

Petr PÁNEK<sup>1</sup>, Ludvík VÉBR<sup>2</sup>

## ÚNAVOVÁ ÚNOSNOST CEMENTOBETONOVÝCH DESEK

### ON FATIGUE RESISTANCE OF PAVEMENT CONCRETE SLABS

#### Abstrakt

Článek shrnuje výsledky testování sedmi cementobetonových desek uložených na vrstvě z nestmeleného materiálu a zatěžovaných ve zkušební boxu. Výzkumný projekt byl zaměřen na ověření předpokladu, že únavová odolnost cementobetonových desek je mnohem větší než ta, která je stanovena ze zkoušek na betonových trámečcích. Získané výsledky potvrzují zvýšenou únavovou odolnost cementobetonových desek proti únavě. To má významný vliv pro návrh cementobetonové vozovky.

#### Klíčová slova

Experiment, CB deska, vozovka, únava.

#### Abstract

The paper summarizes results of pilot testing of seven concrete slabs resting on granular base in testing box. The experimental project was intended to verify recent findings that fatigue resistance of concrete slabs is much higher than that predicted using concrete flexural characteristics derived from concrete beam testing. Results obtained confirm enhanced fatigue resistance of concrete slabs with (possible) far reaching consequences for concrete pavement design.

#### Keywords

Experiment, CC slab, pavement, fatigue.

## 1 ÚVOD

V tomto článku je věnována pozornost únavovým trhlinkám v cementobetonových deskách vozovek [1], které představují klíčový „selhávací mechanismus“ z komplexního procesu exploatace vozovky (vozovky jsou vystaveny rozkmitům napětí odpovídajícím proměnnému dopravnímu zatížení vlivu proměnných teplotních a vlhkostních gradientů). Za účelem vývoje návrhové metody pro prosté CB desky spojené ve svých spárách trny, sestavili Darter a Barenberg [2] výsledky únavových testů prováděných na trámečcích do rovnice:

$$\log N_{lim} = 17.61 \times \left( 1 - \frac{\sigma}{f_{fl, beam}} \right) \quad (1)$$

kde  $N_{lim}$  je počet opakování zatížení do porušení,  $\sigma$  je maximální hodnota ohybového napětí,  $f_{fl, beam}$  je hodnota pevnosti v tahu za ohybu stanovena na nosníkových vzorcích. Tato únavová rovnice předpovídá dovolený počet zatěžovacích cyklů s padesátiprocentní pravděpodobností. Roeslerovy

---

<sup>1</sup> Ing. Petr Pánek, Ph.D., Katedra silničních staveb, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice, tel.: (+420) 224 354 418, e-mail: petr.panek@fsv.cvut.cz.

<sup>2</sup> Doc. Ing. Ludvík Vébr, CSc., Katedra silničních staveb, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice, tel.: (+420) 224 354 421, e-mail: vebr@fsv.cvut.cz.

(2005) únavové testy prováděné na deskách [3], potvrdily předchozí předpoklady, že CB deska vykazuje větší únavovou odolnost, než je ta předpovídaná únavovými křivkami získanými z trámečků. Hlavním důvodem tohoto rozporu bylo nesprávné uvažování statické pevnosti desky získané pomocí ohybové pevnosti na trámečcích. Z výsledků testů vyplynulo, že ohybová pevnost desky byla přibližně 2.8krát vyšší než ta stanovená na trámečcích. Proto byla rovnice únavy přepsána do následujícího tvaru:

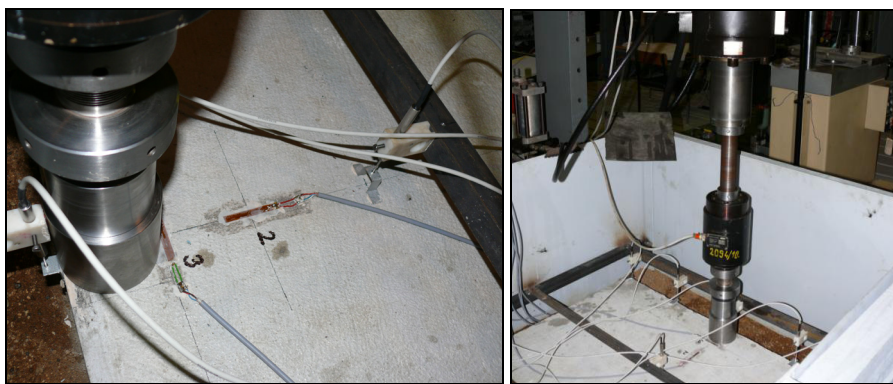
$$\log N_{lim} = 17.61 \times \left( 1 - \frac{\sigma}{\kappa f_{fl,beam}} \right) \quad (2)$$

$\kappa$  je faktor “zvětšení únavového odporu desky” a je roven 2.8. Cílem našeho současného výzkumu bylo připravit a provést experiment, který by ověřil informace o zvýšené únavové odolnosti CB desek.

## 2 ZKOUŠENÍ CB DESEK

K ověření efektu zvýšené únavové odolnosti cementobetonových desek, bylo v rámci tohoto výzkumu testováno celkem osm desek. Rozměry desek byly 1.1 m x 1.4 m, sedm desek (zde uvedených) bylo tloušťky 10cm. Desky byly vybetonovány v dřevěných formách a po řádném vytvrdnutí byly následně uloženy na vrstvu šterkopísku ve zkušebním dřevoocelovém boxu (modul přetvárnosti šterkopísku  $E_{def,2} \approx 60$  MPa). Desky byly osazeny tenzometry a snímači posunů.

Zatížení bylo přenášeno na desku pomocí hydraulického lisu s dosedací kruhovou plochou o průměru 10cm. Pro prvních pět desek byla zvolena středová pozice zatížení na příčné hraně desky (obr. 1), zatím co pro desky č. 6 a č. 7 byla pozice zatížení zvolena ve středu podélné hrany. Z technických důvodů musela být zavedena zrychlená frekvence zatěžování, která se pohybovala mezi 4.5 Hz až 7.2 Hz.



Obr. 1: Zatěžování CB desky ve zkušebním boxu

Výsledkem složení cementového betonu na 1 m<sup>3</sup>: cement 390 kg, voda 190 kg, kamenivo 1785 kg (drobné kamenivo 0-4: 830 kg, hrubé kamenivo 8-16: 955 kg), byly následující mechanické vlastnosti (ohybová pevnost byla stanovena jako 0.10 – 0.15  $f_c$ ):

pevnost v tlaku:	$f_c \approx 60$ MPa,
objemová hmotnost:	$\rho_c \approx 2350$ kg.m <sup>-3</sup> ,
ohybová pevnost:	$f_{fl,beam} \approx 6$ MPa.

Proces přípravy i zhodnocení testů CB desek byl podporován výpočty MKP analýzy (CB deska na elastickém poloprostoru). Deska byla analyzována (v rozsahu možností Kirchhoffovi teorie) pomocí MKP s užitím trojúhelníkového dělení desky. Kontakt desky s podložím je uskutečněn pomocí kontaktních tlaků, které jsou lineárně proměnné uvnitř hranic trojúhelníkových elementů. Využitím normativních hodnot vlastností cementového betonu dle technických podmínek TP 170 [4],

byla pomocí MKP vypočtena maximální velikost zatížení  $Q_{max} = 8.5$  kN ( $Q_{min} = 0.5$  kN) jako hodnota, při které je předpokládáno únavové porušení desky po počtu opakování zatížení  $N_{lim} \approx 10^5$ . Tato hodnota byla tedy vybrána jako počáteční pro zatěžování první desky.

### 3 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Výsledky testování prvních pěti desek jsou uvedeny v Tab. 1. Uvedeno je maximální zatížení  $Q_{max}$  ( $Q_{min} \approx 0.5$  kN), zatížením vyvolaná napětí  $\sigma^*$ , frekvence zatěžovacích cyklů,  $N^*$  počet opakování zatížení a  $\kappa^*$  faktor „zvětšení únavového odporu desky“ určený z rovnice (2) za použití substituce  $N_{lim} = N^*$ ,  $\sigma = \sigma^*$ . Hodnota  $\kappa^* = 2.66$  pro pátou desku je již velmi blízko hodnotě  $\kappa = 2.8$ , kterou stanovil Roesler (2005). Navíc je nutno poznamenat, že zatěžování desky skončilo při  $1 \times 10^6$  zatěžovacích cyklů, bez únavového porušení desky.

Tab. 1: Výsledky únavového experimentu desky 1 až 5

Slab No.	Maximální zatížení $Q_{max}$ [kN]	napětí $\sigma^*$ [MPa] FEM	frekvence [Hz]	$N^*$	$\kappa^*$
1	8.5	2.65	4.5	$1 \times 10^6$	-
2 – 4	17.0	5.28	7.2	$1 \times 10^6$	1.33
5	34.0	10.55	7.0	$1 \times 10^6$	2.66

Vyšší zatížení bylo aplikováno na desku č. 6. Krátce po začátku zatěžování (ještě ve fázi zvyšování zatížení) deska praskla. Proto byla deska č. 7 zatěžována plynuleji, resp. byla postupně zvyšována hodnota  $Q_{max}$ . Výsledky zatěžování jsou v Tab. 2.

Tab. 2: Výsledky únavového experimentu desky 6 až 7

$i$	deska 6		deska 7	
	$\sigma^*_i$ [MPa]	$N^*_i$	$\sigma^*_i$ [MPa]	$N^*_i$
1	6.28	110	2.22	$2.5 \times 10^5$
2	7.50	55 <sup>+</sup>	4.40	$2.5 \times 10^5$
3			6.46	$2.5 \times 10^5$
4			8.50	$8.5 \times 10^5$
	$\hat{\kappa} = 1.387$		$\hat{\kappa} = 2.136$	

Faktor „zvětšení únavového odporu desky“  $\hat{\kappa}$  je určen z nelineární rovnice vyjadřující Minerovu hypotézu o postupném hromadění poškození během zatěžování.

$$\sum_{i=1}^k \frac{N_i^*}{N_{lim,i}} = 1, \quad \log N_{lim,i} = 17.61 \times \left( 1 - \frac{\sigma_i^*}{\hat{\kappa} f_{fl,beam}} \right) \quad (3)$$

Výsledky Tab. 2 ukazují a to i v případě desky č. 6, že únavová odolnost desek je mnohem vyšší než předpovídaly klasické únavové křivky [1]. Výsledky ukázané v Tab. 1 a 2 plně podporují Roeslerova zjištění o zvýšené ohybové pevnosti desek [1].

## 4 DŮSLEDKY PRO NÁVRH

Únavové vlastnosti hrají důležitou roli v postupech navrhování vozovek. Zjištěná vyšší odolnost může tedy přinést úspory při navrhování tloušťky desek. Nicméně vložení těchto výstupů přímo do návrhové metody by vyžadovalo ještě další podrobnější testování s důrazem na přesnou simulaci kontaktu deska/podložní systém a dále na testování dalších poloh zatížení. Při navrhování CB vozovky musí být brán ohled na oslabená místa vzniklá při smršťování, nebo vlivem horších vlastností betonové směsi, atd. Uvažováno by mělo být také možné počáteční poškození povrchu desky, které ovlivňuje výslednou únavovou únosnost. Pro názornost je zde ukázána možnost začlenění zvětšené únavové odolnosti CB desek do návrhu vozovky. Např. katalogová vozovka D0-T-1-S z předpisu TP170 [4] byla znovu “přeočítána” s využitím několika hodnot faktoru zvětšené únavové odolnosti  $\kappa$  ( $\kappa = 1.1$  a  $\kappa = 1.25$ ). Vypočtené tloušťky desek dle klasické návrhové metody TP 170 [4] jsou ukázány v Tab. 3, uvažovaná skladba konstrukce vozovky je: CB I 27 cm - CB deska, KSC I 15 cm - kamenivo zpevněné cem., ŠD 15 cm - šterkodrt', PII - podloží s modulem přetvárnosti 60 MPa.

Tab. 3: Tloušťka  $h_{CB}$  CB desky v závislosti na hodnotě faktoru  $\kappa$

	Faktor zvětšení únavového odporu desky		
	1.0 (TP170)	1.1	1.25
$h_{CB}$	27 cm	25 cm	23 cm

## 5 ZÁVĚR

Tento pilotní experimentální výzkum potvrdil předpoklady o zvýšené únavové odolnosti CB desek. Další výzkum v tomto směru je však nezbytný z důvodu ověření aplikovatelnosti zvýšené únavové odolnosti CB desek, tak aby bylo možno zefektivnit návrhovou metodu pro CB vozovky. Tento výzkum bude využit také pro navazující vědecké úkoly, jakými je např. využití uhelných popílků jakožto pojiva do cementobetonových desek vozovek pozemních komunikací. V těchto navazujících projektech budou porovnávány únavové vlastnosti popílko-cementobetonových desek, s výše testovanými deskami z prostého cementového betonu.

### PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl vytvořen za podpory grantové agentury GAČR (projekt č. 103/09/1746).

### LITERATURA

- [1] EVANGELISTA, Francisco, Jr.; and ROESLER, Jeffery. Top-Down Cracking Predictions for Airfield Rigid Pavements. Transportation Research Record, 2009, no. 2095, pp. 13-23. ISSN 0361-1981.
- [2] DARTER, M. I., BARENBERG, E. J. (1977), "Design of Zero-Maintenance Plain Jointed Concrete Pavement", Report No. FHWA-RD-77-111, Vol. 1; Federal Highway Administration.
- [3] ROESLER, J. R., HILLER, J. E., LITTLETON, P.C. (2005), "Large-Scale Airfield Concrete Slab Fatigue Tests", Int. J. Concrete Pavements, 1, pp. 66-87.
- [4] TP 170 (2004), Návrh vozovek pozemních komunikací: Technické podmínky. Praha: MDČR, Dostupné z: [www.pjpk.cz](http://www.pjpk.cz).

### Oponentní posudek vypracoval:

Prof. Dr. Jozef Komačka, Katedra cestného stavitel'stva, Stavebná fakulta, ŽU v Žiline.

Prof. Ing. Jan Kudrna, CSc., Ústav pozemních komunikací, Fakulta stavební, VUT v Brně.