VISKOELASTICKÉ CHOVÁNÍ SMĚSÍ RECYKLOVANÝCH ZA STUDENA NA PŘÍKLADU KOMPLEXNÍHO DYNAMICKÉHO MODULU

Zpracovali: Ing. Zuzana Čížková, Ph.D., Ing. Jan Suda (Fakulta stavební ČVUT v Praze)

Souhrn

Chování směsí recyklovaných za studena osciluje v závislosti na obsahu asfaltového a/nebo hydraulického pojiva od viskoelastického chování podobného chování klasických asfaltových směsí prováděných za horka, ke křehkému chování pružného materiálu obdobnému jako u hydraulicky stmelených vrstev, až k chování podobnému chování nestmelených materiálů. V závislosti na druhu očekávaného chování směsi se liší i zkoušky, které způsob dlouhodobého chování s dynamickými účinky nejlépe popisují. V roce 2017 se v této oblasti výzkum věnoval sledování specifické oblasti viskoelastického chování směsí recyklovaných za studena (testované směsi tudíž obsahovaly vyšší množství asfaltového pojiva – buď zpěněného asfaltu, nebo asfaltové emulze). Nejkomplexnějším způsobem sledování chování viskoelastického materiálu v širokém spektru zkušebních teplot i frekvencí je využití konceptu tzv. řídící křivky a principu superpozice času a teploty. Byly získány zajímavé poznatky z hlediska závislosti obou složek komplexního modulu (elastické i viskózní) na zkušební teplotě a frekvenci, které demonstrují klimatické podmínky a rychlost přejezdu vozidel, kterým je směs v reálné konstrukci vystavena a díky tomu je lépe možné predikovat chování takového materiálu v čase.

Oblast použití

Ačkoliv v běžné praxi není možné komplexní modul směsí recyklovaných za studena měřit (kvůli nárokům na výbavu laboratoří i složitosti a časové náročnosti), významně přispívá k porozumění chování poměrně složitého a dosud v omezené míře prověřeného komplexního pohledu na funkční chování tohoto materiálu. Využití získaných poznatků tak lze očekávat především v oblasti dalšího rozvoje predikčních modelů a simulace degradace u stmelených typů asfaltových vrstev. Poznatky poslouží při postupném zpřesňování podmínek jak vlastního zkoušení, tak využití přístupu komplexní křivky pro původní stmelené viskoelastické směsi, tak i pro zestárnuté směsi, kde dochází v důsledku oxidativních změn asfaltového pojiva k změnám v odolnosti konstrukční vrstvy proti účinkům opakujícího se zatížení či proměnlivých vlivů klimatu. Tyto poznatky pak lze integrovat do nové generace degradačních modelů.

Metodika a postup řešení

Komplexním modulem označujeme u lineárně viskoelastických materiálů podíl napětí a přetvoření. Určuje se při ustáleném harmonicky proměnném kmitání s přihlédnutím k časovému posunutí napětí a deformace, která je fázově zpožděna právě v důsledku viskoelastického chování asfaltových směsí. Označení „komplexní“ vychází ze skutečnosti, že při analýze výsledků jsou u této charakteristiky využívána komplexní čísla. Základní vztah pro výpočet komplexního modulu je uveden rovnicí (1):

$$E^*(i\mu) = \frac{\pm^*}{£^*} = \frac{\pm_0 \cdot \sin(\mu t)}{£_0 \cdot \sin(\mu t - ¤)} = \frac{\pm_0 \cdot e^{i\mu \cdot t}}{£_0 \cdot e^{i(\mu \cdot t - ¤)}} = \frac{\pm_0}{£_0} \cdot e^{i¤} \qquad (1)$$

kde:

- σ_0 maximální napětí (amplituda napětí), (MPa),
- ε_0 maximální osové přetvoření (amplituda cyklické složky), (MPa),
- ω úhlová rychlost (rad/s), $\omega = 2\pi f$, kde f je frekvence zatěžování,
- i imaginární složka komplexního modulu, $i^2 = -1$,
- ø fázový úhel (rad).

Termínem dynamický modul je pak označována absolutní hodnota komplexního modulu výpočtem podílu maximálního napětí a vratného osového přetvoření materiálu, který je vystaven opakovanému sinusovému osovému zatížení tlakem v rozmezí alespoň 0-25 kN při stanovené teplotě a frekvenci zatížení, [1].

Komplexní modul u směsí recyklace za studena byl měřen při zkoušce čtyřbodovým ohybem metodou 4PB-PR podle [3]. Zkušební tělesa tvaru trámečku o rozměrech 50 x 50 x 400 mm byla vyrobena nařezáním desek (305 x 50 x 400 mm), vyrobených segmentovým zhutňovačem dle [4]. Zkušební tělesa

Tento výsledek byl vytvořen s finanční podporou programu Centra kompetence TA ČR, projekt č.TE01020168

zrála minimálně 28 dní při laboratorní teplotě a relativní vlhkosti 40-70 %. Zkouška byla prováděna v režimu řízené deformace, která dosahovala výše 50 microstrain. Měření bylo prováděno při teplotách 0 °C, 10 °C, 20 °C a 30 °C, přičemž nižší nebo vyšší zkušební teploty není nutné testovat, protože využití testovaných směsí recyklovaných za studena se předpokládá do podkladních vrstev vozovek, ve kterých se výkyvy teplot zpravidla pohybují v uvedeném spektru. Pro každou zkušební teplotu bylo měření prováděno při 9 zvolených zkušebních frekvencích (50, 30, 20, 10, 8, 5, 2, 1 a 0,5 Hz).

Při zkoušce je měřena síla potřebná k deformaci trámečku jako funkce času a fázové zpoždění mezi signálem síly a signálem výchylky. Na základě těchto hodnot je pak prostřednictvím (2), (3), (9), (10) a (11) stanovena hodnota komplexního modulu. Tyto rovnice jsou založeny na modifikované aproximaci prvního řádu přesného řešení deformace v důsledku čistého ohybu.

$$E_1 = ¥\left(\frac{F}{Z}\cos(¤) + «\mu^2\right) \qquad E_2 = ¥\left(\frac{F}{Z}\sin(¤)\right) \qquad (2, 3)$$

kde:

F síla působící na trámeček (N),
Z měřená deformace trámečku (m),
ø fázový úhel (rad),
ω úhlová rychlost (rad/s),
γ faktor tvaru (1/m),
μ faktor hmotnosti, pro klasické zkušební podmínky (frekvence menší než 30 Hz) je faktor hmotnosti zanedbatelný.

Faktory γ a μ jsou vypočteny prostřednictvím následujících vzorců:

$$¥ = \frac{L^2 A}{bh^3}\left(\frac{3}{4} - \frac{A^2}{L^2}\right) \qquad (4)$$

$$« = R\{x\}\left(\frac{M}{®^4} + \frac{m_1}{R(A)} + \frac{m_2 R(A)}{[R(y)]^2}\right) \qquad (5)$$

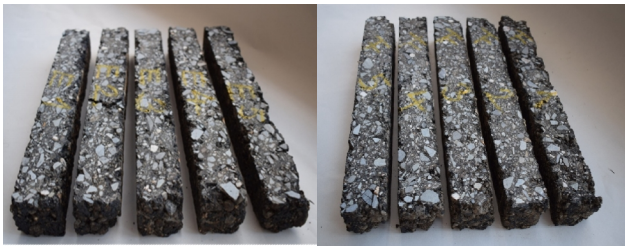
$$R\{x\} = \frac{12L}{A}\left(\frac{1}{3\frac{x}{L} - 3\frac{x^2}{L^2} - \frac{A^2}{L^2}}\right) \qquad (6)$$

kde

L efektivní délka trámečku (m),
h výška trámečku (m),
b šířka trámečku (m),
A vzdálenost mezi vnější svorkou a další vnitřní svorkou (m),
M hmotnost trámečku (kg),
m_1 hmotnost pohyblivé části (kg) v umístění A (m),
m_2 hmotnost pohyblivé části (kg) v umístění y (m),
x umístění sondy pro měření přetvoření trámečku (m), [3].

Výsledky

Pro měření a posouzení využitelnosti čtyřbodové zkoušky pro predikci komplexního modulu směsí recyklace za studena byly vyrobeno osm variant směsí. Každé měření bylo prováděno vždy na pěti zkušebních tělesech. Vyšší počet zkušebních těles je potřebný kvůli obtížím plynoucím z aplikace zkoušky určené pro horké asfaltové směsi na směsi recyklované za studena. Ty jsou charakteristické velkou heterogenitou směsi, většími rozměry maximálního zrna a typickým bodovým spojením zrn. Obtíže s aplikací zkoušky 4PB-PR na směsi recyklované za studena ještě umocňuje skutečnost, že se jedná o zkoušku značně náchylnou na imperfekce. Díky výše uvedeným důvodům byla navíc náročná už samotná příprava zkušebních těles požadovaného tvaru – často docházelo k olamování hran (viz obr. 1 a 2).



Obr. 1 a 2 Zkušební tělesa směsí E a F po měření komplexních modulů metodou 4PB-PR

Vzhledem k velkému množství naměřených hodnot sledovaných charakteristik jsou v tabulce 1 shrnuty pouze hodnoty komplexního modulu a fázového úhlu všech testovaných směsí při zkušební frekvenci 10 Hz. Podrobnější výsledky pro všechny testované frekvence jsou pak shrnuty na obrázcích 5-8.

Tab. 2 Průměrné hodnoty komplexního modulu a fázového úhlu při frekvenci 10 Hz

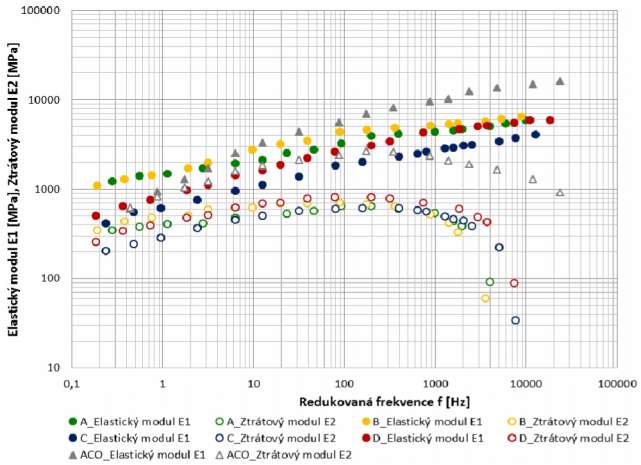
Směs	Zkušební teplota							
	0 °C		10 °C		20 °C		30 °C	
	E* [MPa]	ϕ [°]	E* [MPa]	ϕ [°]	E* [MPa]	ϕ [°]	E* [MPa]	ϕ [°]
A	4745	4,7	3482	7,1	2631	8,9	1872	12,1
B	5482	3,5	4152	6,8	1946	14,6	1967	14,4
C	4761	7,0	3164	12,2	1693	19,4	910	23,8
D	6570	4,8	3651	12,0	2432	17,1	1260	23,4
E	4364	6,8	3295	10,8	1872	18,4	985	21,9
F	6361	4,9	4104	9,9	2388	16,8	1174	22,6
G	4116	7,3	2672	13,5	1389	19,0	684	20,5
H	2148	7,6	1385	12,1	971	16,3	490	17,6

Hlavní výhoda měření komplexních resp. dynamických modulů spočívá v tom, že z hodnot dynamického modulu stanovených za různých teplot a frekvencí je možné sestrojit tzv. řídící křivku. Řídící křivka (master curve) představuje v současnosti nejkomplexnější způsob analýzy deformačního chování asfaltového materiálu za

Tento výsledek byl vytvořen s finanční podporou programu Centra kompetence TA ČR, projekt č.TE01020168

různých podmínek. Řídící křivky všech testovaných směsí byly vytvořeny horizontálním posunem experimentálních dat v programu IRIS Rheo Hub. Jako referenční teplota, ke které jsou vztaženy všechny výsledky provedených měření, bylo zvoleno 20 °C.

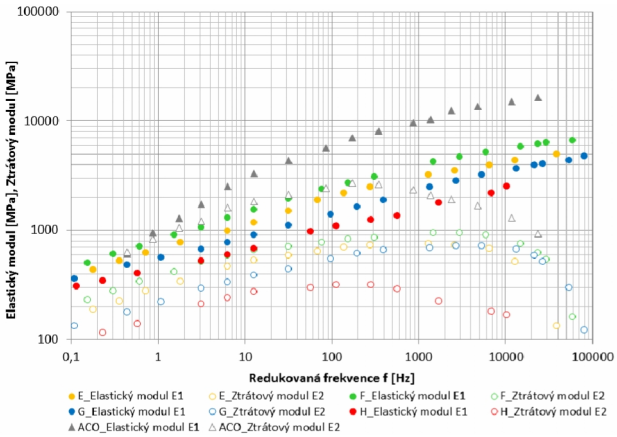
Obrázek 3 zobrazuje řídící křivky obou složek komplexního modulu směsí A-D a obrázek 6 zobrazuje řídící křivky fázového úhlu těchto směsí. Pro lepší porovnání chování testovaných směsí v širokém spektru zkušebních teplot a frekvencí s chováním typickým pro horké asfaltové směsi byly tyto grafy doplněny o hodnoty naměřené na konvenční směsi asfaltového betonu ACO 11+.



Obr. 3 Komplexní křivky elastické a viskózní složky komplexního modulu testovaných směsí A, B, C a D

Z grafu 3 je dobře patrné, že vliv obsaženého asfaltového nebo hydraulického pojiva ve směsi recyklované za studena má na průběh obou složek komplexního modulu menší vliv než skutečnost, že se jedná o směs recyklovanou za studena. Jinými slovy všechny čtyři směsi recyklované za studena mají poměrně podobný průběh řídících křivek a naopak rozdíl oproti průběhu komplexního modulu referenční horké asfaltové směsi ACO 11+ je výraznější. Všechny směsi recyklované za studena mají výrazně nižší viskózní složku komplexního modulu a tudíž i fázový úhel, jejich chování je tedy někde mezi chováním pružného materiálu a viskoelastickým chováním klasických za horka prováděných asfaltových směsí. Vliv druhu obsaženého asfaltového pojiva ve směsích recyklovaných za studena je téměř zanedbatelný. Co je ovšem z grafů patrné, je vliv obsaženého hydraulického pojiva. Směsi A B se 3 % cementu dosahují výrazně vyšších hodnot elastické složky fázového úhlu v oblasti nízkých frekvencí a vysokých zkušebních teplot. V celém spektru zkušebních teplot a frekvencí pak dosahují směsi A B nižších hodnot fázového úhlu. Obsažený cement totiž způsobuje posun chování těchto směsí blíže k chování pružného materiálu.

S rostoucí frekvencí a klesající teplotou rostou obě složky komplexního modulu všech pěti směsí, ovšem výrazně se liší rychlost růstu. U ACO 11+ dochází k rychlejšímu nárůstu elastické složky modulu a rychlému snížení fázového úhlu. Naopak u směsí recyklovaných za studena je průběh E_1 a E_2 téměř rovnoběžný a fázový úhel těchto směsí se v oblasti vysokých teplot a nízkých frekvencí téměř nemění. V oblasti středních teplot i frekvencí jsou průběhy všech pěti směsí podobné – obě složky komplexního modulu stoupají, fázový úhel klesá. Ačkoliv celkově dosahuje komplexní modul směsi ACO 11+ vyšších hodnot než je tomu u směsí recyklovaných za studena, v oblasti středních teplot a frekvencí jsou obě jeho složky v podobném poměru jako u směsí C a D a fázový úhel těchto tří směsí je tudíž také podobný. V této oblasti je tedy chování směsí recyklovaných za studena bez přidaného cementu nejvíce podobné chování klasických asfaltových směsí, což lze považovat za očekávaný jev. V oblasti nízkých teplot a vysokých frekvencí dochází k výraznému poklesu ztrátového modulu a fázového úhlu. Směsi tak ztrácejí své viskózní chování a materiál se stává zcela pružným. Fázový úhel směsí recyklovaných za studena klesá rychleji než u směsi ACO 11+. V oblasti nízkých teplot a vysokých frekvencí vykazují testované směsi recyklované za studena horší vlastnosti než směs ACO 11+, a lze u nich předpokládat vyšší náchylnost na porušení trhlinami.



Obr. 4 Komplexní křivky elastické a viskózní složky komplexního modulu testovaných směsí E, F, G a H

V grafu 4 jsou zobrazeny řídící křivky směsí E-H, opět doplněné o referenční směs ACO 11+. Je patrné, že ani přidání 3 %-hm. mikromletého betonu nemá zásadní vliv na průběh měřených charakteristik. Dále se potvrdilo, že tvary řídících křivek jsou velmi podobné, ať už směs obsahuje asfaltovou emulzi nebo zpěněný asfalt a ani jiné procentní dávkování nepřináší zásadní rozdíl. Ze čtyř směsí recyklovaných za studena se od ostatních nejvíce odlišuje směs H, která obsahovala R-materiál zrnitosti 0/11 mm. Nejvíce odlišný průběh

Tento výsledek byl vytvořen s finanční podporou programu Centra kompetence TA ČR, projekt č.TE01020168

má pak opět referenční směs ACO 11+. Obě složky komplexního modulu směsi F vychází oproti směsi E vyšší v celém spektru zkušebních teplot a frekvencí. Obsažený mikromletý beton má dle výsledků podobný efekt, jako mívá ve směsích studené recyklace přidávaný cement, tj. zvyšuje tuhost směsi a zvyšuje podíl pružné složky komplexního modulu. Z hlediska celého spektra viskoelastického chování směsí recyklovaných za studena je směs F blíže elastickému (pružnému) chování typickému např. pro beton. Naopak směs E se chová více viskózně (dosahuje vyšších hodnot fázového úhlu) a tedy se svým chováním více blíží chování horkých asfaltových směsí.

Závěr

Hlavní poznatky plynoucí ze zkoušky stanovení komplexního dynamického modulu asfaltové směsi a následného sestavení řídících křivek směsí recyklovaných za studena by se daly shrnout do dále uvedených bodů:

- Asfaltová směs recyklovaná za studena je termo-mechanicky citlivý materiál, ovšem závislost na zkušební teplotě a frekvenci je nižší než u běžné za horka vyráběné asfaltové směsi. Tato skutečnost je jasně patrná z plošších průběhů křivek fázového úhlu i elastické složky komplexního modulu směsí recyklovaných za studena.
- V oboru nejnižších zkoušených teplot a nejvyšších frekvencí má materiál tendenci se chovat téměř elasticky.
- Chování směsí recyklovaných za studena je nejbližší chování za horka prováděných asfaltových směsí v oblasti středních teplot a frekvencí (srovnatelná hodnota fázového úhlu).
- V oboru nejvyšších zkušebních teplot a nejnižších frekvencí dosahují směsi recyklované za studena zhruba polovičních hodnot fázového úhlu než konvenční asfaltové směsi. Chování směsí recyklovaných za studena je tedy blíže chování pružného materiálu, v důsledku čehož budou tyto směsi pravděpodobně méně náchylné na vznik trvalých deformací.
- Směsi se 3 % cementu dosahují výrazně vyšších hodnot elastické složky fázového úhlu v oblasti nízkých frekvencí a vysokých zkušebních teplot. V celém spektru zkušebních teplot a frekvencí pak dosahují nižších hodnot fázového úhlu. Obsažený cement způsobuje posun chování těchto směsí blíže k chování pružného materiálu.

Literatura

[1] Valentin, J., Suda, J., Čížková, Z.: Complex dynamic modulus and master curves of cold recycling mixes, zpráva D2.1 projektu CoRePaSol, 2015. Dostupné z www.corepasol.eu

[2] Kim, Y. R.: Modeling of asphalt concrete, American Society of Civil Engineers, ISBN 978-0-07-146462-8, 2009

[3] ČSN EN 12 697-26 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 26: Tuhost, ÚNMZ, 2012

[4] ČSN EN 12 697-33+A1 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek, ÚNMZ, 2007

[5] Wirtgen GmbH: Wirtgen Cold Recycling Manual. 3. vydání, ISBN 3-936215-05-7, Windhagen, Německo, 2010.

Tento výsledek byl vytvořen s finanční podporou programu Centra kompetence TA ČR, projekt č.TE01020168