

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
Stavebná fakulta

Ing. Kristína Zabáková Vráblová

Autoreferát dizertačnej práce

STATICKÁ A DYNAMICKÁ ANALÝZA VYLAHČENÝCH
DOSIEK

Na získanie akademického titulu philosophiae doctor – PhD.
v doktorandskom študijnom programe: 5.1.7. aplikovaná mechanika

Bratislava, máj 2017

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre stavebnej mechaniky, Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Kristína Zabáková Vráblová**
Katedra stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: **Prof. Ing. Norbert Jendželovský, PhD.**
Katedra stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti: **Prof. Ing. Jozef Melcer DrSc.**
Katedra stavebnej mechaniky a aplikovanej matematiky,
Stavebná fakulta ŽU v Žiline
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Doc. Ing. Eva Kormaníková, PhD.
Ústav inžinierskeho staviteľstva, Stavebná fakulta TU v Košiciach
Vysokoškolská 4, 042 00 Košice

Ing. Miroslav Šimonovič, PhD.
Autorizovaný inžinier
Nitrianska 166/37, 949 01 Nitra

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná
.....hod. na Katedre stavebnej mechaniky
Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Obsah

1	Úvod	2
2	Ciele záverečnej práce	2
3	Metodika záverečnej práce.....	3
4	Súčasný typy vyľahčených dosiek.....	4
4.1	Cobiax	4
5	Statická analýza vyľahčených dosiek.....	5
6	Modelovanie vyľahčených dosiek.....	6
7	Dynamická analýza vyľahčených dosiek	9
8	Experimentálne merania	10
9	Záver.....	14
9.1	Ďalší možný postup v problematike	16
10	Použitá literatúra.....	17
11	Publikačná činnosť autora.....	18

1 Úvod

Stropné konštrukcie sú neoddeliteľnou súčasťou staviteľstva. V súčasnej dobe požiadavky na veľkosť rozpätí stropných konštrukcií narastajú a s nimi aj potreba nových a nekonvenčných riešení. Významnú zložku zaťaženia konštrukcií tvorí práve vlastná tiaž a preto masívne železobetónové dosky pri potrebe veľkých rozpätí nahrádzajú práve vyľahčené dosky. Vyľahčenie stropných konštrukcií má pozitívny vplyv nielen na konštrukciu stropu, ale aj na celú stavbu, pretože znižuje hmotnosť, znižuje aj náklady na konštrukciu zvislých konštrukcií a základových konštrukcií.

Myšlienka vyľahčovania stavebných konštrukcií pochádza z prírody. Vták dokáže lietať, pretože jeho kostru tvorí pevný obal a opory. Kostí sú pevné a ich váha je zároveň optimalizovaná .

2 Ciele záverečnej práce

Ciele dizertačnej práce môžeme zhrnúť do týchto bodov:

- Prispieť k lepšiemu poznaniu v oblasti vyľahčených dosiek pod statickým a dynamickým zaťažením.

- Definovanie zjednodušeného postupu výpočtu vlastných frekvencií vylahčených dosiek.
- Analýza vylahčených stropných dosiek pod dynamickými účinkami zaťaženia.
- Porovnanie výsledkov numerických modelov, vytváraných MKP, s výsledkami experimentálnych meraní.

3 Metodika záverečnej práce

Dizertačná práca sa skladá z deviatich kapitol. Prvá kapitola sa venuje úvodu do témy, cieľom záverečnej práce a metodikám práce.

Kapitola *História a súčasný stav riešenia problematiky* sa venuje vývoju systému vylahčených dosiek a rôznym konštrukčným riešeniam vylahčených stropných dosiek. Záver kapitoly pojednáva o súčasných typoch vylahčených stropných konštrukcií, kde sú vylahčovacie prvky umiestňované medzi spodnú a vrchnú výstuž dosky a následné zalievané betónom.

Napriek tomu, že ekonomické hľadisko týchto vylahčených systémov nebolo primárnym cieľom analýzy tejto práce, kapitola *Ekonomické hľadisko vylahčených dosiek Cobiax* sa venuje analýze hospodárnosti návrhu tohto systému v porovnaní s nevylahčenou doskou. Táto téma bola spracovaná na základe veľkého záujmu o túto tému pri prezentovaní čiastkových výsledkov práce.

V kapitole *Statika vylahčených dosiek* je popísaná problematika ohybovej odolnosti dosiek vylahčených guľovými vylahčovacími prvkami a už známe teoretické poznatky o návrhu výstuže do takýchto dosiek. Ďalej sa z teoretického hľadiska venuje aj šmykovej odolnosti vylahčených dosiek a ich priehybom.

Kapitola *Modelovanie vylahčených dosiek* je venovaná spôsobom modelovania dosiek, pričom na začiatku popisujeme jednotlivé typy modelov s názvami, s ktorými sa stretávame ďalej počas celej práce. Pre modelovanie vylahčených dosiek sú využívané programy, využívajúce metódu konečných prvkov, ANSYS a SCIA Engineer. Táto kapitola porovnáva aj výsledky ohybových momentov a priehybov jednotlivých modelov vylahčených dosiek.

Kapitola *Dynamická analýza vylahčených dosiek* je rozdelená na dva hlavné tematické celky: vlastné frekvencie vylahčených dosiek a rázové zaťaženia. V kapitole o vlastných frekvenciách vylahčených dosiek je vytvorená parametrická štúdia vlastných frekvencií vylahčených dosiek a ich porovnanie s vlastnými frekvenciami plných dosiek. Na záver analyzujeme betónové dosky pod rázovým zaťažením, porovnáваме správanie sa plných a vylahčených dosiek.

V kapitole *Experimentálne merania* sa venujeme teórii experimentálneho merania dynamických vlastností stropných konštrukcií in situ. Tieto teoretické vlastnosti sú aplikované pri meraní vylahčenej stropnej konštrukcie výškovej budovy v Bratislave a výsledky meraní sú porovnávané s numerickým riešením konštrukcie.

V závere práce sú zhodnotené výsledky jednotlivých kapitol, splnenie cieľov záverečnej práce a možnosti ďalšieho smerovania v tejto problematike.

4 Súčasné typy vyľahčených dosiek

Moderná doba priniesla riešenie obojsmerne vyľahčených dosiek, kde je vyľahčenie realizované plastovými prvkami rôznych tvarov. Medzi hlavné výhody vyľahčených dosiek patrí:

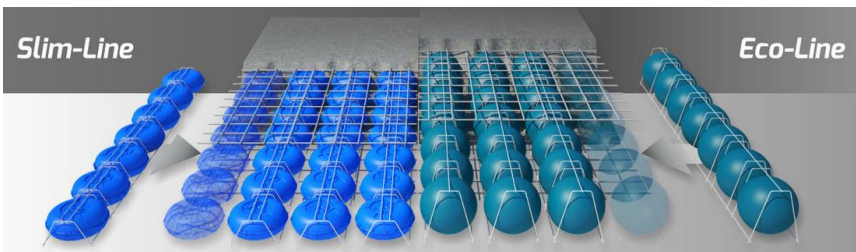
- Pri približne rovnakej tuhosti nižšia hmotnosť predmetnej dosky o 30%.
- 20% úspora betónu pri nosných prvkoch (stĺpy, základy...)
- Zníženie počtu alebo úplne odstránenie prievlakov.
- Možnosť zväčšenia rozpätí.
- Menšie priehyby.
- Menšie zotrvačné sily pri seizmickej analýze.

Medzi hlavné nevýhody vyľahčených dosiek patrí:

- Vyplavovanie vyľahčovacích prvkov pri betonáži.
- Nízka šmyková pevnosť.

4.1 Cobiax

Firma Cobiax Technologies Group bola založená v roku 1997 po objavení sférického dutého telesa konateľom Dr. Karstenom Pfefferom vo Švajčiarsku. Hlavnou činnosťou skupiny Cobiax je výskum a vývoj bi-axiálnych plochých dutých dosiek, hodnotové inžinierstvo a predaj produktov pre medzinárodné projekty. Podobne ako pri systéme BubbleDeck, komponenty Cobiax (plastové duté gule, resp. rotačné elipsoidy) tvoriace prázdny priestor, sú umiestnené medzi vrchnú a spodnú vrstvu betónovej dosky a slúžia ako náhrada za betón.



Výrobca dodáva tri typy vyľahčovacích prvkov: „Eco-Line“, „Slim-Line“ a „Slim-Line Click“.

Produkty Eco-Line (prvky tvaru gule):

- pre dosky hrúbky 400 - 700 mm,
- výška prvkov 270 - 450 mm,

- vhodné pre dosky veľkých rozpätí.

Produkty *Slim-Line* (prvky tvaru rotačného elipsoidu):

- pre dosky hrúbky 200 – 450 mm
- výška prvkov 100 – 260 mm
- vhodné pre dosky menších hrúbok.

„*Slim-Line Click*“ je vyľahčovací prvok po horizontálnej osi rozdelený na dve časti, ktoré sa spájajú priamo na stavbe.

5 Statická analýza vyľahčených dosiek

V európskych normách, ktoré boli prebraté aj do slovenských noriem, návrh dosiek vychádza z teórie medzných stavov, pričom rôznorodosť mechanických vlastností materiálov a zaťaženi zohľadňujú parciálne súčinitele spoľahlivosti. Ohybovú odolnosť prierezu posudzujeme na základe porovnania s momentom odolnosti. Ak predpokladáme lineárne pretvorenie prierezu, moment na medzi odolnosti dosiahneme pri pomernom stlačení $\varepsilon_{cu} = 0.0035$. Normy taktiež umožňujú použitie zjednodušených pracovných diagramov betónu, teda diagram s konštantným spevnením, bilineárny alebo parabolicko-lineárny. Najjednoduchšie je použitie diagramu s konštantným spevnením, kde v betónovom priereze predpokladáme rozloženie návrhového napätia po výške $\lambda \cdot x$, pričom $\lambda = 0.8$ pre betóny do C50/60.

Pri návrhu vyľahčených dosiek môžu nastať 2 prípady:

- Neutrálna os prechádza plným prierezom, resp. nadbetónávkou
- Neutrálna os prechádza vyľahčením

Hodnoty šmykovej odolnosti určujú priamo výrobcovia. Pri systéme Cobiax je to 60% šmykovej odolnosti plnej železobetónovej dosky. Tieto hodnoty sa stanovujú na základe experimentálnych meraní.

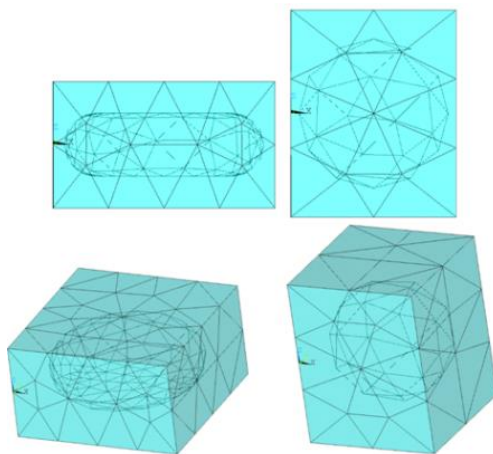
Ďalší spôsob výpočtu definovala nemecká norma DIN a to priemernú šírku prierezu. Priemerná šírka prierezu b_m sa dosadzuje do vzorcov namiesto najmenšej šírky prierezu b_w . Pri dosadení hodnôt odporúčaných výrobcami by sme dostali šmykovú odolnosť rovnú 36% zo šmykovej odolnosti plnej dosky.

Stupeň oslabenia šmykovej plochy bol publikovaný po rozsiahlych výskumoch v roku 1999. K šmykovej odolnosti prispieva v najväčšej miere zaklínenie zrn kameniva. Pri vyľahčených doskách je plocha, kde sa zaklínenie realizuje menšia. Toto zmenšenie percentuálne vyjadruje aj zmenšenie šmykovej odolnosti.

Pri výpočte priehybu vyľahčenej dosky treba uvažovať s priemernou ohybovou tuhosťou prvku. Výpočet priehybu vyľahčených dosiek, môžeme realizovať napríklad pomocou metódy konečných prvkov, ako 2D prvkov s ekvivalentnou hrúbkou.

6 Modelovanie vyľahčených dosiek

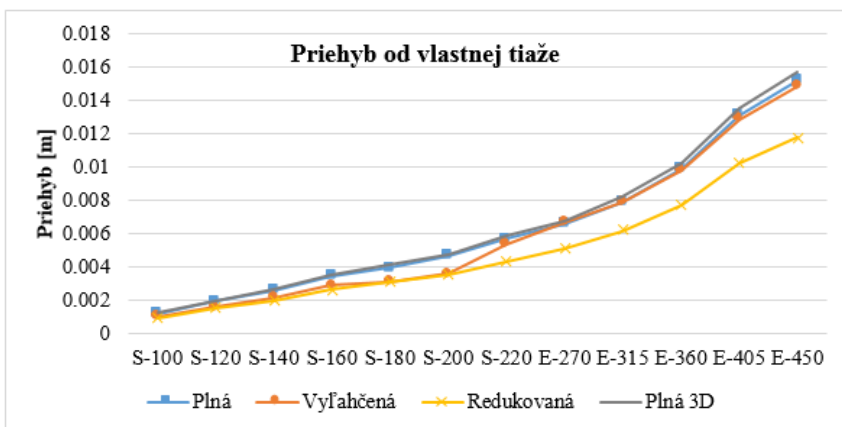
Prvú analýzu modelov sme robili na priehyboch dosiek a ohybových momentoch. Na numerické riešenie problému pomocou MKP sme zvolili systém ANSYS. V programe ANSYS sme vytvárali model vyľahčenej dosky z 3D konečných prvkov SOLID 187. Model vyľahčenej dosky bol vytvorený z betónu bez uváženia vystužovacích prvkov tak, že sme zadali nasledovné materiálové vlastnosti: modul pružnosti $E = 31\text{GPa}$, Poissonove číslo $\nu = 0.2$ a objemovú tiaž $\gamma = 25\text{ kN/m}^3$. Model sme konštruovali vytváraním objemov tak, že sme najskôr vytvorili jeden základný kváder veľkosti závisiacej od osovej vzdialenosti vyľahčovacích prvkov a hrúbky dosky, od ktorého sme odčítali objem vyľahčujúceho telesa- gule (prvky *Eco-Line*) resp. rotačného elipsoidu v prípade prvkov *Slim-Line*.



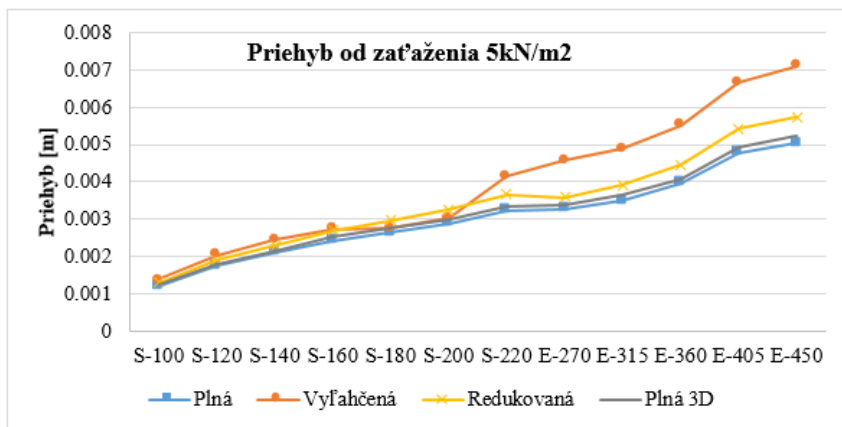
Ďalším typom modelov boli redukované dosky. Model redukovanej dosky bol vytváraný z plošných prvkov SHELL63. Model redukovanej dosky bol vytvorený ako model plnej dosky, ktorá má redukované vlastnosti. Redukovali sme vlastnú tiaž a tuhosť dosky, súčiniteľmi udávanými výrobcom. Tieto súčinitele sa nachádzajú v tabuľke.

Typ vyfŕčovacieho prvku a označenie modelu		Slim-Line (rotačný elipsoid)						
		S-100	S-120	S-140	S-160	S-180	S-200	S-220
Výška vyfŕčovacieho prvku	m	0.1	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2	0.22
Výška dosky	m	0.2	0.22	0.25	0.28	0.3	0.32	0.35
Rozpätie dosky	m	5.95	7	8.05	9.1	9.8	10.5	11.55
Súčiniteľ redukcie tuhosti		0.93	0.91	0.91	0.9	0.9	0.89	0.89
Súčiniteľ redukcie vlastnej tiaže	kN/m ²	1.4	1.64	1.88	2.1	2.32	2.56	2.8
Typ vyfŕčovacieho prvku a označenie modelu		Eco-Line (guľa)						
		E-270	E-315	E-360	E-405	E-450		
Výška vyfŕčovacieho prvku	m	0.27	0.315	0.36	0.405	0.45		
Výška dosky	m	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6		
Rozpätie dosky	m	12.9	14.35	16	18	19.5		
Súčiniteľ redukcie tuhosti		0.91	0.9	0.89	0.88	0.88		
Súčiniteľ redukcie vlastnej tiaže	kN/m ²	2.86	3.34	3.82	4.29	4.77		

Pre porovnanie sme vytvárali aj modely plnej dosky, ktoré mali rovnakú hrúbku, rovnaké rozpätie a neredukovanú objemovú tiaž a tuhosť.



Ako bolo spomínané vyššie, model plnej dosky bol vytváraný pomocou škrupinových prvkov a model vyfŕčenej dosky bol modelovaný z prvkov priestorových. Vytvorili sme preto aj model plnej dosky z priestorových prvkov. Výsledky priehybov objemových prvkov boli pre všetky dosky iba asi o 3.1 až 3.4 % vyššie. Tento rozdiel je spôsobený tým, že pri priestorových prvkoch nie je zabezpečená kolmosť priečnych rezov na strednicovú rovinu dosky. Percentuálne porovnania výsledkov plnej a vyfŕčenej dosky vychádzajú z modelu plnej dosky vytváratej zo škrupinových prvkov nakoľko sú to prvky štandardne používané pre modelovanie stropných dosiek v inžinierskej praxi.



Keďže model redukovanej dosky bol vytváraný iba redukciami jednotlivých vlastností modelu pomocou koeficientov bolo zrejme, že rozdiely medzi modelmi plnej a redukovanej dosky budú pravidelné. Pre dosky rady *Slim-Line* boli priehyby redukovanej dosky o 22.2-23.6% menšie pre zaťaženie od vlastnej tiaže a o 7.5-12.4% väčšie pre premenné zaťaženie 5 kN/m². Pre dosky rady *Eco-Line* boli priehyby redukovanej dosky o 21.5-22.6% menšie pre zaťaženie od vlastnej tiaže a o 9.9-13.6% väčšie pre premenné zaťaženie 5 kN/m².

Porovnanie s modelom vyfahčenej dosky nám dáva pomerne prekvapivé výsledky, ktoré sa značne odlišujú od modelu redukovanej dosky a teda aj od odporúčaní výrobcov. Priehyby vyfahčenej dosky od vlastnej tiaže modelov S-100 až S-160 sa zväčšujú o 4.8-7.4% pri porovnaní s modelom redukovanej dosky. Pre modely S-180 a S-200 rozdiely priehybov od vlastnej tiaže v porovnaní s redukovanou doskou dokonca iba okolo 1%. Veľké rozdiely sa medzi modelmi vyfahčenej a redukovanej dosky ukazujú až od modelu dosky S-220, kde je tento rozdiel 17.7% a modely *Eco-Line* vykazujú rozdiely 20 až 23%. Veľmi podobné percentuálne rozdiely sú medzi modelmi aj pri premennom spojitom zaťažení.

V rámci práce boli analyzované aj veľkosti ohybových momentov. Po sčítaní maximálnych ohybových momentov od vlastnej tiaže a spojitého zaťaženia vykazuje vyfahčená doska v porovnaní s plnou doskou úsporu 10.1% pre model S-120. Redukovaná doska mala po sčítaní maximálne ohybové momenty menšie o 14.2%. Celkový rozdiel medzi redukovanou a vyfahčenou doskou sú 4%.

		Vlastná ťaž	Zaťaženie 5 kN/m ²	Spolu
		[kNm/m]	[kNm/m]	[kNm/m]
S-120	Plná	-11.92	-10.83	-22.75
	Redukovaná	-7.61	-9.86	-17.47
	Vyľahčená	-8.92	-11.53	-20.45
E-270	Plná	-73.02	-36.50	-109.53
	Redukovaná	-47.45	-40.11	-87.56
	Vyľahčená	-63.10	-43.33	-106.43

Vyľahčená doska E-270 po sčítaní maximálnych ohybových momentov od vlastnej tiaže a spojitého zaťaženia má o 8.8% menšie ohybové momenty ako plná doska. Redukovaná doska vykazuje po sčítaní ohybové momenty o 20% menšie ako plná doska. Celkový rozdiel medzi modelom vyľahčenej a redukovanej dosky je 12.6%.

7 Dynamická analýza vyľahčených dosiek

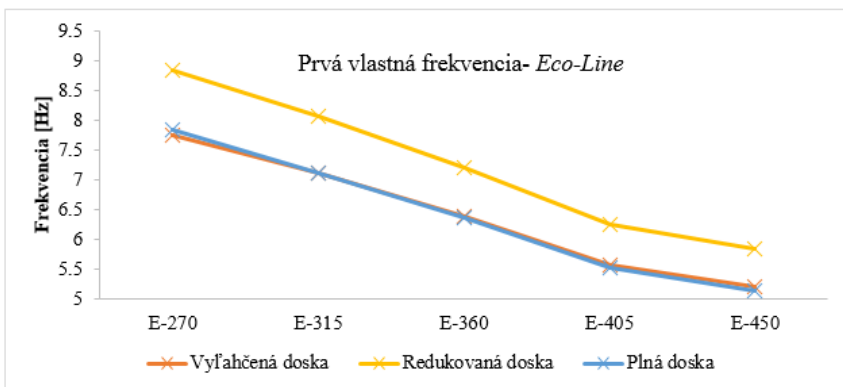
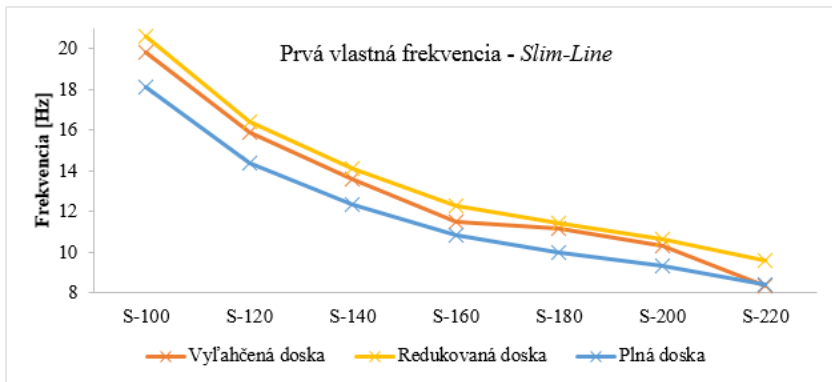
V súčasnosti narastajú problémy s vibráciami v rezidenčných, kancelárskych, ale aj industriálnych budovách. Tieto vibrácie sú spôsobované dynamickým zaťažením prenášaným priamo do konštrukcií stropných dosiek ľuďmi, strojmi alebo presunom strojov už pri výstavbe. Hlavnými zdrojmi vibrácií v budovách sú:

- ľudská činnosť (napr. chôdza, skákanie, tanec)
- vibrácie strojov (napr. práčky, klimatizačné systémy)
- vonkajšie vplyvy (napr. doprava, vietor).

Vibrácie stropných konštrukcií spôsobujú pohyb vo vertikálnom smere, čo nepriaznivo vplyva na obyvateľov budov a na používanie citlivých prístrojov, resp. na ľudí, ktorí s nimi pracujú. V minulosti boli problémy eliminácie vibrácie riešené splnením jednoduchým kritériom maximálneho priehybu. Konštrukcie boli navrhované robustnejšie. Dnešné požiadavky na ľahšie konštrukčné systémy s väčšími rozpätiami, teda spôsobujú nepohodlie užívateľom budov.

Existuje niekoľko spôsobov ako predchádzať, prípadne aspoň redukovať vibrácie stropných konštrukcií. Vibrácie produkované strojmi najjednoduchšie redukujeme odizolovaním zariadenia od stropnej konštrukcie. Izolovať môžeme pružinami, izolačnými doskami alebo rôznymi elastickými telesami.

Vibrácie produkované ľudskou činnosťou nie je možné izolovať priamo. Situácia je pomerne zložitá, pretože v takomto prípade je človek producentom vibrácií aj ich prijímateľ. Na tento problém je preto potrebné myslieť už pri návrhu stropnej konštrukcie, napríklad práve zvýšením vlastnej frekvencie stropnej konštrukcie.



Prvé vlastné frekvencie modelov plných dosiek boli o 13 až 14% nižšie ako prvé vlastné frekvencie modelov redukovanej dosky vo všetkých prípadoch. Na druhej strane prvé vlastné frekvencie modelov vyfahčenej dosky s hrúbkou 350 mm a viac sú bližšie k prvým vlastným frekvenciám modelov plnej dosky, pri týchto hrúbkach je rozdiel medzi frekvenciami 1% a menej. Dosky hrúbky 200 až 320 mm majú prvú vlastnú frekvenciu bližšie k redukovanej doske, pričom rozdiel je okolo 3%.

Modely redukovanej dosky dávajú veľmi dobrú zhodu so zjednodušenými výpočtovými metódami. V porovnaní s presným numerickým modelovaním, však vznikajú veľké rozdiely, najmä pri hrubších doskách.

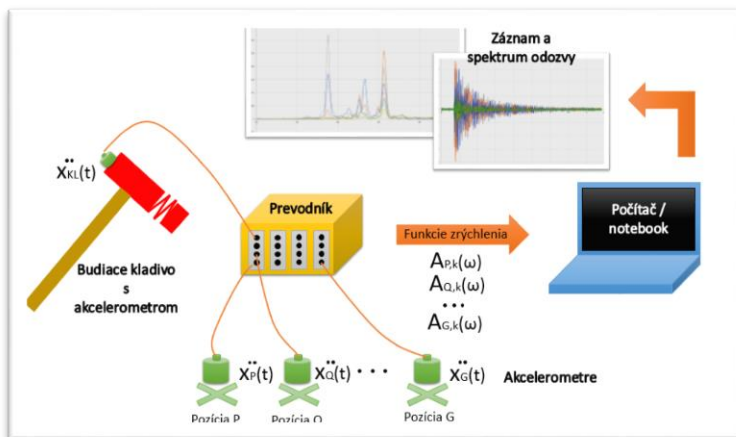
8 Experimentálne merania

Základom presnej charakteristiky dynamického správania sa konštrukcie in-situ a presné popísanie jej správania pomocou numerického modelu, je vytvorenie vysokokvalitných dynamických meraní. Dôležité informácie o správaní stropnej konštrukcie môžeme dosiahnuť jednoduchým meraním jej

odozvy v čase. Spektrálna analýza odozvy v čase, teda autospektrum, ukazuje frekvenčný rozsah odozvy. Časová odozva spôsobená rôznymi typmi nameraných budiacich síl, ako je tzv. „heel-drop“ (doskok cez päty) alebo obyčajná chôdza je dôležitým indikátorom maximálnych (špičkových) zrýchlení pre správanie sa stropnej konštrukcie v bežnej prevádzke. Preskúmanie odozvy spôsobenej výskokmi alebo chôdzou môže byť užitočné pri analýze približných tlmení systému, avšak užitočnosť týchto nereferenčných meraní (takých, pri ktorých nie je meraná budiaca sila) je obmedzená. Modálne skúšky poskytujú možnosť lepšie charakterizovať dynamické vlastnosti stropných konštrukcií meraním vstupnej aj výstupnej odozvy a vytvoriť funkciu frekvenčnej odozvy medzi budiacimi silami a meranými miestami. Dynamické vlastnosti (frekvencia, tlmenie a vlastné tvary) získané experimentálnymi meraniami môžu byť použité pre overenie analytického modelu, ktorým popisujeme dynamické správanie konštrukcie, zvyčajne vyjadreným pomocou numerického modelu.

V rámci práce sme dostali možnosť vykonať dynamické meranie na výškovej stavbe v Bratislave. Táto 23-podlažná budova sa nachádza v širšom centre Bratislavy. Prvých 9 podlaží konštrukcie tvorili vyľahčené železobetónové dosky, ktoré boli betónované ešte v roku 2006. Vyľahčenie bolo realizované vkladáním polystyrénových hranolov medzi výstuž. Meranie bolo realizované na doske 8. nadzemného podlažia, teda na predposlednej doske, ktorá bola realizovaná s vyľahčením.

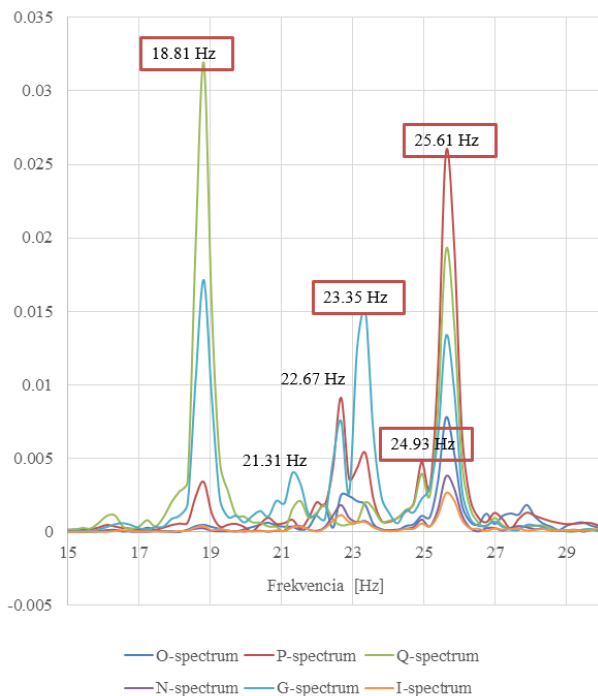
Prvým krokom k experimentálnym meraniam bolo vytvorenie numerického modelu v programe ANSYS. Tieto modely boli vytvorené na základe výkresovej dokumentácie stavby. Najdôležitejšie bolo pri týchto modeloch určiť vlastné tvary vyľahčenej aj plnej dosky, aby sme vedeli čo najlepšie definovať miesta pre umiestnenie akcelerometrov. Následne na stavbe boli na vopred definované miesta umiestnené kovové podložky, ktoré boli na dosku prilepené epoxidovým dvojzložkovým lepidlom. Na konštrukciu bolo umiestnených sedem akcelerometrov (označených I-Q).



Akcelerometre typu PCB Piezotronics 393B31 boli na konštrukciu pripevnené pomocou magnetov na podložkách prilepených na dosku. Tieto boli zapojené do prístroja National Instruments Compact RIO (NI cRIO) 9067 s dvoma vstupno-výstupnými modulmi NI 9234. Do prístroja bol zapojený aj jeden menší akcelerometer, ktorý bol pripojený na budiace kladivo. Z prevodníkov boli funkcie zrýchlenia prenesené do počítača. Schéma zapojenia meracej techniky je na obrázku. V počítači boli záznamy z akcelerometrov spracovávané pomocou programu LabVIEW.

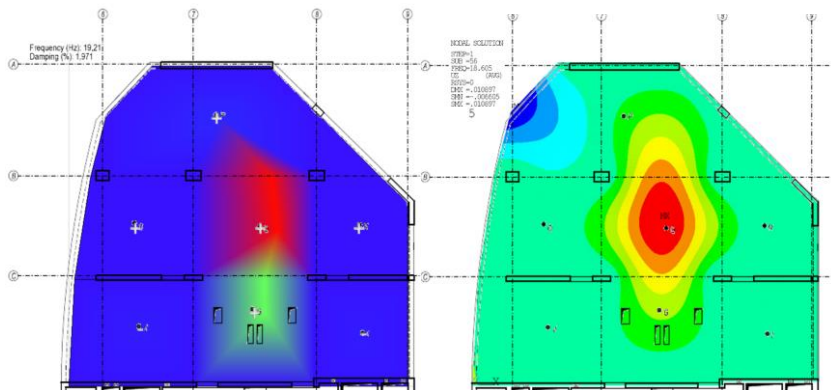
Pri prvých meraniach sme sa pokúšali konštrukciu vybudíť pomocou budiaceho kladiva, avšak už počas meraní bolo zo záznamov badateľné, že konštrukcia nie je dostatočne vybudená. Keďže sme nemali k dispozícii elektrodynamický budič, rozhodli sme sa na budenie konštrukcií využiť výskoky, resp. doskoky.

Na vyľahčenej doske bolo pomocou programu ModalVIEW vytvorených 6 vlastných tvarov dosky, tieto boli jasne viditeľné aj na spektre odozvy, ktoré je na nasledujúcom obrázku.

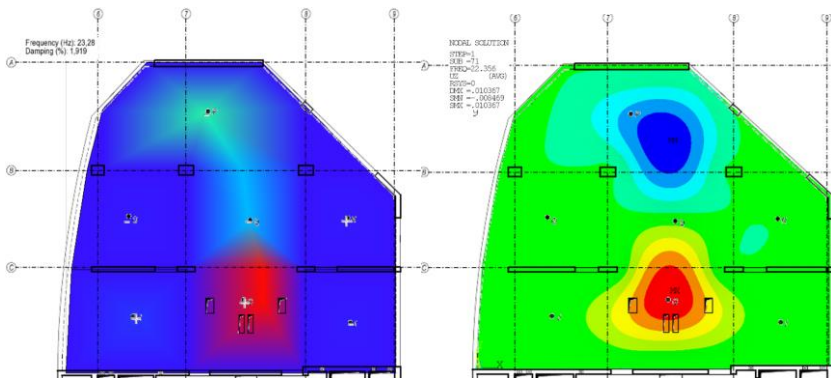


Na nasledujúcich obrázkoch sú porovnávané vlastné tvary vyľahčenej dosky pre jednotlivé frekvencie. Výsledky experimentálneho merania dávali veľmi dobrú zhodu, ako pri vlastných tvaroch, tak aj pri hodnotách vlastných frekvencií, pričom rozdiely vo frekvenciách boli menej ako 1 Hz.

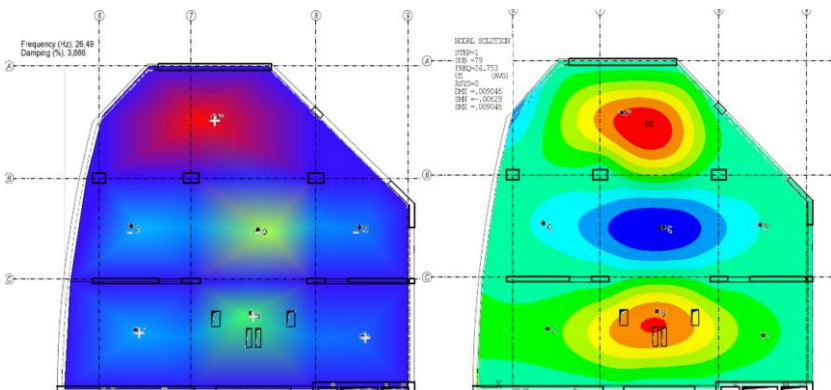
Prvý vlastný tvar vyťahčenej dosky z programu ModalVIEW a ANSYS



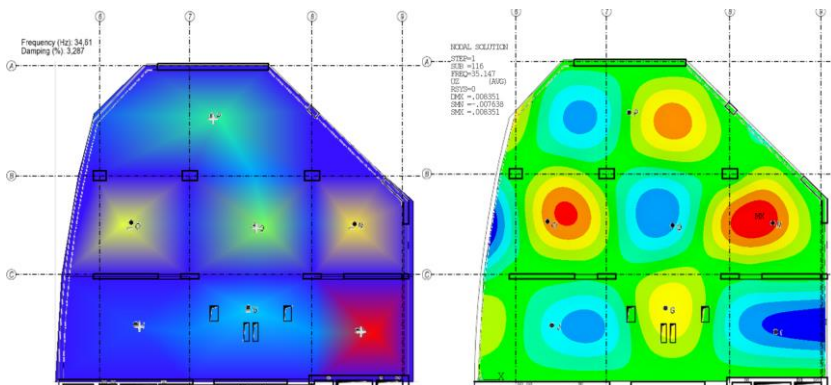
Druhý vlastný tvar vyťahčenej dosky z programu ModalVIEW a ANSYS



Tretí vlastný tvar vyťahčenej dosky z programu ModalVIEW a ANSYS



Štvrtý vlastný tvar vyľahčenej dosky z programu ModalVIEW a ANSYS



Porovnanie obrázkov vlastných tvarov vyľahčenej dosky získaných z experimentálnych meraní pomocou programu LabVIEW s obrázkami vlastných tvarov získaných pomocou programu ANSYS vykazuje veľmi dobrú zhodu, pričom sme našli zhodu až v štyroch vlastných tvaroch. Porovnaním hodnôt prvých vlastných frekvencií sme prišli tiež k dobrej zhode. Maximálny rozdiel medzi hodnotami numerického modelu v porovnaní s experimentálnymi meraniami bol v druhom vlastnom tvare 4.26 % , v prvom vlastnom tvare bol tento rozdiel iba 1.09%.

Vlastné frekvencie vyľahčenej dosky			
	Spektrum	ANSYS	Porovnanie
	odozvy		
	[Hz]	[Hz]	[%]
1	18.81	18.605	-1.09
2	23.35	22.356	-4.26
3	25.61	24.753	-3.35
4	34.228	35.147	2.68

9 Záver

V úvode dizertačnej práce sme si zhrnuli históriu využitia a predstavili v súčasnosti využívané typy vyľahčených dosiek. Cieľom tejto práce bola statická a dynamická analýza vyľahčených stropných dosiek. Vyľahčenie stropných dosiek môže viesť k úsporám na stropných konštrukciách a celej stavbe, čo bolo ukázané v kapitole o ekonomickom hľadisku dosiek typu Cobiax, kde bola finančná úspora na samotnej doske asi 8%, pričom ďalšie úspory vznikajú na zvislých konštrukciách a základoch pretože sú namáhané menším zaťažením. Potvrdili sme výhodu využitia vyľahčených stropných dosiek, nielen zo statického hľadiska, ale aj ekonomického. V krátkosti sme zhrnuli aj teoretické hľadisko výpočtu ohybovej odolnosti, šmykovej odolnosti a priehybov vyľahčených dosiek na základe noriem.

V dnešnej dobe sa prikladá veľký význam práve numerickým metódam výpočtu. V inžinierskej praxi sú využívané na analýzu konštrukcií softvéry pracujúce s metódou konečných prvkov, preto spôsoby modelovania vyľahčených stropných dosiek museli byť neoddeliteľnou súčasťou práce. Venovali sme sa modelovaniu vyľahčených dosiek v MKP programoch tromi rôznymi prístupmi: presné 3D modelovanie, redukovaný 2D model a roštový model. Najrýchlejší a pre prax najlepšie využiteľný je model redukovanej 2D dosky. Je však potrebné konštatovať, že výsledky priehybov a ohybových momentov vychádzali pre model redukovanej 2D dosky najmenšie.

Priehyby redukovanej 2D dosky boli pre modely do hrúbky 320 mm približne o 10% menšie v porovnaní s 3D modelom a roštovým modelom. Priehyby redukovanej 2D dosky modelov hrubších ako 320 mm boli v niektorých prípadoch až o 30% menšie ako priehyby dosiek 3D modelov a roštových modelov.

Ohybové momenty sme počítali iba pre dosku hrúbky 220 mm vyľahčenú rotačným elipsoidom výšky 120 mm a dosku hrúbky 400 mm vyľahčenú guľou priemeru 270 mm. Ohybové momenty vyľahčenej dosky hrúbky 220 mm vypočítané redukovaným modelom boli o približne 4 % menšie ako momenty vypočítané pomocou 3D modelu. Ohybové momenty vyľahčenej dosky hrúbky 400 mm vypočítané redukovaným modelom boli o približne 13% menšie ako momenty vypočítané pomocou 3D modelu.

Využitím modelovania vyľahčených dosiek pomocou redukovaného 2D modelu sa dopúšťame chyby, ako pri výpočte priehybov, tak pri výpočte vnútorných síl. Pre prax, by som odporučila navýšiť vnútorné sily vyľahčených dosiek vypočítaných redukovanými modelmi o 5%, pre dosky do hrúbky 320 mm a o 15% pre hrubšie dosky. Pri výpočte priehybov dosiek do hrúbky 320 mm redukovaným modelom je postačujúce priehyby zväčšiť o 10%, pre hrubšie dosky odporúčam navýšenie až o 30%, resp. použitie presnejšej metódy výpočtu.

Pri výpočtoch prvých vlastných frekvencií vyľahčených dosiek sme dospeli k záveru, že zjednodušené metódy výpočtu a model redukovanej dosky dávajú výbornú zhodu. Po porovnaní výsledkov prvých vlastných frekvencií dosiahnutých pomocou presného 3D modelovania a modelov redukovaných dosiek dospievame k záveru, že prvé vlastné frekvencie vyľahčených dosiek do hrúbky 320 mm majú veľmi blízko k hodnotám prvých vlastných frekvencií získaných z modelov redukovanej dosky, rozdiel menej ako 3%, pričom tieto frekvencie sú o 13 až 14% vyššie ako prvé vlastné frekvencie plných dosiek rovnakých rozmerov a okrajových podmienok. Prvé vlastné frekvencie hrubších dosiek majú bližšie k prvým vlastným frekvenciám plných dosiek.

Po analýze rázového zaťaženia vyľahčených dosiek môžeme konštatovať, že model redukovanej dosky dostatočne nevystihol veľkosť maximálnych premiestnení konštrukcie po náraze. Premiestnenia plnej dosky boli iba o 14% menšie v porovnaní s redukovanou doskou. Premiestnenia vyľahčenej dosky modelovanej pomocou 3D prvkov boli v porovnaní s plnou doskou

šesť až osemnásobne väčšie v závislosti od typu okrajových podmienok. Pre modelovanie účinkov rázového zaťaženia nie je dostatočné využitie modelu redukovanej dosky, je potrebná presnejšia numerická analýza.

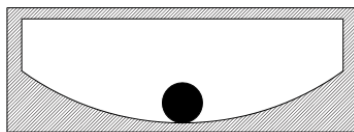
Experimentálnou analýzou sme preukázali, že rozdiely medzi prvými vlastnými frekvenciami plných a vyľahčených dosiek sa pohybujú v rozmedzí 10-15%. V prípade potreby získania presnejšej hodnoty frekvencií vyľahčených dosiek (napr. pre potrebu osadenia špeciálnej techniky) je potrebné vykonať experimentálne merania a v prípade nevyhovujúcich podmienok použiť jeden zo spôsobov úpravy frekvenčného spektra, ktoré sú spomínané nižšie.

9.1 Ďalší možný postup v problematike

Stavebné konštrukcie vystavované vonkajším dynamickým vplyvom často vykazujú nadmerné výchylky, ktoré je potrebné utlmiť. Štandardne môžeme na utlmenie výkyvov využiť zvýšenie pevnosti materiálov, resp. zväčšenie priečných rezov jednotlivých prvkov konštrukcie. Tieto postupy, však nie sú ekonomicky príliš výhodné, predovšetkým pri stavbách umiestnených v seizmicky aktívnych oblastiach resp. pri vysokých budovách vystavených silným účinkom vetra. Alternatívnym a lacnejším riešením v takýchto prípadoch môže byť využitie guľových eliminátorov kmitania.

Guľové eliminátory kmitania, už boli úspešne realizované na niekoľkých konštrukciách v Českej republike. Systém guľových pohlcovačov bol navrhnutý na tlenie horizontálnych kmitov lávky pre peších s rozpätím 252 m cez Vranovskú priehradu. Prototyp úspešne vyskúšali v laboratóriách Ústavu teoretickej a aplikovanej mechaniky Akadémie vied Českej republiky, jeho inštalácia sa však po zrealizovaní stavby neukázala ako potrebná. Bol však úspešne použitý na dvoch televíznych vežiach výšky 70 m (Svatobor – Sušice a Barák – Klatovy, oceľové konštrukcie na betónovej spodnej stavbe), kde nahradil kyvadlový tlmíč. Na vrchol veže bol osadený tlmíč s guľou o hmotnosti 870 kg. Taktiež bol systém guľových eliminátorov umiestnený na vrchol oceľovej zvonice u Jákovova žebříku v Prahe, kde bol využitý na obmedzenie torzných kmitov veže.

Využitím guľových tlmíčov vo vyľahčených železobetónových doskách sa zaoberali v roku 2015 na Wuhan Univerzity v Číne. Skúmali účinky rozloženia tlmíčov v 6-podlažnej budove, pričom tlmíče boli uvažované ako gule ukladané vo vyľahčeniach stropnej dosky, ktoré mali guľový povrch.



T tejto problematike sme sa začali venovať v článku „Guľové eliminátory a ich využitie vo vyľahčených doskách“, ktorý bol publikovaný na konferencii v októbri 2016. Pre krátkosť času sa

nám ju, však nepodarilo dopracovať. Táto téma je veľmi aktuálna a bola by vhodným pokračovaním, resp. nadviazaním na dizertačnú prácu.

10 Použitá literatúra¹

Cobiax, „<http://www.cobiax.com/home>“, 2017.

Tvrdá, K., Dický, J., „Analysis of sensitivity coefficients in evolutionary structural optimization“, *Modelování v mechanice*, pp. 225-230, 10. február 2005.

Harris, J.W., Stocker, H., *Handbook of Mathematics and Computational Science*, New York: Springer, 1998.

M. Smutek, „Vylahčované dutinové železobetónové stropné dosky“, *Stavebné materiály*, %1. vyd.10/210, 2010.

Murin, J., Hrabovský, J., Kutiš, V., *Metóda konečných prvkov - Vybrané state pre mechatronikov*, Bratislava: Vydavateľstvo STU, ISBN 978-80-227-4298-6, 2014.

ANSYS, *Ansys Users Manual*.

Kotrásová, K., Kormaníková E., „Frequency analysis of the base plate on Winkler subsoil model“, *Pozemné komunikácie a dráhy*, Zv. 1 z 21-2/2010-6, 1. vyd.ISSN 1336-7501, 2010.

Wang, E., Nelson, T., „Structural dynamic capabilities of ANSYS“, CADFEM GmbH, Munich, Germany, 2002.

Sokol, M., Tvrdá, K., *Dynamika stavebných konštrukcií*, Bratislava : Vydavateľstvo STU, ISBN 978-80-227-3587-2, 2011.

Kuchárová, D., Melcer, J., *Dynamika stavebných konštrukcií*, Žilina : EDIS ŽU, ISBN 80-7100-779-1, 2000.

Š. Benča, „Výpočtové postupy MKP pri riešení lineárnych úloh mechaniky“, STU Bratislava, Bratislava, 2006.

Sokol M., Venglár M., „System identification of a composite beam“, *Pollack Periodica*, %1. vyd.Vol 12, No. 2 (v tlači), 2017.

D. Ewins, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, 2nd Ed, Baldock England: Research Studies Press.

¹ Kompletný zoznam použitej literatúry sa nachádza v dizertačnej práci

A. Barrett, Dynamic testing of In-Situ Composite Floors and Evaluation of Vibration Serviceability Using the Finite Element Method, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.

A. Bilošová, Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktéra a vývojáru: část Modální zkoušky, Ostarva: Fakulta Strojní VŠB-TU Ostrava, 2012.

Venglar, M., Sokol, M., Aroch, R., Budaj, J., „Initial Experimental Test of the Port Bridge for Structural Health Monitoring,“ *Applied Mechanics and Materials*, %1. vyd.Vol. 837, pp. 135-139, 2016.

Fischer, O., Pirner, M., „Návrh na omezení kmitu štíhlé ocelové zvonice,“ rev. *Inženýrská mechanika*, Svratka, Česká republika, 2002.

Shujin, L. Liming, F., Fan, K., „Seismic response reduction of structures equipped with a voided biaxial slab- Based tuned rolling mass damper,“ *Shock and vibrations, Hindawi Publishing Corporation*, %1. vyd.760394, 2015.

11 Publikačná činnosť autora

Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

JENDŽELOVSKÝ, Norbert – ZABÁKOVÁ VRÁBLOVÁ, Kristína. Ananalysis of Naural Frequencies of Biaxial Voided Concrete Slabs. In *Key Engineering Materials: Static and Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Structures*. Vol 738, (2017), s.15-24. ISSN 1013-9826.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

VRÁBLOVÁ, Kristína. Consideration of Boundary Conditions During Impact Loading of Slab = Uváženie podopretia pri rázovom zaťažení dosky. In *Juniorstav 2015 : 17. odborná konferencia doktorského studia. Brno, ČR, 29. 1. 2015 [elektronický zdroj]*. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2015, CD-ROM, [6] s. ISBN 978-80-214-5091-2.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - VRÁBLOVÁ, Kristína. Impact Loading of Concrete Slabs. In *Applied Mechanics and Materials : 6th International Scientific Conference on Dynamic of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering, DYN-WIND 2014, Donovaly, SR, 25. - 29. 5. 2014*. Vol. 617, (2014), s. 100-103. ISSN 1660-9336. v databáze SCOPUS

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - VRÁBLOVÁ, Kristína. Výpočet vlastných frekvencií vyľahčených dosiek. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : proceedings of*

12th International Conference. Bratislava, SR, 16. - 17. 10. 2014. 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014, CD ROM, [4] s. ISBN 978-80-227-4259-7.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - VRÁBLOVÁ, Kristína. Modelovanie vyľahčených dosiek v programe ANSYS. In *22nd SVSFEM ANSYS Users' Group Meeting and Conference 2014 [elektronický zdroj] : proceedings, Jasná, SR, 25. - 27. 6. 2014.* Brno : SVS FEM, 2014, online, s. 158-164. ISBN 978-80-905525-1-7.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - VRÁBLOVÁ, Kristína. Comparison of Natural Frequencies of Hollow Core Slabs. In *Applied Mechanics and Materials : Trends in Statics and Dynamic of Construction - selected, peer reviewed papers from the 12th International Conference, Bratislava, SR, 16. - 17. 10. 2014.* Vol. 769, (2015), s. 225-228. ISSN 1660-9336.

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - ZABÁKOVÁ VRÁBLOVÁ, Kristína. Analýza vlastných frekvencií vyľahčených železobetónových dosiek. In *Betonárske dni 2016 : zborník príspevkov. Bratislava, SR, 20. - 21. 10. 2016.* 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016, S. 297-300. ISBN 978-80-227-4622-9.

VRÁBLOVÁ, Kristína. Výpočet trhlín v kruhových nádržiach. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings : proceedings of 11th International Conference. Bratislava, SR, 3. - 4. 10. 2013.* 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology, 2013, s.247-250. ISBN 978-80-227-4040-1.

VRÁBLOVÁ, Kristína - JENDŽELOVSKÝ, Norbert. Analysis of Concrete Slabs under Impact Load. In *Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering DYN-WIND 2014 : proceedings of the 6th International Scientific Conference. Donovaly, SR, 26. - 29. 5. 2014.* 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita, 2014, S. 337-341. ISBN 978-80-554-0844-6.

VRÁBLOVÁ, Kristína. Porovnanie modelov plnej a vyľahčenej dosky. In *Advances in architectural, civil and environmental engineering [elektronický zdroj] : 24rd Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics.* 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014, CD-ROM, s. 136-140. ISBN 978-80-227-4301-3.

ZABÁKOVÁ VRÁBLOVÁ, Kristína - JENDŽELOVSKÝ, Norbert - KONEČNÁ, Lenka. Experimentálne overenie výpočtu prvej vlastnej frekvencie dosky z plexiskla. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : proceedings of 13th International Conference. Bratislava, Slovakia, 15. - 16. 10. 2015.* 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2015, CD-ROM, [4] s. ISBN 978-80-227-4463-8.

ZABÁKOVÁ VRÁBLOVÁ, Kristína. Experimentálna a numerická analýza dosky z plexiskla. In *Advances in architectural, civil and environmental engineering [elektronický zdroj] : 25rd Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics. Bratislava, SR, 28. 10. 2015.* 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015, CD-ROM, s. 150-154. ISBN 978-80-227-4514-7.

ZABÁKOVÁ VRÁBLOVÁ, Kristína - JENDŽELOVSKÝ, Norbert - KONEČNÁ, Lenka. Analysis of the Natural Frequencies of a Plexiglass Plate. In *Applied Mechanics and Materials [elektronický zdroj] : Trends in Statics and Dynamics of Construction II. Selected, peer reviewed papers from the 13th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings, Bratislava, SR, 15. - 16. 10. 2015.* Vol. 837, (2016), CD-ROM, s. 187-190. ISSN 1660-9336.

ZABÁKOVÁ VRÁBLOVÁ, Kristína. Guľové eliminátory a ich využitie vo vyľahčených doskách. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 26th Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics.* 26. October 2016, Bratislava. 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016, CD-ROM, s. 134-138. ISBN 978-80-227-4645-8.