních prvků*, sborník z Česko-Slovenské konference EXPERIMENT '04, str. 7–12, 14.–16. 10. 2004, Brno, Fakulta stavební VUT v Brně, ISBN 80-7204-354-4
- [27] Bajer, M. – Kala, J.: *Analýza únavy spojů ocelových konstrukcí*, Sborník z 3rd International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings, str. 327–330, ISBN 80-227-2116-6, 21–22 October 2004, Bratislava, Slovensko
- [28] Bijlaard, F. S. K. – Nethercot, D. A. – Stark, J. W. B. – Tschemmernegg-Zoetemeijer, P.: *Structural Properties of Semi-Rigid Joints in Steel Frames*, IABSE Periodica, 2/1989
- [29] 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
- [30] Crha, M. – Bajer, M.: *Kompletní napjatost v izolovaném bodě*, 26. celostátní konference Experimentální analýza napětí, Holany, 1995
- [31] Coelho, A. – Bijlaard, F. – da Silva, L.: *On the Behaviour of Bolted End Plate Connections Modelled by Welded T-Stubs*, Eurosteel Coimbra 2002
- [32] Cook, R. A. – Kunz, J. – Fuchs, W. – Konz, R. C.: *Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete*, ACI Structural Journal, V. 95, No. 1, January–February 1998
- [33] Goto, Y. – Miyashita, S.: *New Classification System for Semi-Rigid Connections Considering Overall Behavior of Frames*, IABSE Colloquium, Istanbul, 1996
- [34] 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
- [35] 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
- [36] Christopher, J. E. – Bjorhovde, R.: *Semi-Rigid Frame Design Methods for Practicing Engineers*, Engineering Journal (First Quarter), 1999
- [37] Eligehausen, R. (Editorial Charmain): *Proceedings of International Symposium on Connections between Steel and Concrete*, Vol. 1 and 2, RILEM Stuttgart, 2001
- [38] Kala, J. – Kala, Z.: *Modely vlastního pnutí u ocelových válcovaných profilů - stochastický přístup, Část 1 – Imperfekce a jejich zohlednění ve výpočtovém modelu*, Inženýrská mechanika, roč. 7, 2000, č. 3, s. 219–230, ISSN 1210-2717
- [39] Kala, J. – Kala, Z.: *Stabilitní problémy ocelových stavebních konstrukcí – stochastický přístup, Část 1 – Problematika klopení v souvislosti s deskostěnovým působením imperfektní prutové ocelové konstrukce*, Stavební obzor 5/2000, s. 132–136

- [40] Kala, Z.: *Nelineární odezva ocelových rámu na statické zatížení*, disertační práce, Brno: FAST VUT v Brně, 1998
- [41] Kala, Z. – Kala, J. – Škaloud, M. – Teplý, B.: *Sensitivity Analysis of the Effect of Initial Imperfections on the Stress State in the Crack-Prone Areas of Breathing Webs*, In Proc. of the Fourth Int. Conf. on Thin-Walled Structures, Loughborough (England, UK), 2004, pp. 499–506, ISBN 0 7503 1006-5
- [42] Kala, Z. – Kala, J. – Škaloud, M. – Teplý, B.: *The Stress State in the Crack-Prone Areas of „Breathing“ Thin Walled Girders – a Sensitivity Analysis*, In Proc. of the Fourth International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures, Rome (Italy) 2004, pp. 265–276
- [43] Kala, Z. – Kala, J. – Škaloud, M. – Teplý, B. – Melcher, J. – Novák, D.: *Sensitivity Analysis of Engineering Structures*, In *CD Proc. of the European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering – ECCOMAS 2004*, Jyväskylä (Finland), 2004, ISBN 951-39-1868-8
- [44] Kala, Z. – Kala, J.: *Modely vlastního pnutí u ocelových válcovaných profilů – stochastický přístup, Část 2 – Citlivost únosnosti ocelového válcovaného profilu na imperfekce*, Inženýrská mechanika, roč. 7, 2000, č. 4, s. 241–248
- [45] Kala, Z. – Kala, J.: *Stabilitní problémy ocelových stavebních konstrukcí – stochastický přístup, Část 2 – Úloha vzpěrné únosnosti nosníku při klopení řešená v uzavřeném tvaru v souvislosti s deskostěnovým modelem MKP*, Stavební obzor 6/2000, s. 172–176
- [46] Karmazínová, M. – Bajer, M.: *Využití experimentů pro porovnání skutečného působení některých typů dodatečně osazovaných ocelových kotevních prvků do betonu*, sborník z Česko-Slovenské konference EXPERIMENT '04, str. 177–182, 14.–16. 10. 2004, Brno, FAST VUT v Brně, ISBN 80-7204-354-4
- [47] Kishi, N. – Hasan, R. – Goto, Y. – Komuro, M.: *Investigation on the Validity of Connection Classification System*, IABSE Colloquium, Istanbul, 1996
- [48] Kolář, V. – Němec, I.: *Modelling of Soil – Structure interaction*, Academica, Praha, 1989
- [49] Kunz, J. – Cook, R. A. – Fuchs, W. – Spieth, H.: *Tragverhalten und Bemessung von chemischen Befestigungen*. Beton und Stahlbetonbau 93 (1998), Hefte 1 und 2, Berlin
- [50] da Lima, L. – da Silva, L. – da Vellasco, P. – de Andrade, S.: *Experimental Analysis of Extended End-plate Beam-to-column Joints under Bending and Axial Force*, Eurosteel Coimbra 2002
- [51] Morris, G. – Scerbo, M. – Dong, Q.: *Moment-Rotation Behavior of Beam-to-Column Connections*, Annual Technical Session, Proc. Structural Stability Research Council 1994
- [52] Nethercot, D. A.: *Classification of Connections by Type*, Semi-Rigid Connections in Steel Frames, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Bethlehem, 1992
- [53] Pícha, V. – Lecian, J.: *Tunelové stavby*, Tab. 10 – VII, ČSAV, Praha, 1959
- [54] Salajka, V.: *ANSYS v celé své šíři*, CAD & GRAPHICS č. 6, Computer Press, 1996
- [55] SCIA CZ, s r. o.: NEXIS 32 rel. 3.20, *Přípoje ocelových konstrukcí – teoretické základy*, 2000
- [56] Servít, R. – Doležalová, E. – Crha, M.: *Teorie pružnosti a plasticity I*, SNTL/ALFA, Praha, 1981
- [57] Schmid, P.: *Kotevní a upevňovací technika – experimentální stanovení účinnosti a modelování statického chování rozpěrných kotev a hmoždinek*, časopis Atelier otvorových výplní, 1/98, str. 31–36
- [58] Sobotka, Z.: *Teorie plasticity desek*, Academia Praha, 1973
- [59] Steenhuis, M. – Evers, H. – Gresnigt, N.: *Conceptual Design of Joints in Braced Steel Frames*, IABSE Colloquium, Istanbul, 1996
- [60] The Steel Construction Institute: *Joints in Simple Construction, Volume 1: Design Method*, 2000

- [61] The Steel Construction Institute: Joints in Steel Construction: Moment Connections, 2001
- [62] Steenhuis, M. – Evers, H. – Gresnigt, N.: *Pre-Design of Semi-Rigid Joints in Steel Frames*, Proc. of the Second State of the Art Workshop Praha, Brussels, 1994
- [63] Šmak, M.: *Problematika skutečného působení a metod navrhování ocelových prutových soustav s poddajnými spoji*, disertační práce, Brno, 2000
- [64] Wald, F.: *Analýza konstrukce s polotuhými styčníky*, Ocelové konstrukce, 1/2000
- [65] Wald, F.: *Návrh styčnicků metodou komponent*, Ocelové konstrukce, 6/2000
- [66] Wald, F.: *Využití poddajnosti styčnicků ocelových skeletů*, Inženýrské stavby 6/1990
- [67] Wald, F. – Mazura, V.: *Modelování ohybově tuhých styčnicků*, 18. Česko-Slovenská mezinárodní konference „Ocelové konstrukce a mosty '97“, Brno, 1997
- [68] Wald, F. – Mazura, V.: *Ohybově tuhé styčníky ocelových konstrukcí*, Stavební obzor, 10/1997
- [69] Wald, F. – Sokol, Z.: *Navrhování styčnicků*, ČVUT, Praha, 1999
- [70] Zandonini, R. – Zanon, P.: *Analysys of Beams in Semi-Rigid (Nonsway) Frames*, Semi-Rigid Connections in Steel Frames, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Bethlehem, 1992

ABSTRACT

The real behaviour of the connections in steel beam structures represents currently an essential problem in the field of steel structure designing. The traditional idea of a perfect joint or ideally rigid connection of beams is not in accordance with reality. However, the definition of the real characteristics of the joint makes it possible to demonstrate a higher load carrying capacity of these critical points in the structure. The results obtained by using appropriate methods dealing with the real joint behaviour enable to assure efficiency, durability and reliability of the steel structure systems.

This thesis focuses on the analysis of the real behaviour of the joints (bolted ones, in particular) in beam structure systems. The term *real joint behaviour* implies that the connection does not behave as if it was perfectly rigid or ideally jointed. More likely, it behaves as semi-rigid with a real value of rotation stiffness. This work concentrates both on inner and anchorage joints. With anchorage connections, the influence of concrete and foundation soil was taken into account. The problem of the real joint behaviour was considered from two viewpoints.

The first (fundamental) approach consists in defining the basic characteristics (these are rotation stiffness and bending moment carrying capacity) of an isolated connection. Under certain conditions, they can be determined by means of algorithms found in normative documents (e.g. [3], [4], [5]). The algorithms stated in these documents were formulated on the basis of experimental research. Numerical analyses of these joint types were, in each case, verified by laboratory research. However, such algorithms are limited to certain cross-sections of beams meeting in the joint (usually I and H cross-sections) and to an a priori delimited structure arrangement of such joints. The algorithms for connections with other beam types or for connections with a specific structure arrangement are not usually available. The aim of this work was also to define the influence of concrete foundation subsoil on the anchorage connection behaviour.

The other approach deals with the analysis of the real behaviour of the beam structure as a whole, considering the real joint behaviour, i.e. how the real joint behaviour affects the dimensions of connected cross-sections.

The computational technique advances enable – to a higher degree - to analyse the structures (or their parts) using numerical models based on the finite element method with 3D models. Nowadays, such a possibility is not restricted to the institutes equipped with the latest technology any more.

The purpose of this work was to verify the computational models based on the method of finite elements demonstrating the real joint behaviour in steel beam structures with an emphasis on bolted joints where the connection is made through a front plate. The author of the present paper intends to demonstrate that the numerical models designed in this way can serve for an analysis of a real structure, since the model behaviour of the joints corresponds to their real structure behaviour. As complex computational models represent a risk that the results obtained will not be in agreement with the real behaviour of a modeled structure, this work includes a verification calculation based on the comparison with an experiment completed before. The numerical model aimed to find whether the results of a numerical analysis of this connection type correspond to the results obtained experimentally. The verification was generalized for bolted connections of a similar type.

Another partial purpose of this work was to carry out an analysis of a selected real structure and to evaluate the results employing different possibilities of implementing the real joint behaviour into computational models (by means of relations presented in normative documents, by introducing alternative rotation joint stiffness, defining the real joint behaviour using the models based on space FEM). The mutual influence of the steel footing and concrete foundation with subsoil was an important factor, too (in case of anchorage joints).