

DYNAMICKÁ ODOZVA TRIBÚNY ZIMNÉHO ŠTADIÓNA ONDREJA NEPELU V BRATISLAVE

DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF THE ONDREJ NEPELA WINTER STADIUM GRANDSTANDS IN BRATISLAVA

Daniel PAPÁN¹, Veronika VALAŠKOVÁ²

SUMMARY:

Behaviour of the spectators in the grandstands during a sports match may generate excessive vibration that can cause problems with the serviceability limit state. Construction of modern stadium due to architectural design and improving the material properties of the elements are made more efficient. In this article we are dealing with modal analysis of structures Ondrej Nepela stadium in Bratislava and finding natural frequencies adjacent grandstands. The mods of natural vibration and natural frequencies were calculated by the computational model in computer program Scia Engineer with using the Lanczos mathematical method. The mods of natural vibration of construction is the motion of the construction in the direction of least energy expenditure, with which we can predict the behaviour of construction under dynamic loading.

KEYWORDS: dynamic analysis; custom shape; finite element method; natural frequency; dynamic response; Ondrej Nepela grandstands.

ÚVOD

Správanie sa divákov na tribúne počas športového zápasu môže vyvolať nadmerné vibrácie, ktoré môžu spôsobiť problém s medzným stavom použiteľnosti. Konštrukcie moderných štadiónov vplyvom architektonického návrhu a zlepšovaním materiálových vlastností prvkov sa v čoraz väčšej miere zhotovujú štíhlejšie. Tento typ návrhu konštrukcie prináša so sebou mnoho výhod, ale na druhej strane intenzita kmitania, spôsobená najmä koordinovaným pohybom divákov narastá a môže prekročiť limitné hodnoty udávané v príslušných normách.

V tomto článku sa zaoberáme modálnou analýzou konštrukcie štadiónu Ondreja Nepelu v Bratislave a zisťovaním vlastných frekvencií príslušných tribún. Koncepcia výpočtového modelu vychádza z pôvodnej projektovej dokumentácii z roku 1988 a následnej projektovej dokumentácie z roku 2009, kedy prebehla kompletná rekonštrukcia štadiónu do formy, ako vyzerá dnes. Vlastné tvary a

vlastné frekvencie boli vypočítané na výpočtovom modeli v programe Scia Engineer. Scia Engineer pracuje na princípe metódy konečných prvkov - numerická metóda pre riešenie okrajových úloh mechaniky kontinua. MKP rieši systém diferenciálnych rovníc transformovaných na sústavu lineárnych algebrických rovníc. Vplyv premenného zaťaženia na konštrukciu bol sledovaný pre prázdny štadión, plný štadión, počas zápasu a počas prestávky.

Zaťaženie na konštrukcii bolo vyvolané koordinovaným pohybom davu, čo sa v reálnej situácii na tribúne štadióna stáva ojedinele. Dynamické kmitanie športových štadiónov je vo všeobecnosti zložitá simulovať a stanoviť pri návrhu konštrukcie najmä z dôvodu nepredvídateľného správaniu sa divákov počas zápasu. V súčasnosti sa v zahraničí realizuje veľké množstvo experimentov na stanovenie hodnôt zaťaženia vyvolaného divákmi na tribúne v rôznych situáciách počas zápasu, ktoré by sa v budúcnosti mohlo použiť pri návrhu tohto typu konštrukcie [1].

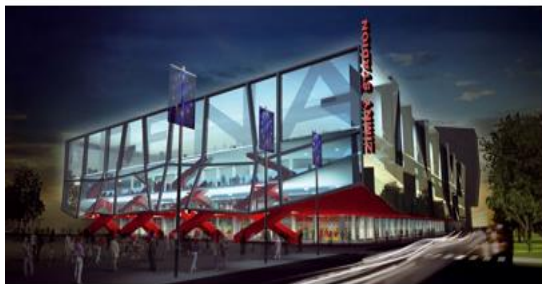
¹ Daniel Papán, Ing. PhD, Žilinská Univerzita v Žiline, Stavebná fakulta, Katedra stavebnej mechaniky a aplikovanej matematiky, Univerzitná 8315/1, 010 26 Žilina, 00421 41 513 5615, daniel.papan@fstav.uniza.sk.

² Veronika Valášková, Ing., Žilinská Univerzita v Žiline, Stavebná fakulta, Katedra stavebnej mechaniky a aplikovanej matematiky, Univerzitná 8315/1, 010 26 Žilina, 00421 41 513 5616, veronika.valaskova@fstav.uniza.sk.

1. ZÁKLADNÉ ÚDAJE O STAVBE

Zimný štadión Ondreja Nepelu sa nachádza na Ul. Odbojárov, Bratislava III – Nové mesto. Výstavba štadiónu bola zahájená v roku 1948 ale v rokoch 1958, 1990 – 1992, 2009 – 2011 tu prebehla celková rekonštrukcia.

Celková zastavaná plocha štadiónu je 9 079,87 m² a aktuálne má kapacitu 10 110 miest.



Zdroj: http://www.asb.sk/buxus/images/cache/768xXXX/fotogaleria/fotogalerie/architektura/obnoveny_zimny_stadion_vbratislave_prinesie_horuce_vasne_fotoalbum/02-zimny-stadion-big-image.jpg

Obrázok 1. Zimný štadión Ondreja Nepelu

Štadión Ondreja Nepelu sa nachádza v západnej časti Podunajskej nížiny. Podložie územia je vrstevnaté a tvoria ho kvartérne sedimenty s podložíom z neogénnych zemín. Inžinierskogeologickým prieskumom bola pri povrchu zistená vrstva navážky dosahujúca hĺbku do 1,4 m. Obsahovala prevažne stavebný odpad. Ďalšiu vrstvu tvorili súdržné a piesčité zeminy. Súdržné sedimenty boli reprezentované hlinou piesčitou až stredne uľahnutým ílom tuhej až tvrdej konzistencie. Piesčité sedimenty tvoria vrstvy piesčitých ílov. Vo vrstve v hĺbke od 4,7 m do 10,5 m v niektorých miestach až 15,7 m sa nachádzajú hrubozrnné zeminy, štrky zrnité s polohami pieskov zle zrnitých kypre až stredne uľahnuté. Maximálna výška hladiny

podzemnej vody bola stanovená na hodnotu 131,30 m n. m., čo predstavuje hĺbku 6,0 m pod terénom.

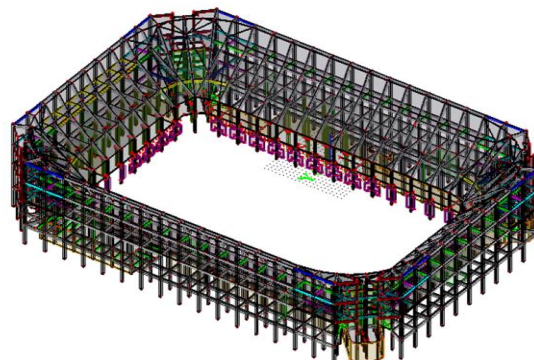
Po rekonštrukcii v roku 2011 nová oceľová konštrukcia obkračuje ponechanú železobetónovú konštrukciu tribún. Zo statického hľadiska sa jedná o samonosný priečny nosný systém s osovou vzdialenosťou medziľahlých väzieb 10,0 m. Pôdorysné rozmery haly sú 86,0 x 102,8 m s maximálnou teoretickou výškou v strede rozpätia 23,3 m.



Obrázok 2. Nosný systém štadióna Ondreja Nepelu

Zvislé oceľové nosné stĺpy votknuté do základovej konštrukcie sú zo zvaraného prierezu s konštantnou výškou 900 mm. Priehradový strešný väzník má šošovkovitý tvar s maximálnou teoretickou výškou v strede rozpätia 6,0 m. Výška väzníka nad podperami je 2,103 m.

Nosný systém železobetónových tribún zimného štadióna Ondreja Nepelu je tvorený priečnym rámom. Stĺpy rámov sú votknuté do základových pätiiek so základovou škárou v nezamrzenej hĺbke v únosných štrkoch. V pozdĺžnom smere sú rámy spojené železobetónovými stužidlami. Pôvodná nosná železobetónová konštrukcia je od obostavanej novej oceľovej nosnej konštrukcie po celom obvode dilatovaná.



Obrázok 3. Globálny nosý systém štadióna Ondreja Nepelu

2. POPIS VÝPOČTOVÉHO SOFTWARE SCIA ENGINEER

Scia Engineer je výkonný software založený na deformačnej variante MKP určený pre statický a dynamický výpočet konštrukcií a ich návrh podľa príslušných noriem. Systém sa využíva na numerickú analýzu konštrukcií. Program sa skladá z troch častí:

PREPROCESOR – všetky vstupy sú zadávané grafickou formou. Užívateľ si môže definovať prostredie, t.j. rám XZ, všeobecnú sústavu XYZ, rošt XYY, priehtadu XZ, následne sa definuje samotný model, funkcie zaťaženi, podoprenie, kombinácie a nelineárne časti. P

NUMERICKÝ RIEŠIČ – umožňuje vypracovať:

- statický výpočet (geometricky nelineárny)
- dynamický výpočet seizmicity
- stabilitný výpočet (vlastné tvary vybočenia)
- a iné.

POSTPROCESOR – slúži na grafickú a numerickú analýzu jednotlivých výpočtov. Súčasťou postprocesoru je aj modul, ktorý posudzuje a navrhuje konštrukcie podľa platných noriem EN.

3. RIEŠENIE DYNAMICKÝCH ÚLOH V MKP

V dynamických úlohách pôsobí na konštrukciu v čase (rádovo v sekundách) premenné zaťaženie, ktoré vďaka zotrvačným silám vznikajúce pri zrýchlenom pohybe hmôt, vyvolá dynamickú odozvu systému. Rovnica podmienky rovnováhy má tvar:

$$[K] \cdot \{r(t)\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

kde: $[K]$ je tuhosť konštrukcie a vektor vonkajšieho zaťaženia $\{F(t)\}$ je doplnený o zotrvačné sily $\{F_m\}$ a tlmiace sily $\{F_c\}$ pôsobiace v konštrukcii, ktoré sú na základe d'Alembertovho princípu závislé na zrýchlení $\{\ddot{u}\}$, resp. rýchlosti $\{\dot{u}\}$.

$$\{F(t)\} = \{F_b\} + \{F_m\} + \{F_c\} \quad (2)$$

pričom:

$$\{F_m\} = - \int_V \rho \cdot [N]^T \cdot [N] \cdot dV \cdot \{\ddot{r}\} = -[M] \cdot \{\ddot{r}\}$$

$$\{F_c\} = - \int_V \kappa \cdot [N]^T \cdot [N] \cdot dV \cdot \{\dot{r}\} = -[C] \cdot \{\dot{r}\}$$

- kde:
- $\{\dot{r}\}$ – vektor rýchlosti elementu
 - $\{\ddot{r}\}$ – vektor zrýchlenia elementu
 - ρ – špecifická hmotnosť
 - κ – parameter útlmu
 - $[M]$ – matica hmotnosti prvku
 - $[C]$ – matica útlmu prvku

Dosadením vyjadríme pohybovú rovnicu prvku v tvare:

$$[M] \cdot \{\ddot{r}\} + [C] \cdot \{\dot{r}\} + [K] \cdot \{r\} = \{F\} \quad (3)$$

V prípade seizmického zaťaženia je konštrukcia nachádzajúca sa na pohybujúcom sa podloží zaťažená zotrvačnými silami, ktoré pôsobia v jednotlivých diskretných bodoch s koncentrovanou hmotnosťou

$$\{F\} = -[M] \cdot \{\ddot{r}_b\} \quad (4)$$

kde: $\{\ddot{r}_b\}$ – vektor zrýchlenia na úrovni

základovej škáry

Principiálne môžeme pohybové rovnice riešiť dvoma metódami:

- Metóda modálnej analýzy – riešenie vo frekvenčnej oblasti
- Metóda priamej integrácie v čase – riešenie v čase

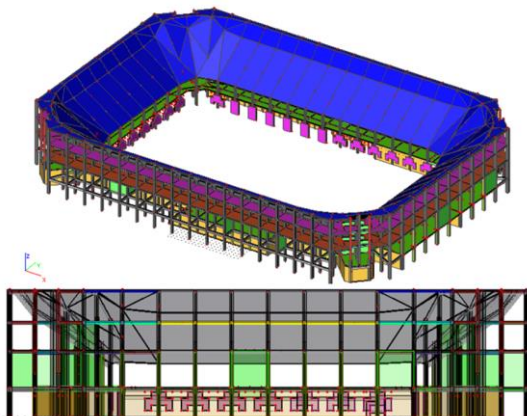
4. DYNAMICKÝ VÝPOČET

Dynamická správanie konštrukcie je vyvolané zotrvačnými silami, ktoré vznikajú pri pohybe hmôt samotnej konštrukcie, alebo predmetov na nej umiestnených, po nej sa pohybujúcich, na ňu dopadajúcich, alebo pohybom obklopujúceho prostredia (zem, vzduch, voda). Keďže dynamické zaťaženie je v čase premenné, nadobúda odozva konštrukcie počas pôsobenia zaťaženia na konštrukciu rôzne hodnoty.

Jednou z ťažkostí modelovania konštrukcie zaťaženej ľuďmi je vyjadrenie príspevku davu ku dynamickým charakteristikám konštrukcie a konzekventne k odozve konštrukcie na dané zaťaženie. Môžu nastať dva hraničné prípady:

1. statický dav – spôsobuje prídavné tlmenie konštrukcie,
2. pohybujúci dav – pôsobí ako zaťaženie.

V mnohých prípadoch správanie sa davu nezodpovedá ani jednej z hraničných situácií. V týchto situáciách stacionárny dav poskytuje doplnkový tlmiaci mechanizmus a konzekventne redukuje odozvu konštrukcie [2].



Obrázok 4. MKP model nosný štadióna Ondreja Nepelu

5. DYNAMICKÉ ZAŤAŽENIE

Za účelom dosiahnutia bezpečnosti divákov a bezpečnosti konštrukcie je nevyhnutné poznať odozvu konštrukcie na rôzne typy dynamického zaťaženia, ktoré môžu na konštrukcii pôsobiť. Je pochopiteľné, že dav dokáže vyvolať väčšie zaťaženie, ako vlastnou váhou, chôdzou, skákaním, najmä v prípadoch, keď je tento pohyb synchronizovaný napríklad zvukovými podnetmi. Zaťaženie od ľudí nie je ľahké predvídať. Frekvencie a amplitúdy dynamického zaťaženia sa líšia v závislosti od typu aktivity.

Chôdza po konštrukcii indukuje dynamické zaťaženie, ktorého charakteristiky sú závislé od parametrov ako frekvencia krokov, rýchlosť chôdze a dĺžka kroku. Typická frekvencia chôdze sú 2 kroky za sekundu, čo spôsobuje zvislú frekvenciu 2 Hz. Pomalá chôdza má frekvenčný rozsah 1,4 – 1,7 Hz a rýchla chôdza 2,2 – 2,4 Hz. Celkový frekvenčný rozsah chôdze sú 1,4 – 2,4 Hz [1].

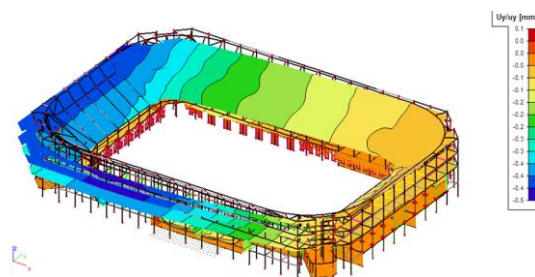
Skákanie spôsobuje významné zvislé zaťaženie spôsobené náhlym dopadom ľudských nôh na podlahu. Veľa úsilia si vyžaduje korelovanie zaťaženia vplyvujúcimi faktormi, ako sú výška skoku, typ dopadu, rýchlosť opakovania a čas bez kontaktu s konštrukciou. Bolo vykonané veľké množstvo pokusov, na základe ktorých bol stanovený

frekvenčný rozsah pre skákajúci dav 1,0 – 2,8 so strednou hodnotou 1,9 Hz [2].

Mexická vlna napodobňuje pohyb morskej vlny pozdĺž tribúny na štadióne, počas ktorého sa jedna časť divákov postaví, zdvihne ruky a potom sadne, rovnako ako to spravila predchádzajúca časť divákov. Analyzovaním videozáznamu mexickej vlny na Štadióne Ondreja Nepelu zo zápasu KHL HC Slovan Bratislava vs Avtomobilist Jekaterinburg (3:1) zo dňa 15.11.2013, ktorý sledovalo 10 055 fanúšikov (vypredané) bolo možné pozorovať, že mexická vlna celý obvod tribúny s priemernou dĺžkou 285 m prešla za 26 s, čomu odpovedala rýchlosť vlny 11,0 m/s (23 sedadiel/s). Dĺžka vlny zachytávala skoro celú dĺžku hľadiska (25 radov) a šírka vlny približne jeden sektor (21 sedadiel).

6. MODÁLNA ANALÝZA KONŠTRUKCIE

Vlastné tvary a vlastné frekvencie boli vypočítané na výpočtovom modeli v programe Scia Engineer. Riešenie viedlo na systém algebraických rovníc, kde bola použitá Lanczosova eliminačná metóda. Výpočtový systém generuje hodnoty do matice hmotnosti z vlastnej tiaže automaticky. Modálnou analýzou bolo vyriešených prvých 100 vlastných tvarov kmitania s príslušnými frekvenciami. Lokálne kmitanie indikoval súčiniteľ participácie tvaru vyjadrujúci množstvo hmoty kmitajúcej v príslušnom vlastnom tvare. Súčiniteľ nenadobúdal väčšie hodnoty ako 0,01%. Podiel celkovej kmitajúcej hmoty pre vypočítaných 100 vlastných tvarov kmitania bol v smere X $W_{xi}/W_{xi,tot} = 78,94 \%$, v smere Y $W_{yi}/W_{yi,tot} = 89,19 \%$ a v smere Z $W_{zi}/W_{zi,tot} = 14,66 \%$ z celkovej hmoty. Pri prvom vlastnom tvare kmital v priečnom smere roh štadióna na rohu Trnavskej ulice a Ulice Odbojárov s frekvenciou $f_4 = 3,0594$ Hz.



Obrázok 5. Prvý vlastný tvar

Prvých 10 frekvencií vlastných tvarov kmitania má hodnoty: 3,0594 Hz, 3,5165 Hz, 3,5957 Hz, 3,9142 Hz, 4,4490 Hz, 5,5504 Hz, 7,7397 Hz, 8,3133 Hz, 9,4372 Hz, 12,0088 Hz.

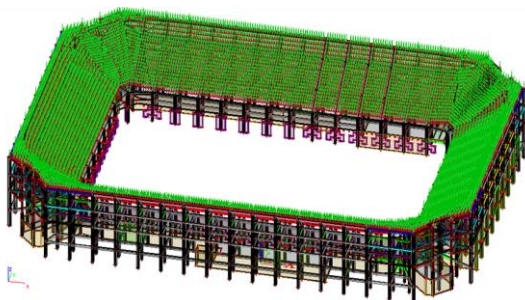
7. VPLYV PREMENNÉHO ZAŤAŽENIA NA DYNAMICKÉ VLASTNOSTI KONŠTRUKCIE

Cieľom bolo preukázať na zmenu dynamických vlastností vplyvom zaťaženia konštrukcie.

V prvom variante boli vypočítané modálne vlastnosti prázdneho štadióna. Druhý variant bol zaťažený úžitkovým zaťažením hodnotou uvedenou v norme EN 1991 pre plochy náchylné na tlačenicu C5.

Ďalšie dva varianty boli konzervatívne. Z tohto dôvodu boli vytvorené dva hraničné prípady, v ktorých sa predpokladá, že počas zápasu je prevažná časť divákov sústredená na tribúne.

V druhom prípade sa uvažovalo, že počas prestávky všetci diváci opustia tribúnu a rovnomerne sa rozložia po celom štadióne.



Obrázok 6. Rozloženie zaťaženia na konštrukcii

V tabuľke 1 je uvedených 5 vybraných vlastných tvarov s porovnaním ich vlastnej frekvencie v jednotlivých variantoch.

LITERATÚRA

- [1] SAHNACI, C., KASPERSKI, M.: *Random loads induced by walking*, Structural Dynamics EUROLYN 2005, Vol.1, Millpress, Rotterdam 2005, pp.441–446.
- [2] LITTLER, J.D.: *Frequencies of synchronized human loading from jumping and stamping*, The Structural Engineer 2003 (22) (2003), s. 27–35,
- [3] EN 1993-1-1: 2005: Navrhovanie oceľových konštrukcií - Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre pozemné stavby.

Tabuľka 1
Ukážky výsledkov variantného riešenia

	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4
n_4	3,0594	2,5103	2,8088	2,6864
n_8	3,5957	2,9400	3,4171	3,2963
n_{23}	8,3133	6,7394	7,6675	7,4646
n_{88}	13,6096	10,3169	11,1918	11,1723
n_{100}	13,9349	11,7203	11,2930	11,2888

ZÁVER

Modálnou analýzou konštrukcie sa vypočítalo prvých 100 vlastných tvarov s príslušnými frekvenciami. Za prvý významný vlastný tvar kmitania konštrukcie možno považovať kmitanie s frekvenciou 3,0594 Hz, pri ktorom dochádzalo ku vodorovnému kmitaniu dostatočne veľkej hmoty konštrukcie. Prvé náznaky zvislého ohybového kmitania konštrukcie tribúny nastali pri frekvencii 9,4372 Hz (Variant 3,4), ktorej hodnota je vyššia ako limitná hodnota rezonančnej frekvencie 6,0 Hz (STN-EN) aj vyššia ako 3,0 Hz generovaná ľudským zaťažením.

Pri porovnávaní variantov dynamického zaťaženia došlo k potvrdeniu predpokladu, že statické zaťaženie pasívnym davom vplyva na modálne vlastnosti konštrukcie. Vplyvom zaťaženia došlo ku zníženiu frekvencie kmitania zaťaženého štadióna oproti frekvencii kmitania prázdneho štadióna. Tento jav bol pripísaný zmene dynamickej matice konštrukcie pri nerovnomernom rozložení kmitajúcej hmoty. Na záver treba pripomenúť, že zaťaženia boli vyvolané koordinovaným pohybom davu čo sa v reálnej situácii na tribúne štadióna stáva ojediniele [3].