

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra mechaniky



**Mechanická odezva tlačných betonových sloupů se
dvěma propojenými kruhovými spirálami**

**Mechanical response of compressed concrete columns
with two interlocking circular spirals**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Ing. Petr Havlásek, Ph.D.

Markéta Venclová

Praha 2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Venclová Jméno: Markéta Osobní číslo: 484373
 Zadávající katedra: Katedra mechaniky K132
 Studijní program: Stavební inženýrství
 Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Mechanická odezva tlačných betonových sloupů se dvěma propojenými kruhovými spirálami

Název bakalářské práce anglicky: Mechanical response of compressed concrete columns with two interlocking circular spirals

Pokyny pro vypracování:

Ve vybraných normách a doporučeních pro navrhování a analýzu betonových konstrukcí budou vyhledány relevantní vztahy pro výpočet tlakové únosnosti sloupů, u kterých lze uvážit vliv sevření příčnou výztuží na zlepšení mechanických vlastností betonu.

Bude analyzováno chování reprezentativní části sloupu se dvěma kruhovými spirálami, které se půdorysně překrývají. Pozornost bude soustředěna na vliv míry překrytí a stoupání těchto spirál na maximální únosnost v tlaku. Data pro tuto analýzu budou získána z nelineárních výpočtů metodou konečných prvků v programu OOFEM. Cílem práce je pro tento druh uspořádání výztuže formulovat zjednodušené vztahy pro přibližné stanovení maximální únosnosti. Tvar těchto vztahů bude inspirován existujícími vzorci a předpoklady z norem a literatury.

Seznam doporučené literatury:


Dokumentace k programu OOFEM.org
 fib MC 2010, ACI 318, EC2 apod.
 Vědecké články a normy týkající se problematiky


Jméno vedoucího bakalářské práce: Petr Havlásek

Datum zadání bakalářské práce: 14. 2. 2022

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. 5. 2022

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku



Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

14.3.2022
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma „Mechanická odezva tlačných betonových sloupů se dvěma propojenými kruhovými spirálami“ vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Petra Havláška, Ph.D. a že jsem uvedla veškeré použité zdroje informací.

Markéta Venclová

Praha, květen 2022

Poděkování

Přednostně děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Havláskovi, Ph.D. za odborné vedení, kritiku a především za strávený čas a entusiasmus. Také bych chtěla poděkovat prof. Dr. Ing. Danielu Ryplovi, za poskytnutí softwaru T3D, doc. Ing. Pavlu Reitermanovi, Ph.D. za pomoc při experimentech, navržení receptury a přípravě betonové směsi. A poděkovat bych chtěla také Ing. Václavu Nežerkovi, Ph.D. za názornou ukázkou DIC měření a postprocessing získaných dat.

Práce vznikla za podpory Technologické agentury ČR, v rámci projektu TM01000059.

Abstrakt

Příčná výztuž kruhových sloupů, např. ve formě spirál, se po zatížení těchto sloupů jednoosým tlakem společně s betonem podílí na vzniku tzv. ovinutí, příčného tlakového napětí, které v betonu vyvolává trojosou napjatost. Takto ovinutý beton má mnohem vyšší tažnost a tlakovou pevnost. Zapojením více spirál, jejich různým půdorysným rozvržením a optimalizací geometrie lze dosáhnout nejen tvarové variability, ale i efektivnější úrovně ovinutí, a tím i úspornějšího návrhu. Proto jsou v současné době testovány sloupy s netradičním uspořádáním příčné výztuže označovaným jako multispirálové vyztužení.

Tato bakalářská práce se zabývá mechanickou odezvou centricky tlačného sloupu se dvěma navzájem se překrývajícími spirálami prostřednictvím numerické simulace metodou konečných prvků v programu OOFEM. Zkoumán je vliv výšky závitů spirály, velikost překrývající se oblasti a orientace vinutí výztuže (souhlasně, opačně vinuté). V úvodu je shrnuta teorie ovinutého betonu, následují výsledky z výpočetních modelů a v závěru je popsán experiment.

Hlavním cílem práce je formulování jednoduchého vztahu pro stanovení maximální únosnosti sloupu se dvěma spirálami, který je inspirován existujícími vzorci a předpoklady z norem a literatury.

Klíčová slova

betonový sloup, ovinutí, multispirálové vyztužení, metoda konečných prvků, experiment

Abstract

If a circular column reinforced by lateral reinforcements such as spirals is subjected to uniaxial compressive loading, interaction between concrete and the reinforcement invoke lateral pressure in concrete referred to as confinement which change the uniaxial stress state of concrete to triaxial. The confined concrete shows more ductile behaviour and enhanced compressive strength. More effective confinement can be achieved by incorporating multiple spirals into a complicated layout and optimize geometric parameters. Such an unconventional reinforcement layout is called multi-spiral reinforcement and represents a more economic design with better cross-sectional variability.

This Bachelor's thesis deals with a mechanical response of compressed concrete columns with two interlocking circular spirals. The results are obtained from numerical simulations using OOFEM, finite element solver. Investigated parameters are the spiral pitch, the size of the overlapping area and orientation (aligned or opposite spin) of the spirals. First of all, confined concrete and appropriate literature are introduced. Secondly, numerical analysis and its results are presented followed by experiment results.

The aim of this thesis is to design a simple formula to compute the compressive strength of a column with the presented reinforcement layout while respecting the structure of current standards and existing formulas.

Keywords

concrete column, confinement, multi-spiral reinforcement, finite element method, experiment

Obsah

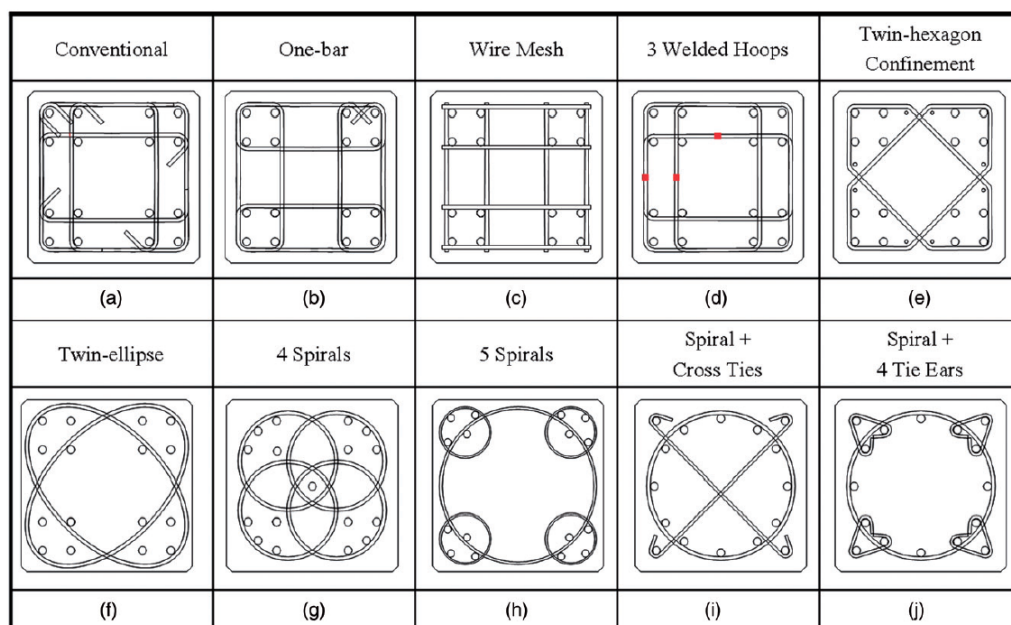
1	Úvod	13
2	Ovinutý beton	17
2.1	Obecný princip	17
2.2	Ovinutý beton dle vybraných norem	20
2.2.1	ČSN EN 1992-1-1	20
2.2.2	EN 1992-1-1 (draft, 2018)	21
2.2.3	<i>fib</i> Model Code 2010	22
3	Numerická analýza	23
3.1	Zpracování dat	24
3.2	Kruhový sloup	26
3.2.1	Geometrie modelu	26
3.2.2	Výchozí předpoklady	27
3.2.3	Vyhodnocení výsledků analýzy	29
3.3	Sloup s překrývajícími se spirálami	34
3.3.1	Geometrie modelu	34
3.3.2	Celková odezva sloupu	36
3.3.3	Popis vnější jednou ovinuté oblasti S	37
3.3.4	Popis vnitřní dvojitě ovinuté oblasti D	41
3.3.5	Vyhodnocení vlivu jednotlivých oblastí	43
3.3.6	Rozdílná orientace spirál	45
3.3.7	Kompletní postup při výpočtu pevnosti sloupu s překrývajícími se spirálami	45
4	Experiment	47
4.1	Popis zkušebních těles	48
4.2	Průběh zkoušky	49
4.3	Vyhodnocení naměřených dat	50
4.4	Porovnání dat s numerickým modelem	55
5	Závěr	58
6	Seznam symbolů	59

1 Úvod

Sloup je jeden ze základních prvků stavebních konstrukcí. Pokud je železobetonový sloup tlačěn, stává se interakce mezi příčnou výztuží (třmínky, spirála apod.) a betonem zdrojem tzv. ovinutí, příčného tlakového napětí, které zlepšuje mechanické vlastnosti betonu (tlakovou pevnost a tažnost). Richart a kol. [19] provedl již ve třicátých letech 20. století pilotní studii zaměřenou na statické chování ovinutého betonu. Následovalo mnoho dalších teoretických výzkumů podpořených experimentálními daty. Snahou bylo a je analyticky definovat závislost napětí na podélné deformaci $\sigma_{c,c}(\varepsilon_c)$, maximální únosnost $f_{c,c}$ a mezní deformaci $\varepsilon_{cu,c}$, největší dovolené přetvoření do kterého se materiál uvažuje nosný.

Výzkum byl zprvu cílen na konvenční kruhové a obdélníkové sloupy s tlakovou pevností f_c kolem 30 MPa. Postupně se oblast zájmu a zkoumaných parametrů rozšiřovala i na betony vysokých pevností ($f_c > 55$ MPa) a výztuží s vysokou mezí kluzu. Cílem ovinutí u vysokopevnostních betonů není maximalizovat již tak dobrou pevnost, ale zlepšit tažnost materiálu, který vykazuje křehčí poškození než beton nižších pevností. Z výzkumu [21] vyplývá, že při stejném stupni vyztužení působí ovinutí efektivněji na betony normální pevnosti.

Sloup s překrývajícími se spirálami navazuje na jednoduchý kruhový tvar a představuje mezistupeň pro složitější a komplexnější topologii tzv. multispirálové vyztužení (multi-spiral reinforcement, MSR). Jde o neobvyklé uspořádání příčné výztuže viz obr. 1. Mnoho institucí provedlo experimenty s různými podobami MSR. Cílem je navrhnout rozvržení



Obrázek 1: Uspořádání příčné výztuže tlačných sloupů v experimentu [25].

příčné výztuže tak, aby způsobilo co nejefektivnější ovinutí a zvýšilo jak tlakovou pevnost, tak deformační kapacitu a schopnost sloupu disipovat energii způsobenou např. se-

ismicitou. Především zlepšené přetvárné vlastnosti zajistí schopnost konstrukce přestát otřesy, zmenšit následné trvalé deformace nebo alespoň prodloužit dobu potřebnou na útek. Proto jsou lidry v této problematice země postižené častými zemětřeseními. Pro uvedení do praxe je nutné mít k dispozici dostatek experimentálních dat, ze kterých lze nakalibrovat výpočetní modely a navrhnout konstitutivní vztahy pro výpočet mechanické odezvy. Kritériem je přitom minimalizace spotřeby výztuže i betonu, zajištění kvality a nenáročného technického provedení (strojová prefabrikace). Jedním slovem peníze.

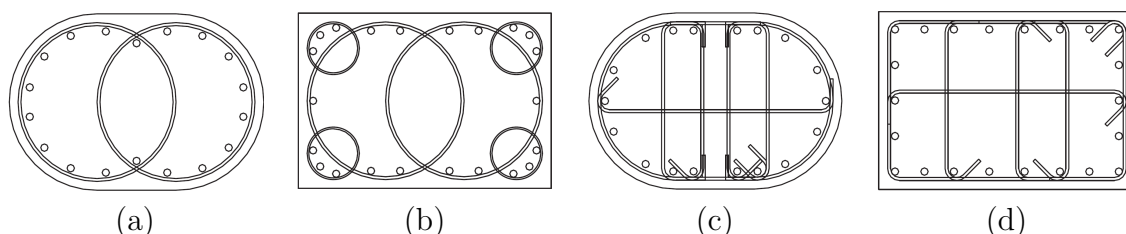
Další motivací pro navrhování MSR sloupů je současné naladění společnosti. Moderní společnost usiluje o trvale udržitelný rozvoj, který má zajistit potřeby nejen současné, ale i budoucí generace [5]. Tato problematika se dotýká sféry kulturní, ekonomické a environmentální. Ekologický dopad stavebního průmyslu není zanedbatelný. Beton je zdaleka nejpoužívanější stavební materiál a výroba cementu je provázána značnou uhlíkovou stopou. Kromě nových receptur či omezení využití betonu ve výstavbě se nabízí optimalizace návrhu konstrukce jako celku nebo zefektivnění jednotlivých konstrukčních prvků. Výsledkem takového návrhu jsou subtilnější konstrukce.

Pro ukázkou jsou na obr. 1 z experimentu [25] zobrazeny varianty rozvržení příčné výztuže čtvercových sloupů. Původní autor těchto uspořádání je Yin [11], který zkoumal prefabrikované betonové sloupy. Tvoří je kombinace třmínků, spirál a háků. Zkušební tělesa byla testována na zatížení v jendoosém centrickém tlaku a na boční cyklické zatěžování při působení konstantní tlakové síly. V první fázi testování proběhla selekce topologií s nejlepší odezvou, která se po podrobnějších experimentech porovnála se standardním uspořádáním výztuže obr. 1a. Mezi zkoumanými parametry byla pevnost použitého betonu, mez kluzu výztuže, stupeň vyztužení a použití kruhových třmínků nebo spirál.

Výsledky ukazují, že multispirálové vyztužení složené z kruhových tvarů dává lepší výsledky než tradiční čtvercové třmínky. Nejlépe splňují kritéria sloupy na obr. 1g,h. Jednotlivé spirály přispívají k celkové pevnosti individuálně, a proto se po dosažení vrcholu nesnižuje napětí tolik, jako u konvenčního uspořádání. Vykazují duktilnější chování. Rozvržení na obr. 1h má jednodušší překrytí spirál a je pro výpočet a výrobu armatury výhodnější. Ovinuté oblasti betonu se pro tuto topologii dají rozdělit do tří typů: plocha jednou ovinutá malou či velkou spirálou a plocha s překryvem obou zmíněných. Velikost každého výztužného prvku ovlivňuje podíl síly, kterou tyto jednotlivé zóny přenesou. Zvětšení centrální spirály zefektivňuje ovinutí a zvětšuje její podíl z přenášené síly [25].

Ve zmíněné studii byly zkoumány pouze čtvercové sloupy. Jejich využití můžeme předpokládat hlavně v pozemním stavitelství. Na druhou stranu masivní pilíře mostů mají většinou průřezy obdélníkové, a proto je vhodné jiné rozvržení výztuže. Rozsáhlý výzkum proběhl již dříve v osmdesátých letech 20. století na Univerzitě v Nevadě (the California Department of Transportation, CALTRANS) [6], který zkoumal dvě překrývající se spirály obr. 2a. Tato studie se zaměřila především na mezní smykovou sílu, limitní vzdálenost středů kružnic opsaných spirálou, rozdíl mezi čtvercovým a kruhovým uspořádáním a další parametry. Nepopisuje ale vliv ovinutí na maximální únosnost. V závislosti na smykové pevnosti ovinutého betonu omezuje maximální vzdálenost středů kružnic. Rozmezí je de-

finované násobkem poloměru spirály R v interval $(1 - 1,5)R$. Dolní hraniční hodnota $1R$ je doporučena, aby se zamezilo kolizi s případnou třetí spirálou. Horní mez má zamezit podélnému porušení ve střední dvojitě ovinuté části. Velikost smykové pevnosti betonu je zde omezující parametr pro stanovení vzdálenosti středů spirál.



Obrázek 2: Uspořádání příčné výztuže v experimentech [24]. Rozvržení (a) odpovídá také uspořádání ve studii CALTRANS [6].

Další studie [24] zkoumala rozvržení příčného řezu viz obr. 2. Zkušební tělesa byla testována na kombinaci tlaku a ohybu (excentrický tlak) a na boční cyklické zatěžování při působení konstantní tlakové síly rovné $0,1A_c f_c$. Sloup 2b je kombinací rozvržení výztuže z obr. 1h a sloupu se dvěma spirálami z obr. 2a. Na rozdíl od oblého tvaru má v rozích malé přidavné spirály, které tuto část zpevňují. Docílí se tak klasického obdélníkového tvaru. Výsledky experimentu byly porovnány s interakčními diagramy (ID) dle tchajwanských norem pro navrhování (MOI 2011 [16], MOTC 2009 [17]). Posuzují se mezi sebou zvláště výsledky průřezů oblých a obdélníkových. Vyhodnocení ukazuje, že topologie na obr. 2a odpovídá přibližně odezvě uspořádání s třímínky dle obr. 2c. Spotřebuje se ale pouze 43 % výztuže. Varianta obr. 2b podává lepší odezvu než paralelní obr. 2d a opět za ušetření 59 % ocele.¹ Tyto závěry podporují další výzkum MSR a záměr uvést takovéto uspořádání do širší praxe. [24]

Česká republika se do problematiky ovinutí angažovala např. projektem *Snížení materiálových nároků a zvýšení únosnosti železobetonových sloupů s multispirálovým vyztužením - pokročilá simulace a experimentální ověření* [22] podporovaným agenturou TAČR. Na projektu spolupracuje National Taiwan University, Červenka Consulting s. r. o. a FSv ČVUT. Má za cíl rozšířit počítačový software ATENA a OOFEM o simulace sloupů s pokročilou multispirálovou výztuží, verifikovat jej experimentálním měřením, optimalizovat pokročilou vícekritériální optimalizací a navrhnout zjednodušený analytický vztah pro výpočet MSR.

¹V porovnání s rozvržením výztuže z obr. 2d.

Tato bakalářská práce se skládá ze tří navazujících celků. V první části bude rozebrána teorie ovinutí dle dostupné literatury a normativních doporučení zaměřená na kruhové sloupy vyztužené kruhovými třmínky nebo spirálami. I přes své značné výhody je v současně platné normě pro navrhování betonových konstrukcí ČSN EN 1992-1-1 [2] ovinutý beton pouze okrajově zmíněn. Větší pozornosti se mu má dostat v druhé generaci eurokódů přípravných technickou komisí CEN/TC 250.

stranDruhá část obsahuje analýzu výsledků numerických simulací vypočítaných programem OOFEM [18], který je schopen postihnout nelineární chování betonu díky implementaci materiálového modelu Concrete Damage-Plastic Model 2 (CDPM2) [13], vyvinutý P. Grasslem a kol. Nejprve je pozornost věnována analýze kruhového ovinutého sloupu s jednou spirálou zatíženého centrickým tlakem. Jde v praxi o nejjednodušší a nejrozšířenější případ. Poznatky z tohoto jednoduchého rozvržení výztuže jsou následně využity pro komplikovanější sloup se dvěma překrývajícími se spirálami. Základní parametry jsou: výška závitů, míra překryvu jednotlivých spirál a jejich vzájemná orientace (souhlasně nebo opačně vinuté). Cílem práce je navrhnout jednoduchý vztah, který by určil pevnost tohoto sloupu.

V závěru je uveden experiment, který má podpořit teoretické simulace. Testovací vzorky jsou zhotoveny jako prosté válce standardních rozměrů, válce vyztužené jednou spirálou a jedna sada sloupů vyztužených dvěma spirálami s rozdílnou vzdáleností středů tzn. s rozdílnou dvojité ovinutou plochou. Je shrnuto a odůvodněno, v čem byl experiment úspěšný a kde se naopak praxe odchýlila od teorie.

2 Ovinutý beton

V této kapitole je přiblížen pojem ovinutý beton, čím je způsoben a jaké jsou teoretické modely pro výpočet pracovního diagramu, tlakové pevnosti a mezního podélného přetvoření.

2.1 Obecný princip

Beton je materiál s vnitřním třením a jeho chování proto závisí i na velikosti hydrostatického napětí. Základní charakteristiky materiálu se po ovinutí výrazně změny a hydrostatické napětí klesne. Pevnost i tažnost značně vzroste.

Nilson [7] demonstruje efekt ovinutí na chování písku v ocelové válcové nádobě. Postupným zatěžováním se začne pískem přenášet tlak do stěn. Aby byla zajištěna rovnováha sil, vzniká zde tahové napětí viz obr. 3a,b. Zatěžování probíhá dokud stěna nádoby nedosáhne své pevnosti, pak se roztrhne. Samotný písek by nebyl schopen vzdorovat větší síle.

Betonový sloup má samozřejmě i bez příčné výztuže určitou pevnost. Po zatížení se podélně zkracuje a příčně roztahuje v závislosti na Poissonově konstantě ν (při malých hodnotách deformace). Působením větší síly začnou vznikat plastické deformace. Ve spirále (nebo třmínku), která 'svírá' betonové jádro, vzniká díky boční expanzi tlačeního betonu tah [7]. Říkáme, že se tím výztuž aktivuje. Jak je vzorek dále zatěžován, vyvíjí výztuž větší příčný tlak dokud nedosáhne meze kluzu a nezplastizuje. Ve vzorku tak vzniká trojosá napjatost, i když je sloup pouze osově tlačěn.

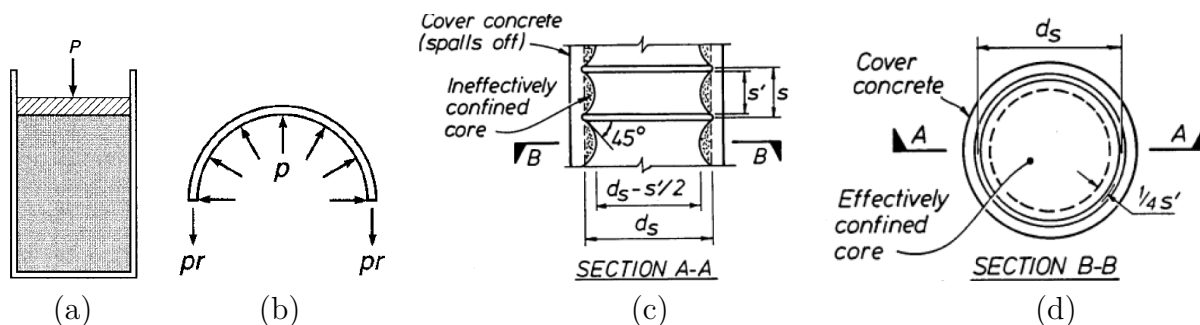
Příčný tlak generovaný výztuží označujeme jako pasivní příčný tlak (passive confinement). Není po výšce prvku rovnoměrný. Jeho rozložení je ovlivněné tvarem třmínku. Naproti tomu tlak v triaxiálním přístroji, který vytváří konstantní boční tlak po celou dobu testování, je označován za tzv. aktivní (active confinement). V prvním případě ovinutí postupně vzniká v závislosti na kvalitě materiálu, v druhém je kontrolovaně vneseno již od první chvíle [14].

Pasivní tlak vyvolává nejen betonářská výztuž. Zdrojem může být např. dutý ocelový profil vyplněný betonem. Ocel přenáší část zatížení a vyvozuje příčné napětí na svíraný beton, který zas omezuje vybočení sloupu. V normě ČSN EN 1994 [3] je tento jev zahrnut skrze koeficienty do výpočtu únosnosti průřezu. Omezující podmínky jsou dány poměrnou štíhlostí a poměrem excentricity zatížení a průměru trubky.

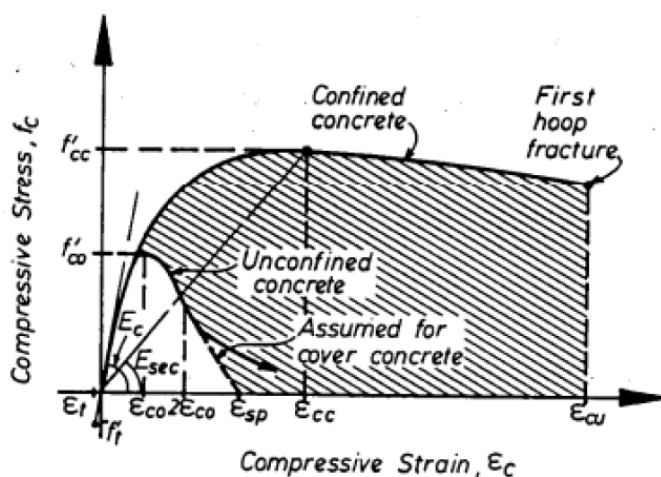
Moderním trendem v posledních letech je externě lepené vyztužení FRP tkaninou (Fiber reinforced polymer). Tento kompozitní materiál má vysokou pevnost v tahu, nízkou objemovou hmotnost, je odolný proti agresivnímu prostředí a je trvanlivý. Používá se přednostně k zesilování a sanování poškozených betonových i zděných konstrukcí, primárně sloupů. Aplikací tzv. FRP jackets (obalu FRP) lze dodatečně vyvolat ovinutí, které funguje na stejném principu jako u betonářské výztuže. Je vhodné nejdříve konstrukci co nejvíce odtížit, aby byl výchozí stav co nejpříznivější a po opětovném přitížení došlo

k aktivaci napětí ve FRP. Před aplikací FRP je také nutné provést vhodnou povrchovou úpravu [23].

Na výpočet odezvy způsobené pasivním tlakem existuje mnoho teoretických modelů. V této práci je pozornost věnována ovinutí kruhovými třmínky nebo spirálou. Mander a kol. [15] navrhl analytický vztah, který popisuje pracovní diagram ovinutého betonu za monotonního zatěžování pro kruhové a obdélníkové vyztužení viz obr. 4. Krycí vrstva po dosažení pevnosti f_c odpadne, a proto není uvažována. Mander rozděluje plochu průřezu na tzv. efektivně a neefektivně ovinutou. Na obr. 3c je schematicky zakresleno parabolické rozložení příčného napětí pod úhlem 45° a nejkritičtější místo v polovině horizontální vzdálenosti třmínků $H/2$ (na obr. značeno $s/2$). Efektivní plochu A_e tvoří kruh s průměrem $D - H/2$.



Obrázek 3: Na obr. (a) a (b) je schéma ocelové nádoby naplněné pískem zatížené tlakem a působení sil ve vodorovném výřezu [7]. Podélný a příčný řez kruhovým sloupem na obr. (c) a (d) definuje efektivně ovinuté jádro i neefektivní oblast a krycí vrstvu [15].



Obrázek 4: Porovnání pracovního diagramu ovinutého a prostého betonu [15].

Pro kvantitativní popis efektu ovinutí se používá příčné napětí σ_L , v textu dále označováno jako příčné sevření, které vychází z rovnováhy sil (1) na vodorovném řezu

viz obr. 3b. Napětí ve výztuži je na mezi kluzu f_y .

$$\sigma_L = \frac{2A_s f_y}{DH} \quad (1)$$

Průměr kruhového sloupu je značen D , svislá vzdálenost třmínek H (výška závitů), plocha výztuže jednoho drátu je A_s . Protože je vlivem roznosu napětí (obr. 3c) ve sloupu dosaženo sevření pouze v efektivní oblasti, redukuje se σ_L koeficientem efektivního ovinutí k_e na efektivní hodnotu σ'_L platnou pro celý průřez.

$$\sigma'_L = \sigma_L k_e \quad (2)$$

Koeficient k_e je definován jako poměr efektivně ovinuté oblasti A_e a celkové plochy průřezu A_e/A' , která je snížena o plochu podélné výztuže $A' = A_c(1 - \rho_{s,v})$. Pro kruhové třmínky předpokládá k_e dané výrazem $(1 - \frac{H}{2D})^2$ a pro spirály $1 - \frac{H}{2D}$. Celková pevnost betonu v ovinutí se určí vztahem (3).

$$f_{c,c} = f_c \left(1,245 + 2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94\sigma'_L}{f_c} - 2\frac{\sigma'_L}{f_c}} \right) \quad (3)$$

Podobných analytických rovnic k určení maximální únosnosti je v literatuře více. Tvar, kterým se inspirovala tato práce, je prostý součet původní pevnosti a její navýšení způsobené ovinutím. Respektuje tak podobu normových vztahů, které jsou prezentovány v následující kapitole. Dává tím také prostor definovat navýšení pevnosti v důsledku ovinutí $\Delta f_{c,i}$ zvlášť pro různá uspořádání výztuže.

$$f_{c,c} = f_c + \Delta f_{c,i} \quad (4)$$

2.2 Ovinutý beton dle vybraných norem

V této kapitole je čtenář stručně seznámen s přístupem v evropských normách a mezinárodním standardu Model Code 2010 [10] k problematice ovinutí.

2.2.1 ČSN EN 1992-1-1

V Evropě je závazným dokumentem pro navrhování stavebních konstrukcí soubor evropských technických norem (EN). Dle českého překladu ČSN EN 1992-1-1 Navrhování betonových konstrukcí [2] dochází v důsledku ovinutí betonu, které je způsobeno uzavřenými třmínky nebo šroubovicí, ke zvýšení pevnosti a k vyššímu meznímu poměrnému přetvoření. Ovlivnění další materiálových charakteristik se neuvažuje. Norma neuvádí, jak má čtenář efektivní příčné tlakové napětí vypočítat. Pokud ale vycházíme z podmínky rovnováhy (1), můžeme zvýšenou pevnost a přetvoření jednoduše dopočítat dle rovnic:

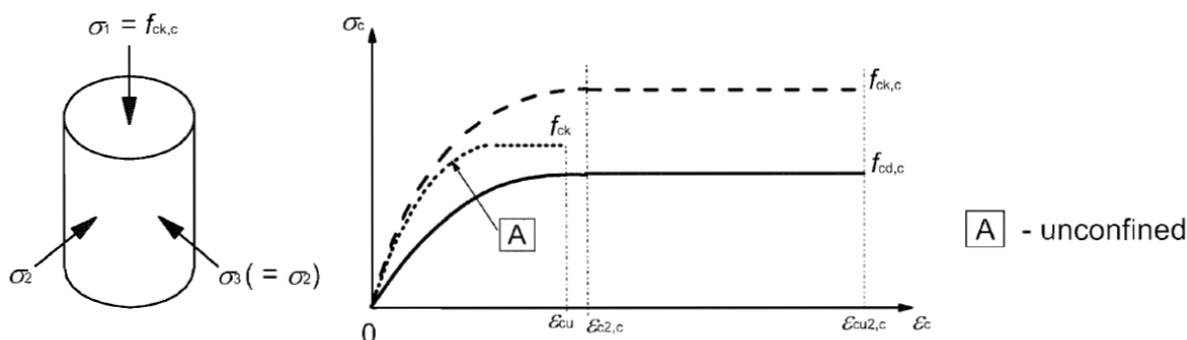
$$f_{c,c} = f_{ck}(1,000 + 5,0 \sigma_2 f_{ck}) \quad \text{pro} \quad \sigma_2 \leq 0,05 f_{ck} \quad (5)$$

$$f_{c,c} = f_{ck}(1,125 + 2,5 \sigma_2 f_{ck}) \quad \text{pro} \quad \sigma_2 > 0,05 f_{ck} \quad (6)$$

Pevnosti v ovinutí odpovídá poměrné stlačení (s kladným znaménkem):

$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2} (f_{c,c}/f_{ck})^2 \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu} + 0,2 \sigma_2/f_{ck} \quad (8)$$



Obrázek 5: Pracovní diagram ovinutého betonu [2].

kde $\sigma_2 (= \sigma_3)$ je efektivní příčné tlakové napětí v mezním stavu únosnosti; $\varepsilon_{c2,c}$ přetvoření ovinutého betonu při dosažení maximálního napětí $f_{c,c}$ (ε_{c2} neovinitého betonu při dosažení f_c) a $\varepsilon_{cu2,c}$ je mezní přetvoření ovinutého betonu (ε_{cu} neovinitého betonu).

2.2.2 EN 1992-1-1 (draft, 2018)

Pracovní verze EN z roku 2018 [1] předpokládá v důsledku ovinutí opět zvýšení pevnosti a poměrného protažení. Příspěvek k pevnosti $\Delta f_{c,c}$ vlivem ovinutí se vypočítá obdobným způsobem z působícího příčného tlakového napětí σ_2 a redukuje se při použití kameniva s $d_{dg} < 32$ mm faktorem $d_{dg}/32$. Výpočet je možné použít pro sloupy vyztužené obdélníkovými třmínky s jedním nebo více prvky způsobujícími sevření, kruhovými třmínky, spirálami nebo sloupy s tlakovými zónami (viz obr. 6). Předpokládá se, že výztuž z důvodu příčné deformace betonu dosáhne meze kluzu a bude se plasticky přetvářet.

Výpočet příspěvku k původní pevnosti:

$$\Delta f_{c,c} = 4 \sigma_2 \quad \text{pro} \quad \sigma_2 \leq 0,6 f_{cd} \quad (9)$$

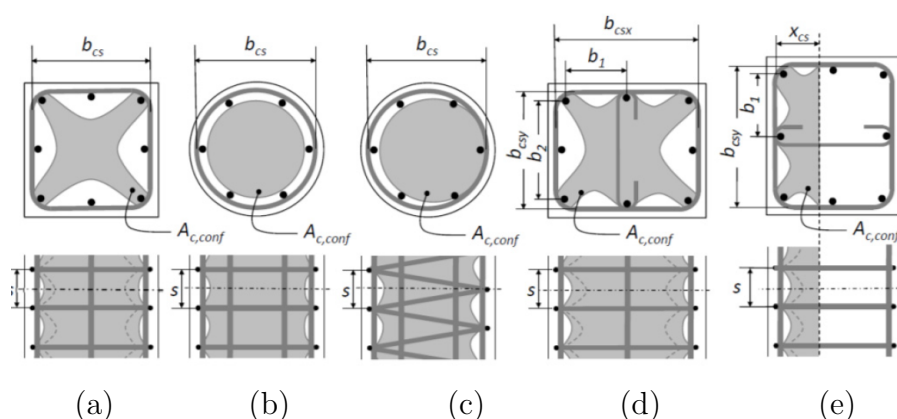
$$\Delta f_{c,c} = 3,5 \sigma_2^{3/4} f_{cd}^{1/4} \quad \text{pro} \quad \sigma_2 > 0,6 f_{cd} \quad (10)$$

kterému odpovídá poměrné stlačení (s kladným znaménkem):

$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2}(1 + 5\Delta f_{c,c}/f_{cd}) \quad (11)$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu} + 0,2 \sigma_2/f_{cd} \quad (12)$$

Pokud je zvýšené přetvoření zahrnuto do pevnostních výpočtů, krycí vrstva betonu se neuvažuje. Výpočet příčného tlakového napětí (pro obr. 6a,b,c) se určí z rovnice (1).



Obrázek 6: Rozvržení výztuže a schéma efektivně ovinuté oblasti $A_e (= A_{c,conf})$. Pozn. v textu je vertikální vzdálenost výztuže s zaměněna za H a šířka třmínku b_{cs} za D [1].

Efektivně ovinutá plocha A_e , na kterou lze aplikovat zvýšení pevnosti pro případy obr. 6b a 6c, je dána parabolickým roznosem sevření a vzorcí:

$$A_e = \frac{\pi}{4} (D - H/2)^2 \quad 6b \quad (13)$$

$$A_e = \frac{\pi}{4}(D - H/4)^2 \quad 6c \quad (14)$$

Tato verze vychází z Model Code 2010 (MC2010) a Fardis (2009) [12].

2.2.3 *fib* Model Code 2010

fib Model Code 2010 [10] vydaný mezinárodní organizací *fib* (International Federation for Structural Concrete) předpokládá, že se díky příčnému napětí změní pouze charakteristiky pevnosti a kritického poměrného přetvoření. Ostatní mechanické charakteristiky zůstávají beze změny. Poměrné stlačení je stejné jako ve vztazích (11),(12) a příspěvek ovinutí k původní pevnosti $\Delta f_{c,c}$ je dle (10) bez omezení intervalem platnosti.

Příčné tlakové napětí (s kladným znaménkem) se určí následovně:

$$\sigma_2 = \omega_c f_{cd} \left(1 - \frac{H}{D}\right)^2 \quad \text{pro} \quad (\text{kruhové třmínky}) \quad (15)$$

$$\sigma_2 = \omega_c f_{cd} \left(1 - \frac{H}{D}\right) \quad \text{pro} \quad (\text{kruhové spirály}) \quad (16)$$

konstanta ω_c :

$$\omega_c = \frac{2A_s f_{yd}}{HD f_{cd}} \quad (17)$$

MC2010 podává návod nejen pro kruhové sloupy se spirálou nebo třmínky, ale i pro obdélníkové sloupy. Na rozdíl od EN 1992 (draft) neredukuje přímo plochu průřezu sloupu, ale snižuje příčné napětí koeficientem $k_e \left(1 - \frac{H}{D}\right)$ nebo $\left(1 - \frac{H}{D}\right)^2$. Hodnota k_e je menší než v případě Mandera, protože předpokládá lineární roznos příčného napětí pod úhlem 45° . Plocha v kritickém průřezu je tak daná poloměrem $D - H$ pro kruhové třmínky a $D - H/2$ pro spirály².

²V polovině závitů je rozložení napětí podobné jako na obr. 6c, ale je nutné zaměnit parabolický roznos příčného napětí za lineární a vrchol paraboly ve vzdálenosti $H/4$ za průsečík přímek v $H/2$. Hodnota $(1 - H/2/D)^2$ je aproximovaná výrazem $(1 - H/D)$. Dosáhne se tak uniformované podoby vzorců.

3 Numerická analýza

V následující kapitole jsou uvedeny výsledky numerických simulací modelu kruhového sloupu s jednou spirálou a sloupu se dvěma překrývajícími se spirálami na zatížení centrickým tlakem. Jsou popsány parametry výpočetního modelu a způsob vyhodnocení a zpracování dat.

Výpočetní model představuje výřez sloupu, jehož výška odpovídá závitů jedné spirály. Aby byl model reprezentativní a výsledky byly porovnatelné s experimentem, průměr všech spirál je pevně stanoven $D = 150$ mm. K numerické simulaci je použit výpočetní program OOFEM (Object Oriented Finite Element Method) [18].

Síť konečných prvků je vygenerována softwarem T3D mesh generator [20], který diskretizuje betonový sloup šestistěnou s lineární aproximací posunů. Výztuž je vytvořena v Matlabu lineárními prvky truss. Aby se napětí z výztuže lépe roznášelo do okolí a nedocházelo k lokálnímu poškození, je prutu modelován pěti dílčími pruty s redukovanou plochou průřezu. Přičemž celková plocha průřezu je zachována. Interakce mezi objemovými prvky (šestistěny) a tyčovými prvky (truss) je zprostředkována pomocí tzv. zavěšených uzlů (hanging node).

Okrajové podmínky na horní a spodní podstavě jsou periodické, definované pomocí podmínky master-slave. Nastavení nelineárního výpočtu umožňuje řešit úlohu buď předepsáním přímo síly, posunu nebo kombinace obou zmíněných. V tomto případě je úloha řízena předepsáním svislého posunu horní podstavě. Rychlost zatěžování je konstantní.

Pro popis betonu je použit materiálový model CDPM2, pro výztuž MisesMat [13]. CDPM2 je založen na kombinaci plasticity a mechaniky poškození. V tomto konkrétním případě je pro MisesMat použita podmínka plasticity bez zpevnění, aby bylo možné jasněji sledovat mechanickou odezvu sloupu při rozdílném druhu vyztužení. Materiálové charakteristiky betonu a oceli zůstávají pro všechny použité modely neměnné.

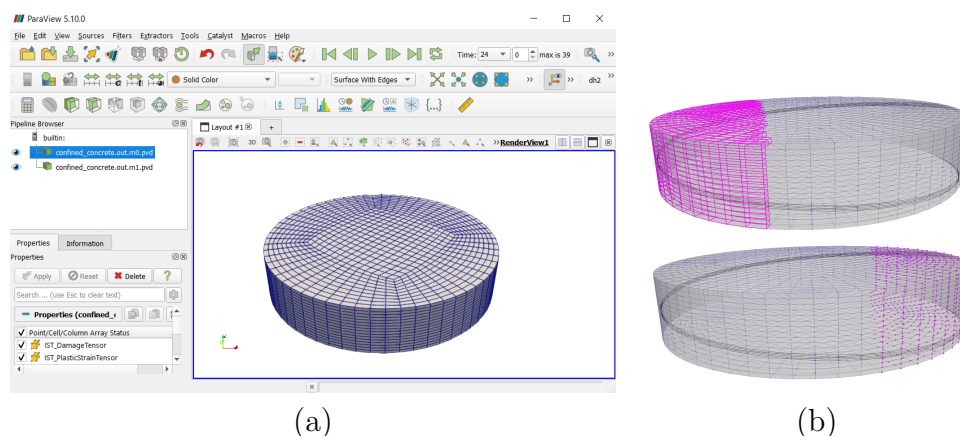
Parametry modelu CDPM2 jsou následující. Beton je uvažován s pevnostní třídou C20/25; $f_c = 28$ MPa představuje průměrnou válcovou pevnost v tlaku ve stáří 28 dní. Poissonův součinitel je dán $\nu = 0,2$. Pevnost v tahu a počáteční modul je dle doporučení *fib* MC2010 počítán vztahy $f_t = 0,3(f_c - 8 \text{ MPa})^{\frac{2}{3}}$ a $E = 21,5(0,1f_c)^{\frac{1}{3}}$. Výsledné hodnoty jsou $f_t = 2,21$ MPa a $E = 30,3$ GPa. Ostatní parametry jsou v OOFEMu nastaveny jako výchozí. Youngův modul pružnosti výztuže je $E_s = 200$ GPa a mez kluzu $f_y = 500$ MPa.

Další předpoklady v modelování zahrnují dokonalou soudržnost mezi betonem a výztuží, ideálně centrické zatížení, homogenní materiál a nepřítomnost podélné výztuže. Poslední zmíněný bod souvisí se zkušebními tělesy v experimentální části této práce a maximálním výkonem hydraulického lisu. Krycí vrstva výztuže během zatěžování odpadne, a proto není zahrnuta do výpočtů či numerické simulace.

Konstruování samotných výpočetních modelů je nad rámec časových možností a úrovně této práce. Poskytl je vedoucí práce. Postprocessing dat je proveden v ParaView [4], open-source multiplatformní aplikaci pro interaktivní vědeckou vizualizaci.

3.1 Zpracování dat

Program OOFEM umožňuje exportovat výstup úlohy ve formátu *vtk*, který jsou schopné otevřít programy určené k vizualizaci vědeckých dat jako je např. ParaView nebo MayaVi. Díky tomu je práce s daty jednodušší a geometrické nepřesnosti modelu lépe identifikovatelné. V tomto případě byl použit program ParaView (PV). PV je aplikace s distribuovanou architekturou a rozšiřitelným aplikačním rámcem se sbírkou nástrojů a knihoven včetně skriptování (pomocí Pythonu), webové vizualizace (prostřednictvím ParaViewWeb) nebo in-situ analýze (Catalyst) [9]. Rozhraní aplikace viz obr. 7a.



Obrázek 7: Uživatelské prostředí v aplikaci ParaView (a). Vizualizace výpočetního modelu betonového sloupu (b) se zobrazenou sítí konečných prvků a spirálovou výztuží s označenými prvky (nahore) a uzly (dole).

PV načte zvlášť vstupní soubor pro betonový sloup a ocelovou výztuž. Umožňuje zobrazovat data dvojím způsobem. Buď se jedná o informace v uzlech sítě konečných prvků (point data) nebo průměrné hodnoty vybraných veličin v jednotlivých prvcích, šestistěnnů (cell data). Toto uspořádání se liší od výpočetního modelu, který formuje výstup do *vtk* následujícím způsobem. V uzlech je definován posun a složky celkového přetvoření a složky napětí. V tomto konkrétním případě je zase v prvcích uchována informace o plastickém přetvoření a parametru poškození. Bodové, uzlové hodnoty vykresluje aplikace PV pomocí lineární interpolace barevnými konturami na celý model.

PV používá koncept ‘data flow paradigm’, který spočívá v transformování původních dat ze simulace na formu, která se dá interpretovat a analyzovat. Činí tak prostřednictvím filtrů aplikovaných na původní model, které se mohou za sebou postupně řetězit. Filtr představuje algoritmus³, který vstupní data (inputs) určitým způsobem transformuje a výsledkem je výstup (outputs) s odlišnými vlastnostmi [9].

V této práci sloužily filtry především k úpravě geometrie (*Clip*, *Slice*), vypočítání příčného tlakového napětí σ_+ (viz kapitola 3.2.2) *Calculator*, vyhodnocení statistických

³Je označován také jako pipeline module.

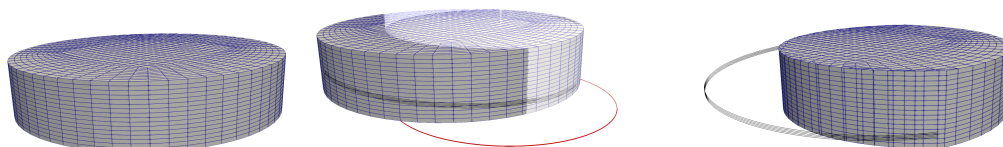
veličin *Descriptive Statistics*, extrakci označené skupiny uzlů nebo prvků *Extractor*, vykreslení veličin v závislosti na čase nebo poloze řezu a mnoho dalších.

Zřetězení výše uvedených filtrů je možné ilustrovat např. při výpočtu napětí σ_+ na části kruhového sloupu z obr. 7a. Posloupnost filtrů je následující:

- model \rightarrow *Calculator*, $\sigma_+ \rightarrow$ *Clip*, (obecně) řez \rightarrow *Descriptive Statistics*, statistické veličiny

Filtr *Descriptive Statistics* je použit pro vyhodnocení průměrného napětí a poskytuje dva soubory informací. V jedné je seznam veškerých vybraných uzlů s příslušnými hodnotami veličin (např. napětí, celkové přetvoření atd.), v druhé jsou z těchto dat dopočítány statistické veličiny jako je průměr, směrodatná odchylka, maximum, minimum a další. Průměrná napětí jsou tedy určena jako vážený průměr uzlových hodnot a nezohledňují větší či menší prvky sítě konečných prvků. Proto je vhodné použít tuto síť co nejpravděpodobnější, aby se zabránilo zkreslení výsledku při vyhodnocení touto metodou.

Komplikace nastává u složitější geometrie jak je demonstrováno na obr. 8. Je vidět, že filtr docílil vizuálně správného tvaru, ale program síť v místě řezu modifikoval a začlenil další uzly s hodnotami získanými lineární interpolací. Vážený průměr z těchto dalších uzlů představuje jisté zkreslení, protože se může při podobných úpravách geometrie vytvořit značná nepravidelnost.



Obrázek 8: Změna sítě konečných prvků po aplikování příslušného filtru.

Další nepřesnost vnáší časový okamžik, ve kterém je výpočetní model vyhodnocován. Výstupní soubory *vtk* jsou zapisovány z důvodu úspory objemu dat v daném intervalu, konkrétně po 25 časových krocích⁴. Pro bod, kterým se zatěžování řídí, jsou zaznamenány hodnoty síly a posunu v každém časovém kroku. Z pracovního diagramu řídicího bodu je určena referenční pevnost $f_{c,c}^{\text{FEM}}$ (viz kapitola 3.2.2). Z tohoto důvodu je nasnadě, že zvolený časový krok je v PV zvolen jako nejbližší možný k referenčnímu, ve kterém je dosažena maximální únosnost. Na velikosti hodnot zkoumaných veličin má tato skutečnost jen minimální vliv, protože ovinutý beton vykazuje velmi duktilní chování s mírným změkčením a nenastává skoková změna.⁵

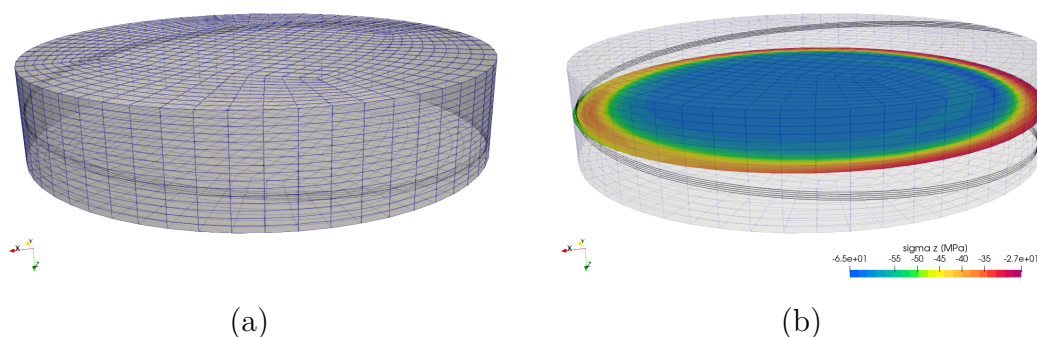
⁴Celý proces zatěžování probíhá v 1000 časových krocích.

⁵Toto tvrzení platí pro spojitě veličiny jako je napětí a celkové přetvoření.

3.2 Kruhový sloup

V této kapitole je věnována pozornost odezvě kruhového sloupu vyztuženého spirálou na zatížení centrickým tlakem. Cílem tohoto jednoduššího uspořádání je identifikovat oblasti s přibližně rovnoměrným příčným a svislým napětím a definovat vztahy, které se v kapitole 3.3 aplikují na složitější případ sloupu se dvěma spirálami.

Síť konečných prvků výpočetního modelu má 15 360 uzlů a 14 000 prvků viz obr. 9. Uspořádání ani počet prvků se při změně výšky závitů nemění, pouze se proporcionálně zvětšuje svislá vzdálenost mezi uzly.



Obrázek 9: Síť konečných prvků kruhového sloupu výšky H (a). Rozložení svislého napětí σ_z na vodorovném řezu ve výšce $H/2$ (b).

3.2.1 Geometrie modelu

Důraz je kladen na identifikaci vlivu výšky závitů spirály H a průměr výztuže d . Tyto dva parametry významně ovlivňují výsledné ovinutí. Vzdálenosti H jsou dány 15, 30, 50, 70, 90 mm (dále je použité značení H_x např. H_{50} odpovídá výšce 50 mm) a průměr válce $D = 150$ mm. Celková plocha průřezu sloupu je $A_c = 17671$ mm².

Jsou sledovány dva případy, které se liší vyztužením. Ve variantě A je d konstantní ($d = 6$ mm) a generuje tak jiné hodnoty sevření σ_L pro jednotlivé případy H_x . Varianta B počítá s průměrem upraveným způsobem, který zajistí stejný stupeň vyztužení ρ_B a konstantní hodnotu ovinutí pro různé výšky, a tedy i průměrnou velikost sevření. Referenční výška H_{30} ($d = 6$ mm) definuje $\rho_B = 2,52$ %.

Stupeň vyztužení ρ je definován vztahem

$$\rho = \frac{A_s \cdot l_s}{A_c \cdot H} = \frac{4A_s \cdot l_s}{\pi D^2 \cdot H} \quad (18)$$

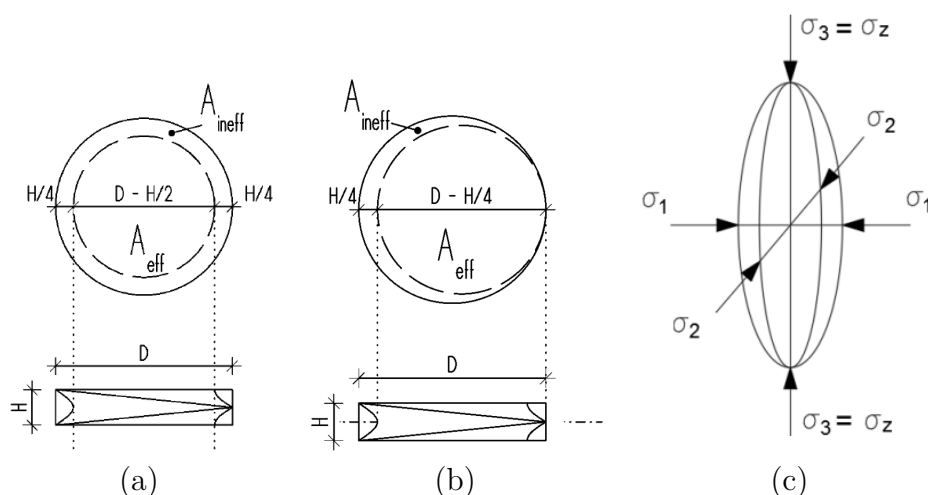
Délka spirály l_s je dána geometrií

$$l_s = \sqrt{(\pi D)^2 + H^2} \quad (19)$$

3.2.2 Výchozí předpoklady

V analyzování dat je brán ohled na doporučení v literatuře a normách. Kruhový sloup je rozdělen na efektivní a neefektivní oblasti. Z obr. 9b je patrné, že relevantnímu rozvržení těchto oblastí odpovídají spíše obr. 10a než předpoklady EN 1992 (draft) na obr. 10b⁶. Jejich přesná velikost je předmětem zkoumání.

Aby zjištěné příčné tlakové napětí bylo nejnepříznivější, je logickým krokem spočítat hlavní napětí a určit největší tahové. Zjednodušeně je uvažovaná prostorová napjatost orientovaná jako na obr. 10c. Největší tlakové napětí je předpokládáno ve směru osy z . Proto jsou v rovině xy hlavní napětí σ_1 a σ_2 brána jako minimální a maximální příčné napětí přičemž nejmenší (stále tlakové) napětí $\sigma_1 = \sigma_+$.



Obrázek 10: Dvě možná rozvržení mezi efektivně a neefektivně ovinutou oblastí. Vlevo (a) je oblast definována přes celý objem válce. Uprostřed (b) je vodorovný řez, který ohraničuje nepoškozenou oblast a zohledňuje vinutí spirály. Takto se předpokládá rozdělení dle EN 1992 (draft). Vpravo (c) je schéma předpokládané prostorové napjatosti tlacených sloupů.

Dle závěru práce [14] je závislost koeficientu efektivního ovinutí k_e na poměru H/D neměnná nezávisle na stupni vyztužení a typu výztuže. Pro výpočet se spirálami lze použít jednoduchou rovnici,

$$k_e = \left(1 - \frac{H}{2D}\right)^2 \quad (20)$$

která byla původně odvozena pro kruhové třmínky s předpokládaným parabolickým roznosem příčného tlakového napětí.

Plocha A_{eff} by tak měla odpovídat obr. 10a. Přehled koeficientů pro jednotlivé Hx spolu s odpovídajícími hodnotami příčného sevření σ_L je shrnut v tabulce 1. Výpočet zvýšené

⁶ *fb* MC2010 uvažuje konzervativnější (lineární) roznos příčného napětí narozdíl od EN 1992 (draft) viz kap. 2.2.3. Kružnice by měla stejnou pozici, ale průměr $D - H/2$.

pevnosti v důsledku ovinutí byl převzat z [14] a je nakalibrován pro tento materiálový model. Uvažuje se s kladným znaménkem.

$$\Delta f_{c,c} = k\sigma_L^p[1 + c(f_c/\text{MPa} - 28)^q] \quad (21)$$

kde $k = 7,65$; $p = 0,8$; pevnostní korekce $c = 0,0085$ a $q = 1$ jsou opravné koeficienty pro případ výpočtu tahové pevnosti f_t dle MC2010. Po dosazení konkrétních hodnot se vztah zredukuje na člen $\Delta f_{c,c} = 7,65 \sigma_L^{0,8}$. Celková pevnost ovinutého sloupu (s kladným znaménkem) vychází z redukované hodnoty $\Delta f_{c,c}$ koeficientem k_e (22).

$$f_{c,c}(\sigma_L) = \frac{f_c A_c + \Delta f_{c,c}(\sigma_L) A_{\text{eff}}}{A_c} = f_c + k_e \Delta f_{c,c}(\sigma_L) \quad (22)$$

Příčné tlakové sevření σ_L je vypočítané ze silové podmínky rovnováhy dle (1). Do vztahu(21) se dosazuje s kladným znaménkem, i když působí v tlaku. Pro úplnost je přenásobeno hodnotou $\cos(\alpha)$, kde α je úhel, který svírá stoupající spirála s vodorovnou rovinou $\alpha = \arctan(H/(\pi D))$. Tato drobná úprava výsledky výpočtu téměř nezmění viz tabulka 1.

Svislé napětí numerického modelu σ_z^{FEM} vychází ze silové reakce. Pevnost $f_{c,c}^{\text{FEM}}$ je daná

$$f_{c,c}^{\text{FEM}} = F_{\text{peak}}/A_c \quad (23)$$

kde F_{peak} je max. reakce řídicího bodu a A_c celková plocha průřezu sloupu. Jak bylo řečeno, průměrné hodnoty zkoumaných veličin jsou z PV vyhodnocovány v okamžiku působení F_{peak} (nebo v blízkém časovém kroku).

Přírůstek k pevnosti pro numerický model je pak dán

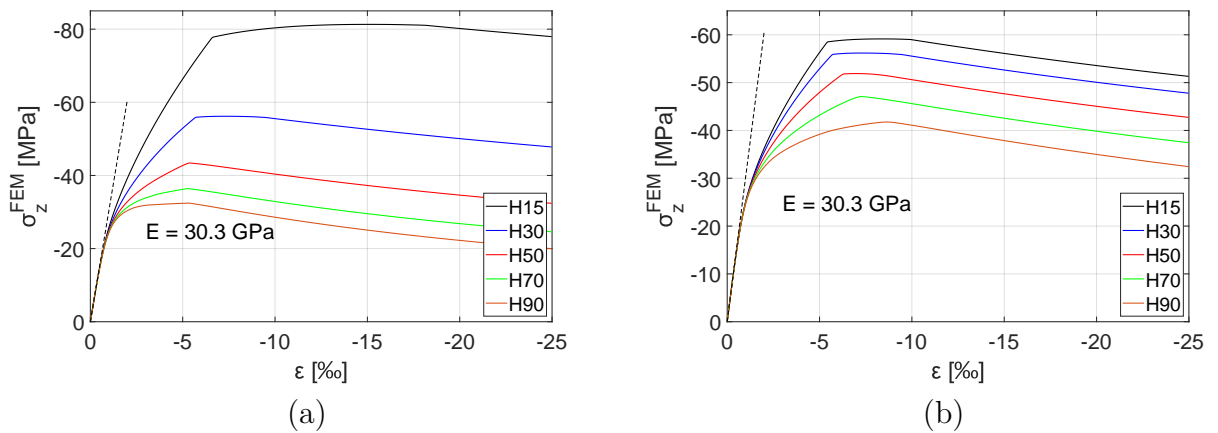
$$\Delta f_{c,c}^{\text{FEM}} = f_{c,c}^{\text{FEM}} - f_c \quad (24)$$

Tabulka 1: Koeficient efektivního ovinutí k_e z (20), sevření σ_L a průměr d pro variantu A, B.

H [mm]	H/D [-]	k_e [-]	σ_L^A [MPa]	σ_L^B [MPa]	d^A [mm]	d^B [mm]
15	0,10	0,90	-12,56	-6,28	6	4,24
30	0,20	0,81	-6,27	-6,27	6	6,00
50	0,33	0,69	-3,75	-6,25	6	7,75
70	0,47	0,59	-2,66	-6,21	6	9,17
90	0,60	0,49	- 2,06	-6,17	6	10,39

3.2.3 Vyhodnocení výsledků analýzy

V první části této kapitoly je prezentována celková odezva tlačného kruhového sloupu. Na obr. 11 je pracovní diagram pro variantu A a B znázorňující průběh napětí σ_z^{FEM} . Do dosažení jednoosé tlakové pevnosti f_c je odezva přibližně úměrná modulu pružnosti betonu, pak dochází ke zpevnění do určitého zlomu, který odpovídá počátku plastizování výztuže. Po dosažení pevnosti dochází k celkovému pozvolnému změkčování. Ve variantě B jsou sestupné větve pracovního diagramu téměř rovnoběžné, zatímco ve variantě A pozorujeme odchylky změkčování modelů s různou výškou, a tím i s odlišným ovinutím.

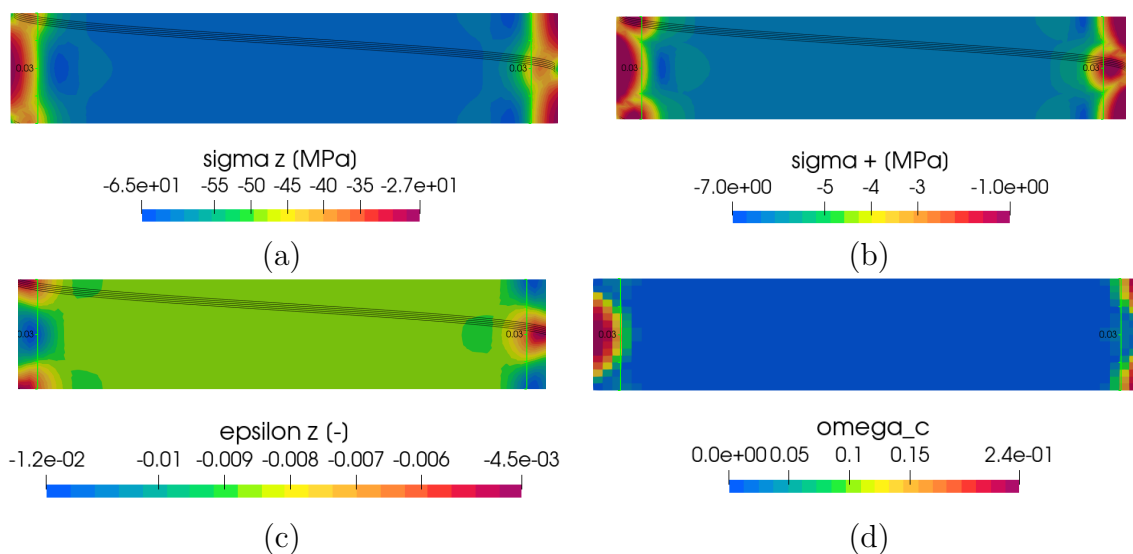


Obrázek 11: Svislé napětí σ_z^{FEM} pro variantu A (různé σ_L) (a) a B (konstatní σ_L) (b).

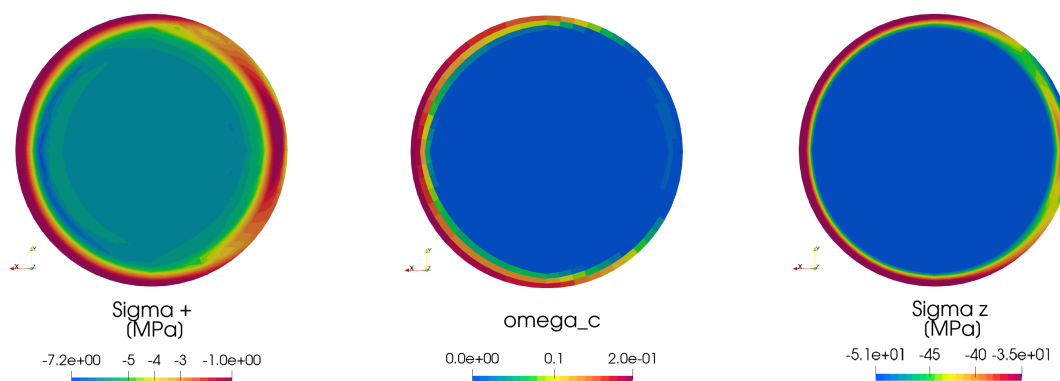
Pro názornou představu jsou představeny konkrétní vypočtené hodnoty extrémních případů. Ve variantě A pro H90, kdy se hodnota příčného sevření σ_L pohybuje okolo -2 MPa, je pevnost navýšena pouze na 32,4 MPa ($\Delta f_{c,c} = 4,4$ MPa). Pro H15 je $\sigma_L = -12,56$ MPa a pevnost $f_{c,c}^{\text{FEM}} = 81,31$ MPa ($\Delta f_{c,c} = 53,34$ MPa) je přibližně trojnásobná než původní f_c . Pevnost ve variantě B s konstantní předepsanou hodnotou sevření postupně roste o přibližně 3–5 MPa se snižující se výškou závitů.

V další fázi je v PV vyšetřeno rozložení příčného a svislého napětí a pokud je to nutné, jsou upřesněny oblasti A_{eff} a A_{ineff} ; zda odpovídají rozvržení z obr. 10a nebo b. Protože jsou oblasti vymezené symetrickou kružnicí nezáleží, zda je analýza provedena ve vodorovném řezu (2D) nebo na celém objemu vymezeném válcem (3D), protože všechny veličiny kopírují stoupání spirály. Pokud je během postprocessingu upravena geometrie pouze soustřednou kružnicí, modifikuje PV původní síť konečných prvků pravidelně.

Na obr. 12 je ve vizualizaci na svislém řezu vykresleno svislé a příčné napětí σ_z a σ_+ , podélné přetvoření ε_z a parametr poškození v tlaku ω_c . Napětí σ_+ se roznáší parabolicky dle očekávání. Mimoto je snižené i v místě výztuže. Efektivní oblast odpovídá schématu obr. 10a; je přibližně vymezena soustřednou kružnicí s průměrem $D - H/2$. Plocha z obr. 10b odpovídá poškozené oblasti obr. 13b.



Obrázek 12: Rozložení veličin při max. únosnosti sloupu. Svislé normálové napětí σ_z (a), příčné napětí σ_+ (b), podélné přetvoření ε_z (c) a parametr poškození v tlaku ω_c (d). Oblasti vymezené $H/4$ jsou vyznačeny zelenou linkou.



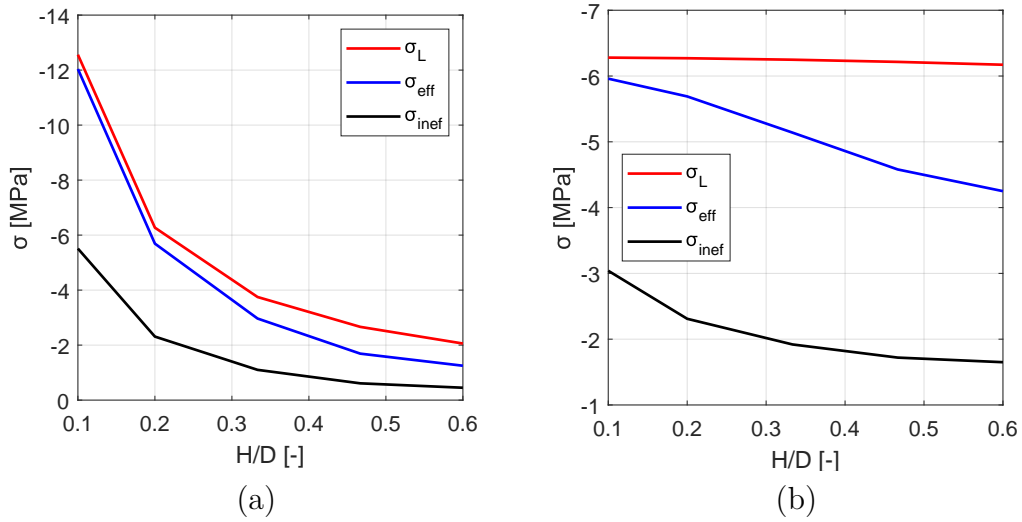
Obrázek 13: Na vodorovném řezu je ve výšce H vykresleno napětí σ_+ , poškození ω_c a σ_z .

Ukazuje se, že příčné napětí σ_+ odpovídá přibližně hodnotám sevření σ_L v efektivní oblasti pouze pro nízké hodnoty poměru H/D viz obr. 14. Se vzrůstajícím poměrem se neefektivně ovinutá oblast zvětšuje a předpokládané hodnoty σ_L není dosaženo ani v úplném středu sloupu.

Z PV je výsledná pevnost kruhového sloupu určena váženým průměrem σ_z oblastí A_{eff} , A_{ineff} .

$$f_{c,c}(\sigma_z) = \frac{\sigma_{z,\text{eff}} A_{\text{eff}} + \sigma_{z,\text{ineff}} A_{\text{ineff}}}{A_c} \quad (25)$$

Pro další postup je vhodné vypočítat pevnost z příčného sevření. Docíleno je tak modifikací vztahu 21, ve kterém se sevření nahradí napětím σ_+ určeným z numerické simulace.



Obrázek 14: Příčné tlakové napětí σ_+ v oblasti A_{eff} , A_{ineff} a sevření σ_L pro variantu A (a) a B (b).

Součtem příspěvku k pevnosti a původní tlakové pevnosti f_c je vypočtena pevnost v ovinutí.

$$f_{c,c}(\sigma_{+,i}) = f_c + k\sigma_{+,i}^p [1 + c(f_c/\text{MPa} - 28)^q] \quad (26)$$

Index i znamená výpočet buď pro efektivní nebo neefektivní plochu. Celková pevnost je daná průměrem z oblastí A_{eff} , A_{ineff} rovnicí (27).

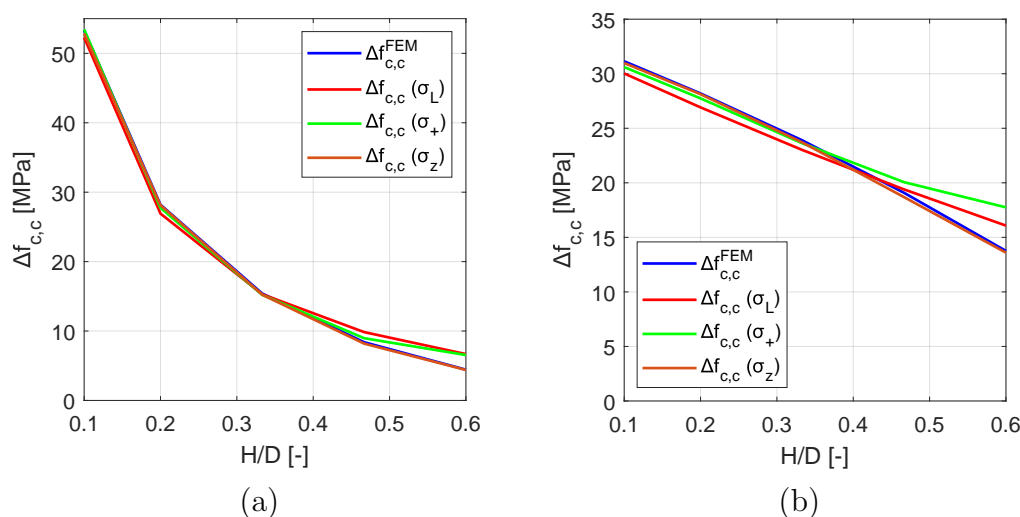
$$f_{c,c}(\sigma_+) = \frac{f_{c,c}(\sigma_{+, \text{eff}})A_{\text{eff}} + f_{c,c}(\sigma_{+, \text{ineff}})A_{\text{ineff}}}{A_c} \quad (27)$$

Celkově jsou různým způsobem vypočteny čtyři pevnosti:

1. $f_{c,c}(\sigma_L)$ určená analyticky zjednodušenými vztahy (21), (22)
2. $f_{c,c}^{\text{FEM}}$ referenční, ze silové reakce (23)
3. $f_{c,c}(\sigma_z)$ zprůměrovaná pevnost z vizualizace v PV (25)
4. $f_{c,c}(\sigma_+)$ vypočítaná z příčného tlakového napětí σ_+ z PV (26), (27)

Rozdíl mezi $f_{c,c}(\sigma_z)$ a $f_{c,c}^{\text{FEM}}$ představuje menší odlišnost ve vyhodnocování dat. Porovnáním $f_{c,c}(\sigma_z)$ a $f_{c,c}(\sigma_+)$ je ověřena správnost vztahu (21) a hlavním cílem je samozřejmě ověřit platnost analytického výpočtu pevnosti $f_{c,c}(\sigma_L)$. Na obr. 15 je vykreslené navýšení pevnosti pro všechny čtyři případy. Ve variantě A je pro poměr $H/D > 0,5$ dosaženo malé hodnoty σ_L a navýšení pevnosti je zanedbatelné. Dle průběhu $\Delta f_{c,c}$ ve variantě B mají modely s menším průměrem výztuže lepší výsledky. To odpovídá faktu, že při navrhování železobetonových konstrukcí je obecně vhodnější použít více prutů s menším

průměrem výztuže. V tomto případě je výhodnější navrhovat kruhové sloupy se spirálou s menší plochou A_s a nižším stoupáním tj. hustším svislým uspořádáním. Jistá omezení představuje technologické provádění. Také je nasnadě, že při příliš malém H může být sloup rovnou navržen jako ocelový profil vyplněný betonem.

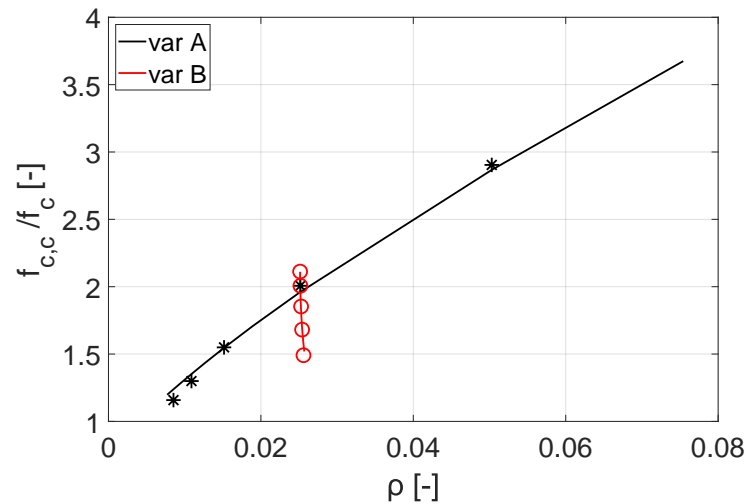


Obrázek 15: Zvýšení pevnosti ovinitím $\Delta f_{c,c}^{FEM}$, $\Delta f_{c,c}(\sigma_+)$, $\Delta f_{c,c}(\sigma_L)$ a $\Delta f_{c,c}(\sigma_z)$ v závislosti na H/D pro varinatu A (a) a B (b).

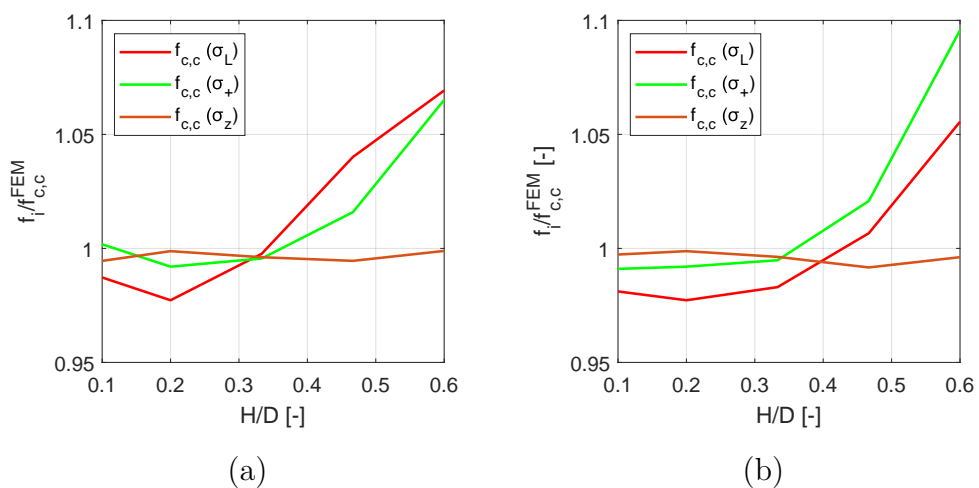
Na obr. 16 je vykreslená pevnost v ovinití normovaná původní tlakovou pevností v závislosti na stupni vyztužení. Rozdílná efektivnost ovinití je pozorovatelné pro stejnou hodnotu ρ^B . Pro var. A je již při $\rho = 0,026$ únosnost dvojnásobná oproti původní tlakové pevnosti f_c .

Závěrem lze konstatovat, že $\approx H/4$ vystihuje oblast neefektivně ovinitou a podobné rozložení napětí se dá očekávat v jednoduše ovinité oblasti S (identifikovaná v následující kapitole) i u sloupu se dvěma překrývajícími se spirálami. Potvrdila se platnost rovnice (21), která přesně počítá navýšení pevnosti. To je patrné z porovnání mezi pevnostmi $f_{c,c}(\sigma_+)$ a $f_{c,c}(\sigma_z)$ jednotlivých modelů Hx na obr. 17. Dá se očekávat, že dvojitě ovinitá oblast bude mít hodnotu napětí σ_+ menší než je předpokládána $2\sigma_L^7$, protože ani pro kruhový sloup neodpovídá σ_+ hodnotě dané z rovnováhy sil. Vzhledem k tomu, že se s rostoucím poměrem H/D efektivita v ovinití snižuje, je zkoumaná výška modelů sloupu se dvěma spirálami omezena na 70 mm.

⁷Dvojnásobné sevření je dané opět z podmínky rovnováhy, kde se v případě sloupů se dvěma spirálami obě tyto výztuže protínají uprostřed.



Obrázek 16: Pevnost v ovinutí normovaná f_c v závislosti na ρ , plná čára značí výsledky výpočetního vztahu (22) a body výsledky z numerické simulace (23). Mírná změna ρ ve var. B je zapříčiněná zvětšujícím se úhlem stoupání spirály α .

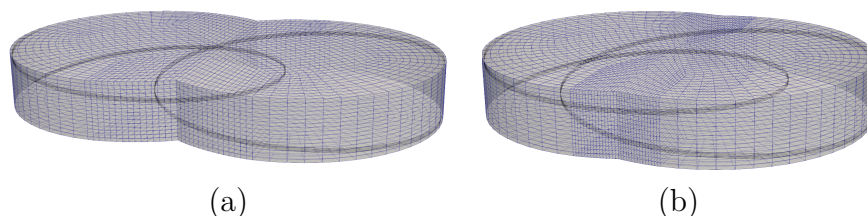


Obrázek 17: Pro názornější porovnání výsledků ze simulací a zjednodušeného výpočtu je znázorněn poměr mezi pevnostmi $f_{c,c}(\sigma_+)$, $f_{c,c}(\sigma_L)$, $f_{c,c}(\sigma_z)$ a $f_{c,c}^{FEM}$ pro varinatu A (a) a B (b). Do poměru $H/D = 0,6$ je chyba maximálně 10 %.

3.3 Sloup s překrývajícími se spirálami

V následujícím textu je analyzováno chování sloupu s překrývajícími se spirálami zatíženým centrickým tlakem. Cílem je pokusit se definovat jednoduchý vztah na výpočet pevnosti tohoto rozvržení výztuže, který bude inspirován postupy z literatury. Dosud prezentované konstitutivní vztahy určují maximální únosnost výpočtem z hodnoty příčného tlakového napětí, které ji přímo ovlivňuje.

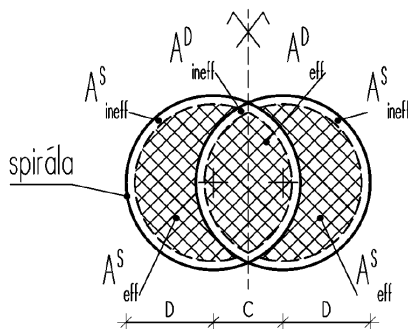
V této práci je zkoumán vliv výšky závitů H , míry překryvu jednotlivých spirál a jejich vzájemná orientace (souhlasně S , opačně O). Nejprve je rozdělen půdorys do smysluplných celků dle σ_+ a následně určena velikost jejich příspěvků k pevnosti $\Delta f_{c,c}$ v důsledku ovinutí. Referenční modely uvažují spirály souhlasně vinuté. Síť konečných prvků má 30 700 uzlů a 28 000 prvků viz obr. 18 a odlišná výška jednotlivých modelů je opět zajištěna pouze změnou svislé vzdálenosti uzlů.



Obrázek 18: Síť konečných prvků pro modely s menším (a) a větším (b) překryvem spirál.

3.3.1 Geometrie modelu

Model sloupu je rozdělen do dvou hlavních oblastí tj. oblast ovinutá jednou spirálou (vnější, single S) a střední společné části (vnitřní, double D). Každá z nich je opět rozdělena na plochy, ve kterých se předpokládá nedokonalé ovinutí a efektivně ovinuté 'jádro'; A_{ineff}^S , A_{eff}^S . Zavedené značení pro popis jednotlivých oblastí je na obr. 19.



Obrázek 19: Topologie sloupu s vyznačenou vnitřní a vnější oblastí. Vyšrafovaná plocha označuje efektivně ovinutou plochu.

Protože je úloha je symetrická, definujeme oblast S sice obecně jako celou vnější část, ale prakticky je označení její plochy použito pouze pro jednu polovinu. Ve výpočtech se pak uvažuje její celková plocha jako $2A^S$. Následující výrazy přehledně popisují zmíněnou geometrii.

$$\text{oblast S} \quad A^S = A_{\text{eff}}^S + A_{\text{ineff}}^S \quad (28)$$

$$\text{oblast D} \quad A^D = A_{\text{eff}}^D + A_{\text{ineff}}^D \quad (29)$$

$$\text{celk. plocha} \quad A = 2A^S + A^D \quad (30)$$

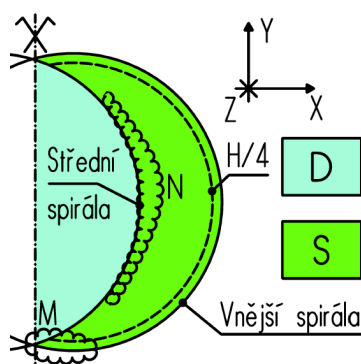
Modely jsou kvůli přehlednosti konstruovány pro tři různé situace. Vzdálenost středů C ovlivňuje velikost překryvu O a je zvolená tak, aby plocha A^D a A^S byla přibližně v poměrech 1:0,5:1, 1:1:1, 1:2:1 ($A^S:A^D:A^S$, v textu značeno H05/11/12). To znamená, že konfigurace H05 označuje poměr jednotlivých ploch $A^S : 0,5A^S : A^S$. Spirály opisují kružnici o průměru $D = 150$ mm.

Sevření σ_L je opět počítáno z podmínky rovnováhy (1) s tím rozdílem, že v oblasti A^D má dvojnásobnou hodnotu. Referenční výška $H = 30$ mm (dále použité H50/70) má průměr spirál $d = 6$ mm. Aby se pro zbylé výšky zachovala hodnota sevření (početně rovna σ_L^B resp. $2\sigma_L^B$), odpovídá d průměrům výztuže z varianty B viz tab. 1. Stupeň vyztužení ρ je definován jako podíl objemu výztuže ku celkovému objemu sloupu.

Tabulka 2: Geometrie průřezu

konfigu- race	C [mm]	O [mm]	A^S [mm ²]	A^D [mm ²]	A_c [mm ²]	ρ_{H30} [%]	ρ_{H50} [%]	ρ_{H70} [%]
05	81	69	11 531	6 141	29 202	3,05	3,06	3,08
11	60	90	8 918	8 754	26 425	3,37	3,38	3,40
12	39	111	5 783	11 888	23 455	3,79	3,81	3,83

Na následujícím obr. 20 je upřesněno několik konkrétních pojmů a oblastí, na které bude později v textu odkazováno.



Střední spirálou se míní výztuž mezi oblastí A^S a A^D . Vnější spirála ohraničuje okraj A^S .

Oblast M definuje část oblasti A_{ineff}^S , která je v kontaktu se střední spirálou. Oblast N zahrnuje část oblasti A_{eff}^S , která je za střední spirálou.

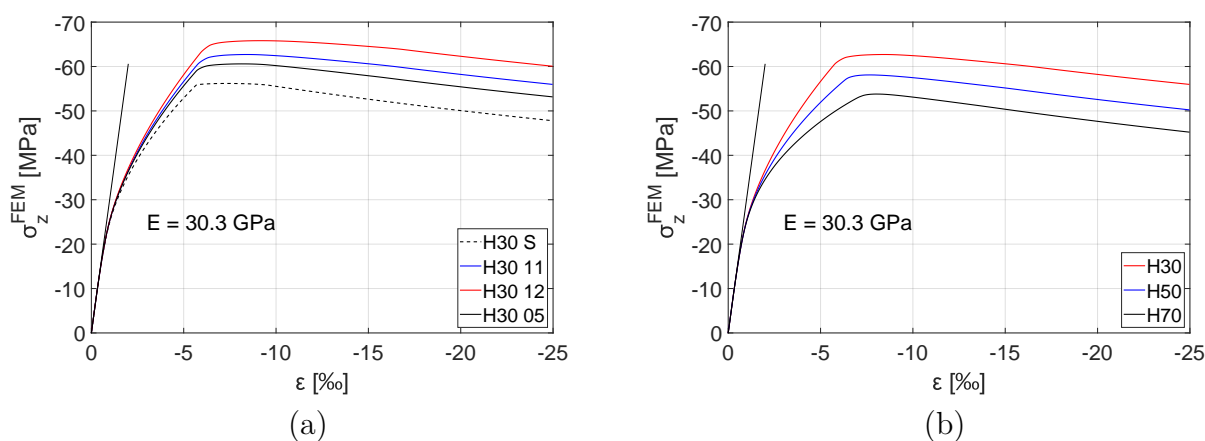
Orientace souřadnicových os je pravotočivá.

Vnější oblast S; vnitřní oblast D.

Obrázek 20: Schéma.

3.3.2 Celková odezva sloupu

Nejprve je popsáno chování sloupu na zatížení a je upřesněna geometrie efektivně a neefektivně ovinutých oblastí. Obr. 21a znázorňuje pracovní diagram σ_z^{FEM} pro konstantní výšku závitů s různou konfigurací tj. vzdáleností středů C . Vpravo obr. 21b je tentýž graf pro jednotnou konfiguraci H11, při které se naopak mění stoupání H . Zlomy opět představují počátek plastizace výztuže.

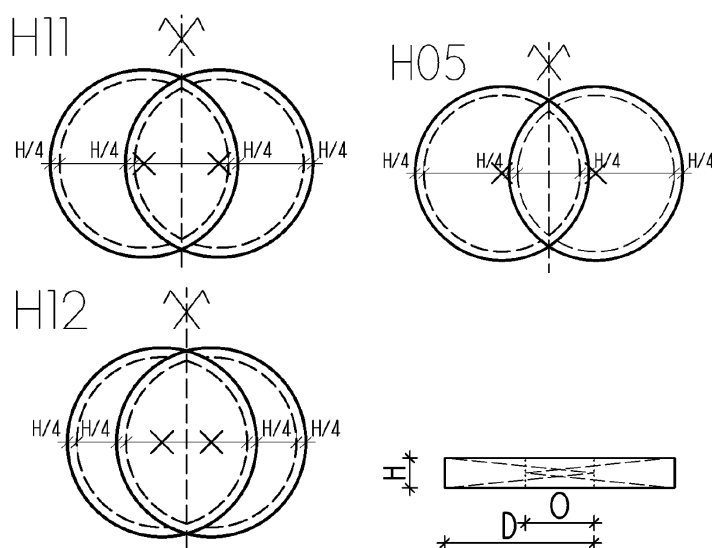


Obrázek 21: Napětí σ_z^{FEM} pro H30 konfigurace H11/12/05 a jednoduchý kruhový sloup S (a). Pro konfiguraci H11 je znázorněn pracovní diagram s výškami závitů H30/50/70 (b). Černou čarou je naznačen sklon daný modulem pružnosti betonu E .

Je vidět paralela mezi pracovními diagramy sloupů s jednou a dvěma spirálami (viz kap. 3.2). Na obr. 21a se ve výpočetním modelu zvětšuje resp. zmenšuje plocha A^D , a tím i průměrné sevření v celém sloupu. Odkazuje tak nepřímou na variantu A, kde má největší pevnost sloup s největším sevřením. Druhý diagram obr. 21b napodobuje variantu B. Sloup je vyztužen spirálami, které vyvozují ‘konstantní’ sevření σ_L ⁸. Podélná deformace ε_z sloupu se dvěma spirálami a kruhového sloupu s jednou spirálou je v okamžiku maximální únosnosti obdobná, v rozmezí $\approx 7\text{--}9\%$.

Z vizualizace modelů v PV je možné odhadnout, že efektivní a neefektivní plochy ve vnější části S přibližně kopírují rozložení napětí σ_+ jednoduchého kruhového sloupu. Pro vnitřní oblast D je pozorováno podobné uspořádání. Tento výchozí předpoklad je dále ověřen a potvrzen. Hranici mezi efektivní a neefektivní plochou vymezuje soustředná kružnice s průměrem $D - H/2$ viz obr. 22.

⁸Sevření σ_L je početně stejné pro jednotlivé Hx.



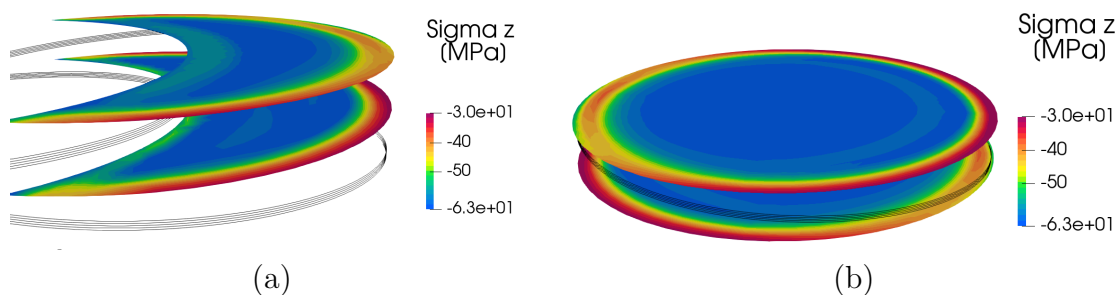
Obrázek 22: Konfigurace H05/11/12 s vyznačenými efektivními oblastmi. Délka O značí velikost překryvu.

3.3.3 Popis vnější jednou ovinuté oblasti S

Je vhodné postupovat po menších částech, a proto je odděleně popsáno chování modelu ve vnější S (jednou ovinuté) a následně i ve vnitřní oblasti D (dvojitě ovinuté). Jak již bylo zmíněno, při posuzování sloupu s kruhovým průřezem nezáleží, zda je analýza provedena ve vodorovném řezu (2D) nebo na celém objemu (3D). Pro sloup se dvěma spirálami je situace odlišná. Rozložení napětí je ve vnější oblasti závislé na poloze vodorovného řezu. Tento fakt demonstruje obr. 23a,b; ve kterém jsou dva horizontální řezy ve výšce H a $H/2$. Na jednotné barevné škále je vidět, že rozložení svislého normálového napětí jsou na vnějším okraji (vymezeném $H/4$) obou sloupů velmi podobná. Avšak u sloupu se dvěma spirálami má na určitou část vliv střední spirála. Změny v rozložení napětí po výšce modelu jsou proto důvodem, proč jsou data vyhodnocována v PV na objemu (3D) z průměrných uzlových hodnot. Stejný přístup je aplikován i pro vnitřní oblast.

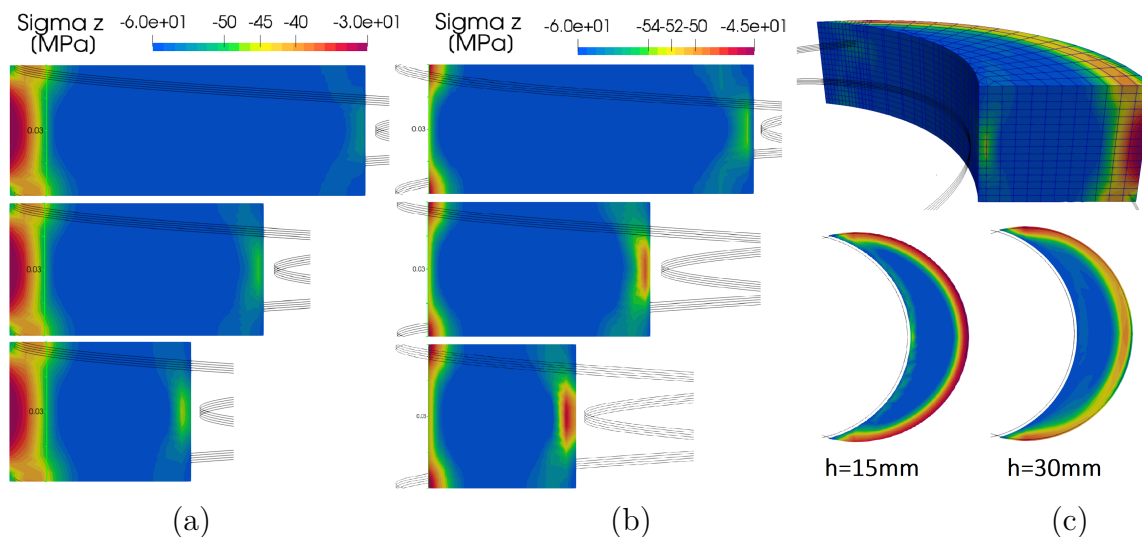
Část neefektivně ovinutá A_{ineff}^S je vymezena kružnicí s průměrem $D - H/2$. Má velmi konzistentní hodnoty svislého i příčného napětí σ_z , σ_+ . Jejich rozložení je v podstatě stejné jako u jednoduchého kruhového sloupu s jednou spirálou a kopíruje její stoupání resp. klesání. Pouze v oblasti M (viz obr. 20) je napětí σ_+ ovlivněno střední spirálou. Díky tomu se hodnoty mírně zvýší. Čím si jsou spirály blíže, tím se celková plocha A_{ineff}^S zmenšuje a tento vliv je markantnější. Závěrem lze konstatovat, že rozložení napětí vychází dle předpokladů.

Efektivní oblast A_{eff}^S je podstatně více ovlivněna střední spirálou, která svírá materiál z ‘vnitřní’ strany. Její deformace vyvolává na malém okolí, dále označovaném jako oblast N (viz obr. 20), znatelně zvýšené přetvoření ε_z (větší stlačení tj. záporné hodnoty). V místě



Obrázek 23: Vodorovné řezy komplikovanějšího sloupu se dvěma spirálami (a) a kruhovým sloupem (b) ve výšce H a $H/2$. Vizualizace v PV zobrazuje σ_z s jednotnou barevnou škálou.

drátu se σ_+ zvýší a aby byla zachována rovnováha, dojde za ním naopak poklesu. Protože má σ_+ přímý vliv na svislé napětí, sníží se v této části i σ_z obr. 24. Na rozsah této nové oblasti N má vliv velikost překryvu výztuže i výška závitů. Z obr. 24 je zřejmé, že v případě H12 je snížení napětí σ_z resp. σ_+ výraznější. Při vzdálenější poloze středů má střední spirála menší obvod a příčné napětí je více rozprostřeno do okolí. S vzrůstající výškou se velikost N zvětšuje. To odpovídá skutečnosti, že vyšší modely mají také větší plochu průřezu výztuže, která zajišťuje konstantní sevření.



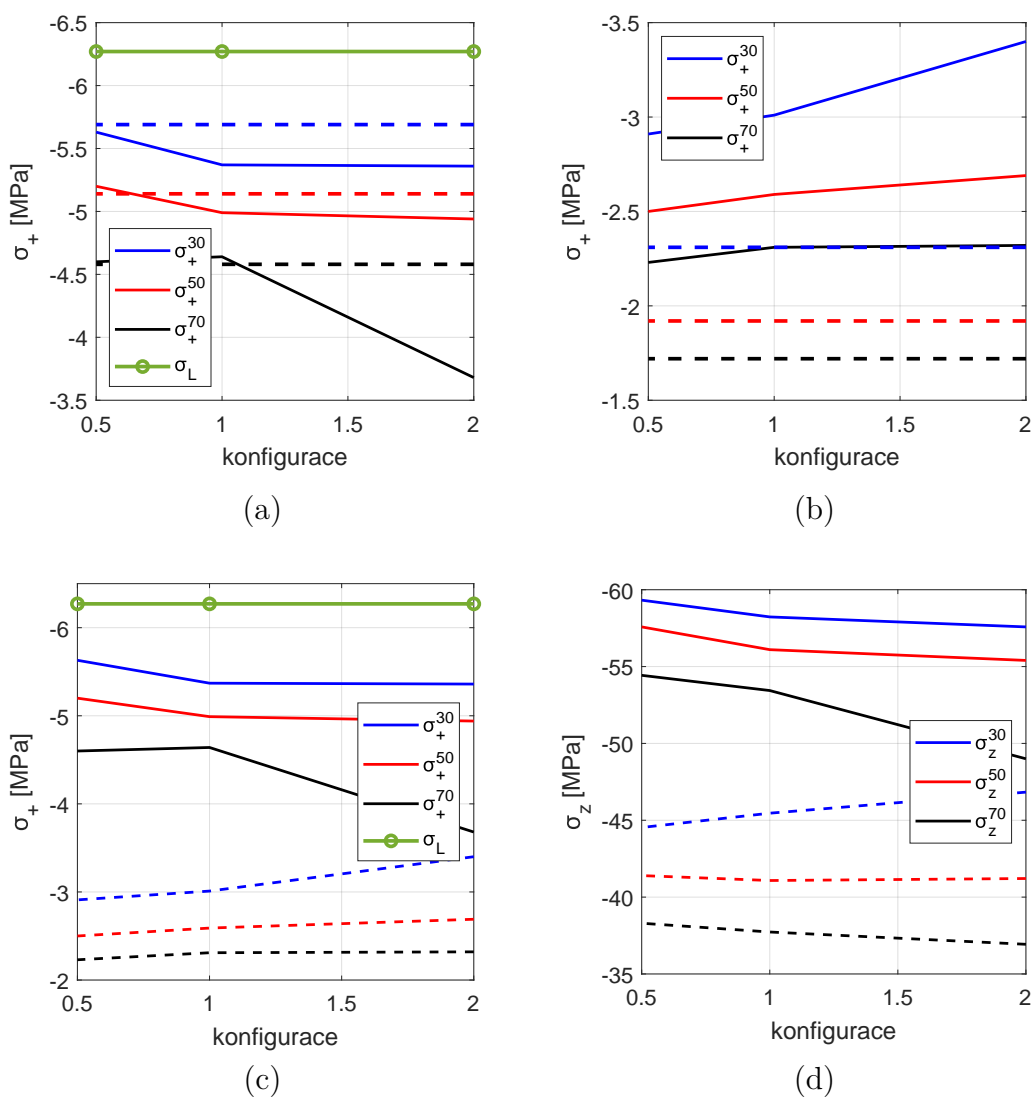
Obrázek 24: Svislý řez vnější oblastí H30 05/11/12 v rovině xz znázorňuje σ_z pro celou oblast A^S (a) s vyznačenou hranicí neefektivní oblasti (zelená linka). Uprostřed (b) je tentýž řez pouze pro efektivní oblast vykreslený odlišným rozsahem hodnot, aby vynikl pokles napětí za střední spirálou. Vpravo (c) je axonometrické zobrazení a oblast A^S ve vodorovném řezu ve výšce H a $H/2$.

Oblast N je špatně definovatelná, neboť jde o menší půlkruhový objem přibližně uprostřed, který kopíruje střední spirálu. Její vznik je brán v patrnost, ale protože se v referenčních modelech H30 hodnoty σ_+ nesnížily výrazně (např. na úroveň A_{ineff}^S), není do výpočtu implicitně zahrnuta.

Na obr. 25a,b,c jsou graficky vyneseny hodnoty napětí σ_+ pro různé Hx a všechny konfigurace. Obr. 25a,b popisují napětí zvláště na ploše A_{eff}^S a A_{ineff}^S . Plné čáry představují hodnoty σ_+ sloupu se dvěma spirálami a čárkovaná čára reprezentuje příčné tlakové napětí na kruhovém sloupu s jednou spirálou na ploše A_{eff} a A_{ineff} z kapitoly 3.2. Obr. 25c vykresluje hodnoty σ_+ z obou oblastí sloupu se dvěma spirálami do jednoho grafu. Obr. 25d stejným způsobem zobrazuje svislé napětí σ_z .⁹

Z grafů je patrné, že číselně neodpovídá σ_+ v A_{eff}^S vypočítanému sevření σ_L , ale je srovnatelné s tím na jednoduchém kruhovém sloupu. Nejvíce se shoduje konfigurace H05, která má nejmenší překryv. Příčina nejspíš leží právě v proměnlivé oblasti za střední spirálou a jejím vlivem na snížení příčného napětí. V A_{ineff}^S jsou hodnoty vyšší než u jednoduššího případu.

⁹Veškeré hodnoty jsou průměrné, extrahované z PV po upravě geometrie. V tomto případě byla síť konečných prvků pravidelná.

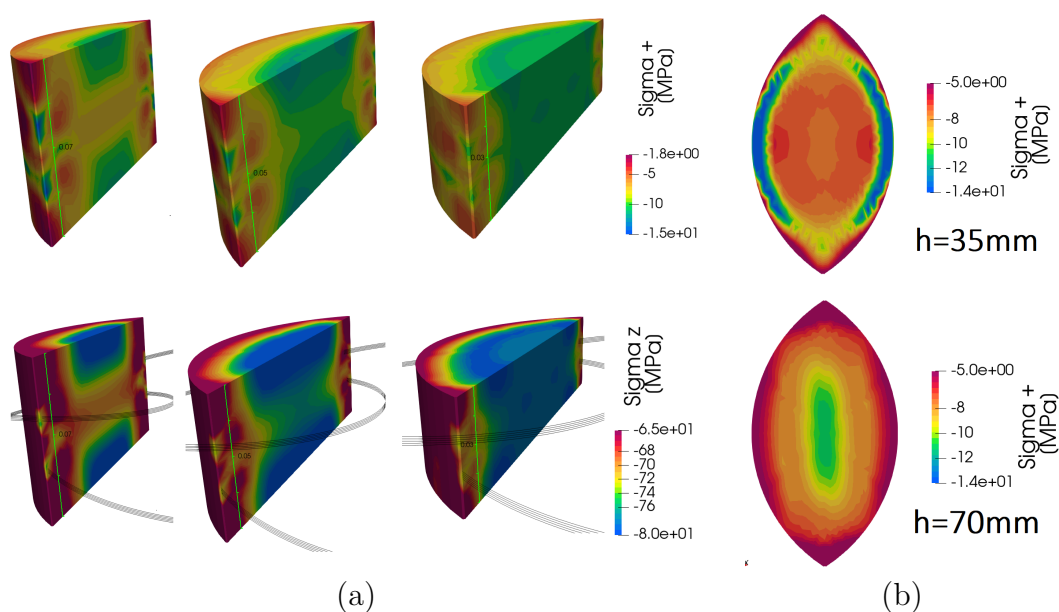


Obrázek 25: První dva grafy porovnávají napětí σ_+ sloupu se dvěma spirálami (plnou čarou) a jednou spirálou (čárkovanou čarou) v oblasti A_{eff}^S (a) a A_{ineff}^S (b), resp. $A_{\text{eff}}, A_{\text{ineff}}$. Příčná napětí jsou vykreslena dohromady (c) A_{eff}^S (plnou čarou) a A_{ineff}^S (čárkovanou čarou). Stejným způsobem je zobrazeno svislé napětí (d).

3.3.4 Popis vnitřní dvojité ovinuté oblasti D

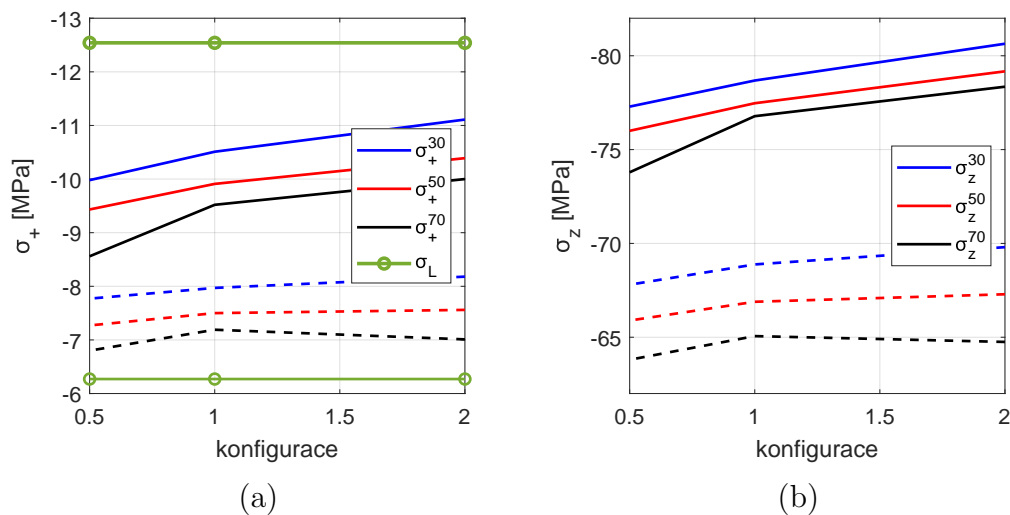
Dále je analyzováno chování ve vnitřní oblasti, která je svou povahou specifická a pro kterou není k dispozici žádný konkrétní analytický vztah. Předpoklad, že bude příčné napětí přibližně odpovídat $2\sigma_L$, je výchozí informace. Vzhledem k tomu, že je v navazující vnější části S napětí odlišné, není nepochopitelné i zde rozdělení na část efektivní a neefektivní. Je tak zajištěný přechod mezi vyšším a nižším příčným napětím. Opět je vhodné uvažovat tloušťku pruhu širokou přibližně $H/4$ viz obr. 22.

Charakter rozložení napětí ve střední oblasti se podstatně mění v závislosti na výšce závitů. Na úrovni, kde se spirály kříží, σ_+ klesá. V tomto místě se koncentruje napětí kolem výztuže. Nejmarkantnější je tento efekt na konfiguraci H05, kde je plocha A^D nejmenší viz obr. 26.



Obrázek 26: Na obrázcích (a) je znázorněno rozložení σ_+ (nahore) a σ_z (dole) pro konfiguraci H05 v dvojité sevřené oblasti. S rostoucí výškou (H30/50/70 zprava doleva) je viditelná oblast snížených napětí v $H/2$. Zelená linie představuje hranici mezi A_{eff}^D a A_{ineff}^D . Vpravo nahore (b) je v $H/2$ na vodorovném řezu znázorněno σ_+ pro H70. Pod ním je v H řez téhož modelu.

Na obr. 27a je znázorněno σ_+ , σ_L a $2\sigma_L$ (dolní a horní zelená čára). Je zřejmé, že příčné napětí nedosahuje hodnot dvojnásobného sevření a zvětšuje se s nárůstem odpovídající plochy A_{eff}^D . Oblast A_{ineff}^D se chová téměř jako oblast jednou ovinutá. Různé konfigurace mají na hodnoty σ_+ resp. σ_z jen minimální vliv.

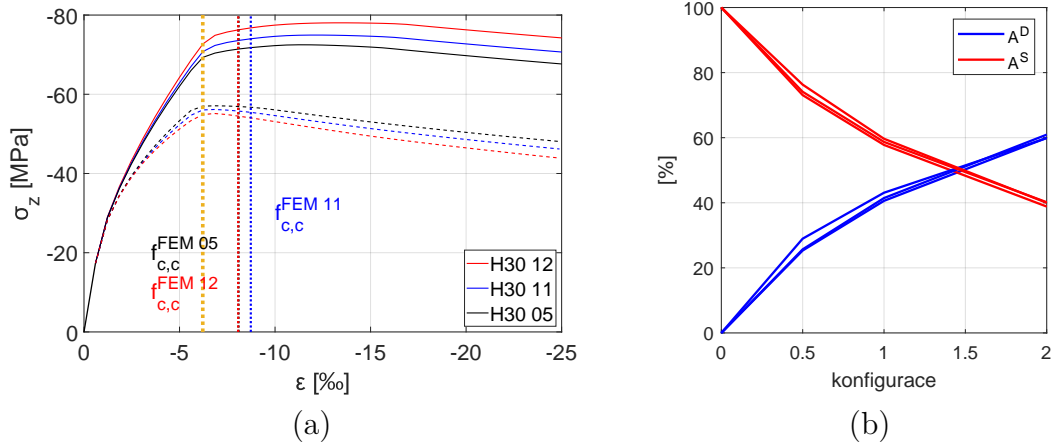


Obrázek 27: Na grafu (a) jsou plnou čarou znázorněna příčná napětí v oblasti A_{eff}^D a čárkovanou čarou A_{ineff}^D . Zelená čára představuje úroveň sevření σ_L a $2\sigma_L$. Vpravo je stejným způsobem zakresleno svislé napětí (b).

Vnitřní oblast má v PV, z hlediska upravené sítě konečných prvků pomocí nástrojů na změnu geometrie, největší nepřesnost. Vzhledem k tomu, že jsou v této práci zkoumány výsledky numerického modelu, je nutné brát veškeré výsledky orientačně, a proto je tato skutečnost zanedbána.

3.3.5 Vyhodnocení vlivu jednotlivých oblastí

Obr. 28a znázorňuje pracovní diagram v jednotlivých oblastech S a D. Vykresluje průměrné hodnoty napětí σ_z z PV. Při dosažení maximální pevnosti $f_{c,c}^{\text{FEM}}$ dochází v části jedenkrát ovinuté již ke změkčování, zatímco dvojitě ovinutá oblast nedosáhla maximální pevnosti.



Obrázek 28: Pracovní diagram σ_z na referenčním modelu H30 (a) v oblastech A^D (plná čára) a A^S (čárkovaná čára). Svislá přerušovaná linie představuje okamžik, kdy je dosaženo pevnosti $f_{c,c}^{\text{FEM}}$ na celém modelu. Barevně jsou přiřazeny své konfiguraci. Tečkovaná čára označuje počátek plastizace výztuže, $f_y = 500$ MPa. Procentuální rozdělení zatížení do A^D a $2A^S$ (b). Konfigurace H0 představuje kruhový sloup a jednotlivé čáry představují výsledky pro různá Hx.

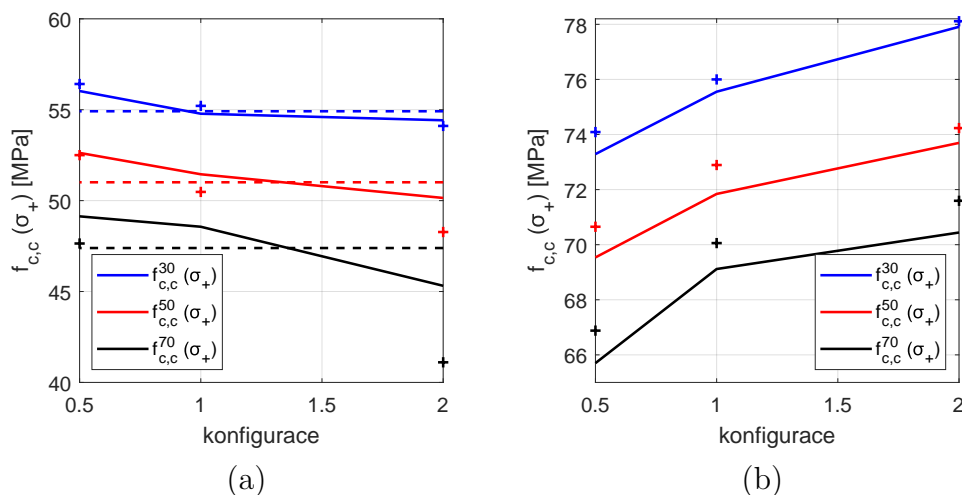
Pevnosti v jednotlivých oblastech nejsou konstantní. Výrazněji závisí na výšce závitů, méně pak na konfiguraci spirál. Obecně dává větší plocha lepší odezvu obr. 29. Např. v oblasti S má nejvyšší pevnost H05, které má největší plochu A^S . Pro oblast D je to naopak. Rozdíl mezi pevností $f_{c,c}(\sigma_+)$ a průměrným svislým napětím $f_{c,c}(\sigma_z)$ je minimální pokud je poměr H/D malý. Na grafu 28b je znázorněno, kolik procent zatížení přenáší jednotlivé oblasti (A^D , $2A^S$). Interpolací vychází přenos zatížení půl na půl pro poměr ploch 1:1,5:1.

Protože oblasti A_{eff}^S a A_{ineff}^S nejsou ideální pro zjednodušený inženýrský výpočet, je příspěvek k pevnosti $\Delta f_{c,c}$ této oblasti kalkulován stejně jako u kruhového sloupu, tzn. je přenásoben redukcí (22). Na obr. 29a je vidět malý rozdíl mezi výslednou pevností těchto dvou topologií. Koeficient k_e je schopný postihnout vliv výšky, který je výraznější ve srovnání se změnami způsobenými různou konfigurací.

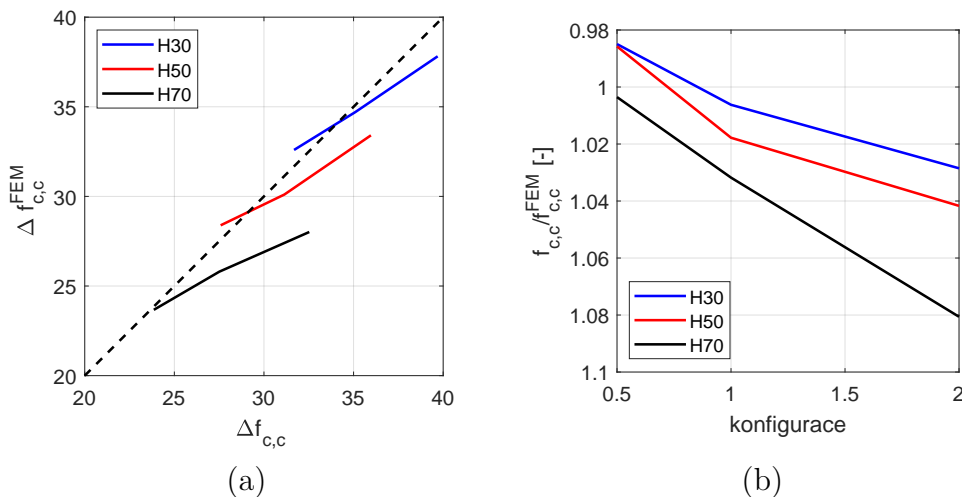
Vnitřní oblast má v efektivní části trochu vyšší hodnoty σ_+ a v neefektivní zase nižší. Tím se vykompenzují a není potřeba žádná další korekce. Celkový příspěvek způsobený ovinutím $\Delta f_{c,c}$ se vypočítá z součtem příspěvků jednotlivých oblastí.

$$\Delta f_{c,c} = \Delta f_{c,c}(\sigma_L) k_e \frac{2A^S}{A} + \Delta f_{c,c}(\sigma_L) \frac{A_{\text{ineff}}^D}{A} + \Delta f_{c,c}(2\sigma_L) \frac{A_{\text{eff}}^D}{A} \quad (31)$$

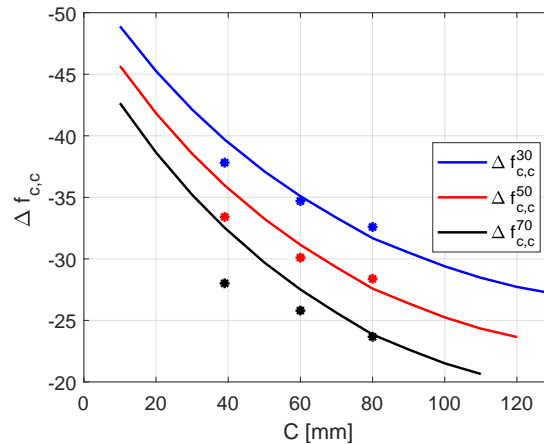
Celková pevnost $f_{c,c}$ se inspiruje vztahem (4). Kompletní postup výpočtu geometrie i únosnosti je na str. 45.



Obrázek 29: Pevnost vypočítaná (27) v oblasti (a) A^S a (b) A^D . U vnější oblasti A^S je čárkovanou čarou vyznačena pevnost jednoduchého kruhového sloupu vypočítaná ze vztahu (22). Osamocené body označují průměrné svislé napětí $f_{c,c}(\sigma_z)$ (25).



Obrázek 30: Porovnání vypočítaným přírůstkem pevnosti $\Delta f_{c,c}$ (31) a $\Delta f_{c,c}^{FEM}$ (24) odezvou z numerického modelu (a). Poměr těchto veličin udává chybu analytického výpočtu (b).

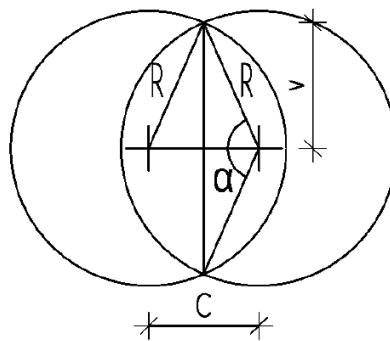


Obrázek 31: Graf ukazuje závislost vypočítaného celkového přírůstku pevnosti na vzdálenosti středů, od kterého se odvíjí velikosti překryvu. Osamocené body značí výsledky z výpočetního modelu.

3.3.6 Rozdílná orientace spirál

Modely se spirálami vinutými proti sobě podávají stejnou mechanickou odezvu jako referenční sloupy souhlasně orientované. Orientace spirál by neměla mít na výsledek vliv.

3.3.7 Kompletní postup při výpočtu pevnosti sloupu s překrývajícími se spirálami



Obrázek 32: Geometrie sloupu.

1. Výpočet geometrie jednotlivých ploch S, D¹⁰

$$m = (c + 2R_i)/2 \quad (32)$$

$$v = \frac{2}{C} \sqrt{m(m - C)(m - R_i)^2} \quad (33)$$

¹⁰Výpočet kruhové úseče. Hodnota m představuje pouze pomocný mezikrok ve výpočtu.

$$\alpha = 2 \arcsin(v/R_i) \quad (34)$$

$$A^i = R_i^2(\alpha - \sin \alpha) \quad (35)$$

- Středový úhel α [rad].
- A^D se vypočítá dosazením do rovnic (32)-(35) $R_i = D/2$.
- A_{eff}^D se vypočítá dosazením do rovnic (32)-(35) $R_i = (D - H/2)/2$.

$$A_{\text{ineff}}^D = A^D - A_{\text{eff}}^D \quad (36)$$

$$A^S = A_c - A^D/2 \quad (37)$$

- Plochy A_{eff}^S a A_{ineff}^S není nutné odděleně počítat.
- Celková plocha A (30)

2. Výpočet sevření a koeficientu k_e

- Koeficient k_e (20)
- Sevření σ_L (1)

3. Výpočet pevnosti v ovinutí

- Zvýšení pevnosti ovinutím v jednotlivých oblastech¹¹

$$\Delta f_{c,c}(i \cdot \sigma_L) = k(i \cdot \sigma_L)^p [1 + c(f_c/\text{MPa} - 28)^q] \quad (38)$$

- Pevnost ovinutého sloupu se vypočítá jako součet příspěvků z jednotlivých oblastí

$$f_{c,c} = f_c + \Delta f_{c,c}(1 \cdot \sigma_L) k_e \frac{2A^S}{A} + \Delta f_{c,c}(1 \cdot \sigma_L) \frac{A_{\text{ineff}}^D}{A} + \Delta f_{c,c}(2 \cdot \sigma_L) \frac{A_{\text{eff}}^D}{A} \quad (39)$$

Pro výpočet pevnosti sloupu se dvěma spirálami je možné použít ještě jeden, jednodušší vztah s menší chybou.

$$f_{c,c} = \left[(f_c + \Delta f_{c,c}(\sigma_L)) \frac{A^S}{A} + (f_c + \Delta f_{c,c}(2\sigma_L)) \frac{A^D}{A} \right] k_e \quad (40)$$

kde je upraven tvar k_e

$$k_e = \left(1 - \frac{H}{4D} \right)^2 \quad (41)$$

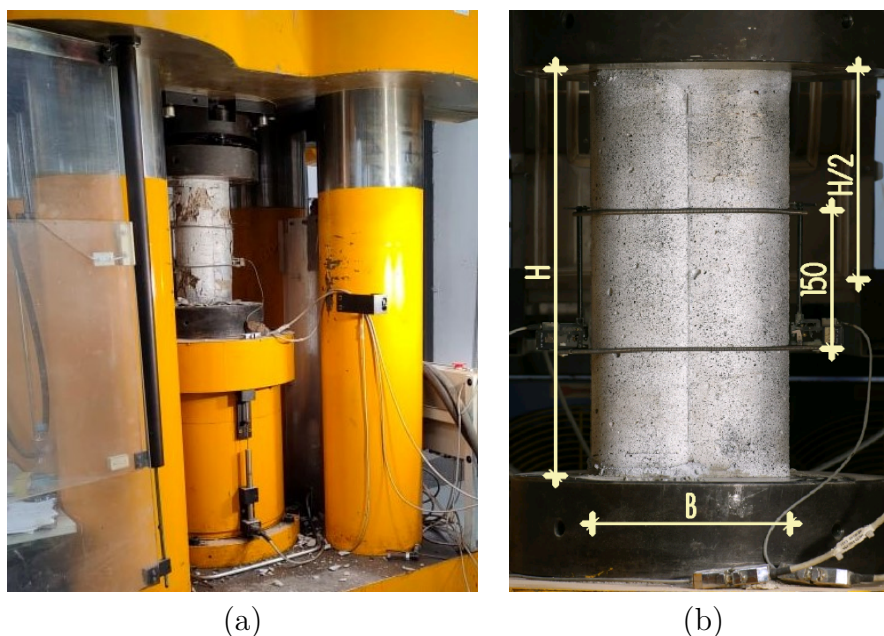
Tento způsob výpočtu není kompatibilní s jednodušším uspořádáním kruhového sloupu a neodpovídá záměru sestavit rovnici z jednotlivých příspěvků pevnosti jako v předpokladu (4). Koeficient k_e má odlišný tvar a redukuje nejen $\Delta f_{c,c}$, ale i původní f_c . Celkově snižuje $f_{c,c}$ o 10, 20 a 30 % (pro H30/50/70). Není jisté, zda by v případě jiných parametrů (D nebo d) nebylo nutné k_e upravit.

¹¹Koeficienty k , p , q viz kapitola 3.2.

4 Experiment

V praktické části byla připravena zkušební tělesa, která byla po 28 dnech podrobena tlakové zkoušce s monotónním zatěžováním. Cílem experimentu je porovnat numerické výsledky s reálnými daty. Nejdříve byla na krychlích standardních rozměrů zjištěna tlaková pevnost betonu, dále byly provedeny destruktivní tlakové zkoušky na několika zkušebních sadách vzorků různých rozměrů a v závěru byla naměřená data vyhodnocena. Odpovídající numerický model byl aktualizován a přepočítán se změřenými materiálovými charakteristikami (f_c a E) zjištěnými v první fázi na tělesech z prostého betonu. Zbylé parametry, tahová pevnost a lomová energie, byly pro výpočetní model vypočítány dle doporučení z *fib* MC2010.

Výroba zkušebních těles a testování proběhlo v laboratořích na Fakultě stavební Českého vysokého učení technického v Praze. První sada kontrolních vzorků obsahuje devět krychlí standardních rozměrů (150×150 mm) a byla testována obvyklým způsobem. Pro druhou sadu vzorků byl použit testovací přístroj Inova (maximální síla 2,5 MN) s výrazně vyšším výkonem. Tato sada zahrnovala referenční kruhové sloupy prosté a vyztužené a sloupy se dvěma překrývajícími se spirálami. K těmto vzorkům byly po obou stranách připevněny extenzometry, které přinášely spolu se samotným hydraulickým lisem data o podélném poměrném přetvoření ε_z . Všechny zkoušky vyztužených těles byly navíc zdokumentovány metodou DIC. Tak se získala další data k ověření vývoje podélných a příčných deformací. Rozložení testovacího schématu je na obr. 33.



Obrázek 33: Testovací přístroj Inova s umístěným testovaným vzorkem (a) a rozvržení testovacího schématu (b). Délka extenzometru je 150 mm.

4.1 Popis zkušebních těles

Snahou bylo namíchat betonovou směs se zpracovatelností odpovídající vlastnostem samozhutnitelného betonu (Self Compacting Concrete, SCC) a tlakovou pevností přibližně 30 MPa. Tekutost a samozhutnitelnost jsou nezbytné vlastnosti pro řádné probetonování při složitém a poměrně hustém vyztužení v nekonvenční bednicí formě bez možnosti vibrování. Poměrně nízká hodnota pevnosti odpovídá parametrům numerických modelů a možnostem dostupné techniky. Složení jednotlivých komponent je uvedeno v tabulce 3. Recepturu navrhl a připravil Ing. Pavel Reiterman, Ph.D. (Experimentální centrum, ČVUT).

Bylo vyrobeno devět standardních krychlí (150×150 mm), pět standardních válců (150×300 mm), tři vyztužené válce (S1–S3, 150×300 mm) a čtyři konfigurace sloupů se dvěma spirálami 111A, 111O, 121, 212 viz obr. 33. Jejich geometrické rozměry jsou zaznamenány v tabulce 4. Výztužné spirály měly $d = 6$ mm a byly vyrobeny z oceli s mezí kluzu $f_y = 500$ MPa. Výška závitů každé spirály odpovídala referenční hodnotě $H = 30$ mm s vnějším průměrem $D = 150$ mm, který vychází z průměru standardních zkušebních válců z norem. Vyztužená zkušební tělesa byla navržena bez krycí vrstvy, která se ale v malé tloušťce kvůli nedokonalé geometrii formy a tvaru spirály vytvořila.

Tabulka 3: Receptura betonu pro experiment

Surovina	Poznámka	Množství [kg/m ³]
Portlandský cement CEM I 42,5	Mokrá	314
Mletý vápenec	Čertovy schody	105
Křemičitý písek 0–f4 mm	Dobříň	980
Drcené kamenivo 4–8 mm	Zbraslav	257
Drcené kamenivo 8–16 mm	Zbraslav	381
Provzdušňující přísada	Microporan (Stachema CZ)	1,43
Plastifikátor 300	Polycarboxylate (Stachement 787)	2,76
Voda	pitná	180
Stabilizační přísada	Stabilan (Stachema CZ)	1,52

Tabulka 4: Geometrie zkušebních těles se dvěma spirálami.

Zk. těleso	Výška H [mm]	Šířka B [mm]	Tloušťka t [mm]	Objem. hmotnost ρ_V [kg/m ³]	Orientace spirály
111A	422	208,5	151,5	2199	S
111O	415	209,0	151,5	2214	S
212	420	230,5	151,5	2179	O
121	419	190,5	150,0	2203	S

S - spirály jsou vinuté souhlasným směrem; O - spirály jsou vinuté proti sobě

4.2 Průběh zkoušky

Vzorky zůstaly po odbednění po dobu 28 dní uskladněny v místě s vysokou relativní vlhkostí (96 %), aby bylo zabráněno mikrotrhlinám způsobenými vysycháním betonu. První sada zkušebních těles (standardní krychle) byla podrobena klasické destruktivní zkoušce, která stanovila krychelnou pevnost betonu v tlaku. Druhá sada vzorků byla zkoušena v hydraulickém lisu Inova, který umožňuje řídit způsob zatěžování buď předepsáním vývoje síly nebo rychlostí posunu.

V první fázi zatěžování se zkušební těleso pohybovalo v lineární části pracovního diagramu. Proto byla zkouška řízena silou zvyšující se rychlostí 175 kN/min a trvala 1 min. Odhad síly 175 kN vychází ze změřené krychelné pevnosti 22,33 MPa přepočítané na válcovou pevnost, ze které je bráno pouze 40 % hodnoty ($22,33 \cdot 0,85 \cdot 0,40 = 170,85$ kN). Na zatěžování silou plynule navazuje zatěžování předepsaným posunem. Po dobu 15 min byly vzorky se dvěma spirálami podrobena konstantní změně deformace 0,8 mm/min. Vzorky s jednou spirálou (S1–S3) zatěžoval lis stejnou rychlostí 10 minut. K zachycení poslední fáze po překročení maximální únosnosti, ve které dochází již ke změkčování, byla rychlost zatěžování zvýšena z důvodu úspory času a energie na 4 mm/min po dobu 4 minut. Celková doba jedné zkoušky byla 20 resp. 15 min. Přechod mezi druhou a třetí fází zatěžování je patrný v pracovním diagramu výrazným výkyvem při $\varepsilon_z \approx 25$ ‰.

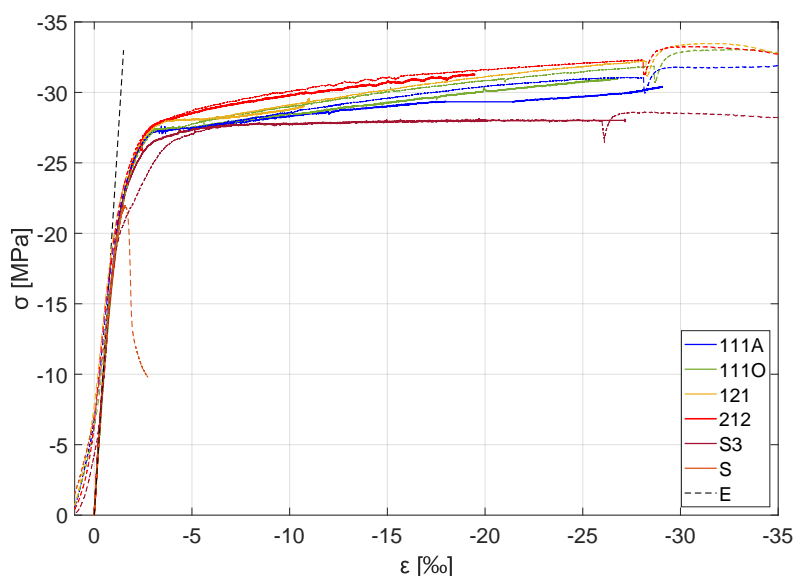


Obrázek 34: Betonáž a ukázka bednění. Pro sloup se dvěma spirálami bylo vyrobeno bednění z KG trubek. Pro válce se použila standardní forma. Spirály byly natočené a samy o sobě si zachovávaly svůj tvar.

4.3 Vyhodnocení naměřených dat

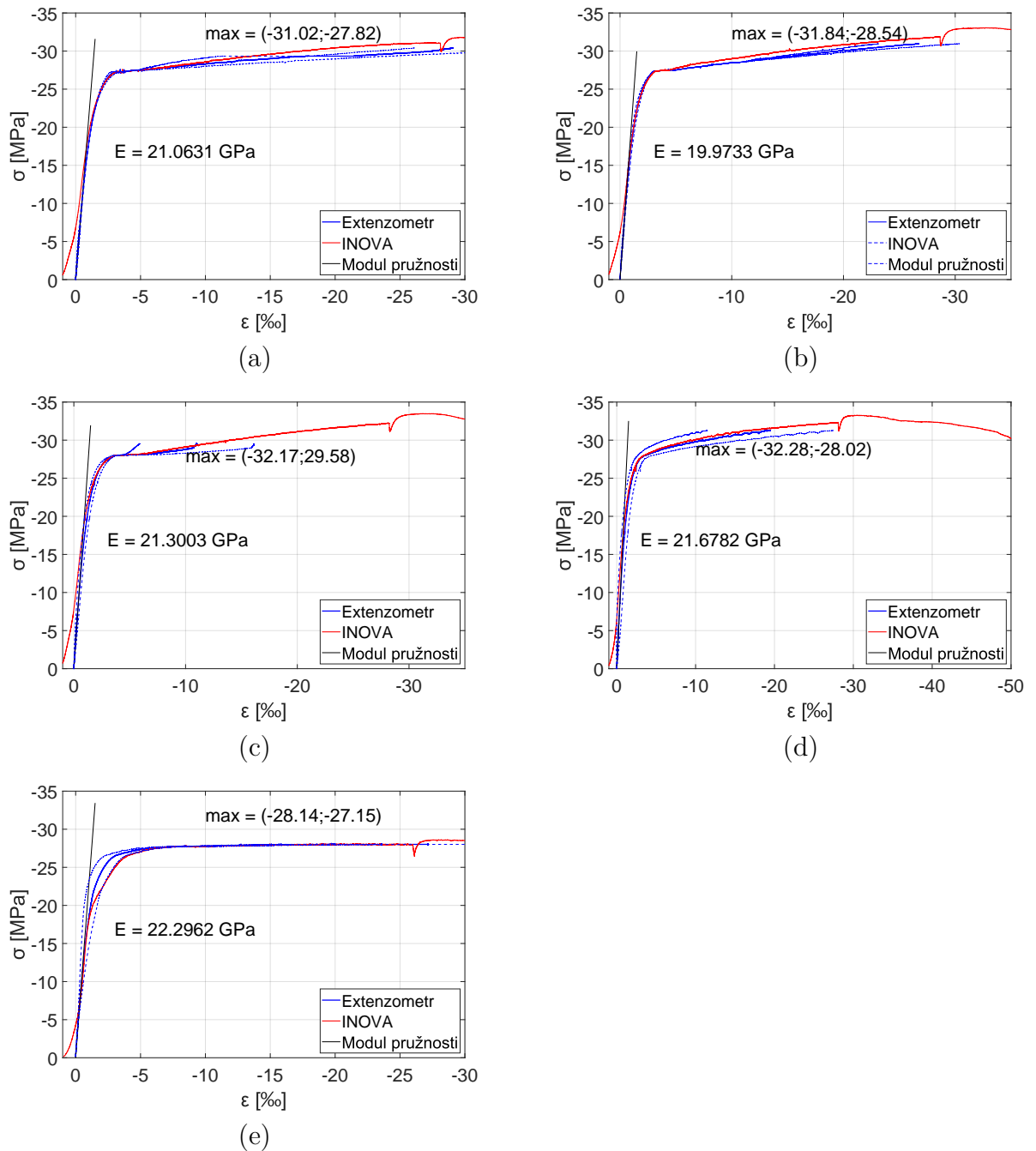
Jednou z charakteristik testovacích lisů je jejich podélná a příčná tuhost, která zajišťuje rovnoměrné zatěžování zkušební vzorku, snižuje náhlé poškození a obecně prodlužuje životnost stroje. U zatěžovacího rámu lisu Inova se konečná tuhost předpokládá, a proto jsou výsledky deformací kontinuálním měřením stroje nakalibrovány pomocí dat z extenzometrů. Na obr. 35 či 36 je vidět, že data ze stroje doplňují informace o přetvoření vzorku po odstavení extenzometru při větším poškození nebo dosažení mezní hodnoty přetvoření.

Na obr. 35 je znázorněn pracovní diagram pro všechny podstatné konfigurace výztuže tj. sloup se dvěma spirálami, kruhový sloup vyztužený jednou spirálou S3 a nevyztužený S. Ve všech případech se hodnota sečnového modulu pružnosti pohybuje okolo 21 GPa. Pro všechna zkušební tělesa je stanovený z 40% průměrné tlakové pevnosti prostých kruhových sloupů, která je 22,67 MPa.



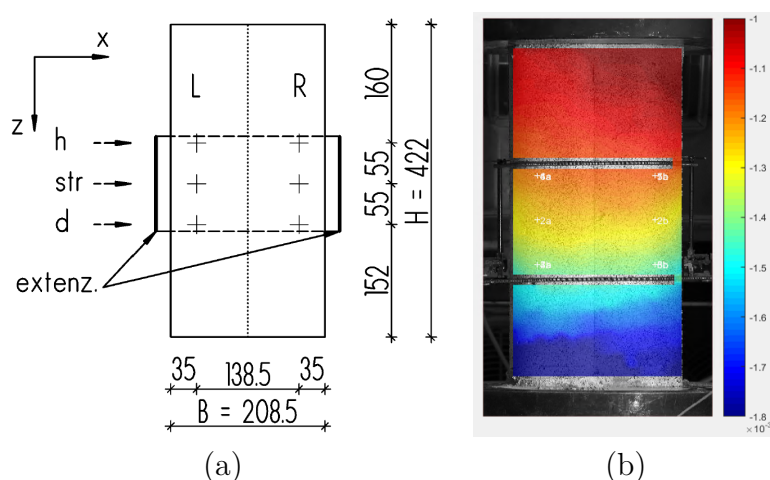
Obrázek 35: Pracovní diagram pro vzorky 111A, 111O, 121, 212, S3 a S. Čárkovanou čarou je značen posun měřený testovacím lisem, plná čára znázorňuje průměrné výsledky extenzometrů, které byly v důsledku postupujícího porušení vzorku odstaveny. Modul pružnosti je 21 GPa.

Je patrné, že se od sebe značně liší průběh napětí σ_z ve vyztužených a prostých zkušebních tělesech. Při malém přetvoření vykazují oba prvky společnou lineární odezvu, pak ale pozorujeme změkčení prostého betonu. Vyztužený válec S3 má po dosažení určitého bodu zlomu téměř konstantní hodnotu napětí, zatímco sloupy se dvěma spirálami vykazují určité zpevnění.



Obrázek 36: Pracovní diagram pro zkušební tělesa 111A (a), 111O (b), 121 (c), 212 (d) a S3 (e). Čárkovanou čarou je značen pravý a levý extenzometr, plná čára znázorňuje jejich průměr. Uvedené maximální hodnoty představují data před zvýšením rychlosti zatěžování.

Topologie sloupů se dvěma spirálami je komplikovaná, a proto se kromě osazených extenzometrů jako nejvýhodnější metoda měření deformací jeví DIC (Digital Image Correlation). Je to nedestruktivní metoda, při které se měří posuny jednotlivých bodů a jejich deformace. Na šedém povrchu se vytvořil pomocí přilnavého bílého a černého spreje nepravidelný a jasně viditelný vzor. Během testování je vzorek snímán digitálním fotoaparátem v určitém časovém intervalu (6 s). Data získaná touto metodou zpracoval Ing. Václav Nežerka, Ph.D. Vzhledem k neuspokojivým výsledkům pevnosti zkušebních těles byl vyhodnocen pouze vzorek 111A. Ze vzájemného posunu bodů na rozvržení obr. 37a byla dopočtena podélná a příčná deformace ε_z ; ε_x .



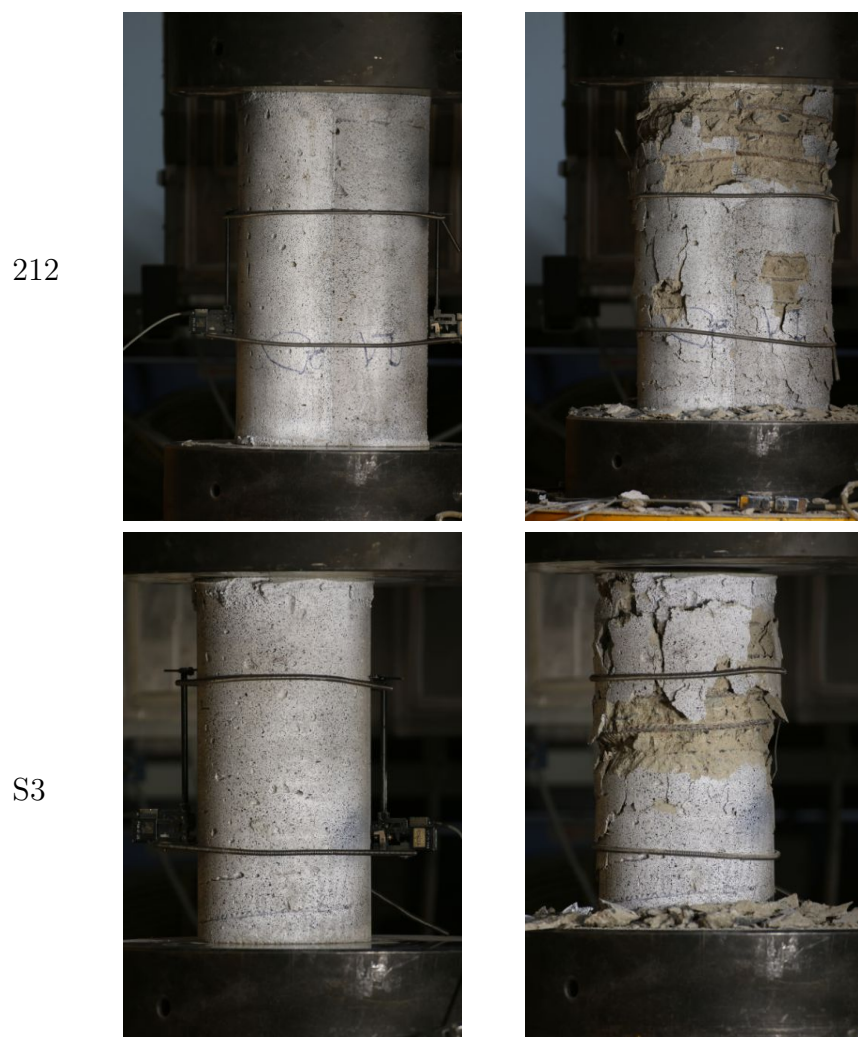
Obrázek 37: Schéma bodů vyhodnocovaných DIC metodou (a) a vykreslení podélného posunu na celém vzorku (b). Červená barva odpovídá $-1 \cdot 10^{-3}$ a modrá $-1,8 \cdot 10^{-3}$ mm.

Během zatěžování zkušebních těles docházelo velmi brzy k poškozování tenké krycí vrstvy a narušení vzoru pro hodnocení pomocí DIC. Při zatěžování také docházelo k rotaci hydraulického válce okolo podélné osy vzorku. Směr tohoto otáčení byl dán vinutím spirál. Pouze v případě vzorku s opačně vinutými spirálami k markantní rotaci nedošlo. Při návrhu experimentu s tímto chováním nebylo počítáno. Na obr. 38 a 39 jsou zobrazeny sloupy před a po ukončení testování.¹² Ani v jednom případě nedošlo k porušení výztužné spirály ani k vytržení jejího kotvení v horní či dolní podstavě.

¹²Kromě zkušebního vzorku 111A, který byl po ukončení testování zatížen do porušení výztuže.



Obrázek 38: Výchozí stav zkušebního tělesa a stav po ukončení zkoušky.



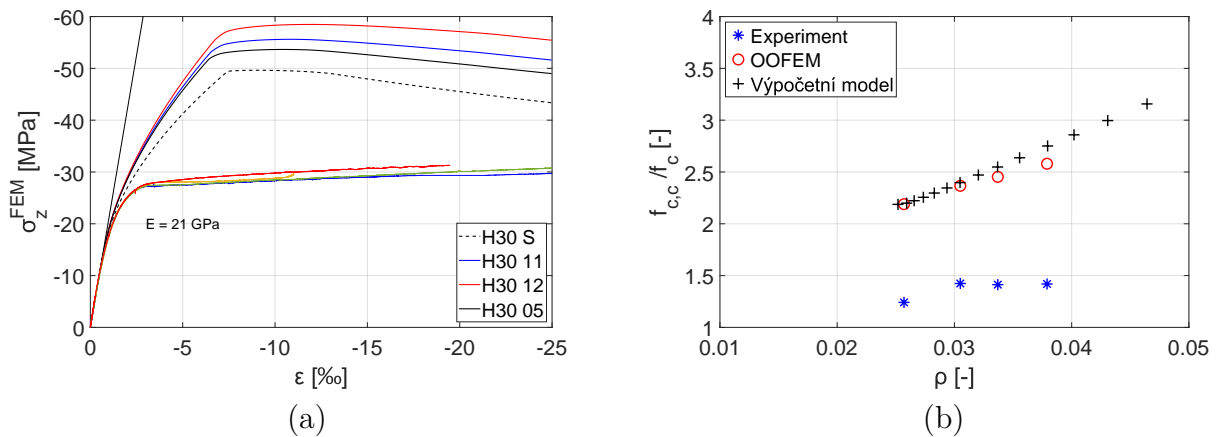
Obrázek 39: Výchozí stav zkušebního tělesa a stav po ukončení zkoušky.

4.4 Porovnání dat s numerickým modelem

Numerický model obsahuje určitá zjednodušení a ze své podstaty nemůže dokonale postihnout skutečné chování zatěžovaného sloupu. Reprezentativnost experimentu rozhodně není zaručena, pokud jsou od každé konfigurace vytvořena pouze jedno (či dvě) zkušební tělesa. Experiment proto slouží spíše k ověření základních trendů, nikoliv přesných výsledků.

Po aktualizaci materiálových parametrů na základě tlakových zkoušek prostého betonu, jsou výsledné pracovní diagramy zobrazeny společně s výsledky experimentu na obr. 40a. Na první pohled je patrný propastný rozdíl mezi modelem a experimentálním měřením. Očekávané zvýšení pevnosti mělo být přibližně 2–2,4 násobek původní hodnoty tlakové pevnosti, tj. z $f_c = 22,67$ MPa měla hodnota v důsledku ovinutí narůst na 45–54 MPa. Zkušební tělesa přitom mají velmi podobnou hodnotu $f_{c,c} \approx 31,5$ MPa.

Tento fakt souvisí s dalším předpokladem. Efektivněji jsou ovinuty konfigurace s větší plochou vnitřní oblasti D. Konkrétně konfigurace 121 (=H12) by měla dosahovat vyšší pevnosti než zbývající. Nepatrně lepší odezvy než průměrné přitom dosahuje 212 (=H21), s poměrem ploch A^S a A^D přesně opačným. Vzorek 212 má opačně vinuté spirály, což by podle analýzy numerického modelu nemělo mít vliv na výsledek. Průběh svíslého napětí σ_z v pracovních diagramech je také odlišný.

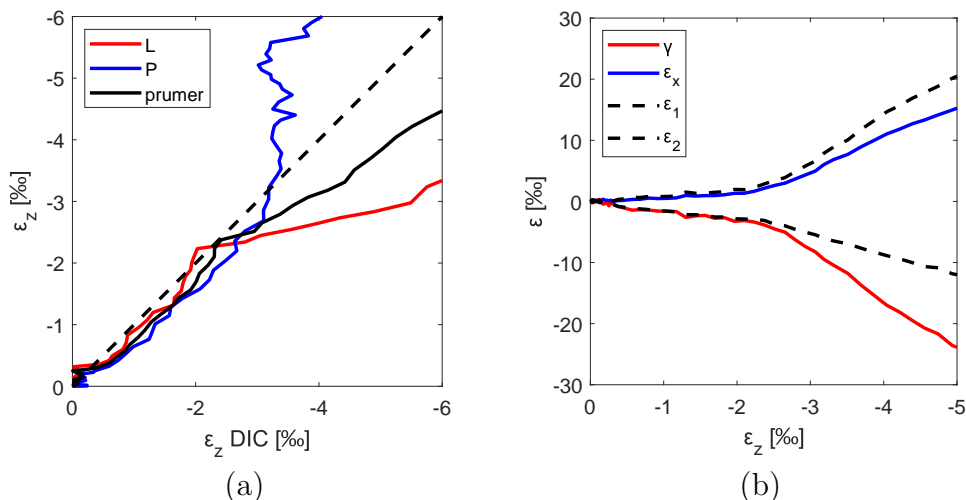


Obrázek 40: Pracovní diagram zachycuje průběh svíslého normálového napětí z experimentu i výpočetního modelu (a). V grafu (b) je zobrazena normalizovaná pevnost $f_{c,c}/f_c$ v závislosti na stupni vyztužení. Výpočetní vztah je dle navržené rovnice (39)

Na obr. 40b je vykreslena pevnost v ovinutí normalizovaná osovou tlakovou pevností $f_{c,c}/f_c$ v závislosti na stupni vyztužení. Na rozdíl od definovaného výpočetního vztahu a numerické simulace vykazují všechna zkušební tělesa (kruhový sloup s jednou i dvěma spirálami) výsledky obdobné kolem 1,4 násobku f_c pro sloup se dvěma spirálami a 1,24 pro kruhový sloup s jednou spirálou.

Dalšími experimentálními daty k ověření chování sloupů jsou výstupy z měření DIC. Aby byla ověřena jejich správnost, je na obr. 41a porovnáno přetvoření ε_z a ε_z^{DIC} pro levou

a pravou stranu vzorku a jejich průměr. Do hodnoty -3 ‰ se obě měření shodují. Na obr. 41b je zobrazena příčná deformace, smykové zkosení γ v rovině xz a hlavní deformace $\varepsilon_1, \varepsilon_2$.



Obrázek 41: Vlevo je porovnání podélných deformací ε_z a ε_z^{DIC} pro levý a pravý extenzometr (a). Vpravo je vykreslené příčné přetvoření ε_x^d , smykové zkosení γ a hlavní deformace $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ v závislosti na průměrném přetvoření ε_z .

Graf na obr. 42 zobrazuje vzájemné vztahy mezi přetvořením a napětím ve výztuži a v betonu. První kvadrant znázorňuje předpokládaný pracovní diagram výztuže, která je idealizována pružnoplastickým chováním s mezí kluzu $f_y = 500 \text{ MPa}$. V druhém kvadrantu je zobrazen poměr přetvoření ε_z a ε_x . Příčné deformace jsou pro tři výškové úrovně (h/str/d) a jejich průměr barevně odlišeny.

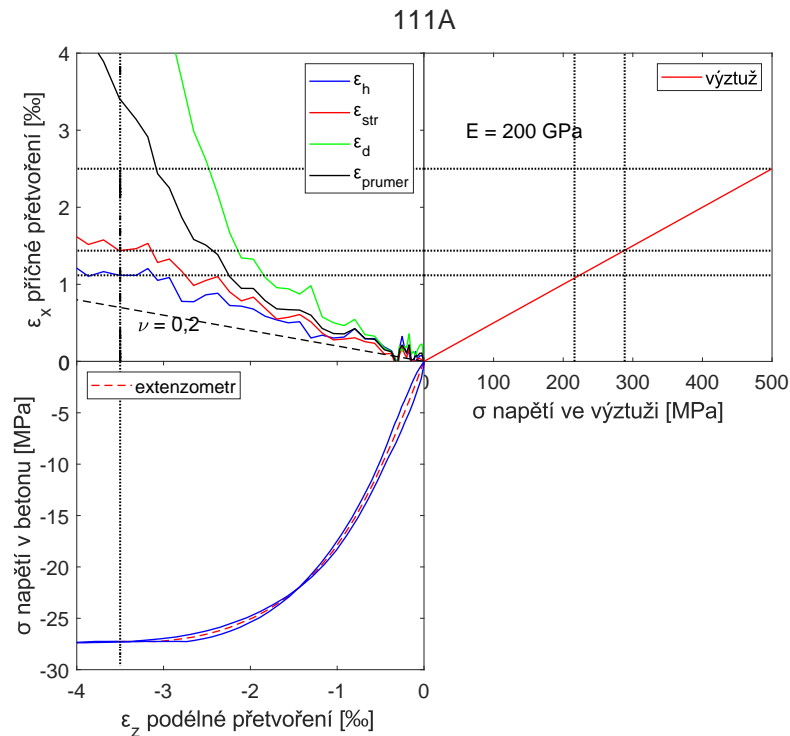
Je vidět, že čárkovaná čára, která vyjadřuje sklon odpovídající Poissonově konstantě ($\nu = 0,2$), je kopírována pouze do přetvoření $\varepsilon_z \approx -1 \text{ ‰}$. Ve třetím kvadrantu je svislou čárkovanou čarou na pracovním diagramu betonu vyznačeno napětí, které neodpovídá celkové pevnosti, ale hodnotě po které začíná materiál jen mírně zpevnovat. Poškození vzorku je viditelné na fotografii obr. 34 111A.

Dle ε_x^d by měla být výztuž v okamžiku dosažení pevnosti již plně zplastizovaná. Pokud by tomu tak nebylo, mohly by být změřené nižší pevnosti způsobené tím, že se beton začal drtit dříve, než se aktivovala výztuž. Výsledky DIC tuto teorii nepodporují.

Jak bylo zmíněno, při zatěžování docházelo k pootáčení spodní podstavy lisu, které vedlo ke kroucení vzorku. Tento stav byl zohledněn novým výpočetním modelem, který tuto rotaci umožňuje. Snížení pevnosti bylo ale zanedbatelné a výsledné pevnosti stále značně vyšší než naměřené.

Jelikož pro uspořádání sloupu se dvěma spirálami nejsou v literatuře dostupná data z experimentu se stejnými parametry, lze porovnat pouze kruhový sloup s jednou spirálou. Běžně testované vzorky mají většinou pevnost v tlaku 28 a vyšší. S podobnou pevností

testoval Desai [8] dvě zkušební tělesa, která měla stejný koeficient k_e jako S1–S3. S tlakovou pevností $f_c = 18,9$ MPa, $f_y = 677$ MPa se zvýšila pevnost těchto vzorků 1,62 a 1,74 násobně. Naměřené pevnosti $f_{c,c}$ byly 30,6 a 33,0 MPa. Nárůst opět nebyl dvojnásobný tj. $2f_c$.



Obrázek 42: Vztah mezi podélným a příčným přetvoření betonu ε_z , ε_x ; svislým normálovým napětím betonu a tahovým napětím ve výztuži. V prvním kvadrantu je průběh takového napětí ve výztuži. Ve druhém jsou vykreslena podélná a příčná přetvoření a ve třetím kvadrantu je závislost napětí σ_z betonu a ε_z .

Z velmi podobných hodnot všech měřených vzorků, včetně kruhového sloupu s jednou spirálou, lze usuzovat, že ovinutí betonu tak, jak bylo doposud v práci prezentováno, v experimentu neproběhlo. Možná příčina leží v nízké pevnosti betonu, který sice nevykazoval viditelnou pórovitost, ale s průměrnou objemovou hmotností $\rho_V = 2\,200$ kg/m³ se řadí spíše mezi lehké betony. Mohlo dojít k drcení betonu, boční expanzi vzorku a přitom ke vzniku pouze omezeného tahu ve výztuži.

5 Závěr

V této bakalářské práci byla na numerickém výpočetním modelu zkoumána mechanická odezva centricky tlačeneho sloupu s dvěma překrývajícími se spirálami. S ohledem na uvažované parametry, tj. výška závitů, vzdálenost středů spirál a jejich vzájemná orientace, byl stanoven analytický vztah (39) pro výpočet pevnosti v ovinutí $f_{c,c}$ inspirovaný předpoklady a vztahy z literatury a současně platných norem. Pomocí tohoto výpočtu je možné také určit pevnost jednodušší topologie, kruhového sloupu s jednou spirálou. Se vzrůstající vzdáleností středů spirál roste i nepřesnost výpočtu. Při oddálení do $1,5R$ je chyba kolem 10 %, přičemž R je vnější poloměr spirály. Dále bylo ověřeno, že efektivnějšího ovinutí dosahují spirály s nižším stoupáním a zároveň s menší plochou výztuže. Příčné tlakové napětí, které je odpovědné za nárůst pevnosti v betonu, je v tomto případě efektivněji rozneseno.

Byl proveden experiment, jehož výsledky pevnosti nedosahovaly očekávaných hodnot. Pravděpodobná příčina byla kombinace příliš malé pevnosti a objemové tíhy, která měla za následek podrcení betonu. Nemohl se tak v plné míře projevit nárůst pevnosti z důvodu ovinutí.

6 Seznam symbolů

A_c	[mm ²]	celková plocha kruhového betonového průřezu
A_{eff}^D	[mm ²]	efektivně ovinutá plocha ve vnitřní oblasti D
A_{ineff}^D	[mm ²]	neefektivně ovinutá plocha ve vnitřní oblasti D
A_s	[mm ²]	plocha výztuže
A_{eff}^S	[mm ²]	efektivně ovinutá plocha ve vnější oblasti S
A_{ineff}^S	[mm ²]	neefektivně ovinutá plocha ve vnější oblasti S
D	[mm]	vnější průměr spirály nebo kruhového třmínku
d_{dg}	[mm]	největší jmenovitý rozměr zrna kameniva
E	[GPa]	počáteční modul pružnosti betonu
E_s	[GPa]	modul pružnosti ocele
f_c	[MPa]	pevnost betonu v tlaku
$f_{c,c}$	[MPa]	pevnost ovinutého betonu v tlaku
f_{cd}	[MPa]	návrhová pevnost betonu v tlaku
f_{ck}	[MPa]	charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní
f_{cm}	[MPa]	průměrná válcová pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní
F_{peak}	[MN]	maximální reakce řídicího bodu
f_t	[MPa]	pevnost betonu v tahu
f_y	[MPa]	mez kluzu betonářské výztuže
$\Delta f_{c,c}$	[MPa]	příspěvek k pevnosti vlivem ovinutí
H	[mm]	svislá vzdálenost příčné výztuže, popř. výška závitů
k_e	[-]	koeficient efektivního ovinutí
R	[mm]	vnější poloměr spirály nebo kruhového třmínku
$\varepsilon_{c2,c}$	[-]	poměrné stlačení ovinutého betonu při dosažení max. napětí $f_{c,c}$
ε_{c2}	[-]	poměrné stlačení neovinutého betonu při dosažení max. napětí f_c
$\varepsilon_{cu2,c}$	[-]	mezní poměrné stlačení ovinutého betonu
ε_{cu}	[-]	mezní poměrné stlačení neovinutého betonu
ε_x	[-]	příčné poměrné přetvoření
ε_z	[-]	podélné poměrné přetvoření
ν	[-]	Poissonova konstanta
ρ	[-]	stupeň vyztužení příčnou výztuží
$\rho_{s,v}$	[-]	stupeň vyztužení podélnou výztuží
ρ_v	[kg/m ³]	objemová hmotnost
σ_2	[MPa]	efektivní příčné tlakové napětí
σ_+	[MPa]	příčné tlakové napětí, hlavní napětí v rovině xy
σ_L	[MPa]	příčné sevření
σ'_L	[MPa]	efektivní příčné sevření

Reference

- [1] *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures, Final Version of PT1-draft prEN 1992-1-1 2018 D3*. 2018.
- [2] ČSN EN 1992-1-1 (731201). *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 2006.
- [3] ČSN EN 1994-1-1 (731201). *Eurokód 4: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 2006.
- [4] Utkarsh Ayachit. *The ParaView Guide: A Parallel Visualization Application*. Kitware, 2015.
- [5] Gro Harlem Brundtland. *Report of the World Commission on environment and development: "our common future"*. UN, 1987.
- [6] Juan F Correal. *Seismic performance of RC bridge columns reinforced with two interlocking spirals*. University of Nevada, Reno, 2004.
- [7] David Darwin, Charles William Dolan, and Arthur H Nilson. *Design of concrete structures*, volume 2. McGraw-Hill Education New York, NY, USA, 2016.
- [8] Prakash Desayi, K. T. Sundara Raja Iyengar, and T. Sanjeeva Reddy. Equation for stress-strain curve of concrete confined in circular steel spiral. *Matériaux et Construction*, 11:339–345, 1978.
- [9] ParaView Developers. *ParaView Users Guide Documentation, Release 5.10.1*. 2022.
- [10] Fédération Internationale du Béton. *Model Code 2010*, volume 2. 2012.
- [11] Yin et al. Experimental studies of rectangular columns with innovative spiral confinements. *The 17th KKCNN symposium on civil engineering, Bangkok*, 2004.
- [12] Michael N. Fardis. *Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings*, volume 8. Springer Science+Business Media B.V, 2009.
- [13] P. Grassl, D. Xenos, U. Nyström, R. Rempling, and K. Gylltoft. Cdp_m2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 50:3805–3816, 2013.
- [14] P. Havlásek. Numerical modeling of axially compressed circular concrete columns. *Engineering Structures*, 227:111445, 2021.
- [15] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, and R Park. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8):1804–1826, 1988.

-
- [16] MOI. *Design specifications for concrete structures*. Taiwan: Ministry of the Interior, 2011.
- [17] MOTC. *Seismic bridge design specifications*. Taiwan: Ministry of Transportation and Communications, 2009.
- [18] B. Patzák. OOFEM home page. 2020.
- [19] F. Erwin Richart, A. Brandtæg, and R. Leno Brown. Failure of plain and spirally reinforced concrete in compression. Technical report, University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering, 1929.
- [20] D. Rypl. *Sequential and Parallel Generation of Unstructured 3D Meshes*. CTU reports. Czech Technical University, 1998.
- [21] Shamim Sheikh, Dharmendra Shah, and Shafik Khoury. Confinement of high-strength concrete columns. *ACI Structural journal*, 91:100–111, 1994.
- [22] TAČR. Snížení materiálových nároků a zvýšení únosnosti železobetonových sloupů s multispirálovým vyztužením - pokročilá simulace a experimentální ověření, projekt č. tm01000059. 2020-2022.
- [23] Vysoké učení technické v Brně. Sborník semináře FRP výztuže. 2014.
- [24] Tzu-Liang Wu, Yu-Chen Ou, Samuel Yen-Liang Yin, Jui-Chen Wang, Ping-Hsiung Wang, and Si-Huy Ngo. Behavior of oblong and rectangular bridge columns with conventional tie and multi-spiral transverse reinforcement under combined axial and flexural loads. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 36(8):980–993, 2013.
- [25] Samuel Yin, Jui-Chen Wang, and ping-hsiung Wang. Development of multi-spiral confinements in rectangular columns for construction automation. *Journal of The Chinese Institute of Engineers - J CHIN INST ENGINEERS*, 35:309–320, 2012.