

VERIFIKACE A VALIDACE ZESILOVÁNÍ KRÁTKÉ KONZOLY NESOUDRŽNOU PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽÍ



Abstrakt

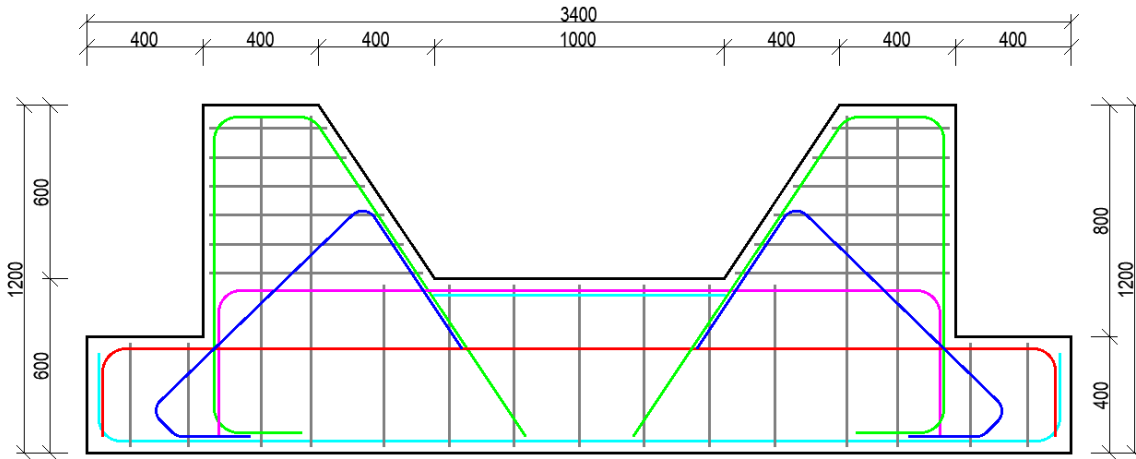
Krátké železobetonové konzoly jsou velmi častým prvkem při návrhu průmyslových hal. Vzhledem ke zvýšení únosnosti, snížení průhybů nebo zamezení vzniku dalších trhlin jsou stávající konzoly předpínány nesoudržnou výztuží prostřednictvím předpínacích tyčí nebo lan. Cílem výzkumu bylo experimentální ověření nové metody CSFM (Compatible stress field method) na příkladu zesílení krátké ŽB konzoly. Metoda je založena na fyzikálně nelineárním výpočtu s uvážením vlivu tahového ztužení výztuže, tlakového změkčení betonu a dalších předpokladů, které mají co nejvíce vystihnout skutečné chování železobetonových prvků. Navíc je tato metoda verifikována pomocí nezávislé analýzy vycházející z podobných předpokladů jako CSFM.

1 Popis experimentu

V roce 2013 proběhl výzkumný projekt ve spolupráci Fakulty stavební VUT v Brně a společností PEEM, spol. s.r.o. Úkolem experimentu bylo navrhnout optimální způsob zesílení existující krátké konzoly za účelem zvýšení její únosnosti a snížení množství a šířky trhlin. Bylo navrženo několik způsobů zesílení pomocí nesoudržných předpínacích lan, přičemž se během experimentu na modelu v měřítku M1:1 zjišťovalo zvýšení únosnosti předpjatých konzol vůči železobetonové variantě. Pro výrobu těles byl použit beton s krychelnou pevností 20 MPa a betonářská výztuž třídy B500B.

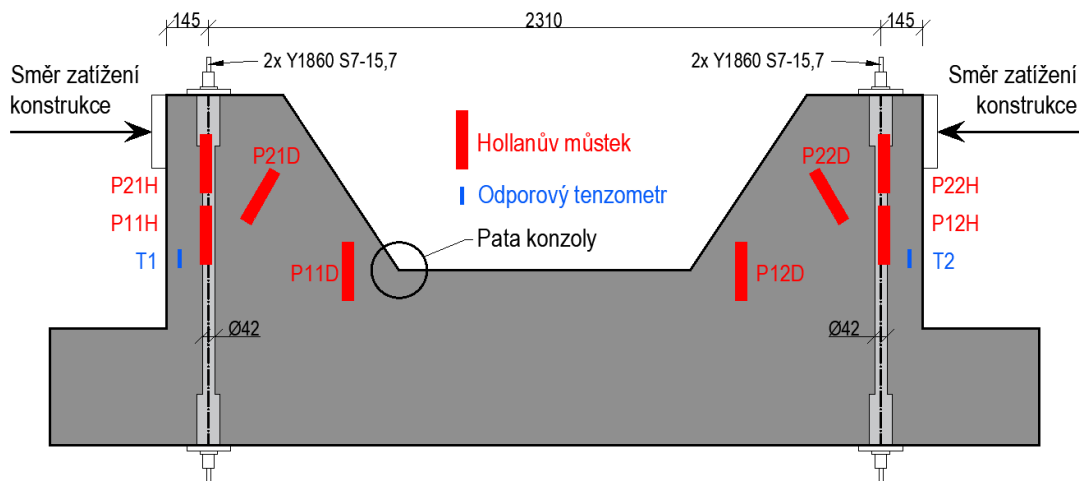
Pro účely tohoto příspěvku byl vybrán model, jehož konzoly jsou zesíleny pomocí dvojice nesoudržných předpínacích lan umístěných v dodatečně vyvrtaném kanálku $\Phi 42$ mm. Experimentální těleso představuje dvojici symetrických krátkých konzol, které jsou spojeny trámem reprezentujícím sloup. Tvar tělesa a vyztužení prvku je uvedeno na (**Obr. 1**). Každé lano (**Obr. 2**) bylo zakotveno na sílu 200 kN. Následně byly konzoly zatěžovány v horizontálním směru pomocí předpínacích lan přes zatěžovací rám. Maximální síla během

experimentu dosáhla hodnoty 1 026 kN. Pro účely validace výpočetního programu bylo maximální horizontální zatížení uvažované hodnotou 658 kN. Po překročení tohoto zatížení nastává drčení betonu v místě styku sloupy a dolní části konzoly - pata konzoly (**Obr. 2**).



Obr. 1 Vyztužení zkušebního prvku

Během zatěžovací zkoušky byly zjišťovány svislé deformace modelu pomocí nivelačního přístroje, přetvoření betonu bylo sledováno Hollanovými můstky osazenými na povrchu betonu a napětí na hlavní ohybové výztuži konzoly se určovalo pomocí odporových tenzometrů nalepených přímo na výztuži (**Obr. 2**). Údaje zjištěné při experimentu jsou použity pro validaci nové výpočtové metody CSFM (Compatible stress field method).



Obr. 2 Umístění předpínacích lan a jednotlivých snímačů

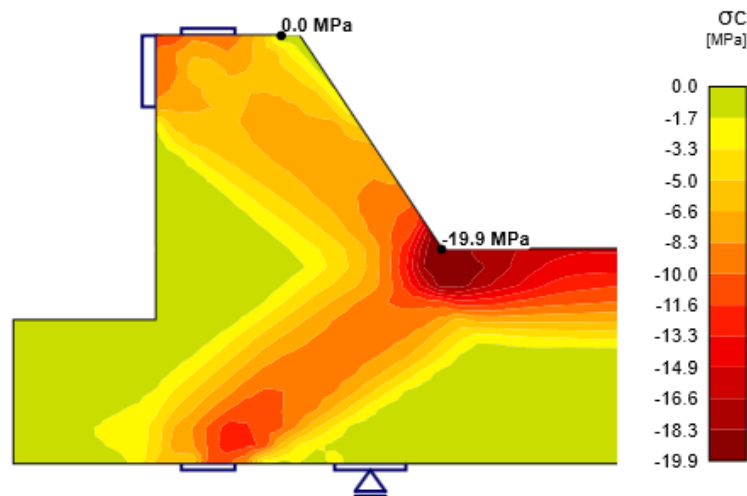
2 Compatible stress field method (CSFM)

Experimentální těleso bylo namodelováno ve výpočetním programu Idea StatiCa Detail, v němž je metoda CSFM implementována. Model je tvořen konečnými 2D prvky představující beton a výztuž je modelována 1D prvky. Z hlediska stavební mechaniky se jedná o úlohu rovinné

napjatosti. Při výpočtech se uplatňuje fyzikálně nelineární vztah mezi napětím a přetvořením na konstrukci.

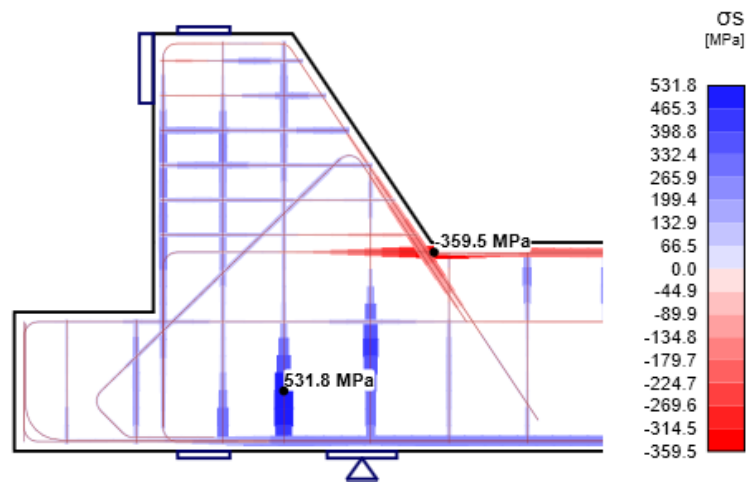
Vytvořený stěnový model byl nastaven podle experimentálně zjištěných hodnot materiálových charakteristik betonu a výztuže ze vzorků odebraných z experimentálního modelu. Výpočetní model zanedbává pevnost betonu v tahu a nahrazuje ji tahovým ztužením.

Zobrazením hlavních tlakových napětí (**Obr.3**) zjistíme, že maximální tlak v betonu vzniká v patě konzoly, kde se setkávají 3 tlakové vzpěry. Napětí v této oblasti dosahuje meze pevnosti betonu, která je 20 MPa a nastává tedy drcení betonu.

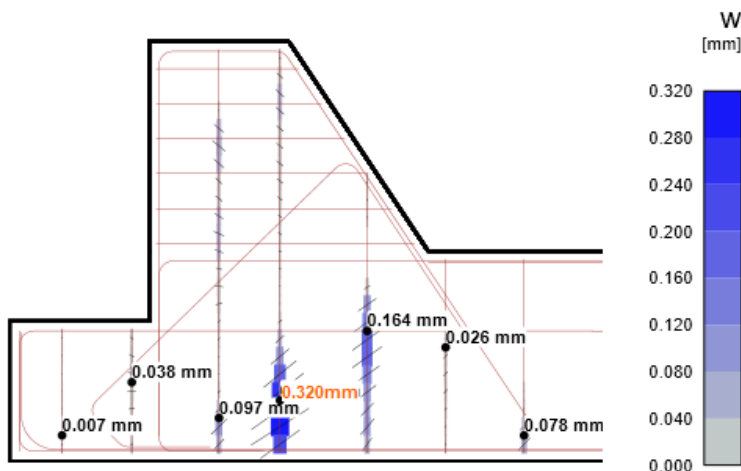


Obr. 3 Průběh napětí na betonu (CSFM)

Nejvíce namáhanou výztuží v tahu je třmínek nacházející se na spojnici mezi kotvou předpínací výztuže a patou konzoly (**Obr. 4**). Výztuž v těchto místech již přesáhla mez kluzu a dále plastizuje, což koresponduje se vznikem trhliny s největší šířkou, jak je uvedeno na (**Obr. 5**).

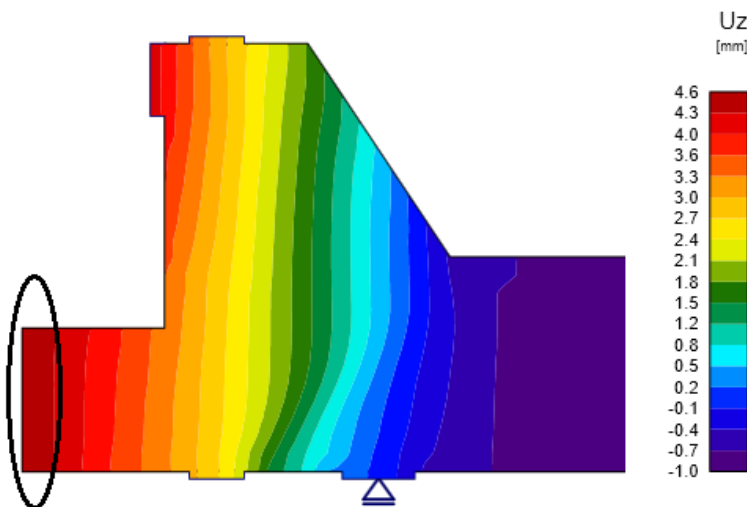


Obr. 4 Napětí na betonářské výztuži (CSFM)



Obr. 5 Výskyt a šířka trhlin na prvku (CSFM)

V posledním kroku byla zkontrolována svislá deformace konstrukce (Obr. 6). Největší deformace velikosti 4,6 mm je na levé hraně konzoly.

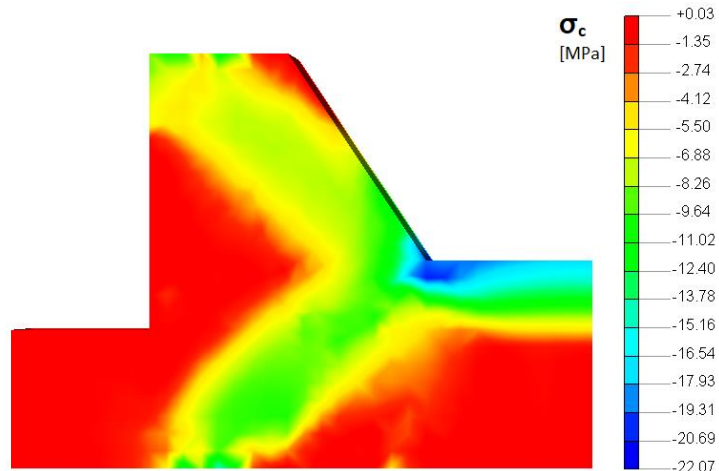


Obr. 6 Svislá deformace prvku (CSFM)

3 Midas FEA

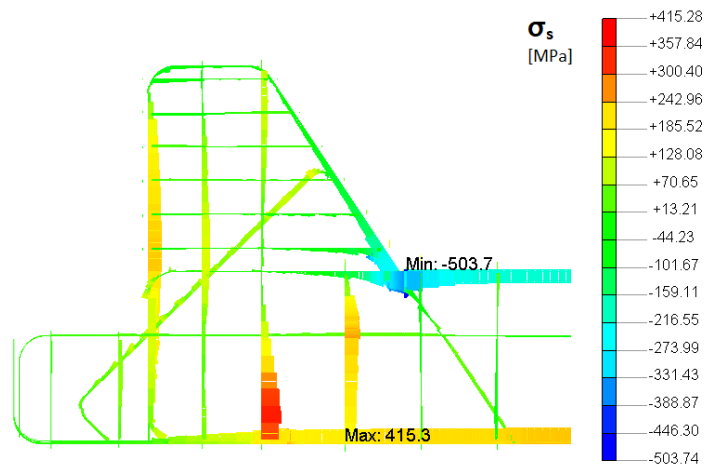
Díky pokročilému výpočetnímu programu Midas FEA lze konstrukci analyzovat jako prostorové těleso se skutečným rozmístěním výztuže v objemu prvku (Smearred crack model). Konzola byla modelována pomocí 3D konečných prvků, jednotlivé výztuže jsou vytvořeny jako 1D prvky. Zatížení konzol, stejně tak i materiálové charakteristiky betonu a výztuže, byly nastaveny tak, aby se shodovaly se vstupy do Idea StatiCa Detail, a také s reálnými vlastnostmi použitých materiálů.

Na **(Obr. 7)** je zobrazeno hlavní tlakové napětí v betonu. Maximální tlakové napětí -22,07 MPa **(Obr. 7)** vyskytující se v oblasti styku tlakových vzpěr (pata konzoly) odpovídá přesně místu maximálního tlakového napětí z 2D modelu.



Obr. 7 Průběh napětí na betonu (Midas FEA)

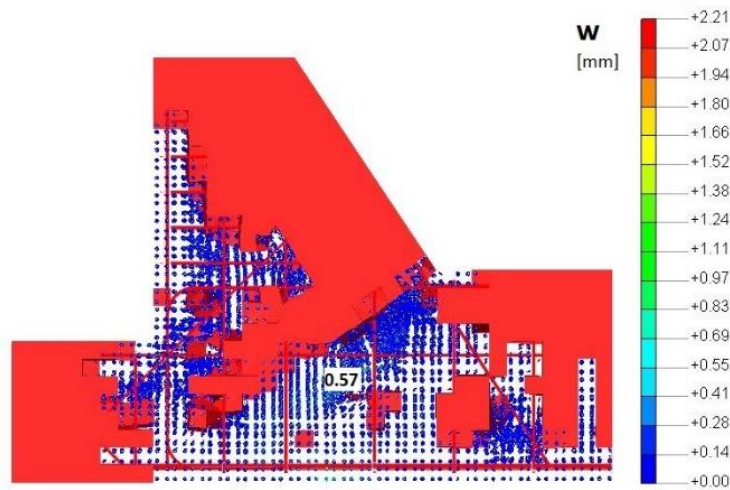
Napětí na výztuži ilustruje **(Obr. 8)**. Je zjevné, že 3D model v programu Midas FEA vykazuje velmi dobrou shodu s 2D řešením metodou CSFM.



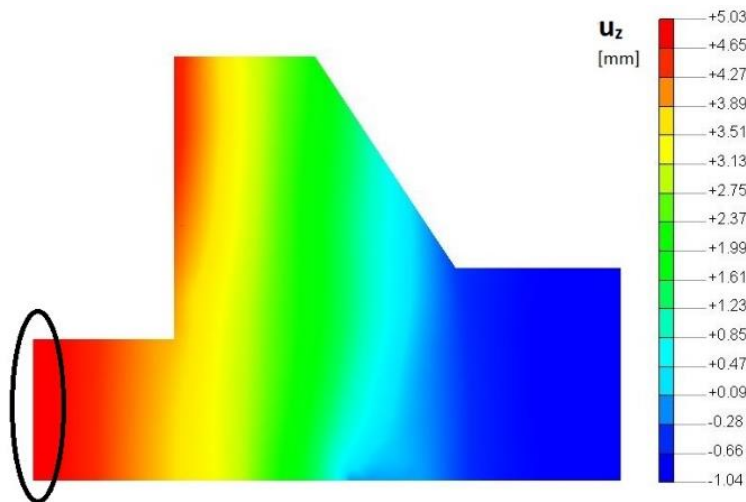
Obr. 8 Napětí na betonářské výztuži (Midas FEA)

Prezentace výsledků šířky trhlin z programu Midas FEA je poměrně komplikovaná **(Obr. 9)**. Největší trhlina šířky 0,57 mm vzniká na konečném prvku v oblasti nejvíce namáhaného třmínku. Místo výskytu koresponduje s metodou CSFM.

Svislá deformace prvku získaná z programu Midas **(Obr. 10)** dosahuje na kontrolované levé hraně prvku hodnotu 5,03 mm. Velikost deformace má velmi dobrou shodu s 2D řešením.



Obr. 9 Výskyt a šířka trhlin na prvku (Midas FEA)



Obr. 10 Svislá deformace prvku (Midas FEA)

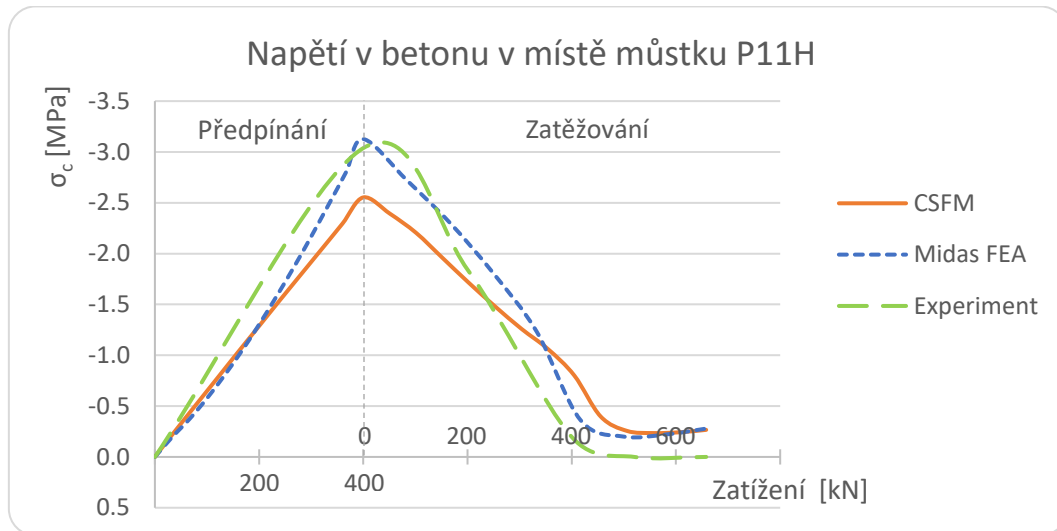
4 2D model vs. 3D model vs. experiment

Pro lepší představu toho, jak se měnily jednotlivé veličiny během zatěžování konstrukce, jsou vytvořeny grafy, které porovnávají hodnoty z obou výpočetních programů a experimentu, postupně po jednotlivých zatěžovacích krocích.

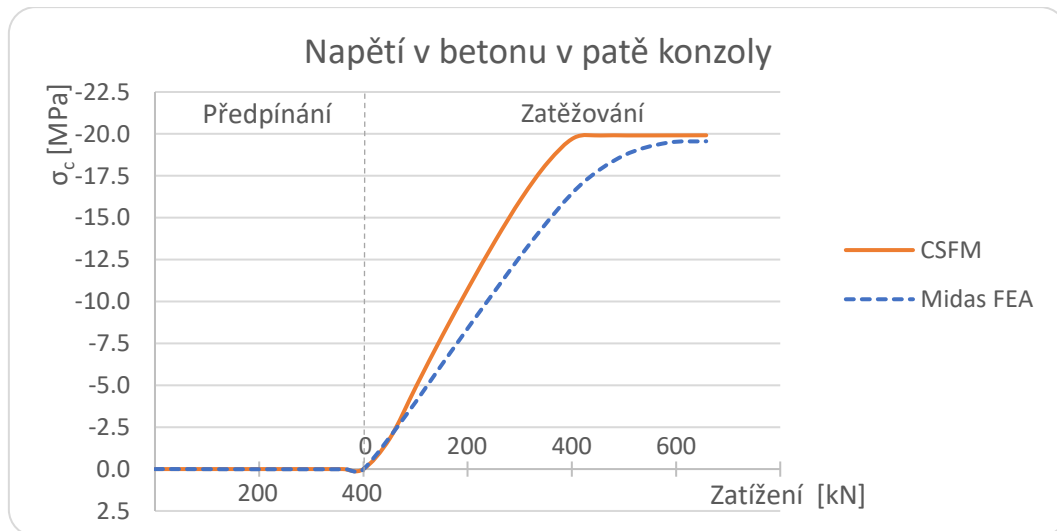
V první fázi bylo simulováno předpínání krátké konzoly ve svislém směru pomocí 2 nesoudržných předpínacích lan s celkovou silou 400 kN na 1 konzolu. Následně byla konzola postupně zatěžována v horizontálním směru na maximální hodnotu síly 658 kN.

Pro účely srovnání napětí v betonu byly vybrány 2 místa. První zkušební místo se nachází v místě Hollanova můstku P11H (Obr. 2), proto je možné použít i hodnoty přetvoření z experimentu. Vzhledem k tomu, že beton pod Hollanovým můstkem byl porušen trhlinami, bylo

nutné tyto vlivy odfiltrovat. To mohlo vést k mírnému zkreslení výsledků. U 3D modelu (midas FEA) je také rozdíl, zda se uvažují výsledky z prvku nacházejícího se na povrchu nebo uvnitř konzoly. Jelikož se snímače během experimentu nacházely na povrchu konzoly, byl pro porovnání výsledků zvolen konečný prvek vyskytující se na totožném místě. CSFM je stěnový model, který průměruje napětí po tloušťce stěny. Zmíněné průměrování mohlo způsobit mírné odchylky napětí v betonu v tlaku (**Obr. 11**).



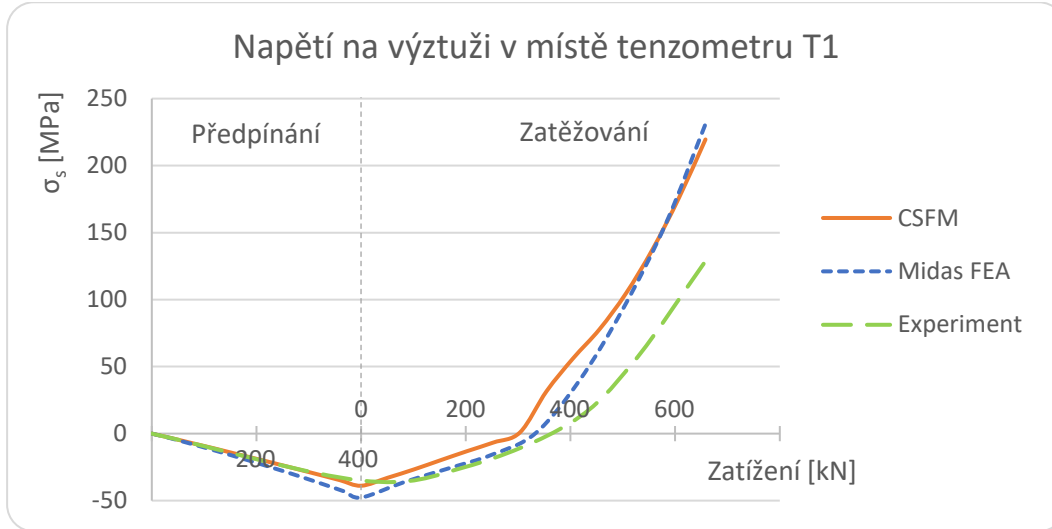
Obr. 11 Napětí v betonu v místě Hollanovho můstku P11H



Obr. 12 Napětí v betonu v patě konzoly

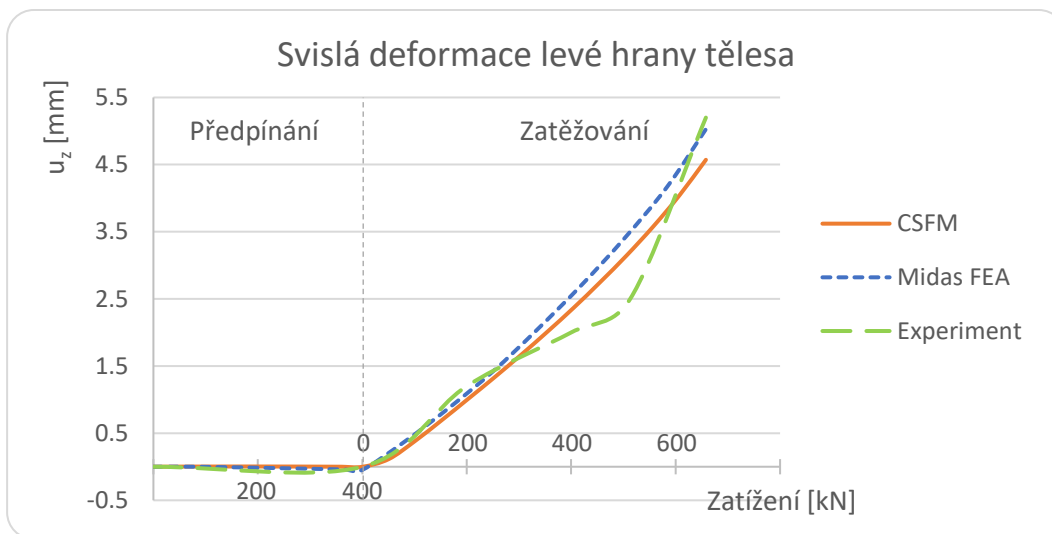
Obr. 12 zobrazuje průběh napětí na betonu během zatěžovací zkoušky v nejvíce namáhané části prvku (v patě konzoly). Průběh napětí vyhodnocen z jednotlivých programů je velmi podobný, mírné odchylky jsou způsobeny nerovnoměrností rozložení napětí po tloušťce prvku v 3D modelu. Je zřejmé, že od bodu, kdy horizontální zatížení dosahuje velikost 600 kN, je beton na mezi pevnosti. Protože během experimentu v tomto místě nebyl umístěn tenzometr, nelze uvést

hodnoty z reálné zatěžovací zkoušky. Ze zatěžovací zkoušky lze potvrdit, že při dalším zvyšování zatížení se beton v místě pod konzolou začal drtit, což odpovídá výsledkům z obou programů.



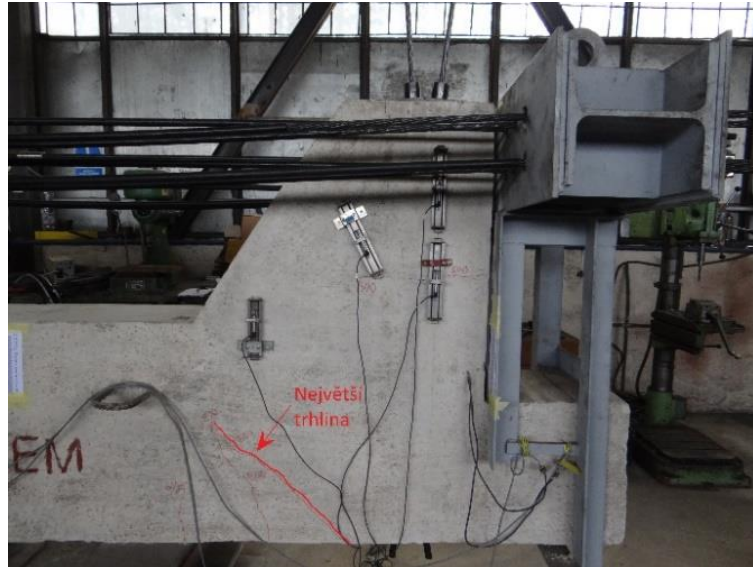
Obr. 13 Napětí na výztuži v místě tenzometru T1

Dalším sledovaným parametrem je průběh napětí na hlavní tahové výztuži konzoly, na které byl umístěn tenzometr T1 (Obr. 13). Ze srovnání vyplývá, že oba softwary vykazují velmi podobný průběh napětí. Křivka tlakového napětí na tenzometru koresponduje s výsledky obou programů. V softwaru byly výsledky napětí reprezentovány po celé délce hlavní tahové výztuže konzoly a ukazují místo s extrémním normálovým napětím. Toto napětí je větší oproti experimentu, jelikož maximální napětí vzniká v místě trhliny, což tenzometr v případě experimentu nesplňuje, protože leží mezi trhlinami, kde částečně působí i beton v tahu. Díky tomuto umístění tenzometru se v měření projevilo nerovnoměrné rozložení napětí na výztuži mezi trhlinami.



Obr. 14 Svislá deformace levého okraje prvku

Velmi dobrý přehled o tom, jak se sledovaná konstrukce chová, udává deformace konstrukce. Během experimentu byl použit nivelační přístroj, kterým se sledoval svislý posun tělesa na 3 různých místech. **Obr. 14** zobrazuje svislou deformaci levé vnější hrany prvku. Je zjevné, že oba modely (2D i 3D model) udávají srovnatelné hodnoty deformací s reálným stavem.



Obr. 15 Experimentální těleso s osazenými snímači



Obr. 16 Šířka největší trhliny při zatížení 658 kN

Díky nelineárním analýzám jednotlivých výpočetních programů je možné určit šířku trhlin na prvku. Pomocí metody CSFM byla zjištěna maximální šířky trhliny 0,32 mm (**Obr. 5**). Prostorový model Midas FEA udává ve stejném místě trhlinu šířky 0,57 mm (**Obr. 9**). Během experimentu bylo zjištěno, že trhлина při daném zatížení dosahuje šířku 0,3 mm (**Obr. 16**), což můžeme prohlásit za výbornou shodu především s 2D modelem spočítaným metodou CSFM.

5 Závěr

Dnešní doba poskytuje různé nástroje pro návrh detailů železobetonových konstrukcí. Některé jsou jednoduché (jako CSFM), jiné jsou složitější (jako Midas FEA, Ansys). Metoda CSFM používá zjednodušený návrhový model, čímž bylo dosaženo lepší konvergence a výrazně kratších výpočtových časů oproti obecným metodám. I přes tato zjednodušení vykazuje metoda CSFM velmi dobrou shodu s experimentem a poskytuje přesný a zároveň bezpečný návrh detailů ŽB konstrukcí a dobře vystihuje reálné chování konstrukce. Navíc, řešení metodou CSFM vyžaduje jen zlomek času oproti modelování pomocí 3D prvků ve složitějších výpočetních programech, které jsou pro potřeby inženýra z praktického hlediska těžko uchopitelné a mohou vézt na příliš zdlouhavé postupy.

Poděkování

Za vznik tohoto příspěvku patří poděkování doc. Ing. Ladislavu Klusáčkovi, CSc. z Fakulty stavební VUT v Brně, za poskytnutí cenných dat z experimentu a pomoc při zpracování naměřených veličin. Díky informacím Ing. Michala Požára, Ph.D. z Fakulty stavební VUT v Brně bylo možné poskytnutá data lépe pochopit a správně vyhodnotit.

Ing. Lukáš Bobek

✉ VUT Fakulta stavební
Veveří 331/95, 602 00 Brno
Česká republika
☺ lukas.bobek@vutbr.cz
URL www.fce.vutbr.cz

Ing. Lukáš Juříček

✉ IDEA StatiCa s.r.o.
U Vodárny 2a, 616 00 Brno
Česká republika
☺ lukas.juricek@ideastatica.com
URL www.ideastatica.com

Ing. Michal Číhal

✉ IDEA StatiCa s.r.o.
U Vodárny 2a, 616 00 Brno
Česká republika
☺ michal.cihal@ideastatica.com
URL www.ideastatica.com

Ing. Jaromír Kabeláč, Ph.D.

✉ IDEA StatiCa s.r.o.
U Vodárny 2a, 616 00 Brno
Česká republika
☺ jaromir.kabelac@ideastatica.com
URL www.ideastatica.com

Ing. Michael Konečný

✉ IDEA StatiCa s.r.o.
U Vodárny 2a, 616 00 Brno
Česká republika
☺ michael.konecny@ideastatica.com
URL www.ideastatica.com
