NUMERICKÁ ANALÝZA SPRIAHNUTIA NOSNÍKOV NA BÁZE KOMPOZITOV S BETÓNOM

NUMERICAL ANALYSIS OF SHEAR RESISTANCE ON COMPOSITE BEAMS

Michala Weissová¹, Vincent Kvočák¹, Daniel Dubecký¹, Patrícia Vaňová¹

michala.weissova@tuke.sk, vincent.kvocak@tuke.sk, daniel.dubecky@tuke.sk

¹ Ústav inžinierskeho staviteľstva, Stavebná fakulta, Technická univerzita v Košiciach, Vysokoskolska 4, 040 23 Kosice, Slovenská republika

Abstrakt

Súčasťou prípravy experimentálneho overovania spriahovacích prvkov je aj numerická analýza skúmaného problému. Hlavným predmetom tohto výskumu je MKP analýza vybraného experimentu, t. j. pretláčacích skúšok. Na MKP analýzu bol vybraný softvér Abaqus/CAE. Táto práca sa bude venovať modelovaniu pretláčacej skúšky vo vybranom softvéri.

Klíčová slova

Numerická analýza, metóda konečných prvkov, prvky na báze sklenených vlákien

Abstract

The part of the preparation of experimental verification of shear connectors is also a numerical analysis of the examined problem. The main subject of this research is the FEM analysis of a chosen experiment, the push out test. For FEM analysis, we have opted for Abaqus/CAE software. This piece of work will focus on the modelling of the push out test via software stated above.

Key words

Numerical analysis, finite element method, fibre reinforced polymer beams

1 ÚVOD

Na analýzu spriahnutia kompozitného nosníka s betónom bol použitý softvér Abaqus. Tento softvér je určený na analýzu metódou konečných prvkov pre počítačové inžinierstvo. Softvér ponúka spolu 5 softvérových produktov na rôzne analýzy. Prvý z nich je Abaqus/CAE (Complete Abaqus Environment), ktorý sa používa na modelovanie a analýzu mechanických komponentov a zostáv. Ďalší z nich je implicitný iteračný produkt, Abaqus/Standard, ktorý má všeobecné použitie. Na nelineárnu analýzu s množstvom vstupných informácií ako je kontakt, zaťaženie, či okrajové podmienky, slúži produkt Abaqus/Explicit, ktorý bol použitý na analýzu šmykovej odolnosti spriahnutia. Štvrtým z nich je produkt Abaqus/CFD (Computation Fluid Dynamics), ktorý slúži na analýzu dynamiky kvapalín. Posledným z nich je Abaqus/Electromagnetic slúžiaci na analýzu pokročilých výpočtových elektromagnetických úloh.

2 PRETLÁČACIA SKÚŠKA

Hlavným princípom pretláčacej skúšky je zistiť šmykovú odolnosť spriahovacieho pásu. Pretláčacia vzorka je tvorená dvoma betónovými kvádrami so šírkou 200 mm, dĺžkou 600 mm a výškou 600 mm. Do týchto dvoch betónových kvádrov boli zabetónované spriahovacie pásy, s dĺžkou spriahnutia 400 mm. Spriahovacie pásy tvoria dva nosníky vyrezané z kompozitného profilu s dĺžkou 600 mm a boli zabetónované do kvádrov tak, aby ich poloha bola 100 mm od spodného okraja kvádra a 100 mm nad horným okrajom. Aby sa zistila skutočná odolnosť spriahnutia a nosník sa nezatlácal do betónu, bol pod nosník vložený polystyrén v hrúbke 10 mm. Nosníky boli pripevnené ku oceľovému profilu tak, aby bolo možné dosiahnuť posun celej strednej časti spolu s kompozitnými nosníkmi teda, bolo potrebné zabezpečiť dostatočnú tuhosť spoja. Tento spoj je štandardne realizovaný zvarom

ale keďže ide o skúšku spriahnutia kompozitného nosníka tak tento spoj musel byť realizovaný skrutkami. Tým pádom, vznikla stredová časť v celkovej dĺžke 600 mm, kde ku pásniciam oceľového nosníka, boli pripevnené pásnice dvoch kompozitných nosníkov pomocou oceľových skrutiek. Keďže by mohlo dôjsť ku nadbytočnému spriahnutiu skrutiek s betónom, tak bolo nutné plochu okolo skrutiek zabezpečiť montážnou penou. Betónové kvádre boli vystužené GFRP výstužou tak, aby výstužné prúty boli súčasťou spriahovacieho pásu.

Obr. 1 Geometria vzorky na pretláčaciu skúšku.

Obr. 2 Jednotlivé časti pretláčacej skúšky.

3 PROSTREDIE MKP SOFTVÉRU

Uvedený softvér je použiteľný na všeobecné statické, ale aj dynamické úlohy. Rieši problém ako celok a pri správnom modelovaní dokáže upozorniť na problémy v konštrukciách, ktoré sa približujú realite. Úlohy rieši pomocou 3D MKP analýzy, čo je na rozdiel od 2D MKP analýzy presnejšie. Jeden z hlavných vstupov potrebných na správne vystihnúť správanie sa úlohy je správne a podrobné zadanie materiálových charakteristík.

Quantity	SI	SI(mm)	SI	US Unit(ft)	US Unit(inch)
Length	<i>m</i>	<i>mm</i>	<i>m</i>	<i>ft</i>	<i>in</i>
Force	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>kN</i>	<i>lbf</i>	<i>lbf</i>
Mass	<i>kg</i>	<i>tonne (10³kg)</i>	<i>tonne</i>	<i>slug</i>	<i>lbf s²/in</i>
Time	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>
Stress	<i>Pa (N/m²)</i>	<i>MPa (N/mm²)</i>	<i>kPa</i>	<i>lbf/ft²</i>	<i>psi (lbf/in²)</i>
Energy	<i>J</i>	<i>mJ (10⁻³J)</i>	<i>KJ</i>	<i>ftlbf</i>	<i>inlbf</i>
Density	<i>kg/m³</i>	<i>tonne/mm³</i>	<i>tonne/m³</i>	<i>slug/ft³</i>	<i>lbf s²/in⁴</i>

Obr. 3 Jednotky v softvéru Abaqus.

Prostredie softvéru Abaqus pracuje s modulmi, v ktorých sa postupne definujú jednotlivé vstupy na riešenie úlohy.

- Part – tento modul slúži na vytvorenie geometrie úlohy pomocou modelovania alebo importu 2D alebo 3D prvku.
- Property – modul, v ktorom sa zadefinujú jednotlivé materiálové charakteristiky, orientácia súradnicových osí v anizotropných materiáloch, či kalibrácia materiálu pomocou pracovného diagramu. V tomto module sa priradzujú materiály k prvkom vytvorených v predchádzajúcom module
- Assembly – v module part bola vytvorená geometria jednotlivých súčastí úlohy a v tomto module sú tieto časti spojené do výsledného usporiadania riešenej úlohy.
- Step – modul slúžiaci na zadefinovanie typu výpočtu, dĺžky výpočtu, ale aj výstupy, či počet zápisov, ktoré sú očakávané.
- Interaction – tu sa určia jednotlivé mechanické alebo termodynamické parametre kontaktov medzi dvoma plochami. Umožňuje zadefinovanie kontaktu, ktorý je dokonale tuhý, ale aj naopak kontakt medzi plochami, kde je potrebné uvažovať s trením. Definujú sa tu aj časti, ktoré nemajú tendenciu sa deformovať.
- Load – modul, kde sa určujú okrajové podmienky celej úlohy. Dovoľuje zadefinovať zaťaženie, uloženie, preddefinovaný posun, či rotáciu. Má vystihovať správanie sa úlohy ako celku.,
- Job – v tomto module sa spúšťa výpočet, pričom je možné výpočet sledovať.
- Visualization – grafický modul, kde sa väčšinou graficky zobrazujú výsledky ako napätia, posuny, deformácie, poškodenia.
- Sketch – modul slúžiaci na zadefinovanie 2D aj 3D geometrie.

4 MODUL PART

Na modelovanie geometrie celej vzorky bol použitý softvér AutoCAD, v ktorom bola celá vzorka namodelovaná a následne vo formáte .sat importovaná do softvéru Abaqus. Pri modelovaní celej hmoty boli jednotlivé časti od seba odčítané tak, aby sa objem hmôt navzájom neprekrýval. Výstuž bola namodelovaná ako 2D prvok, prút, ktorému bola v nasledujúcom module priradená plocha a materiál. Z dôvodu anizotropie tohto materiálu bolo pri modelovaní kompozitnej časti vzorky potrebné zadefinovať aj lokálne súradnicové osi.

Obr. 4 Časť vzorky – kompozit a orientácia osí.

5 MODUL PROPERTY

V tomto module boli zadané hodnoty materiálových charakteristík, ktoré boli získané experimentálnymi skúškami v laboratóriu. Následne bol každej časti vzorky priradený materiál a v prípade prútov výstuže aj plocha prierezu. Materiál kompozitného nosníka bol kalibrovaný podľa výsledkov ťahovej skúšky, pracovného diagramu, ktorý bol vložený do programovej súčasti Calibrations. Materiálové charakteristiky strednej oceleovej časti a výstuže boli definované pomocou hustoty a elastických vlastností.

Materiál kompozitného nosníka je anizotropný v dvoch smeroch, teda ho môžeme považovať za ortotropný materiál, ktorému bolo potrebné zadať materiálové charakteristiky vo všetkých smeroch. Na správne zadefinovanie bola použitá elasto-plastická analýza. Pre správne zadefinovanie každého materiálu v 3D MKP analýze je potrebné zadať hustotu materiálu. V prípade kompozitného nosníka bola hustota uvažovaná s hodnotou $1,8 \text{ kg/m}^3$.

Na určenie elastického správania materiálu boli použité namerané hodnoty modulov pružnosti v ťahu a šmyku. Poissonová konštanta nebola nameraná, preto bola použitá hodnota 0,33. Zadávanie popisuje manuál softvéru pomocou tzv. Engineering Constants a teda E12, E13, E23, nu12, nu13, nu23, G12, G13 a G23.

Elastic

Type: **Engineering Constants** ▼ Suboptions

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term ▼

☐ No compression

☐ No tension

Data

	E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23	G12	G13	G23
1	35676	7102	7102	0.33	0.33	0.33	3335	3335	1475

Obr. 5 Elastické materiálové charakteristiky softvéru.

Na určenie plastického správania materiálu bol použitý modul Calibrations, ktorý slúži na zadefinovanie plastických a elastickým materiálov z pracovného diagramu. Na túto kalibráciu boli použité priemerné hodnoty ťahovej skúšky s vláknami orientovanými v pozdĺžnom smere, v smere 1.

Edit Material

Name: GFRP-composite

Description:

Material Behaviors

Density

Elastic

Plastic

Potential

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Plastic

Hardening: Isotropic ▼ Suboptions

☐ Use strain-rate-dependent data

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	Yield Stress	Plastic Strain
1	143.417	0
2	170.345692084	3.95310823529862E-005
3	195.55969531	8.53242214286769E-005
4	220.612903481	0.000140926602728219
5	245.498354928	0.000207714572009314
6	270.276604694	0.000281335512197212
7	294.86124436	0.000367502126482381
8	319.1862722	0.00046954239558665
9	343.4407300188	0.000576536437730017

Suboption Editor

Potential

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	R11	R22	R33	R12	R13	R23
1	1	0.11917	0.11917	0.21891	0.21891	0.072969

Obr. 6 Plastické materiálové charakteristiky softvéru.

Na zadefinovanie plastického správania sa anizotropného kompozitného materiálu bol použitý modul Plastic, ktorého súčasťou je modul Potential. Tento modul funguje podľa funkcie nazývanej Hill's potential function. Materiálové charakteristiky betónu boli určené v laboratóriu pomocou experimentov. Na zadefinovanie charakteristík betónu bola použitá metóda Concrete Damage Plasticity. Táto metóda spočíva v zadefinovaní materiálových charakteristík betónu pomocou modulov, ktoré ponúka táto metóda a to Plasticity, Compressive Behavior a Tensile Behavior.

6 MODUL ASSEMBLY

V tomto module boli spojené jednotlivé časti vzorky do jedného celku, čo je zobrazené na nasledujúcom obrázku. Na obrázku je jedna časť betónu skrytá pre lepšiu predstavu geometrie.

Obr. 7 Vzorka pretláčacej skúšky.

V strede zaťažovacej plochy je umiestnený referenčný bod, v ktorom je sústredená sila zaťažovania.

7 MODUL STEP

Na výpočet bol použitý nelineárny, explicitný výpočet. Čas kroku bol nastavený na hodnotu 0,1, čo samotný čas výpočtu znižuje desaťkrát, ale hodnota hustoty jednotlivých elementov v sieti je desaťkrát zvýšená.

Pri veľmi malých elementoch niekedy dochádza ku pomalej konvergencii, preto bol nastavený maximálny čas na dosiahnutie konvergenzie elementu na $1e-7$.

V tomto module sa taktiež určuje počet zápisov, ktorý bol rovný počtu zaťažovacích cyklov, a taktiež výsledky, ktoré boli očakávané, teda pretvorenie, porušenie betónu, napätia a pomerné pretvorenia.

8 MODUL INTERACTION

Kontakt medzi jednotlivými prvkami bol nastavený tak, aby medzi betónom a spriahovacím pásom vznikalo trenie s koeficientom trenia 0,18. Pre lepšiu konvergenciu elementov a správne zadanie kontaktu bola použitá metóda Penalty contact method, kde je okrem správnych vlastností kontaktu nutné nastaviť nadradenú a podradenú plochu. Keďže betón má väčšie zastúpenie v celkovom modeli, tak nadradené plochy boli plochy betónu a podradené plochy kompozitu.

Medzi kompozitným prvkom a oceľou bol nastavený dokonale tuhý spoj, ktorý bol v skutočnosti zabezpečený skrútkami. V tomto prípade bolo taktiež nutné určiť nadradenú a podradenú plochu, pričom nadradené boli plochy ocele a podradené plochy kompozitu.

9 MODUL LOAD

Okrajové podmienky boli nastavené tak, aby nedochádzalo ku vertikálnemu posunu betónu. Keďže ide o uloženie, tak je toto nastavenie uvažované ešte pred zaťažovaním vzorky.

Zaťaženie bolo nastavené vo vertikálnom smere podľa zaťažovacích cyklov jednotlivých skúšaných spriahovacích pásov.

Obr. 8 Okrajové podmienky modelu vzorky.

10 MODUL MESH

Pri výpočte pomocou MKP je jednou z najdôležitejších vecí správne nastavenie siete. V analýze pretlačacej skúšky pomocou MKP bola snaha o hexagonálnu 3D sieť, čo má jednu zo základných výhod to, že nevznikajú chybné elementy a urýchľuje to výpočet. Pre komplikovanejšiu geometriu prvkov pretlačacej vzorky bolo nutné časti rozdeliť na jednoduchšie prvky tak, aby bolo možné hexagonálnu 3D sieť elementov vytvoriť. Toto rozdelenie hmoty má vplyv len na elementy, nie na prvok ako taký.

Abaqus ponúka možnosť siete aj v tvare štvorbokého ihlana, čo je metóda, ktorou je možné vytvoriť sieť aj na veľmi komplikovaných prvkoch bez potreby vytvárania akéhosi delenia. Nevýhodou však je predlžovanie výpočtu a častejší výskyt elementov, ktoré majú problém konvergovať pri výpočte.

Obr. 9 Sieť 3D modelu pred a po spustení sieťovania.

Pre rôznu hustotu materiálov hustota elementov bola rozdielna. Pre betón bola použitá hustota elementov 15, pre spriahovací pás, výstuž a oceľovú stredovú časť 8. Pre jednotlivé časti bolo potrebné nastaviť typ elementov tak, aby správne vystihovali predpoklad 3D správania sa materiálov. Pre výstuž ako 2D prvok bolo nutné nastaviť typ elementu tak, aby sa správali ako 3D elementy a nevznikali kolízie medzi 3D a 2D analýzou.

11 MODUL JOB

Na urýchlenie analýzy bolo použitie procesora zvýšené na 100% a počet použitých logických procesorov na 20, čo skrátilo výpočet odhadom 2–3 krát.

12 ZÁVER

Analýzy pomocou MKP vytvára mnoho otvorených tém. Napríklad zadávanie materiálových charakteristík aj s limitnou hodnotou, kde dôjde ku porušeniu vzorky. Ďalšou témou, ktorá zostáva otvorená, je snaha o zrýchlenie výpočtu a jeho vplyv na výsledky. Otázka sieťovania a vytvárania elementov v MKP analýze je tiež dôležitou témou, ktorej by tiež bolo vhodné sa venovať.

PodĎakovanie

Prezentovaný dokument bol podporený projektom: VEGA 1/0172/20 “Napätáková a deformačná analýza nosných prvkov z ocele, skla a kompozitných materiálov”, ktorý podporilo Ministerstvo školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky.

Referencie

- [1] Rewers, Iga. (2019) Numerical Analysis of RC beam with High Strength Steel Reinforcement using CDP model. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 471. 022025. 10.1088/1757-899X/471/2/022025.
(PDF) Numerical Analysis of RC beam with High Strength Steel Reinforcement using CDP model (researchgate.net)
- [2] Demir, Aydin et al. “EFFECT OF VISCOSITY PARAMETER ON THE NUMERICAL SIMULATION OF REINFORCED CONCRETE DEEP BEAM BEHAVIOR.” (2018).
[PDF] EFFECT OF VISCOSITY PARAMETER ON THE NUMERICAL SIMULATION OF REINFORCED CONCRETE DEEP BEAM BEHAVIOR | Semantic Scholar
- [3] Hafezolghorani Esfahani, Milad & Hejazi, Farzad & Vaghei, Ramin & Jaafar, Mohd & Karimzade, Keyhan. (2017). Simplified Damage Plasticity Model for Concrete. Structural Engineering International. 27. 68-78. 10.2749/101686616X1081.
(PDF) Simplified Damage Plasticity Model for Concrete (researchgate.net)
- [4] ABAQUS Analysis User's Manual, Version 6.6 Documentation
ABAQUS Analysis User's Manual (v6.6) (wustl.edu)
- [5] IVANČO, V., KUBÍN, K. a KOSTOLNÝ, K. Metóda konečných prvkov I. Košice : Elfa, 1994. ISBN 80-967131-4-0.