NUMERICKÁ ANALÝZA NESYMETRICKÉHO POUŽITIA AKČNÝCH PRVKOV MEMBRÁNOVEJ KONŠTRUKCIE

NUMERICAL ANALYSIS OF ASYMMETRICAL USE OF ACTUATORS ON A MEMBRANE STRUCTURE

Lukáš Kapolka^{*1}, Lenka Štulerová¹

^{*}lukas.kapolka@tuke.sk

¹Technická Univerzita v Košiciach, Stavebná fakulta, 04200 Košice, Slovensko

Abstrakt

Tento príspevok je zameraný na numerickú analýzu adaptívnej membránovej štruktúry, ktorej model bol vytvorený na základe experimentálneho zariadenia v laboratóriu. Bol skúmaný vplyv asymetrického použitia akčných členov na membránovú štruktúru bez konštrukčného zaťaženia. Výsledky článku popisujú správanie sa numerického modelu. Výsledky získané z numerického modelu budú v budúcnosti porovnané s výsledkami nameranými z experimentálneho zariadenia.

Kľúčová slova

membránové konštrukcie, akčné prvky, numerická analýza

Abstract

This paper is focused on the numerical analysis of an adaptive membrane structure, the model of which was created on the basis of experimental device in the lab. It was researched out the effect of asymmetric use of actuators on the membrane structure without structural loads. Results of the article describe the behaviour of numerical model. The results gained from numerical model will be compared in the future with the results measured out from the experimental device.

Key words

membrane structures, actuators, numerical analysis

1 ÚVOD

Membránové konštrukcie, ako konštrukčná kategória, sú, špeciálnou formou ľahkých povrchových štruktúr, ktoré zahŕňajú škrupiny, kupoly a lanové siete. V každom z nich je súvislý priestorovo zakrivený povrch kritickým a integrálnym konštrukčným prvkom. V ťahaných konštrukciách môžu tieto povrchové prvky, pozostávajúce zo štruktúrnej tkaniny a vysokopevnostných káblov, prenášať zaťaženie iba v ťahu [1].

Primárna výhoda ťahaných prvkov oproti tlačným prvkom je, že môžu byť také tenké a ľahké, ako to ich pevnosť v ťahu dovoľuje. V dôsledku toho je hmotnosť ťahaných štruktúr takmer zanedbateľná. Ďalšou výhodou tenkých, ľahkých ťahových komponentov je to, že sa dajú ľahko prepravovať a stavať. Laná môžu byť dlhé desiatky metrov a nevyžadujú žiadne spoje. Môžu byť zdvihnuté a pripojené k ich koncovým podperám pomocou žeriavov, navijakov alebo helikoptér, ktoré nevyžadujú žiadne lešenie. V skutočnosti je čas montáže membránovej štruktúry oveľa kratší ako pri konvenčnej štruktúre [2].

Na to, aby membránová konštrukcia fungovala, sú potrebné minimálne štyri oporné body, o jeden viac, než je potrebné pre pevný konštrukčný systém. Najzákladnejšou formou je teda štvorbodová štruktúra. Jeden zo štyroch bodov musí byť umiestnený mimo roviny definovanú ostatnými tromi bodmi, aby sa dosiahol dvojité zakrivený povrch, ktorý dáva konštrukcii jej stabilitu a jej schopnosť prenášať zaťaženie [3].

V dôsledku nízkej konštrukčnej, musia okrem prvkov, ktoré prenášajú zaťaženie smerom nadol, existovať aj prvky, ktoré odolávajú zaťaženiu pôsobiacemu smerom nahor napr. od sania vetra. [4].

Povrchové napätia, ktoré sú potrebné pre stabilitu a nosnosť konštrukcie, majú za následok okrem bežných vertikálnych síl aj horizontálne sily na kotvy. Toto je cena, ktorú treba zaplatiť za výhody ťahaných konštrukcií.

Schopnosť konštruktéra, ako efektívne zakotviť tieto horizontálne sily, môže mať veľký vplyv na hospodárnosť konštrukčného systému [5].

Výber oporných bodov definuje tvar konštrukcie. Ich geometria v kombinácii s napätím systému priradeným k povrchu vedie k tvaru konštrukčného povrchu. Konečný tvar je určený pomocou počítačového programu na vyhľadávanie tvaru, form-finding, pri ktorom sa hľadá minimálna energia plochy pre danú geometriu a nastavené okrajové podmienky. Na zmenu tohto tvaru sa musia zmeniť aj kotviace body alebo vnútorné napätia [5], [6], [7].

Tento príspevok sa zameriava na vplyv asymetrického použitia akčných členov na membránovú štruktúru bez konštrukčného zaťaženia. Výsledky článku popisujú správanie sa numerického modelu.

2 POPIS NUMERICKÉHO MODELU

Numerický model bol už v niekoľkých článkoch bližšie popísaný, napr. [8], [9], [10]. Vychádza z parametrov experimentálneho zariadenia umiestneného v laboratóriu Technickej univerzity v Košiciach.

Stručne povedané, numerický model hyperbolického paraboloidu bol vytvorený vo výpočtovom prostredí Dlubal RFEM, ktorý obsahuje prídavný modul, na vyhľadávanie počiatočného tvaru plošných a líniových prvkov, podľa zvolených okrajových podmienok.

Pozostáva z pevného oceľového rámu, ktorého rozmery v osiach rámu sú $3,34 \times 3,34 \times 2,50$ m. Oceľový rám sa skladá z rôznych prierezov prvkov a kovových plechových výstuh. Dve kotviace tyče a dva ovládače sú umiestnené v štyroch rohoch rámu, aby vytvorili základný tvar hyperbolického paraboloidu. Okrajové láná a povrch membrány tvoria hyperbolický paraboloid. Pôdorysný rozmer povrchu membrány je $2,00 \times 2,00$ m. Prevýšenie povrchu membrány je 1,00 m so sedlom uprostred. Počiatočný priehyb okrajových lán bol nastavený na 0,20 m. Počiatočné napätie povrchu bolo nastavené na 4,00 kN/m šírky. Materiálové charakteristiky technickej tkaniny Ferrari Serge Precontraint 502 boli prevzaté od výrobcu. Materiálové charakteristiky oceľových a nerezových komponentov boli brané ako bežné normové hodnoty.

Špecifikácia prvkov numerického modelu je znázornená na obrázkoch 1, 2.

Obr. 1 Špecifikácia prvkov numerického modelu – pohľad na pôdorys modelu.

Obr. 2 Špecifikácia prvkov numerického modelu – pohľad na model z perspektívy.

3 NUMERICKÁ ANALÝZA

Numerická analýza je založená na metóde konečných prvkov (FEM), zatiaľ čo proces hľadania počiatočného tvaru je založený na metóde Update Reference Strategy (URS) siete konečných prvkov [5], čo je matematická homotopická metóda na riešenie inverzného problému.

Na riešenie nelineárnych rovníc bola použitá analýza veľkých deformácií s Newton-Raphsonovou metódou. Vo všeobecnosti bola veľkosť trojuholníkovej siete konečných plošných prvkov stanovená na hodnotu 0,050 m. Delenie pre laná resp. nelineárne prvky bol stanovený na hodnotu 20 dielov na prvok. Delenie pre tlačné a ohýbané prvky bol nastavený na hodnotu 10 dielov na jeden prvok. Bolo nastavené nastavenie globálnych parametrov výpočtu: počet iterácií – 100, počet prírastkov zaťaženia – 20.

Bola nastavená analýza URS. Tolerancia pre konvergenčné kritériá na vyhľadávanie formulárov bola stanovená na hodnotu 0,50. Rýchlosť konvergenzie bola nastavená na hodnotu 0,40, aby sa spomalila konvergenca a zvýšila sa stabilita výpočtu. Maximálny počet iterácií pre proces hľadania tvaru bol 200.

V tomto článku nie sú použité zaťažovacie stavy konštrukčného zaťaženia, iba posun akčných prvkov. Zmena absolútnej dĺžky akčných prvkov bola použitá na simuláciu ich pohybu. Bolo vytvorených niekoľko kombinácií pre meniace sa dĺžky na hornom a spodnom akčnom prvku, aby sa zaznamenalo správanie konštrukčného modelu.

4 VÝSLEDKY NUMERICKÉHO MODELU

Pre zaznamenávanie údajov boli v numerickom modeli vytvorené dva rezy, rez A-A a B-B. Rezy boli umiestnené navzájom ortogonálne v pôdoryse membránovej štruktúry medzi jej cípmi. Rezy začínali a končili v akčnom prvku a kotevnej tyči.

Rez A-A zaznamenával údaje o spodnom akčnom prvku, spodnej kotevnej tyči a údaje o povrchu membrány, ktorou rez prechádzal.

Rez B-B zaznamenával údaje o hornom akčnom prvku, hornej kotevnej tyči a údaje o povrchu membrány, ktorou rez prechádzal.

Tento príspevok sa zameriava na tie uzlové body numerického modelu, kde boli umiestnené akčné členy a kotviace tyče, taktiež zaznamenáva údaje o bode v strede povrchu membrány. Grafy znázornené na obrázkoch 3, 5 skúmajú závislosť globálnej, uzlovej deformácie v smere Z od zmeny posunu akčných prvkov, samostatne pre každý rez. Grafy znázornené na obrázkoch 4, 6 skúmajú závislosť normálových (axiálnych) síl akčných prvkov /kotevných tyčí od zmeny dĺžky akčných prvkov, taktiež samostatne v každom reze.

Obr. 3 Závislosť globálnej, uzlovej deformácie v smere Z od zmeny posunu akčných prvkov, pre rez A-A.

Obr. 4 Závislosť normálových (axiálnych) síl akčných prvkov /kotevných tyčí od zmeny dĺžky akčných prvkov, pre rez A-A.

Obr. 5 Závislosť globálnej, uzlovej deformácie v smere Z od zmeny posunu akčných prvkov, pre rez B-B.

Obr. 6 Závislosť normálových (axiálnych) síl akčných prvkov /kotevných tyčí od zmeny dĺžky akčných prvkov, pre rez B-B.

5 ZÁVĚR

V tomto příspěvku bol analyzovaný vplyv neymetrickeho použitia akčných prvkov na membránovú štruktúru bez konštrukčného zaťaženia.

Zo zobrazených výsledkov, ktoré je možné vidieť na grafoch 4, 6, sú normálové sily v ovládačoch a kotevných tyčiach takmer rovnaké v každom jednom kroku zmeny dĺžky akčného prvku a nezáleží na tom, ktorým z akčných prvkov sa pohybovalo. To dokazuje, že numerický model je v rovnovážnom stave v každej jednej polohe pohonov, ale ako je znázornené na grafoch 3, 5, môže byť veľmi veľký rozdiel medzi jednotlivými závislosťami globálnej, uzlovej deformácie pri posune horným akčným prvkom a spodným akčným prvkom. Kým skrátenie horného akčného prvku vyvoláva veľký posun sledovaných bodov konštrukcie smerom nahor, skrátenie spodného akčného prvku má skôr stabilizačný charakter pre konštrukciu pri rovnakej úrovni pohybu akčného prvku.

Výsledky článku popisujú správanie sa numerického modelu. Tieto výsledky budú porovnané s výsledkami získanými z experimentálneho zariadenia v laboratóriu.

Poděkování

Túto prácu podporila Agentúra na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-15-0777 a zároveň aj Slovenská vedecká grantová agentúra na základe zmluvy č. VEGA 1/0129/20.

Použité zdroje

- [1] Kmet' S 2012 Modern cable and membrane constructions Building materials 8 48–52
- [2] Foster and Mollaert Marijke 2003 European Design Guide For Tensile Surface Structures (Germany: Tensinet) p 354
- [3] Wakefield D S 1999 Engineering analysis of tension structures: theory and practice Engineering Structures 21 680-690
- [4] Horst Berger 1999 Form and function of tensile structures for permanent buildings Engineering Structures 21 669–679
- [5] Wüchner R and Bletzinger K U 2005 Stress-adapted numerical form finding of pre-stressed surfaces by the updated reference strategy Int. J. Numer. Meth. Eng. 64 143–166
- [6] Henrysson, E. : Conceptual design and analysis of membrane structures. Sweden: p.104. 2012. ISSN 1652-8557
- [7] Del Grosso A E and Basso P 2010 Adaptive building skin structures Smart Materials and Structures 19 12
- [8] Kapolka L 2019 Analysis of an experimental tension structure IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 566 012014
- [9] Kapolka L, Štulerová L and Kmet' S 2019 Adaptive membrane structure – experimental device Assembly of steel constructions workers 19 79–86
- [10] Kapolka L 2020 Comparison of results of an adaptive membrane structure with a numerical model IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 867 012015