

PODKLADNÍ VRSTVY A PODLOŽÍ VOZOVEK

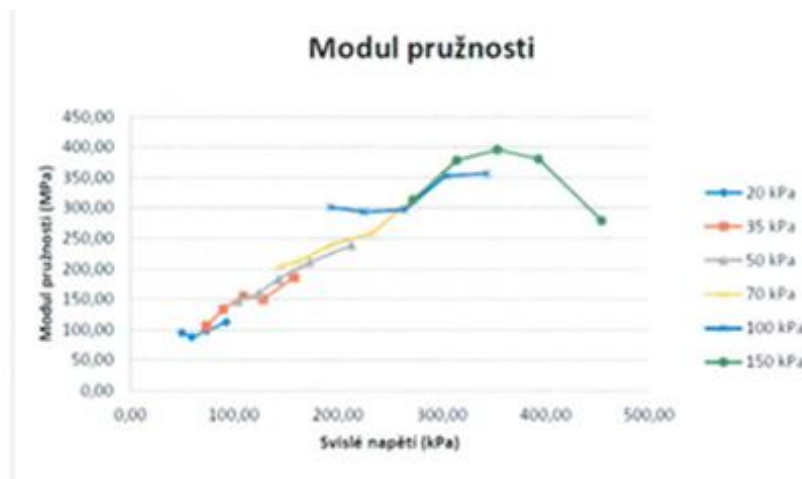
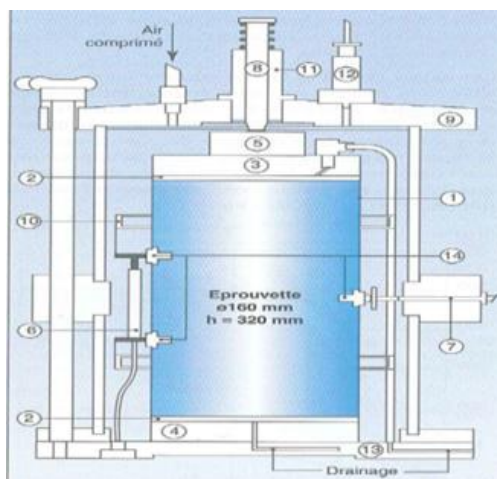
Vyhodnocování modulů pružnosti
nestmelených vrstev vozovky a
podloží z triaxiálních zkoušek

Ing. Jiří Fiedler

Září 2022

Úvod

Moduly pružnosti nestmelených vrstev a podloží závisí na velikosti působících napětí. Lze je zjišťovat triaxiálními zkouškami dle ČSN EN 13286-7. Příklad je pro směs ŠD 1 (VUT Brno).



Někdy není závislost modulu pružnosti na působících napětích plynulá. Pak je obtížné rozpoznat, zda jde o změnu chování materiálu s napětím, rozptýl zkoušky nebo problém při měření. Pomoci může znalost modelů deformačního chování nestmelených směsí.

Modely závislosti modulů pružnosti na působících napětích

$$M_r = k_1 \times (\theta)^{k_2} \quad (1)$$

θ je součet hlavních napětí (označovaný jako „bulk stress“). Při triaxiální zkoušce je vertikální napětí hlavním napětím σ_1 a komorový tlak je roven hlavním napětím σ_2 a σ_3 . Součet hlavních napětí je tedy $\theta = \sigma_1 + (2 \times \sigma_3)$. V USA se používá vzorec (3)

$$M_r = k_1 \times p_a \times \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3} \quad (3)$$

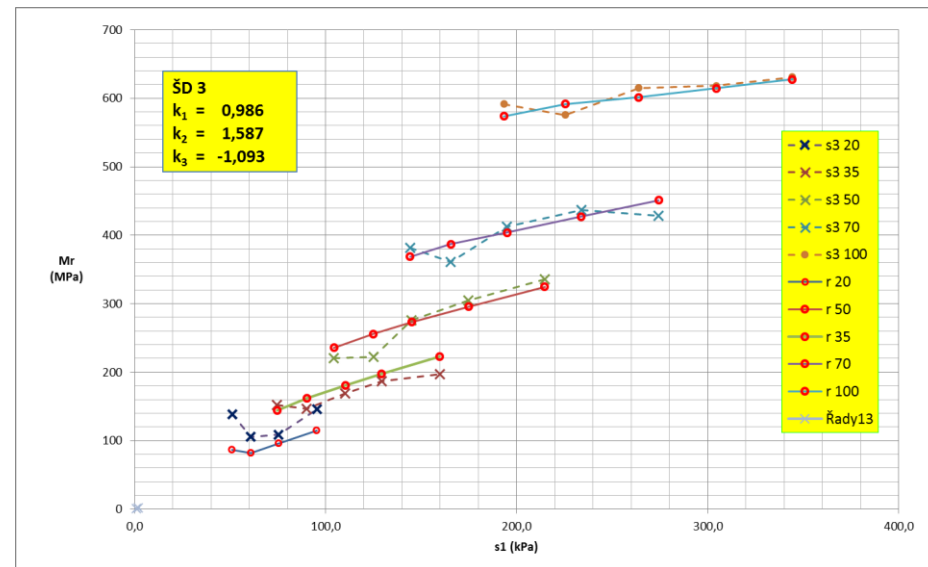
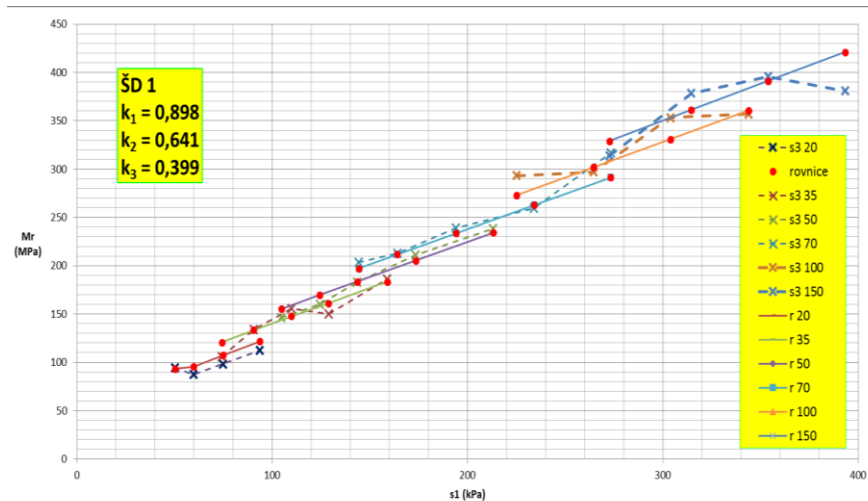
oktaedrické napětí τ_{oct} je u triaxiální zkoušky dáno vzorcem (4)

$$\tau_{oct} = (\sigma_1 - \sigma_3) \times \frac{\sqrt{2}}{3} \quad (4)$$

V australské metodě je vzorec (5) θ_m je střední hlavní napětí

$$M_r = k_1 \times \left(\frac{\theta_m}{p_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a}\right)^{k_3} \quad (5)$$

Závislost M_r na σ_1 pro ŠD 1 a ŠD 3 (vzorec USA) $M_r = k_1 \times p_a \times \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$



ŠD 3 má 2,5 krát vyšší k_2 . Proto s rostoucím součtem hlavních napětí M_r rychleji roste. To je kompenzováno tím, že ŠD 3 má $k_3 = -1,093$, tj. smykové napětí snižuje M_r .

Při stejném σ_1 má σ_3 větší vliv na M_r u směsi ŠD 3 než u ŠD 1.

Celkově jsou moduly vyšší pro ŠD 3, než pro ŠD 1. (viz např. M_r pro $\sigma_1 = 200$ kPa)

Příklady regresní analýzy pro stanovení koeficientů k_1 , k_2 , k_3

Regresní analýzu dle vzorců (3) , (5) lze v Excelu provést iterací pomocí nástroje Řešitel.

Tab.: 1: Koeficienty dle vzorců (3) a (5) a statistické parametry pro směs ŠD 1

Vzorec (3) USA		Statistika		Vzorec (5) Austrálie		Statistika	
k_1	0,898	R^2	0,981	k_1	2,438	R^2	0,984
k_2	0,641	s_e	14,260	k_2	0,610	s_e	13,227
k_3	0,399	s_e/s_y	0,145	k_3	0,180	s_e/s_y	0,135

s_e je střední chyba a s_y směrodatná odchylka naměřených modulů
V [7] a v [8] se dle „subjektivní klasifikace testu vhodnosti modelu“ se pro
 $R^2 \geq 0,9$ a $s_e/s_y \leq 0,35$ shoda modelu s měřenými daty považuje za výbornou.

Porovnání vlastností směsí ŠD 1 a ŠD 3

Směs ŠD 3 má 16 % zrn $\leq 0,063$ mm, zatímco ŠD 1 jich má jen 9 %.

Vyšší obsah zrn $\leq 0,063$ mm vedl k tomu, že při zkoušce Proctor modifikovaná byla u směsi ŠD 3 maximální objemová hmotnost $2\,336 \text{ kg/m}^3$ při $w_{\text{opt}} = 6,0$ %, zatímco u ŠD 1 to bylo $2\,237 \text{ kg/m}^3$ při $w_{\text{opt}} = 5,7$ %.

Při optimální vlhkosti tomu odpovídá vyšší modul pružnosti M_r u směsi ŠD 3.

Vyšším podílem jemných zrn u směsi ŠD 3 lze rovněž vysvětlit to, že koeficient k_3 je u ní výrazně menší než nula.

Pro směs ŠD 3 vyšel pro model s koeficienty k_1 a k_2 koeficient determinace menší než pro model s koeficienty k_1 , k_2 , k_3 . To ukazuje, že u směsi ŠD 3 je již vhodnější použít model s k_1 , k_2 , k_3 , zatímco u směsi ŠD 1 je použitelný jednodušší model se dvěma koeficienty.

Odpovídá to údajům v literatuře, že u nestmelených materiálů s malým podílem jemných zrn lze k_3 zanedbat, protože vliv smykových napětí na modul pružnosti je poměrně malý.

Vliv smykových napětí a vlhkosti na M_r u zemin

U zeminy s vlhkostí $w < w_{opt}$ moduly rostou s vyšším σ_3 , ale pro každý komorový tlak modul M_r výrazně klesá s rostoucím smykovým napětím. U zeminy s w_{opt} je nárůst modulu s rostoucím součtem hlavních napětí menší.

Pro $w > w_{opt}$ jsou moduly konstantní.

Vyšší napětí vyvolá větší pórové tlaky.

Efektivní napětí mezi zrny se nemění.

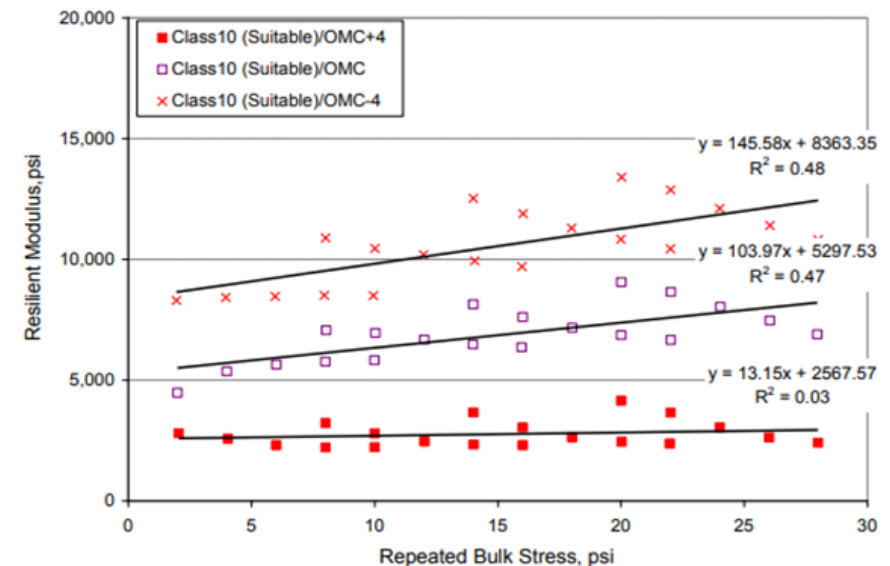
Zkoušky byly pro 4 komorové tlaky a

5 hodnot σ_1 pro každý komorový tlak.

Koeficient k_3 je u zemin nutné zjišťovat.

Pro lineární vztah mezi θ a M_r je R^2 velmi malý.

dle Ceylan H., et al, 2009 (1 p.s.i. = 7 kPa),



Použití modulů M_r nestmelených vrstev při navrhování vozovek

V některých zahraničních není návrhový modul nestmelených vrstev konstantní, ale závisí na velikosti napětí od zatížení a dalších okolnostech.

V australské metodě AGPT02-17 na <https://austroads.com.au/> může projektant použít výsledky laboratorních zkoušek, nebo tabulkové hodnoty.

Table 6.5: Suggested vertical modulus of top sublayer of high standard base material

Thickness of overlying bound material	Modulus of overlying ⁽¹⁾ bound material (MPa)				
	1000	2000	3000	4000	5000
40 mm	500	500	500	500	500
75 mm	500	500	480	460	440
100 mm	500	450	410	390	360
125 mm	450	390	350	310	280
150 mm	400	330	280	240	210
175 mm	360	270	210	210	210
200 mm	310	210	210	210	210
225 mm	260	210	210	210	210
≥ 250 mm	210	210	210	210	210

¹ Overlying bound material is either asphalt or cemented material or a combination of these materials.

Úpravy návrhových modulů při revizi TP 170

V TP 170 z roku 2004 byly návrhové moduly vyšší, než v obdobných zahraničních předpisech. Při revizi v 2022 byly moduly sníženy. Zůstávají stále mírně vyšší než ve zmíněných předpisech. V textu novelizovaného TP 170 se konstatuje:

„Návrhové hodnoty, uvedené v tabulkách, nelze přímo porovnávat s výsledky laboratorních zkoušek. Pokud má být u významných staveb, nebo na základě požadavků projektanta či investora, proveden návrh vozovky na základě výsledků laboratorních zkoušek, je třeba individuálního posouzení, jak z naměřených, laboratorně stanovených hodnot, zvolit návrhovou hodnotu pro výpočet.“

Toto platí v revidovaném TP 170 i pro návrhové hodnoty jiných materiálů, například pro parametry únavy asfaltových směsí.

Bonmot místo závěru

**Přesné výsledky laboratorních zkoušek
se dnes dají získat za každým rohem.
Problém je, že naše Země je kulatá.**

Děkuji za pozornost