VPLYV DYNAMICKÉHO A ÚNAVOVÉHO ZAŤAŽENIA NA PREDPÄTÉ BETÓNOVÉ PODVALY

DYNAMIC AND FATIGUE LOAD EFFECTS TO PRESTRESSED CONCRETE SLEEPERS

MILAN MORAVČÍK,
MARTIN MORAVČÍK

Článok sa zaoberá experimentálnou analýzou spoľahlivosti predpätých betónových podvalov zaťažovaných bežným dynamickým ako aj vysokocyklickým zaťažením. Dôvodom takýchto skúšok je overovanie spoľahlivosti starších existujúcich typov podvalov a analýza novších typov podvalov určených pre vyššie prevádzkové rýchlosti.

The experimental analysis of prestressed concrete sleepers is presented in this paper. Dynamical and fatigue loading tests were applied to verify the concrete sleepers reliability. The major reason of such experiments was to analyse existing older types of sleepers and new type ones utilisation for higher service speed.

Predpäté betónové podvaly spolu s koľajovými pásmi tvoria základnú nosnú konštrukciu železničnej trate – koľajový rošt, v ktorom podvaly počas predpokladanej životnosti 40 rokov sú vystavené intenzívnemu dynamickému namáhaniu a zložitým interakčným silám, ako zo strany podložia, tak aj zo stravy pružného upevnenia koľajnice. Všetky tieto vplyvy, ale aj súčasné nároky kladené na celkovú vysokú spoľahlivosť konštrukcie trate, najmä vzhľadom k zvýšeným prevádzkovým rýchlostiam do 200 km/h, vyžadujú vysokú funkčnosť, odolnosť na preťažovanie a spoľahlivosť týchto prvkov.

V problematike spoľahlivosti predpätých betónových podvalov, ako nosných prvkov koľajového roštu, vystupujú v súčasnosti do popredia viaceré aktuálne otázky:

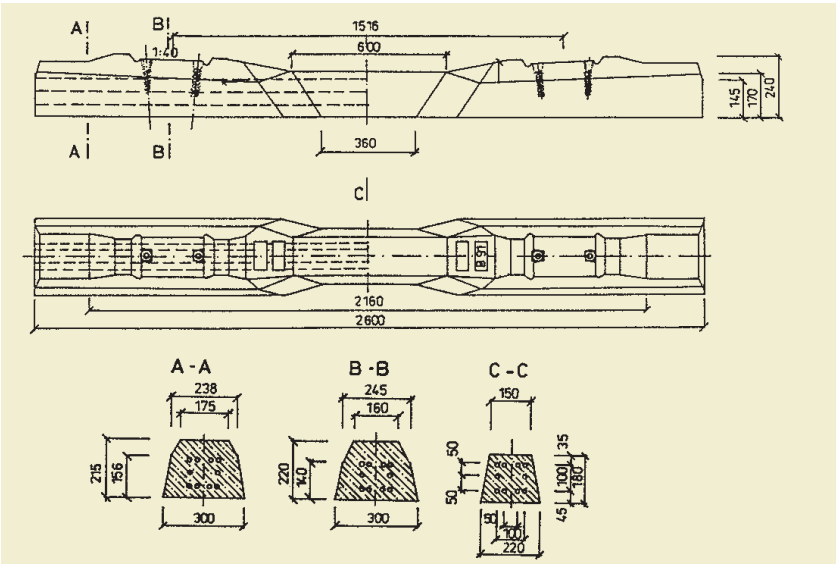
- Do akej miery je splnená požiadavka predpokladanej vysokej 40 ročnej životnosti podvalov.
- Aká je možnosť ďalšieho spoľahlivého využívania starších typov betónových podvalov vyrábaných a osadzovaných do trate pred 15 až 25 rokmi, a ktoré v súčasnosti vykazujú rôzne typy poškodenia.
- Podmienky zaistenia vysokej kvality, únosnosti a životnosti betónových podvalov novej generácie pre priame upevnenie koľajnicových pásov pružnými systémami.

Všetky tieto dôvody viedli k tomu, že problematikou spoľahlivosti predpätých betónových podvalov sa na našom pracovisku komplexne zaoberáme už cca 15 rokov a to v teoretickej oblasti, ale najmä experimentálnym výskumom hodnotenia zložitých dynamických účinkov na predpäté betónové podvaly, a testovaním ich mechanických a úžitkových vlastností.

ZÁKLADNÝ POPIS SKÚMANÝCH PODVALOV

Vzhľadom k vysokej stabilite a spoľahlivosti koľajového roštu vývoj betónových podvalov, smeruje, najmä pre vysokorýchlostné koridory, k ich zvýšenej hmotnosti a vysokej odolnosti na vznik trhlín. Zhromažďovanie poznatkov z prevádzkovania podvalov, ale aj testovania ich únosnosti v dynamickom režime zaťažovania, viedlo k rôznym konštrukčným a tvarovým úpravám betónových podvalov, ktoré vyústili do návrhu a výroby predpätého betónového podvalu typu BP-3. V súčasnosti je v tratiach ŽSR osadených a využívaných viacero typov predpätých betónových podvalov, napr. podvaly rady SB a BP.

Podvaly rady SB sú typickým predstaviteľom staršej generácie predpätých betónových podvalov, vyrábaných od roku 1970. Podval je navrhnutý na zaťaženie nápravovou silou $P_n = 250$ kN, a rýchlosť 140 km/h. Upevnenie koľajníc k podvalu je podkladnicové, štyrmi upevňovacími skrutkami zatáčanými do zabetónovaných plastických vložiek.



Obr. 1 Predpätý betónový podval typu BP-3
Fig. 1 Prestressed concrete sleepers BP-3

Tab. 1 Charakteristiky základných typov predpätých betónových podvalov
Tab. 1 The basic characteristics of prestressed concrete sleepers

Typ podvalu	Hmotnosť [kg]	Dĺžka [m]	Predpínacia výstuž	Predpínacia sila [kN]		Betón triedy
				kotevná	základná	
SB8	270	2,42	40 ϕ 3	337	281	B50
BP-3	305	2,60	10 ϕ 6	350	330	B55

Podvaly rady BP (obr. 1), sú predstaviteľom novej generácie predpätých betónových podvalov vyrábaných od r. 1994 a používané sú v rekonštruovaných trati-

Tab. 2 Teoretické hodnoty ohybových momentov ^{T}M a zaťaženia ^{T}P podvalu v jeho charakteristických prierezoch pri zaťažení podľa obr. 2
Tab. 2 Theoretical values of bending moments ^{T}M and load ^{T}P of sleepers in its characteristic sections for loading scheme according to Fig. 2

Typ podvalu	Prierez podvalu							
	pod koľajnicou „k"				stred podvalu „s"			
	$^{c}M_k$ [kNm]	$^{c}P_k$ [kN]	$^{u}M_k$ [kNm]	$^{u}P_k$ [kN]	$^{c}M_s$ [kNm]	$^{c}P_s$ [kN]	$^{u}M_s$ [kNm]	$^{u}P_s$ [kN]
SB8	20,41	148,40	35,11	255,30	-14,29	63,50	-25,35	112,50
BP-3	23,87	173,6	40,64	295,60	-17,08	75,90	-30,41	135,20

ach a rýchlostných koridoroch. Navrhnuté sú na zaťaženie nápravovou silou P_n = 240 kN, a rýchlosť do 200 km/h s priamym upevnením koľajníc pomocou dvoch skrutiek.

Teoreticky vypočítané hodnoty ohybových momentov podvalu v charakteristických prierezoch pod koľajnicou (*k*) a v strede podvalu (*s*) na medzi vzniku prvej trhliny $^{c}M_k$ a $^{c}M_s$ a momentov na medzi únosnosti v týchto prierezoch $^{u}M_k$ $^{u}M_s$ sú zostavené v tab. 2.

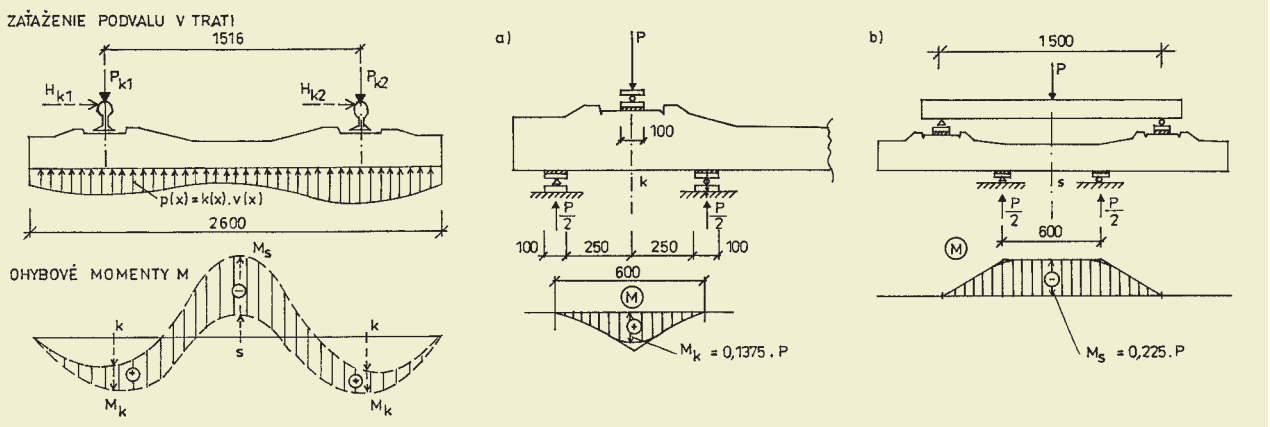
ZÁKLADNÉ SKÚŠKY STATICKEJ A DYNAMICKEJ ÚNOSNOSTI PODVALOV

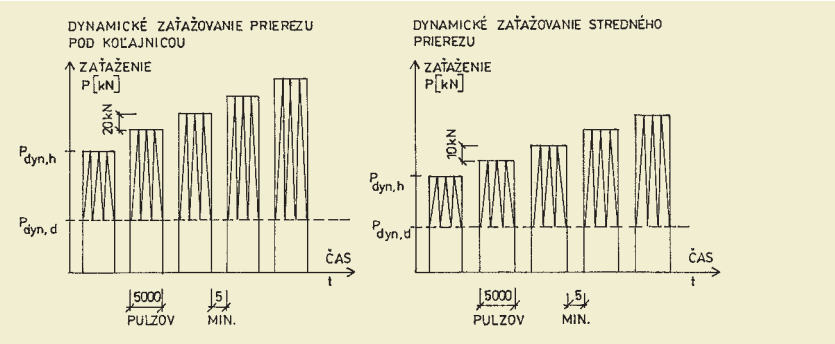
Testovanie návrhom predpokladanej únosnosti podvalov sa preukazuje základnými skúškami ich statickej a dynamickej únosnosti, ale aj únavovej odolnosti, ktoré sú stanovené jednotným skušobným postupom podľa smerníc ERRI [1] – v statickej schéme podľa obr. 2.

SKÚŠKY STATICKEJ ÚNOSNOSTI

Podvaly sú zaťažované staticky s prírastkom zaťaženia po ΔP^{sk} = 20 kN, resp. ΔP^{sk} = 10 kN. Po ustálení zaťaženia sa hodnotí odozva podvalu – rozvoj trhlín, šírka hlavnej trhliny a charakter poškodenia betónu podvalu. Výsledky skúšok statickej únosnosti preukazujú odolnosť podvalu na vznik trhlín v priereze pod koľajnicou a v strede podvalu a únosnosť podvalu v týchto prierezoch. Odozva podvalu na statické zaťažovanie má vždy charakteristický priebeh. Na hladinách zaťaženia v oblasti $1{,}5\ ^{c}P > P^{sk} > {}^{c}P$ možno odozvu charakterizovať ako stabilnú, s postupným rozvojom trhlín do tlačenej oblasti betónu a ich úplným uzatváraním. Na hladinách zaťaženia v oblasti $2\ ^{c}P > P^{sk} > 1{,}5\ ^{c}P$ odozva ma intenzívny charakter – nastáva postupné pretváranie spodného radu ťahanej výstuže a trhliny sa po odťažení neuzatvárajú. Na vysokých hladinách zaťaženia v oblasti $P^{sk} > 2\ ^{c}P$ prebieha už intenzívna plastizácia ťahanej výstuže, ale aj postupné drvenie v tlačenom betóne. V prierezoch pod koľajnicou (*k*) nastáva porušenie obyčajne pretrhnutím spodnej rady predpínacej výstuže, resp. v kombinácií so šmykovým porušením betónu pri podperách. Strata únosnosti podvalu v strednej časti nastáva obyčajne porušením tlačeného betónu, alebo v kombinácií so šmykovým porušením betónu. Výsledky skúšok statickej únosnosti vykazujú vždy dobrú zhodu s výsledkami teoretického riešenia, keď sú dodržané predpísané technologické postupy výroby predpätého betónu a splnené podmienky kvality materiálov.

Obr. 2 Schéma zaťaženia a namáhania podvalu v trati a pri skúške
Fig. 2 The loading schemes of sleepers in the real railway track and in the tests





Obr. 3 Schéma zaťažovacích diagramov pre testovanie prierezu pod koľajnicou a stredného prierezu podvalu
Fig. 3 Loading schemes for cross-section testing – under rail seat and in the middle cross-section

Obr. 4 Porušenia podvalov typickými ohybovými trhlinami pri dynamickom zaťažovaní
Fig. 4 Sleepers failures by typical bending cracks under dynamic loading

Tab. 3 Výsledky skúšok dynamickej únosnosti podvalov
Tab. 3 The results of sleepers dynamic capacity tests

Typ podvalu	${}^{c}\overline{P}_k^{sk}$ [kN]	σ_P [kN]	${}^{c}\overline{M}_k^{sk}$ [kNm]	σ_M [kNm]	${}^{U}\overline{P}_k^{sk}$ [kN]	σ_P [kN]	${}^{U}\overline{M}_k^{sk}$ [kNm]	σ_M [kNm]
Prierez podvalu nad koľajnicou („k")								
SB8	205	22	28,2	3,0	380	28	53,6	3,8
BP-3	224	28	30,8	3,8	420	35	57,7	4,8
Stredný prierez podvalu („s")								
SB 8	78	10	-17,5	-2,2	130	15	-29,2	-3,8
BP-3	90	13	-20,2	-3,4	140	18	-31,5	-4,1

skúšky sa vykonávajú v rovnakom usporiadaní ako statické alebo dynamické skúšky. Charakteristické prierezy sa zaťažujú počtom 2.10^6 cyklov zaťaženia na hladine zaťaženia, napr. pre prierez pod koľajnicou (k):

$$\frac{P_{k,dyn,h}}{P_{k,dyn,d}} = \frac{1,3 \cdot P_k^{\dim}}{0,2 \cdot P_k^{\dim}} \qquad (1)$$

Výsledok skúšky musí potvrdiť, že šírka trhliny po aplikácií 2.10^6 cyklov dynamického zaťaženia je stabilná. Skúšky únavovej odolnosti podvalov typu BP-3 spĺňajú tento predpoklad, čo potvrdzujú skúšky a ohybová trhlina sa vôbec nevytvorí, alebo je počas celého zaťažovacieho cyklu stabilná.

Ako už bolo konštatované v úvode, jednou z ďalších úloh hodnotenia funkčnosti a spoľahlivosti podvalov je testovanie exploatovaných podvalov s rôznymi typmi porúch a poškodení, ktoré sa vyskytli v prevádzkových podmienkach. Ide najmä o poškodenie trhlinami v typických prierezoch podvalu a o poškodzovanie betónu z preťaženia v okolí upevňovadiel. Typické časté poškodenie podvalov trhlinami je ukázané na obr. 4.

VYSOKOCYKLICKÉ ZAŤAŽENIE – ÚNAVOVÉ SKÚŠKY PODVALOV

Usporiadanie testov a skúšok na dynamické vysokocyklické zaťaženie je rovnaké ako pri základných skúškach únosnosti podvalov.

Prakticky najdôležitejší prípad hodnotenia spoľahlivosti podvalov je prípad náhodného jednorázového preťaženia podvalu, dôsledkom čoho je vznik ohybovej trhliny v priereze pod koľajnicou alebo v strednej časti podvalu, a následné vysokocyklické zaťažovanie na zvolených hladinách dynamického zaťaženia. Ide teda o hodnotenie vplyvu dynamického vysokocyklického zaťaženia na zvolených hladinách. Týmito skúškami sa hodnotí:

- Vplyv ohybového namáhania podvalu pri vysokocyklickom zaťažovaní na hladinách zaťaženia pre max $M_{k,dyn}^{sk} \le {}^{c}M_k$ v priereze (k) pod koľajnicou, kde ${}^{c}M_k$ je moment vzniku prvej trhliny.
- Vplyv ohybového namáhania podvalu pri vysokocyklickom zaťažovaní na hladinách max. $M_{k,dyn}^{sk} \ge {}^{c}M_k$, pre max. $M_{k,dyn}^{sk} = (1,1 - 1,5)\ {}^{c}M_k$.

Charakteristické výsledky únavovej odolnosti testovaných betónových podvalov BP-3 v priereze pod koľajnicou ako aj tvar porušenia podvalov sú zhrnuté v tab. 4.

Všetky skúsenosti a testy predpätých betónových podvalov na vysokocyklické zaťažovanie potvrdzujú, že pre opakované dynamické namáhanie betónu na hladinách *max.* $M_k^{sk} < {}^{c}M^{sk}$ sa únavové porušenie betónu nevyskytuje.

Pri prakticky najdôležitejšom prípade podvalu poškodeného trhlinou (inak plne funkčného) sa pri únavovom namáhaní poškodenie kumuluje v oblasti hlavnej ohybovej trhliny a najmä v predpätej výstuži vo vytvorenej trhline. Hlavné indikátory poškodenia sú šírka trhliny w_{tr} a priehyb f podvalu ako prejavy poškodenia na makroskopickej úrovni. V závislosti na počte cyklov zaťaženia sa sledujú najmä:

- priehyby charakteristických miest podvalu f_k, resp. f_s,
- šírka trhlín w_{tr}, vznik a rozvoj voľných trhlín,
- pretvorenie tlačeného betónu e_b,
- posunutia predpätej výstuže na hlavách podvalu.

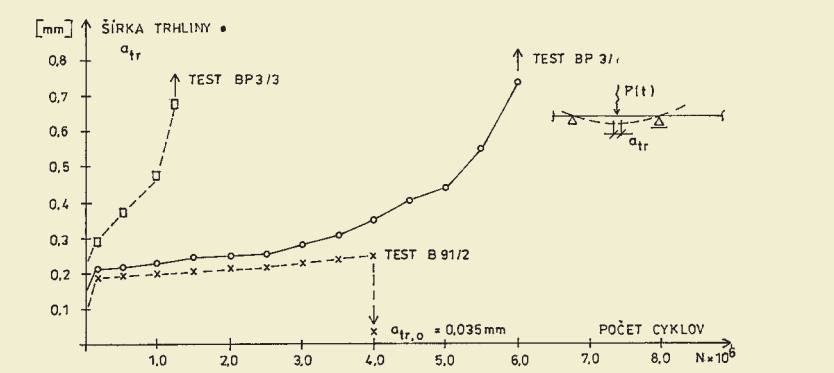
Obr. 5 ukazuje typické závislosti rastu šírky trhliny w_{tr} v závislosti na počte cyklov zaťaženia N pri vysokocyklickom zaťažovaní predpätých podvalov.

Pri riešení praktických úloh hodnotenia funkčnosti a spoľahlivosti ďalšieho využívania prevádzkovaných podvalov poškodených ohybovými trhlinami sa ukazuje dostatočne spoľahlivé overenie únosnosti v dynamickom režime zaťaženia na predpokladanej prevádzkovej hladine $P_{dyn,h}^{sk} / P_{dyn,d}^{sk}$ do počtu $N = 2.10^6$ cyklov zaťaženia.

Tab. 4 Výsledky únavových skúšok predpätých betónových podvalov typu BP v priereze pod koľajnicou
Tab. 4 The results of fatigue tests of prestressed concrete sleepers BP for cross-section under rail seat

Podval/ test č.	Statická trhlina		Dynamické zaťažovanie $P_{dyn,h}$ / $P_{dyn,d}$	Počet cyklov x 10^6	Typ porušenia
	^cP_k [kN]	^cM_k [kNm]			
BP-3/1	220	30,2	260/40	6,1	A
BP-3/2	230	31,6	240/50	4,0	0
BP-3/3	220	30,2	300/60	1,4	A, B
BP-3/4	230	31,6	230/20	2,5	0

Typ porušenia: A – pretrhnutie výstuže, B – Porušenie betónu v tlaku (šmyku)



Obr. 5 Vývoj šírky ohybovej trhliny w_{tr} v závislosti na počte cyklov zaťaženia
Fig. 5 The width of bending crack w_{tr} development in relation to loading cycles number

ZÁVER

Návrhom predpokladaná funkčnosť a spoľahlivosť predpätých betónových podvalov úzko súvisí s hladinami dynamického zaťažovania v prevádzkových podmienkach. Na základe veľkého počtu experimentálnych meraní na podvaloch priamo v prevádzkových podmienkach, ale aj v presne definovaných laboratórnych podmienkach možno konštatovať:

Indikátory poškodenia podvalu – šírka trhliny w_{tr} a priehyb f dávajú dobrý obraz o kumulácií poškodení na makroúrovni.

Ohybové namáhanie podvalu v extrémne namáhaných prierezoch pod koľajnicou a v strede vyvodzujúce *max.* $M < {}^cM$ nespôsobuje únavové porušenie podvalu.

Dynamické namáhanie podvalu už poškodeného ohybovými trhlinami v extrémne namáhaných prierezoch spôsobuje únavu najmä predpätej výstuže, pričom únavové poškodenie závisí na hladine a rozkmite dynamického namáhania:

- Dynamické zaťaženie vyvodzujúce *max.* $M < 1{,}1\ {}^cM$ spôsobuje únavu výstuže, ale vzhľadom na relatívne nízke hladiny zaťaženia nespôsobuje ešte únavové porušenie podvalu.
- Dynamické zaťaženie podvalu vyvodzujúce jeho ohybové namáhanie na hladinách *max.* $M > 1{,}1\ {}^cM$ spôsobuje únavové poškodenie, ktoré sa vždy kumuluje vo vytvorenej ohybovej trhline a v závislosti na hladine dynamického zaťaženia spôsobuje únavové porušenie podvalu. Únavové porušenie nastalo vždy pretrhnutím spodného radu predpätej výstuže.
- Dynamické zaťaženie podvalu vyvodzujúce jeho ohybové namáhanie na vysokých hladinách *max.* $M > 1{,}5\ {}^cM$ spôsobuje intenzívne poškodzovanie podvalu, ktoré sa prejavuje rýchlou únavou predpätej výstuže, a stratou súdržnosti betónu a výstuže.
- Namáhanie podvalu na hladinách zaťaženia vyvodzujúceho ohybové momenty ${}^cM < max.\ M << {}^uM$ nastáva porušenie podvalu porušením predpínacej výstuže, často v kombinácií so šmykovým zlyhaním betónu a stratou súdržnosti výstuže a betónu.

Obr. 6 Deštrukcia podvalu po vysokocyklickom zaťažovaní
Fig. 6 The destruction shape of concrete sleepers under fatigue loading

- Pre zaťaženie podvalu vyvodzujúce ohybové namáhanie ${}^cM < max.\ M << {}^uM$ sa potvrdila spoľahlivá funkcia tlačeného betónu, ako aj súdržnosť výstuže s betónom. Únava betónu bola pozorovaná pre vysoké hladiny zaťaženia, pri *max.* $M > 1{,}5\ {}^cM$.

Literatura

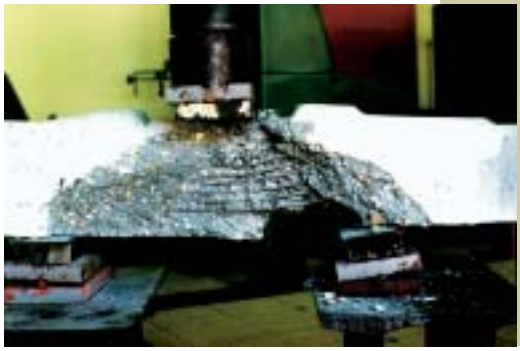
[1] *ERRI Reports – Question D 170:* Current test methods and load for fastening systems and concrete sleepers

[2] *Správy pre ŽSR:* Posúdenie statickej a dynamickej únosnosti podvalov SB8, BP2, BP3, BPN, B91, PB3. Žilinská univerzita 1990–2000

[3] *Správy pre ŽSR:* Hodnotenie funkčnosti a spoľahlivosti systémov pružného upevnenia na podvaloch. Žilinská univerzita 1994–2000

[4] *Moravčík M.:* Reliability analysis of structure under repeated load, Proc. TESE 1987, str. 267-272

[5] *Moravčík M., Moravčík M.:* Fatigue resistance of prestressed concrete sleepers. Proc. Dynamic Behaviour of Concrete Structures, RILEM Exprescentrum Bratislava 1995, p.181–186

[6] *Moravčík M.:* Vysokocyklické namáhanie predpätého betónu. Zb. Degradácia vlastnosti konštrukčných materiálov. VŠDS Žilina 1993, s.152–157

Prof. Ing. Milan Moravčík, Ph.D.
Katedra mechaniky
tel.: +421 41 7634 8189
Ing. Martin Moravčík, Ph.D.
Katedra stavebných konštrukcií a mostov
tel.: +421-41-7241868
martin@fstav.utc.sk
oba: Stavebná fakulta, Žilinská univerzita
Komenského 52, 010 26 Žilina
Slovenská republika