

MĚŘENÍ MODULU TUHOSTI ZKOUŠKOU V PŘÍČNÉM TAHU

Xavier Carbonneau, odpovědný pracovník sekce pro asfaltové směsi, SCREG

Bernard Yvinec, technický pracovník, COLAS

Yves Legal, technický pracovník, SCREG

Jean-Eric Poirier, ředitel pro vědu a výzkum, skupina COLAS

Revue générale 2005, č. 836, str. 53

Přejímání evropských norem otevírá nové obzory. V oblasti asfaltových směsí je datum jejich kompletního převzetí do francouzské normalizační soustavy ještě vzdálené, je však nutno optimálně využít dobu, která nám zbývá k intenzivní přípravě na nové technické skutečnosti. V případě měření modulu tuhosti jsou v návrhu normy prEN 12697-26 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost popsány tři zkoušky, které umožňují celkem osm variant; na prvním místě je popsáno měření modulu tuhosti zkouškou v příčném tahu. Skupina COLAS předpokládá, že se bude významným způsobem podílet na závěrečných etapách tvorby evropských norem zkoušení pro asfaltové směsi, protože to jsou zkoušky, prováděné a uznávané v zemích, kde její jednotlivé společnosti působí. Účast v procesu evropské normalizace současně přispívá ke zkvalitnění práce silničních laboratoří ve Francii a zvýšení jejich vědeckých a výzkumných aktivit. Předkládáme výsledky studií a výzkumných prací, prováděných v laboratořích firmy COLAS při měření modulu tuhosti podle prEN 12697-26 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost.

Úvod

Posuzování asfaltových směsí se zvýšeným modulem tuhosti (**Enrobés à module élevé – EME**), dozor nad katalogy obaloven, vývoj asfaltových směsí optimálních provozních vlastností jsou činnosti, které předpokládají zvýšení úrovně výzkumu v oblasti návrhů asfaltových směsí, a tím i zvýšenou potřebu měření modulů tuhosti. Skupina COLAS má k dispozici databázi s více než 650 výsledky měření modulů tuhosti; 400 výsledků z tohoto počtu bylo získáno zkouškách čtyřbodovým ohybem a automatizovaným zařízením pro reologické zkoušky (**Machine Asservie pour Essais Rhéologiques – MAER**). Tento rozsáhlý soubor dat umožňuje vypracování optimálního návrhu asfaltové směsi a prokázání shody návrhů, vybraných na počátku každé studie. Stanovení charakteristiky „modul tuhosti“ pro stavby, které jej vyžadují, je nutno neustále sledovat zkouškami komplexního modulu nebo zkouškami modulu tuhosti, měřeného přímým tahem zařízením MAER. Tyto zkoušky jsou obtížné a časově náročné. Zařízení MAER, používané v minulosti k posouzení nových asfaltových směsí nebo pro potřeby výzkumu, se postupně stává běžným nástrojem pro zkoušení provozních vlastností asfaltových směsí a to dokonce i směsí, u nichž znalost modulu není nezbytná. Z praxe vyplynula potřeba posoudit alternativní řešení, která umožní zlepšit stanovení charakteristik asfaltových směsí v laboratořích skupiny COLAS. Tato řešení jsou netradiční – jak ve výzkumu, tak ve vývoji nových směsí; umožňují rovněž doporučit zákazníkům účinný prostředek pro posouzení vypracovaných návrhů asfaltových směsí.

Výsledky prací evropské normalizace (CEN/TC 227 Silniční materiály, pracovní skupina WG 1 Asfaltové směsi) jsou předkládány v podobě návrhů evropských norem, jejichž definitivní podoba byla předmětem dlouhodobého vývoje a upřesňování. Návrh prEN 12697-26 [1] je dobrým příkladem a ukázkou takového postupu. Jsou v něm uvedeny různé metody měření modulu tuhosti asfaltových směsí (zkouška dvoubodovým ohybem na zkušebních tělesech ve tvaru komolého vetknutého klínu, zkouška dvoubodovým ohybem na trámečkových zkušebních tělesech, zkouška přímým tahem na válcových nebo trámečkových zkušebních tělesech – inspirace francouzskými normami NF P 98-260-1 a NF P 98-260-2 je zřejmá – také však zkouška pevnosti v příčném tahu na válcovém zkušebním tělese, zkouška střídavého namáhání tahem a tlakem na válcovém zkušebním tělese, zkouška tříbodovým a čtyřbodovým ohybem na trámečkových zkušebních tělesech).

Tato situace se týká oblasti, která předpokládá velký počet zkoušek s převahou zkoušek, které byly ve Francii dosud málo používány. Otázka ekvivalence těchto různých zkušebních metod je naléhavá zvláště v případech, že návrh evropské normy, týkající se vlastností asfaltových směsí, specifikuje funkční charakteristiky, kterých je nutno dosáhnout, ať už je zkušební metoda jakákoliv.

Poněvadž je nutno řešit stále naléhavější výzvy, aby se prováděly zkoušky, jejichž výsledky umožní kvalifikovaný odhad důsledků nových evropských norem pro asfaltové směsi, vykonala skupina COLAS pozoruhodnou práci v měření modulu tuhosti asfaltových směsí zkouškou v příčném tahu. Cílem těchto měření bylo zejména:

- ◆ Formulovat názor výzkumníků a techniků skupiny COLAS na metodu, předloženou v připravované evropské normě zkoušení;
- ◆ Posoudit možné korelace se zkušebními metodami, normalizovanými ve Francii;
- ◆ Upřesnit limity těchto zkoušek vzhledem k používaným zkušebním zařízením a podmínkám provádění;
- ◆ Podpořit tuto zkoušku v případech, kdy její uplatnění napomáhá k dosažení účinnějších výsledků v laboratorní praxi;
- ◆ Zvýšit zkušební potenciál skupiny COLAS, aby se mohla s výsledky zkoušek aktivně zapojit do mezinárodních studií, které tuto zkoušku již normalizují, používají v praxi a pracují s ní;
- ◆ Zařadit tuto metodu do rámce výzkumných projektů, řešených skupinou COLAS; tato zkouška byla vybrána, protože její realizace je jednoduchá – od přípravy zkušebních těles až po různé varianty provedení.

V tomto příspěvku budou uveřejněny výsledky prací, které se týkají:

- ◆ Stanovení metrologických limitů postupu zkoušky a používaného zkušebního zařízení;
- ◆ Porovnání hodnot modulu tuhosti, zjištěných zkouškou v příčném tahu s hodnotami, stanovenými v normách pro zkoušky používající zkušební zařízení MAER a s hodnotami zjištěnými zkouškou dvoubodovým ohybem.

Zkoušku směsí obalených asfaltovými emulzemi nebudeme podrobněji vysvětlovat, i když je to technologie na stavbách používaná a sledovaná; na této skupině směsí však byla prováděna některá měření. Pro lepší pochopení této zkoušky připomeneme její podstatu a hlavní charakteristiky.

Podstata zkoušky v příčném tahu

Na fotografii 1 je zobrazeno zkušební zařízení pro měření modulu tuhosti (včetně zkušebního tělesa). Zatížení se aplikuje na povrch válcového zkušebního tělesa a měří se deformace v rovině kolmé k rovině zatěžování (obrázek 1). Modul pružnosti v příčném tahu M_r je tedy vyjádřen rovnicí:

$$M_r = \frac{P (v + 0,273)}{L \cdot H}$$

kde	M_r	je	modul tuhosti (MPa);
	P		maximální aplikované zatížení (N);
	v		Poissonovo číslo;
	L		délka zkušebního tělesa (mm);
	H		celková deformace, měřená na průměru (mm).

Foto 1: Zařízení používané pro měření modulu tuhosti zkouškou v příčném tahu

Legenda

Charge P

Déformation

zatěžovací tlakové pulzy P

deformace

Obrázek 1: Podstata zkoušky, schéma zatěžovacích tlakových pulzů a měření deformace

Výpočet vychází z několika předpokladů, které je vhodné připomenout:

- ◆ Zkušební těleso se nachází v rovinném stavu napětí;
- ◆ Materiál je pokládán za homogenní a izotropní a je namáhán v oblasti napětí, kde reaguje lineárně a elasticky. Výpočet rozložení napětí v případě ideálního elastického materiálu uvádí faktor $(4/\pi + \nu - 1)$, který je číselně vyjádřen hodnotou 0,273 [2].

Hodnota Poissonova čísla ν je známá (u asfaltových směsí se obvykle používá hodnota $\nu = 0,35$). Modul pružnosti M_r je teoreticky interpretován jako sečnový modul stanovený v tahu, jakmile se zatěžovací pulz změní lineárně k funkci času [3]. Tento způsob namáhání vede k rozložení nehomogenních napětí, jak je znázorněno na obrázku 2.

Tuto zkoušku lze provádět podle několika norem, např. podle normy BS DD 213 nebo normy ASTM 4123 [5]. V těchto uvedených postupech jsou rozdíly v podmínkách předběžného zatížení, avšak i v deformaci, stanovené pro výpočet modulu tuhosti. Návrh evropské normy prEN 12697-26 vychází z normy BS DD 213, ovšem s několika úpravami (deset předběžných zatížení před vlastním měřením modulu).

Rozdíl v porovnání s tradičními francouzskými metodami spočívá v okolnosti, že nejsou specifikovány rozměry zkušebních těles. Běžná zkušební zařízení vyžadují určité průměry zkušebních těles vzhledem k rozměrům zatěžovacích systémů, avšak tloušťka zkušebního tělesa není stanovena. Měření modulu tuhosti se provádí za stanovené teploty na jedné úrovni nebo na více úrovních, avšak s definovanou dobou zatěžování, což neumožňuje zaznamenání přímek závislosti, které jsou velmi dobře známé. Doba zatěžovacího pulzu činí (124 ± 4) ms a měřená deformace na zkušebním tělese musí činit (5 ± 2) μm pro zkušební tělesa o průměru 100 mm nebo (7 ± 2) μm pro zkušební tělesa o průměru 150 mm. To odpovídá rozsahu přetvoření 50 ± 20 μ_{def} a $46,7 \pm 20$ μ_{def} .

Legenda

Compression
Tension
Constant

tlak
tah
konstantní

Obrázek 2: Rozložení napětí ve zkušebním tělese (převzato z publikace Yodera a Witczaka [2])

Poznatky z odborné literatury

O měření modulu tuhosti asfaltových směsí bylo publikováno mnoho odborných prací. V této kapitole se soustředíme na publikace, které se týkají korelací mezi různými zkušebními metodami nebo jejich porovnávání. V těchto publikacích lze nalézt konkrétní prvky, které usnadní práci definováním odchylek různých hodnot, získaných na základě současných platných zkušebních metod.

V odborné literatuře byla prokázána korelace mezi moduly tuhosti, zjištěnými automatizovaným zařízením pro reologické zkoušky MAER a moduly zjištěnými ve zkouškách dvoubodovým ohybem [6, 7]. Tato vynikající korelace se nakonec promítla do připravovaných norem výrobků formou definice ekvivalentních požadavků – při jakékoli zkušební metodě. Specifikace zvolené zkušební teploty tak byly zrušeny.

V rámci mezilaboratorních zkoušek, prováděných počátkem devadesátých let minulého století, byly porovnávány charakteristiky měřené na stejném návrhu asfaltového betonu 0/10 s asfaltem gradace 50/70. Výsledky, získané různými zkušebními metodami na jediné asfaltové směsi ukazují poměrně malou odchylku mezi výsledky zkoušek ohybem (zkušební těleso ve tvaru komolého vetknutého klínu) a výsledky zkoušky v příčném tahu. Nedávno realizovaná syntéza [3] současného stavu znalostí zdůrazňuje specifika některých zkoušek. Upřesňuje limity zkoušky v příčném tahu, jako je např. riziko dotvarování během zkoušky. Doporučuje se pracovat při zkušební teplotě nižší než 20 °C.

U korelací, které lze očekávat mezi modulem tuhosti měřeným zkouškou v příčném tahu a modulem tuhosti měřeným v přímém tahu automatizovaným zařízením pro reologické zkoušky MAER je nutno uvést práci D. Bourdrela [9]. Zařízením, popsaným v normě NF P 98 232-3, obvykle používaným pro provádění zkoušky v příčném tahu na směsích stmelovaných hydraulickými pojivy, byla prokázána korelace mezi oběma metodami. V rámci studie byly zkoumány tři návrhy asfaltových směsí. Používaný protokol o zkoušce měření modulu tuhosti v příčném tahu se však velmi liší od protokolu, který je součástí připravované evropské normy. Zvyšování zatížení bylo lineární funkcí času a nejednalo se o zatížení pulzy, jako v prEN 12697-26. Kromě toho byly rozměry zkušebních těles menší (\varnothing 80 mm).

Poslední důležité upřesnění se týká přípravy zkušebních těles. Válcová zkušební tělesa lze připravit:

- ◆ vibračním zhutňovačem;
- ◆ gyrátorem (*Presse à cisaillement giratoire – PCG*);
- ◆ jako Marshallova zkušební tělesa;
- ◆ odběrem jádrových vývrtů z deskových zkušebních těles připravených v laboratoři.

Způsob přípravy zkušebních těles ovlivňuje vlastní zkoušku, jak bylo prokázáno v pracích, provedených v Nottinghamském centru pro silniční stavitelství (**Nottingham Centre for Pavement Engineering – NCPE**) [10]. Byly použity tři série třiceti zkušebních těles (\varnothing 150 mm) stejné asfaltové směsi (obalované kamenivo), připravené třemi metodami (gyrátorem, odběrem jádrových vývrtů z deskových asfaltových zkušebních těles, vibračním zhutňovačem). Prvním závěrem je, že musí být zkoušen dostatečný počet zkušebních těles (tři až čtyři), aby bylo dosaženo shodnosti 10 % a intervalu spolehlivosti 80 % vzhledem ke „skutečné hodnotě“. Druhý závěr potvrzuje zvýšení hodnot výsledků (+4 % až +11 %) u zkušebních těles, připravených gyrátorem. Hodnota byla porovnána s výsledky na jádrových vývrtech, odebraných z deskových zkušebních těles připravených v laboratoři. Toto zjištění vyplývá ze speciálního rozložení mezer ve zkušebních tělesech, připravených gyrátorem (zvýšená objemová hmotnost v centru zkušebního tělesa).

Cíle a realizace studie

Ve všech předcházejících studiích byl hodnocen vždy omezený počet metod, pokud neběží o jediný návrh směsi. Centrální vědeckotechnické oddělení skupiny COLAS má k dispozici dvě zařízení pro provádění zkoušky v příčném tahu (UMATTA od r. 1995 a UTM od r. 1999). Nedávno bylo zakoupeno další zařízení UTM. Oddělení je rovněž vybaveno souborem zařízení pro zkoušky ohybem a automatizovaným zařízením pro reologické zkoušky (MAER); na těchto zkušebních zařízeních se provádějí zkoušky modulu tuhosti a únavy pro potřeby všech členů skupiny COLAS. Toto centrální uspořádání usnadňuje práci při analýzách získaných dat, které jsou podkladem pro trvalé zlepšování návrhů asfaltových směsí. Uvedená centralizace rovněž umožňuje komplementární posouzení zkoušky v příčném tahu na různých typech asfaltových směsí, zkoušených klasickými metodami. V rámci, předloženém v této publikaci, je shrnuta analýza výsledků, která poskytuje přinejmenším dílčí odpovědi na tyto otázky:

- ◆ korelace s klasickými zkušebními metodami;
- ◆ vliv doby zatěžování zkušebního tělesa;
- ◆ vliv způsobu výroby zkušebního tělesa;
- ◆ limity zkoušky (směsi se zvýšeným modulem tuhosti).

Konečně byly navrženy podmínky zkoušek, jejichž provádění poskytuje nejzajímavější výsledky.

Výsledky a diskuse

Korelace modulu tuhosti získaného zařízením MAER a zkouškou v příčném tahu

Bylo provedeno první posouzení korelace mezi hodnotou modulu tuhosti, stanoveného přímým tahem a příčným tahem při 10 °C. Tyto výsledky (obrázek 3) byly již zčásti publikovány [11]. Regresní přímka podle metody nejmenších čtverců je vyjádřena rovnicí:

$$E_{cd\ 10\ ^\circ C - 120\ ms} = 0,886 \times E_{maer\ 10\ ^\circ C - 0,02\ s} + 273\ (MPa)$$

[zkušební těleso o průměru 150 mm a tloušťce 50 mm],

kde $E_{cd\ 10\ ^\circ C - 120\ ms}$ označuje modul tuhosti, měřený zkouškou v příčném tahu při 10 °C s dobou zatěžovacího pulzu při zvyšování zatížení 120 ms;

E_{maer} označuje modul tuhosti při 10 °C a 0,02 s, stanovený v hlavní přímce závislosti ve zkoušce přímým tahem, provedené zařízením MAER.

Korelační koeficient činí 0,94.

Obrázek 3: Korelace mezi modulem tuhosti zjištěným zařízením MAER a modulem tuhosti, zjištěným zkouškou v příčném tahu zařízením UTM při teplotě 10 °C

Tato dobrá korelace mezi moduly tuhosti E_{cd} a E_{maer} byla stanovena pro zkušební tělesa o průměru 150 mm a tloušťce 50 mm. Zkušební tělesa byla většinou připravena gyrátorem. Druhy zkoušených asfaltových směsí byly velmi rozdílné – od směsí obalených asfaltovými emulzemi až po směsi vyvinuté ve skupině COLAS s asfaltovými pojivy modifikovanými polymerem. Byly zkoušeny asfaltové směsi se zvýšeným modulem tuhosti (EME). Rozsah přetvoření požadovaný v tehdejší době činil 50 μ def; byl tedy mírně vyšší než hodnota, uvedená v normách BS DD 213 a prEN 12697-26, kde činí 46,7 μ def. Téměř v 50 % případů je rozdíl mezi modulem tuhosti měřeným zkouškou v příčném tahu za stanovených podmínek a modulem tuhosti, stanoveným zařízením MAER (10 °C, 0,02 s), nižší než 10 %. Značná část výsledků, u kterých je tato odchylka vyšší, byla zjištěna u asfaltových směsí obalovaných emulzemi, které nás konfrontují s jinými problémy, než jsou problémy, spojené výlučně s podmínkami provádění této zkoušky (např. „vývojový“ charakter směsí obalovaných emulzemi). Při provádění těchto zkoušek bylo možno pozorovat, že použité asfaltové směsi, které vykazují nejvyšší hodnoty mechanických charakteristik, neumožňují získat na zkušebních tělesech požadovaný rozsah přetvoření 50 μ def. Na obrázku 4 je znázorněna průměrná deformace pro každé zkušební těleso. Lze pozorovat, že u modulů tuhosti přibližně vyšších než 12 000 MPa nelze stanoveného cíle již dosáhnout; pro úplnost získaných výsledků je důležité, že vždy zůstává vyšší než minimální hodnota stanovená v normách BS DD 213 nebo prEN 12697-26, která činí 33 μ def.

Obrázek 4: Vývoj rozsahu přetvoření, měřený na každém zkušebním tělese (\varnothing 150 mm, tloušťka 55 mm) jako funkce modulu tuhosti

Pokud jde o rozsah teploty, která není teplotou, používanou při hodnocení asfaltových směsí skupiny COLAS a která odpovídá vyšší úrovni provozních vlastností, možný rozsah měření zůstává značně široký. Kromě zmenšování aplikované deformace umožňuje korelace získaná na tomto typu zkušebních těles za těchto podmínek zkoušky reálné posouzení hodnoty modulu tuhosti při 10 °C, stanovené tradičními zkušebními metodami.

Korelace komplexní modul/modul tuhosti stanovený zkouškou v příčném tahu

Posouzení korelace mezi výsledkem měření modulu tuhosti zkouškou v příčném tahu a zkouškou ohybem se sinusovým zatížením podle normy NF P 98 260-2 bylo provedeno v etapě 4 studie, realizované na zkušebních úsecích. Z poloviny desek asfaltových směsí o rozměrech 400 mm × 600 Ømm × 125 mm byla vyřezáním připravena zkušební tělesa ve tvaru komolého klínu, určená pro provádění zkoušek ohybem při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz. Druhá polovina byla určena pro zhotovení zkušebních těles pro měření modulu tuhosti zkouškou v příčném tahu. Tento program zkoušek umožnil získat informace o faktorech, jako je pojivo, objemová hmotnost a kamenná kostra. Zkoušené asfaltové směsi zahrnují úplnou škálu modulů, které lze zjistit v případě asfaltových směsí obalovaných za horka. Pro zkoušky v příčném tahu byla používána zkušební tělesa o průměru 100 mm, tloušťce 40 mm a 25 mm. V uvedeném případě jsou hodnoty modulů průměrem měření minimálně na třech zkušebních tělesech.

Na obrázku 5 jsou znázorněny korelace, získané mezi modulem tuhosti měřeným zkouškami ohybem při 15 °C a frekvenci 10 Hz a modulem tuhosti měřeným zkouškou v příčném tahu při 125 ms. Z uvedených výsledků zkoušek získáme dva vztahy, které rovněž závisejí na rozměrech zkušebních těles:

Zkušební těleso Ø 100 mm, tloušťka 40 mm:

$$E_{FL(15\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ Hz})} = 0,785 \times E_{CD(15\text{ }^{\circ}\text{C} - 125\text{ ms})} + 3\,790 \text{ (MPa)}$$

Zkušební těleso Ø 100 mm, tloušťka 25 mm:

$$E_{FL(15\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ Hz})} = 0,759 \times E_{CD(15\text{ }^{\circ}\text{C} - 125\text{ ms})} + 3\,680 \text{ (MPa)}$$

Obrázek 5: Korelace mezi modulem tuhosti zjištěným zkouškami ohybem a modulem tuhosti měřeným zkouškou v příčném tahu zařízením UMATTA (teplota 15 °C, jádrové vývrty tloušťky 25 mm a 40 mm)

V obou případech je korelační součinitel vyšší než 0,92. Zjišťujeme velmi dobrou korelaci mezi výsledky – nezávisle na tloušťce, běžné u zkušebních těles, používaných při zkoušce v příčném tahu. Jediný bod u asfaltové směsi pro horní podkladní vrstvu 0/20 vykazuje odchylku 20 % mezi výsledkem měření modulu tuhosti zkouškami ohybem a hodnotou odvozenou od rovnice regresní přímky, vytvořené ze souboru dat. Nepřihlížíme-li k tomuto bodu, je odchylka mezi hodnotou modulu tuhosti měřeného zkouškami ohybem a hodnotou stanovenou podle zákonitostí korelace se souborem experimentálních bodů za obvyklých podmínek zkoušky (teplota, doba zatěžování, tloušťka zkušební tělesa) ve většině případů < 10 %, jak to potvrzují grafická znázornění přímky korelace i grafická znázornění odchylek + 10 % nebo -10 %. V porovnání zkušebních těles o tloušťce 25 mm a zkušebních těles o tloušťce 40 mm jsou nápadné jen velmi mírně zvýšené hodnoty u zkušebních těles o tloušťce 40 mm (odchylka < 10 %).

Vliv doby zatěžování

Provádění zkoušek komplexního modulu nebo modulu tuhosti v přímém tahu se znázorněním přímky závislosti bylo podnětem k dalším zkouškám, při nichž se měnila doba zatěžovacího pulzu (35 ms až 125 ms). Zde se znovu setkáváme s průběhem, známým z hodnoty modulu tuhosti s krátkými dobami zatěžování, odpovídajícími nižším teplotám ve vztahu doba/teplota. Je nutno zdůraznit toto zvyšování modulu tuhosti, získané na obalovaném kamenivu 0/14 (obrázek 6). Na tomto obrázku jsou rovněž uvedeny rozsahy přetvoření, měřené pro různé doby době pulzu. Tato okolnost znesnadňuje a někdy i znemožňuje získat s těmito zkušebními zařízeními data, která jsou tak komplexní, jako data získaná tradičními zkouškami; zejména obtížné je znázornění přímek závislosti.

Protože u trvání pulzu 60 ms až 125 ms zůstává rozsah přetvoření téměř konstantní, mění se hodnota modulu tuhosti v tomto rozsahu prakticky lineárně. Tak lze extrapolovat hodnotu modulu pro dobu zatěžování 25 ms.

Legenda

Temps de montée en charge (ms)
mesures à 10 °C, à 15 °C

doba zatěžování (ms)
měření při 10 °C, 15 °C

Obrázek 6: Vývoj modulu tuhosti jako funkce doby zatěžování

Na obrázku 7 je znázorněna korelace mezi hodnotami modulu tuhosti stanovenými ohybem se sinusovým zatížením a zkouškou v příčném tahu (měření při době pulzu 125 ms nebo extrapolovaná hodnota pro dobu pulzu 25 ms). Tato extrapolace je poněkud méně výrazná než u dříve vytvořených hodnot, což vyplývá z nejistot, které jsou s extrapolací spojeny. Nejkratší pulz vede ke zvýšené hodnotě modulu tuhosti. Je pravděpodobné, že v rozsahu hodnot 5 000 MPa až 15 000 MPa hodnota extrapolovaná při době pulzu 25 ms představuje tendenci zvýšit komplexní modul a hodnota při době pulzu 125 ms naopak tendenci poněkud jej snížit. Ke stejným výsledkům lze dospět při použití zkušebních těles o tloušťce 25 mm. V obvyklých podmínkách, při použití jádrových vývrtů odebraných z desek o rozměrech 600 mm × 400 mm × 125 mm o průměru 100 mm a tloušťce 25 mm nebo 40 mm, při respektování specifického rozsahu přetvoření, je hodnota naměřená při délce pulzu 125 ms nižší, než hodnota stanovená jako komplexní modul.

Legenda

Module flexion 15 °C/10 Hz
100 mm/Ep 40

modul tuhosti měřený ve zkouškách ohybem (15 °C/10 Hz)
průměr zkušebního tělesa 100 mm, tloušťka 40 mm

Obrázek 7: Korelace mezi modulem tuhosti měřeným ve zkouškách ohybem se sinusovým zatížením a stanoveným zkouškou v příčném tahu (zařízení UMATTA) při době pulzu 25 ms a 125 ms

Vliv přípravy zkušebních těles

Podle některých návrhů byla příprava zkušebních těles gyrátorem Gyropac realizována jako doplněk deskových zkušebních těles pro zkoušky únavy. Tak lze pro stejnou zkoušenou směs stanovit modul tuhosti, měřený na dvou zkušebních tělesech, připravených podle dvou různých postupů. Hodnota komplexního modulu jako funkce modulu tuhosti, stanoveného zkouškou v příčném tahu pro sérii devíti zkušebních těles je znázorněna na obrázku 8. V rozměrech zkušebních těles je jen malý rozdíl (tloušťka jádrových vývrtů je 40 mm, tloušťka zkušebních těles připravených gyrátorem 35 mm). Podle výsledků znázorněných na obrázku 6 lze tento rozdíl zanedbat a zjištěné odchylky zařadit mezi rozdíly podmíněné způsobem přípravy zkušebních těles. Modul tuhosti, měřený zkouškou v příčném tahu na zkušebních tělesech připravených gyrátorem Gyropac, je vyšší než modul tuhosti, stanovený na jádrových vývrtech. Tato odchylka vzrůstá, když se modul tuhosti zvyšuje. Možné vysvětlení tohoto rozdílu, publikované v citované literatuře, je gradient objemové hmotnosti ve zkušebních tělesech připravených gyrátorem. Jejich mezerovitost je ve vnitřních částech nižší. Protože právě tato zóna je při zkoušce v příčném tahu nejvíce namáhána, může mít větší objemová hmotnost za následek zvýšení měřeného modulu tuhosti. V rámci výhradně srovnávacích laboratorních studií se tento způsob přípravy zkušebních těles hodnotí jako rychlý a úsporný (není nutno zhotovovat zkušební tělesa řezáním, sekáním nebo tradičním odběrem jádrových vývrtů). Gyrátory typu Gyropac opravdu umožňují přípravu zkušebních těles o průměru 100 mm nebo 150 mm, které lze bez další úpravy použít pro stanovení modulu tuhosti. Je tedy možno studovat kamennou kostru, druh asfaltového pojiva, objemovou hmotnost a poměrně přesně posoudit vliv různých návrhů asfaltové směsi na modul tuhosti. V rámci předběžné studie byla této metodě dáвана přednost. Závěrečné porovnání s tradiční zkouškou může být provedeno pouze na optimalizovaném návrhu asfaltové směsi, sestaveném podle požadavků norem nebo podle specifikací silničního stavebního podniku.

Legenda

Ep carottées
Ep Gyropac

jádrové vývrty
zkušební tělesa připravená gyrátorem Gyropac

Obrázek 8: Vliv způsobu přípravy zkušebních těles – korelace mezi komplexním modulem a modulem tuhosti stanoveným zkouškou v příčném tahu (zařízení UMATTA) pro jádrové vývrty a zkušební tělesa připravená gyrátorem Gyropac

Limity zkoušky

Limity zkoušky byly posouzeny pro zkušební tělesa o průměru 150 mm, používaná pro stanovení korelace s výsledky zkoušek v tahu, prováděných na automatizovaném zařízení pro reologické zkoušky MAER. Na obrázku 9 je znázorněna hodnota deformace jádrových vývrťů nebo zkušebních těles připravených gyrátorem Gyropac, měřená za maximálního zatížení jako funkce modulu tuhosti při 10 °C a 15 °C. Lze znovu pozorovat, že rozsah přetvoření, např. 50 μ def se získá bez problémů, a to přibližně do hodnoty 15 000 MPa. Od této hodnoty se měřená deformace znatelně zmenšuje. To je důsledek limitů lisů: co se týká stanovených podmínek zkoušky, bylo dosaženo maximálně aplikovatelného zatížení. V tomto případě podle obvyklých hypotéz pro posouzení modulu tuhosti obdržíme rovnici

$$H \times E = \frac{P_{max} (\nu + 0,273)}{L} = C_{te}$$

kde H je celkové prodloužení, měřené na průměru zkušebního tělesa;
 E modul tuhosti;
 P_{max} maximální zatížení, aplikovatelné lisem;
 C_{te} konstanta.

Tato rovnice byla porovnávána v hodnotách zkoušky, získaných se zkušebními tělesy připravenými gyrátorem Gyropac o tloušťce 35 mm. V tomto případě byl k dispozici větší počet výsledků. Maximální hodnota aplikovaného zatížení činila 5 150 N. Odchylka mezi výsledky a přímkou závislosti je minimální (obrázek 10) a potvrzuje platnost stávajících hypotéz. Lze rovněž konstatovat, že podmínky deformací, specifikovaných v normě, jsou nedostatečné jedině při hodnotě zatížení > 25 000 MPa, tj. vyššího, než na úrovni modulů tuhosti měřených na různých asfaltových směsích, včetně směsí se zvýšeným modulem tuhosti (EME).

Na obrázku 9 lze rovněž zaznamenat malou odchylku mezi hodnotami naměřenými na jádrových vývrtech o tloušťce 40 mm a zkušebními tělesy připravenými gyrátorem Gyropac o tloušťce pouhých 35 mm. Menší tloušťka umožňuje mírné zvýšení hodnoty modulu tuhosti, od níž již není možné dosáhnout rozsah přetvoření 50 μ def.

Proto je rozumné zůstat v podmínkách namáhání, které zohledňují hypotézy obvyklé pro výpočet modulu tuhosti, což dovoluje předpokládat používání zkoušky za těchto podmínek pro jakýkoli druh asfaltových směsí. Tento předpoklad je dostatečně zdůvodněn korelací, získanou v rozsahu 5 000 MPa až 20 000 MPa.

Obrázek 9: Vývoj deformace měřený na zkušebních tělesech o průměru 100 mm připravených gyrátorem Gyropac nebo na jádrových vývrtech; doba zatěžování 125 ms při teplotě 10 °C a 15 °C

Legenda

Déformation calculée

Résultats expérimentaux

Eprouvettes Gyropac, Ø 100 mm, Ep 35 mm

vypočtená deformace

výsledky zkoušky

zkušební tělesa připravená gyrátorem Gyropac,
Ø 100 mm, tloušťka 35 mm

Obrázek 10: Změny deformace měřené v okamžiku, kdy je dosaženo maximálního aplikovatelného zatížení; porovnání výsledků zkoušky a stávajících hypotéz pro výpočet modulu tuhosti ($\varepsilon \times E = C_{te}$)

U některých bodů je tato analýza v důsledku velké variability důležitých charakteristik (způsob přípravy zkušebních těles, rozměry zkušebních těles, doba zatěžování) bohužel pouze částečná. Přesto tato studie umožnila definovat vztahy mezi výsledky získanými různými zkušebními metodami. Měření modulu tuhosti zkouškou v příčném tahu vykazuje některé limity, podstatně spojené se zatěžovací kapacitou současných zkušebních zařízení; tyto limity však ovlivňují jen velmi málo možnosti, které zkouška nabízí, protože se týkají především asfaltových směsí s velmi zvýšenými moduly tuhosti. Tyto limity mají být podrobně popsány v řadě zkoušek za použití zkušebních těles o průměru 150 mm. Soubor získaných dat a zkušenosti techniků, kteří vypracovávají návrhy asfaltových směsí, umožní výběr zkušebního tělesa vhodných rozměrů – pro zkoušení asfaltových směsí s nejvyšší úrovní provozních vlastností se předpokládá používání zkušebních těles o průměru 100 mm.

S výhradou používání zkušebních těles o průměru 100 mm umožňuje tato zkušební metoda charakterizovat za podmínek popsaných v normách BS DD 213 a prEN 12697-26 všechny druhy asfaltových směsí, včetně směsí se zvýšeným modulem tuhosti (EME). Pouze ve výjimečných případech by některé návrhy asfaltových směsí, které se vyznačují mimořádnými charakteristikami, mohly vést k neshodným rozsahům přetvoření. Ve většině případů je však posouzení návrhu směsi zkouškou v příčném tahu snadné. Souhrn poznatků, získaných ve vědeckém a výzkumném oddělení skupiny COLAS umožňuje zohlednit vliv způsobu přípravy zkušebních těles a rozdíly, existující mezi

jádrovými vývrty, zkušebními tělesy připravenými gyrátory nebo zařízením Gyropac. Tato práce rovněž dokumentuje nutnost přesných výsledků při provádění zkoušky. Je nezbytné zaznamenávat rozměry používaných zkušebních těles a způsob jejich přípravy.

Shrnutí

Zkouška měření modulu příčným tahem může být významným přínosem v souboru zkušebních metod používaných při posouzení návrhu asfaltové směsi. Její jednoduchost z ní činí významný doplněk tradičních metod; v tomto příspěvku bylo opakovaně poukazováno na vypovídací schopnost výsledků, získanou prakticky tím, že se v interpretaci výsledků uplatňuje nezbytná přesnost. U tradičních zkoušek, kde jsou známými veličinami teplota a frekvence, byla přesnost již definována, nyní musí být specifikována doba zvyšování zatížení. Je nutno uvádět objemovou hmotnost a rozměry používaných zkušebních těles; pro stanovení hodnoty modulu tuhosti je vhodné používat průměr výsledků získaných nejméně na čtyřech zkušebních tělesech. Za těchto podmínek a v případě, že předložené výsledky budou kladně hodnoceny odbornou veřejností, může tato zkušební metoda plnit významnou úlohu při posuzování návrhů asfaltových směsí.

Literatura

- [1] prEN 12697-26 Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 26: Rigidité, décembre 2003, version soumise au vote formel
(*prEN 12697-26 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost, prosinec 2003, verze předložená k formálnímu hlasování*)
- [2] E. J. Yoder, M. W. Witczak: Principles of pavement desing, deuxième édition, John Wiley and Sons, 1975
(*E. J. Yoder, M. W. Witczak: Základy navrhování vozovek, druhé vydání, John Wiley a synové, 1975*)
- [3] H. Di Benedetto, C. de La Roche: State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixture, pp. 137 – 180, Rilem Report 17, 1998
(*H. Di Benedetto, C. de La Roche: Stav znalostí v oblasti modulu tuhosti a únavy asfaltových směsí, str. 137 – 180, Rilem Report 17, 1998*)
- [4] BS DD 213, 1993 Method for determination of the indirect tensile stiffness modulus of bituminous mixtures, final draft, 1996
(*BS DD 213, 1993 Metoda stanovení modulu tuhosti asfaltových směsí zkouškou v příčném tahu, závěrečný návrh, 1996*)
- [5] ASTM D 4123-82, reapproved 1995, Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures
(*ASTM D 4123-82, nové znění 1995, Standardní zkušební metoda pro zkoušku v příčném tahu pro modul pružnosti asfaltových směsí*)
- [6] R. Linder, F. Moutier, M. Pernet, F. Peyret: La machine d'essai rhéologique asservie et son utilisation pour l'essai de traction LPC sur enrobés, EUROBITUME, 1985
(*R. Linder, F. Moutier, M. Pernet, F. Peyret: Automatizované zařízení pro reologické zkoušky a jeho užití pro zkoušky asfaltových směsí v přímém tahu v laboratořích LPC, EUROBITUME, 1985*)
- [7] P. Pellevoisin, P. Bense: Lois de corrélation entre les différents procédés de mesures de modules sur enrobés bitumineux, pp. 225 – 230, MTBM, Lyon, 1997
(*P. Pellevoisin, P. Bense: Zákonitosti korelace mezi různými metodami měření modulu tuhosti u asfaltových směsí, str. 225 – 230, MTBM, Lyon, 1997*)
- [8] L. Franken: RILEM interlaboratory tests on bituminous mixes in repeate loading: Teaching and recomandation, EURASPHALT & EUROBITUME Congress, 1996
(*L. Franken: Mezilaboratorní zkoušky asfaltových směsí opakovaným zatěžováním, organizované mezinárodním sdružením výzkumných institucí a expertů v oblasti stavebních materiálů a konstrukcí RILEM: Poznatky a doporučení, Kongres EURASPHALT & EUROBITUME, 1996*)
- [9] D. Bourdrel: Poisson ratio and Young modulus on bituminous mixes using the diametral compression test, pp. 1913 – 1923, EURASPHALT & EUROBITUME Congress, Vienne 2004
(*D. Bourdrel: Poissonovo číslo a Youngův modul u asfaltových směsí při zkoušce v příčném tahu, str. 1913 – 1923, Kongres EURASPHALT & EUROBITUME, Vídeň 2004*)
- [10] E. A. Hunter, G. D. Airey, A. C. Collop: Influence of compaction method on asphalt mixture internal structure and mechanical properties, pp. 1868 – 1877 EURASPHALT & EUROBITUME Congress, Vienne 2004
(*E. A. Hunter, G. D. Airey, A. C. Collop: Vliv metody zhutňování na vnitřní strukturu a mechanické vlastnosti asfaltových směsí, str. 1868 – 1877, Kongres EURASPHALT & EUROBITUME, Vídeň 2004*)
- [11] X. Carbonneau, Y. Legal, P. Bense: Evaluation of the indirect tensile stiffness modulus test, 6th international RILEM symposium, Zürich, 2003
(*X. Carbonneau, Y. Legal, P. Bense: Hodnocení zkoušky modulu tuhosti v příčném tahu, 6. mezinárodní symposium mezinárodního sdružení výzkumných institucí a expertů v oblasti stavebních materiálů a konstrukcí RILEM, Zürich, 2003*)