

ODOLNOST CEMENTOBETONOVÝCH DESEK NA PODLOŽÍ PŘI CYKLICKÉM NAMÁHÁNÍ ■ RESISTANCE OF CONCRETE GROUND SLABS UNDER CYCLIC LOADING

Ludvík Vébr, Bohuslav Novotný, Petr Pánek

Příspěvek je věnován únavovému testování osmi cementobetonových desek (CB) na štěrkopískovém podloží v testovacím boxu. Výsledky zkoušek potvrzují skutečnost, že únavová odolnost CB desek je podstatně vyšší než odhady založené na únavových vztazích pracujících s hodnotami pevnosti v tahu za ohybu stanovených na nosníkových vzorcích. ■ The paper summarizes results of fatigue testing of eight concrete slabs resting on granular base in testing box. Obtained results confirm enhanced fatigue resistance of concrete slabs in comparison to the predictions based on concrete flexural characteristics derived from concrete beam testing.

Článek je věnován výsledkům experimentální části projektu GAČR 103/09/1746 „Optimalizace návrhu cementobetonových vozovek na základě počítačového a experimentálního modelování“, který byl zaměřen na únavovou odolnost CB desek krytu. Experimentální program měl ověřit poznatky o zvýšené únavové odolnosti CB desek, které byly publikovány v práci [1]. Únavová odolnost CB desek je přitom důležitým dílčím problémem složité problematiky optimalizace navrhování, exploatace, údržby a oprav cementobetonových vozovek. Je třeba připomenout, že v USA v rámci současného superprojektu CP Road Map [2] bylo formulováno cca 270 výzkumných problémů, které byly začleněny do dvanácti základních výzkumných směrů (research tracks) s předpokládanými náklady řešení v rozsahu 250 až 500 mil. USD (předběžně do roku 2020).

EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Pilotní projekt testování únavové odolnosti cementobetonových desek zahrnoval výrobu osmi desek půdorysných rozměrů 1 400 × 1 100 mm, z toho sedm desek mělo tloušťku 100 mm a poslední deska tloušťku pouze 80 mm. Desky byly po dozrání betonu umístěny na podkladní vrstvu štěrkopísku (tloušťky 300 mm) v testovacím boxu (obr. 1) a byly osazeny tenzometry pro záznam jejich deformací a snímači LVDT (linear variable differential transducers) pro monitorování jejich průhybů.

Cyklické zatížení bylo na desky přenášeno hydraulickým zatěžovacím válcem přes kruhovou zatěžovací oblast poloměru 50 mm. Výslednice zatížení oscilovala mezi maximální hodnotou Q_{\max} a minimální hodnotou Q_{\min} (ve všech případech bylo požadováno $Q_{\min} = 0,5$ kN). U desek 1 až 5 bylo zatížení umístěno do středu příčné (kratší) strany, u desek 6 a 7 do středu podélné strany a u desky 8 do středu desky (obr. 2). Původně se uvažovalo s frekvencí zatížení 2 Hz, z technických důvodů bylo přistoupeno na akcelerované



Obr. 1 CB deska v testovacím boxu, zatěžovací systém ■
Fig. 1 Concrete slab in testing box, loading system

Obr. 2 Umístění zatížení: a) desky 1-5, b) desky 6, 7, c) deska 8 ■
Fig. 2 Loading placement: a) slabs 1-5, b) slabs 6, 7, c) slab 8

zkoušky s frekvencí pohybující se v jednotlivých etapách zkoušení v rozmezí 2 až 7,2 Hz.

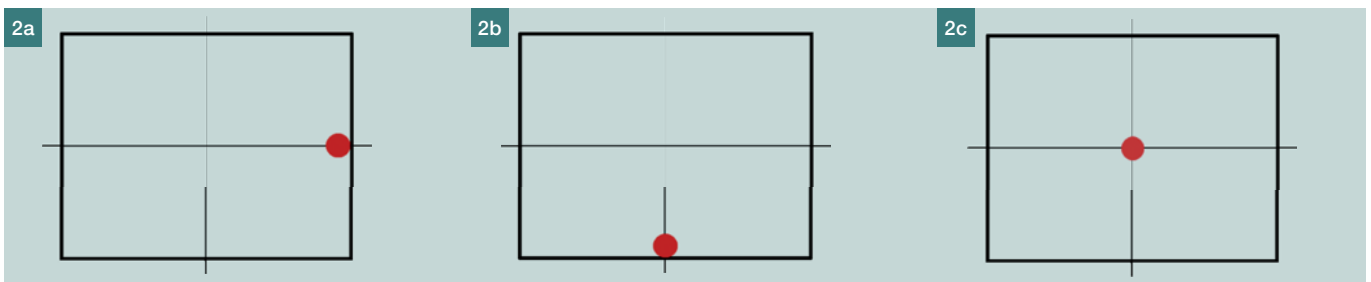
Desky byly zhotoveny ze silničního betonu třídy CB I následujícího složení: cement 42,5 R 390 kg/m³, kamenivo frakce 0/4 830 kg/m³, kamenivo frakce 8/16 955 kg/m³, voda 190 kg/m³. Beton vykázal pevnost v tlaku $f_c \approx 60$ MPa a objemovou hmotnost $\rho_c \approx 2\,350$ kg/m³, pevnost v tahu za ohybu jsme odborným odhadem stanovili hodnotou $f_{t,fl} \approx 6$ MPa.

Postup hodnocení únavové odolnosti CB desek

Cílem experimentálního výzkumu únavové odolnosti CB desek bylo ověření poznatků práce Roesler et al. [1] o zvýšené únavové odolnosti desek ve srovnání s údaji odvozenými klasickými přístupy. Za základ hodnocení únavové únosnosti jsme zvolili vztah Dartera a Barenberga [3]

$$\log N_f = 17,61 \left(1 - \frac{\sigma}{f_{t,fl}} \right), \quad (1)$$

kde N_f je počet opakování zatížení do porušení, σ je maximální hodnota ohybového napětí, $f_{t,fl}$ je hodnota pevnosti v tahu za ohybu stanovená na nosníkových vzorcích.



Pro další uplatnění získaných poznatků je potřebné ozřejmit spojitost vztahu (1) s postupy platné české návrhové metody TP170 [4]. Při posouzení CB vozovky podle technických podmínek TP170 se vyžaduje, aby návrhová hodnota celkového poměrného porušení za návrhové období D_{cd} byla menší než 1

$$D_{cd} = \frac{TNV_{cd}}{TNV_{cd,lim}}, \quad TNV_{cd,lim} = \frac{1}{\gamma_d C_2 C_3} \left(\frac{\gamma_u \gamma_D \eta f_{td}}{\sigma_{Qd} + \psi \cdot \sigma_{Td}} \right)^B, \quad (2)$$

kde TNV_{cd} je návrhová hodnota celkového počtu přejezdů těžkého nákladního vozidla (TNV) za návrhové období, $TNV_{cd,lim}$ mezní hodnota počtů přejezdů TNV za návrhové období, η součinitel nárůstu pevnosti betonu s časem, f_{td} pevnost betonu v tahu (za ohybu), σ_{Qd} vypočtené maximální napětí v betonu od návrhové nápravy, σ_{Td} vypočtené maximální napětí v betonu vlivem teploty, γ_d dílčí součinitel spolehlivosti výpočtového modelu, γ_u dílčí součinitel spolehlivosti aplikace únavové zkoušky, γ_D dílčí součinitel spolehlivosti porušení vozovky, ψ součinitel kombinace zatížení, B charakteristika únavy ($B = 20$), C_2 součinitel vyjadřující fluktuaci stop TNV a C_3 součinitel spektra hmotnosti náprav TNV.

Vztah (1) jsme proto doplnili kalibračním koeficientem ρ

$$\log N_f = 17,61 \left(1 - \frac{\sigma}{\rho f_{t,fl}} \right) \quad (3)$$

a postupy výpočtového modelování [5] jsme hledali hodnotu ρ tak, aby vztahy (2) a (3) dávaly pro přejezdy pětinápravových kamionů ekvivalentní hodnoty poškození: dospěli jsme k hodnotě

$$\rho \approx 0,75, \quad (4)$$

kteřou přípustný počet opakování zatížení podle původního vztahu (1) „snižují“ součinitel TP170.

Úprava (3) je přitom podobná úpravě Roeslera [1], který na základě únavového testování čtvercových desek na poddajném podkladu upravil vztah (1) do podoby

$$\log N_f = 17,61 \left(1 - \frac{\sigma}{\kappa f_{t,fl}} \right), \quad (5)$$

kde součinitel κ „zvýšené únavové odolnosti“ stanovili hodnotou $\kappa = 2,8$ (cyklické zatížení působilo ve středu okraje desek).

Únavové odolnosti zkoušených desek podle vztahu (5) byly hodnoceny se zohledněním charakteru realizovaných únavových procesů. Součinitel κ zvýšené únavové odolnosti v případě několika navazujících únavových procesů charakterizovaných maximálním napětím σ_i^* a počtem opakování zatížení N_i^* ($i = 1, 2, \dots, k$) byl určen řešením nelineární rovnice Minerova zákona akumulace porušení

$$\sum_{i=1}^k \frac{N_i^*}{N_{fi}^*} = 1, \quad \log N_{fi} = 17,61 \times \left(1 - \frac{\sigma_i^*}{\kappa f_{t,fl}} \right), \quad (6)$$

tedy za předpokladu, že k -tý únavový proces bude ukončen porušením desky. Nedojde-li k porušení, potom získaná hodnota představuje pouze spodní odhad hodnoty κ .

Hodnoty napětí σ_i^* jsme zjišťovali výpočetním programem CB_vozovky_1D pomocí postupů metody konečných prvků – jde tedy o smíšený přístup konfrontace výsledků výpočetní simulace a laboratorního měření.

Průběh a výsledky experimentu

Ověřování poznatku zvýšené únavové odolnosti CB desek jsme realizovali únavovými zkouškami osmi desek podle obr. 2.

Tab. 1 Stanovení hodnot parametru κ zvýšené únavové odolnosti
Tab. 1 Determination of values of fatigue enhancement parameter κ

Poloha zatížení	Deska	h_{CB} [mm]	i – etapa zatížení	N_i^*	$Q_{max,i}$ [kN]	σ_i^* [MPa]	κ
(a)	1	100	1	1×10^6	8,5	2,65	–
	2–4	100	1	1×10^6	17	5,28	1,33
	5	100	1	1×10^6	34	10,55	2,67
(b)	6	100	1	$1,1 \times 10^2$	23,86	6,41	1,42
			2	55 ⊗	28,5	7,65	
	7	100	1	$2,5 \times 10^6$	8,5	2,32	2,22
			2	$2,5 \times 10^6$	17	4,58	
			3	$2,5 \times 10^6$	25	6,71	
			4	$8,5 \times 10^6$	33	8,84	
(c)	8	80	1	$2,5 \times 10^6$	10	2,31	1,28
			2	95 ⊗	30	6,84	

Parametry únavového procesu 1. desky ($Q_{max} = 8,5$ MPa) byly zvoleny na základě standardních hodnot materiálových charakteristik předepsaných v předpisu TP170, přičemž se předpokládalo porušení desky při $N \approx 0,5 \cdot 10^6$ počtu opakování zatížení. Zvýšení hodnot Q_{max} u desek 2 až 5 potom vyplynulo ze skutečnosti, že u předešlých únavových procesů nedošlo k porušení desek ani při $1 \cdot 10^6$ cyklech.

U desky 6 jsme chtěli realizovat únavový proces desky 5 (ukončen bez porušení desky) s přesunutím polohy zatížení do středu podélné hrany, avšak již při náběhu zatížení na plánovanou hodnotu $Q_{max} = 34$ kN došlo k porušení desky.

U desky 7 se proto zatížení příčné hrany zvyšovalo postupně ve čtyřech etapách, všechny plánované etapy proběhly bez porušení desky.

V případě poslední desky bylo zatížení umístěno do středu desky a únavový proces byl plánován ve třech etapách: $Q_{max} = 10; 30$ a 50 kN; úspěšně proběhla pouze první etapa, při náběhu zvýšeného zatížení druhé etapy došlo k porušení desky.

Výsledky únavového testování CB desek jsme zaznamenali v tab. 1. Uvádíme tloušťku desek h_{CB} , počet realizovaných opakování zatížení N_i^* (porušení desky označujeme symbolem ⊗), maximální hodnotu výslednice zatížení $Q_{max,i}$, hodnotu maximálního napětí σ_i^* stanovenou výpočtem a v posledním sloupci hodnotu součinitele zvýšené únavové odolnosti κ podle vztahu (6).

Výsledky testování desek 1 až 5 a desky 7 potvrzují zvýšení únavové odolnosti desek při poloze zatížení na okraji desky, kde převládá jednorozměrný stav napětí – porušení vyvolávající napětí působí ve směru okraje a napětí ve směru kolmém k okraji je rovné nule (přínejmenším je v realitě zanedbatelné ve srovnání s napětím ve směru okraje). V uvedených případech má parametr κ zvýšené únavové odolnosti hodnotu větší než 2, v případě desky 5 se zatížením na příčné hraně je $\kappa \approx 2,7$, a to je již hodnota velmi blízká k hodnotě $\kappa \approx 2,8$, ke které dospěl Roesler [1].

Únavové procesy realizované na těchto deskách byly přitom ukončeny před porušením desek a lze tedy počítat se zvýšením hodnoty parametru κ při doběhnutí těchto procesů až k porušení desek. Příčina porušení desky 6 ve stadiu počátečního náběhu únavového zatížení nebyla zjištěna, více poznatků by bylo možné zjistit pouze v rozsáhleším experimentálním výzkumu s možností opakovat zkoušky za shodných podmínek.

Případ zatížení desky 8 ve středu desky se od předešlých případů okrajového zatížení odlišuje tím, že napětí v obou hlavních směrech jsou řádově stejné velikosti, a tedy mechanismus odolnosti v jednom směru nemůže vypomáhat dru-

Literatura:

- [1] Roesler J. R., Hiller J. E., Littleton P. C.: Large-Scale Airfield Concrete Slab Fatigue Tests, Int. J. Concrete Pavements, 1, 2005, 66–87
- [2] Harrington D., Rasmussen R., Merritt D., Cackler T., Taylor P.: Long-Term Plan for Concrete Pavement Research and Technology, The Concrete Pavement Road Map (Second Generation): Volume I, Background and Summary [Report No. FHWA-HRT-11-065], U.S. Department of Transportation FHWA, 2012
- [3] Darter M. I., Barenberg E. J.: Design of Zero-Maintenance Plain Jointed Concrete Pavement, Report No. FHWA-RD-77-111, Vol. 1; Federal Highway Administration, 1977
- [4] TP170 Navrhování vozovek pozemních komunikací [TP], MD ČR, 2004 s úpravou 2006
- [5] Novotný B.: Některé otázky návrhu cementobetonových vozovek, In: CD sborník konf. „Pozemní komunikace 2012“, Praha 2012

hému směru. Tuto skutečnost je třeba potvrdit dalšími zkouškami a upravit případně podobu vztahu (3) i pro polohy vzdálenější od okrajů desek. Z pohledu celkové únavové odolnosti desky ale v případě středového umístění zatížení zase příznivě působí nižší hodnota napětí – větší část kolových zatížení se přímo přenáší do podkladní soustavy vozovky. U pozice zatížení na okraji desky je efekt horizontálního roznosu zatížení (způsobující ohyb desky) podstatně větší.

ZÁVĚRY

Výsledky experimentálního vyšetřování na deskách půdorysných rozměrů 1 400 × 1 100 mm naznačují zvýšenou únavovou odolnost CB desek – zejména při působení zatížení v oblasti spár (okrajů) CB desek, a to jsou oblasti nejvíce namáhané přejezdy těžkých nákladních vozidel. I velmi mírné zvýšení únavové odolnosti ve vztazích standardního posuzování CB vozovek by přitom vedlo k výraznému snížení tloušťky CB desek. V procesu modifikace české návrhové metody by se dal účinně využít postup, kterým jsme posuzovali kompatibilitu návrhové metody TP170 a únavového vztahu Dartera – Barenberga (1) ve vztazích (2), (3).

Hodnocení provozní výkonnosti CB vozovek podle TP170 má však v podstatě úlohu interpolačního nástroje pro hodnocení CB vozovek za podmínek exploatace, které se výrazně liší od standardních podmínek katalogových vozovek. Úpravy návrhových metod tohoto typu na základě dílčích zjištění experimentálního výzkumu nelze ale zavádět bez dalšího hlubšího výzkumu.

Příspěvek je součástí řešení projektu GAČR č. 103/09/1746 „Optimalizace návrhu cementobetonových vozovek na základě počítačového a experimentálního modelování“.



Ing. Bohuslav Novotný, DrSc.
e-mail: bnovotny@volny.cz

Doc. Ing. Ludvík Vébr, CSc.
e-mail: vebr@fsv.cvut.cz



Ing. Petr Pánek, Ph.D.
e-mail: petr.panek@fsv.cvut.cz



všichni: Katedra silničních staveb
Fakulta stavební ČVUT v Praze

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

STAVÍME PROFESIONÁLNĚ



www.smp.cz



DÁLNIČE D3 VESELÍ NAD LUŽNICÍ

Divize dopravních staveb realizuje na trase D3 Tábor - Veselí nad Lužnicí dálniční most v inundačním území Lužnice ve Veselí nad Lužnicí. Mostní dílo by mělo být předáno k užívání do konce roku 2012.

STM
SMP CZ

Společnost skupiny VINCI
CONSTRUCTION