

Anna CHOMICZ-KOWALSKA<sup>1</sup>  
Krzysztof MACIEJEWSKI<sup>2</sup>  
Piotr RAMIĄCZEK<sup>3</sup>

## WPŁYW RODZAJU ASFALTU NA WŁAŚCIWOŚCI LEPKOSPĘŻYSTE MIESZANEK MINERALNO- CEMENTOWYCH Z ASFALTEM SPIENIONYM

Artykuł prezentuje wyniki badań właściwości lepko-sprężystych mieszanek mineralno-cementowych z asfaltem spienionym (MCAS) wytwarzanych laboratoryjnie w technologii recyklingu głębokiego na zimno, z uwzględnieniem klasy penetracji użytego lepiszcza (35/50, 50/70, 70/100). Mieszanki recyklowane zawierały w swoim składzie 50% destruktu asfaltowego, 30% destruktu kamiennego oraz 20% nowego kruszywa doziarniającego. Spoiwem hydraulicznym był cement portlandzki klasy 32,5 który dozowano w ilości 2,0%, a nowe lepiszcze w formie piany asfaltowej dodawano w ilości 2,5%. Próbkę walcową zagęszczano w prasie żyratorowej do zadanej gęstości objętościowej, poddawano oddziaływaniu obciążenia cyklicznego w schemacie ściskania, zgodnie z normą AASHTO TP 62-07 (2009) w każdej z kombinacji temperatur (-10°C, 4°C, 21°C, 37,4°C) oraz częstotliwości (25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,1 Hz). Dla każdej z trzech mieszanek różniących się rodzajem użytego lepiszcza uzyskano wartości zespolonego modułu sztywności oraz odpowiadających im kątów przesunięcia fazowego. Dzięki zastosowaniu zasady superpozycji temperaturowo-czasowej możliwe było przesunięcie w domenie częstotliwości danych eksperymentalnych uzyskanych w różnych temperaturach. Dopasowanie funkcji sigmoidalnych umożliwiło stworzenie krzywych wiodących zespolonego modułu sztywności i kątów przesunięcia fazowego będących funkcją częstotliwości obciążenia. Ujęcie szerokiego spektrum danych eksperymentalnych w postaci krzywych wiodących pozwoliło porównać ze sobą właściwości lepkospężyste badanych mieszanek MCAS. W efekcie stwierdzono niewielkie różnice między mieszankami z nowym lepiszczem o penetracji 50/70 i 70/100, mieszające się w granicy dokładności metody, natomiast dla mieszanki z asfaltem spienionym na bazie lepiszcza 35/50 zanotowano odmienny charakter.

**Słowa kluczowe:** asfalt spieniony, mieszanka mineralno-cementowa z asfaltem spienionym (MCAS), recykling głęboki na zimno, podbudowa, moduł zespolony

<sup>1</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Anna Chomicz-Kowalska, Politechnika Świętokrzyska, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, akowalska@tu.kielce.pl

<sup>2</sup> Krzysztof Maciejewski, Politechnika Świętokrzyska, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, kmaciejewski@tu.kielce.pl

<sup>3</sup> Piotr Ramiączek, Politechnika Świętokrzyska, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, piotr@tu.kielce.pl

## 1. Wstęp

Technologia recyklingu głębokiego na zimno stosowana jest w Polsce od niemal 20 lat pod postacią mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE) i sukcesywnie zdobywa coraz większą popularność na terenie całego kraju. Od 2010 roku wdrażane są w budownictwie drogowym również recyklowane podbudowy z mieszanek mineralno-cementowych z asfaltem spienionym (MCAS), w szczególności w województwie świętokrzyskim, gdzie w technologii tej do tychczas przebudowano ponad 40 km dróg, w tym głównie wojewódzkich obciążonych ruchem KR4 [2, 3]. Na przestrzeni lat technologia mieszanek MCAS potwierdziła swoją skuteczność jako szybki i efektywny sposób przebudowy zużytych warstw konstrukcji nawierzchni w nową pełnowartościową podbudowę. Jednakże do chwili obecnej nie badano w szerszym zakresie własności lepkosprężystych tego typu materiału. W Polsce, w początkowym etapie wdrażania mieszanek MCAS stosowano głównie specjalne lepiszcza asfaltowe przeznaczone do spieniania o penetracji z zakresu 70/100 [2], ale w późniejszym okresie, opierając się na pozytywnych wynikach badań laboratoryjnych stosowano już tylko ogólnodostępne tańsze asfalty drogowe klasy 50/70 [2,3]. Badania laboratoryjne wykazały, że w technologii mieszanek MCAS możliwe jest również stosowanie asfaltów klasy 35/50 [2, 3, 7]. Wykonywane na przestrzeni lat odcinki dróg z podbudową z asfaltem spienionym na bazie asfaltu 50/70 i 70/100 ujawniły niewielki wpływ rodzaju użytego lepiszcza na właściwości warstwy podbudowy, jednakże coraz szersze stosowanie tej technologii w naszych warunkach klimatycznych sprawia, że zagadnieniu temu należy poświęcić więcej uwagi.

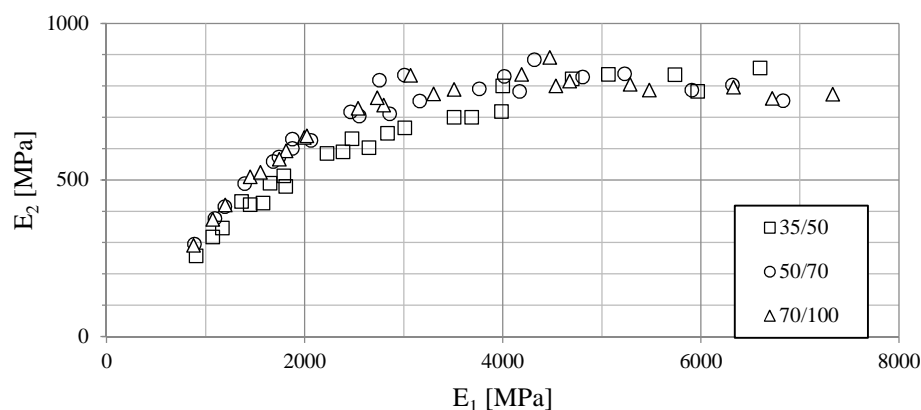
## 2. Materiały i metoda badawcza

Ocenę właściwości lepkosprężystych mieszanek MCAS w aspekcie rodzaju lepiszcza użytego do technologii spieniania (MCAS<sub>35/50</sub>, MCAS<sub>50/70</sub>, MCAS<sub>70/100</sub>), wykonano w oparciu o wyniki oznaczania zespolonego modułu sztywności, oznaczanego w schemacie bezpośredniego cyklicznego ściskania, zgodnie z normą AASHTO TP 62-07 (2009). Mieszanki wytwarzano w całości w laboratorium, symulując zastosowanie technologii recyklingu głębokiego na zimno, analogicznie jak w [4, 8]. Oznaczenia wykonywano na rdzeniach o średnicy 100 mm i wysokości 150 mm wywierconych z próbek cylindrycznych o wymiarach 150 mm x 200 mm zagęszczanych w prasie żyrotorowej. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach wynosiła 11% ( $\pm 1\%$ ). Dla każdej z mieszanek wykonano po 4 próbki, na których zamontowano po 3 czujniki LVDT. Mieszanki badano w temperaturze: -10°C, 4°C, 21°C i 37,4°C oraz przy częstotliwości 25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,1 Hz.

W składzie badanych mieszanek MCAS o właściwościach podanych w [4, 8] stosowano 50% destruktu asfaltowego, 30% destruktu kamiennego oraz 20% kruszywa doziarniającego. Jako środki wiążące stosowano cement klasy 32,5 w ilości 2% oraz asfalt spieniony w ilości 2,5%.

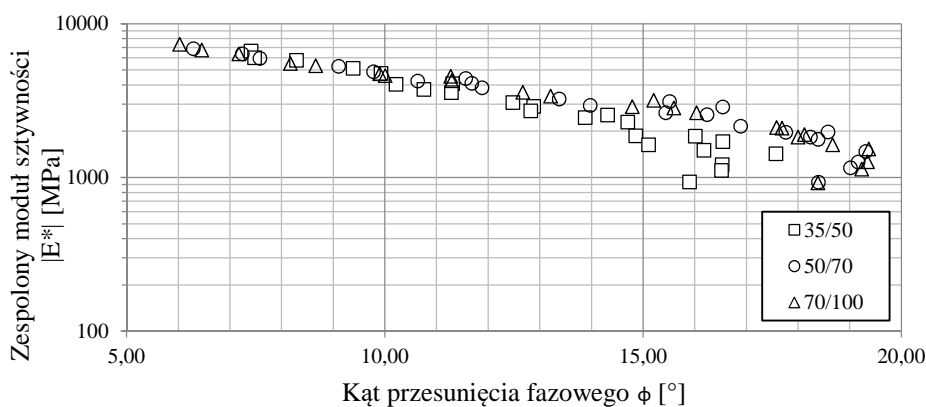
### 3. Zespolony moduł sztywności i krzywe wiodące

W pierwszej kolejności wyniki uzyskane w badaniach przedstawiono w formie wykresów Cole-Cole (rys. 1) i krzywych Blacka (rys. 2). Analiza charakterystyk asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych (mma) w tych przestrzeniach pozwala wnioskować, czy badany materiał spełnia warunki ciała termoreologicznie prostego [6, 10], w przypadku którego można zastosować zasadę superpozycji temperaturowo-czasowej (time-temperature superposition principle, TTSP).



Rys. 1. Wykres Cole-Cole badanych mieszanek MCAS z asfaltem spienionym o penetracjach 35/50, 50/70 i 70/100

Fig. 1. Cole-Cole complex modulus diagram of cold recycled mixtures (CRM) with 35/50, 50/70 and 70/100 foamed bitumen



Rys. 2. Wykresy Blacka badanych mieszanek MCAS z asfaltem spienionym o penetracjach 35/50, 50/70 i 70/100

Fig. 2. Black diagram of tested CRM mixtures with with 35/50, 50/70 and 70/100 foamed bitumen

Wykres Cole-Cole w opisywanym przypadku przedstawia zależności między częścią rzeczywistą zespolonego modułu sztywności  $E_1$  a częścią urojoną  $E_2$ . Przy większych wartościach modułów  $E_1$  (wysokie częstotliwości lub niskie temperatury) zaobserwować można poziomy przebieg uzyskanych krzywych. W badanym zakresie niskich temperatur i wysokich częstotliwości nie odnotowano charakterystycznego dla mma w technologii na gorąco zmniejszania się wartości modułu  $E_2$ . Obraz charakterystyk badanych recyklowanych mieszanek w przestrzeni Blacka silniej ujawnia różnice między mieszanką MCAS<sub>35/50</sub> a pozostałymi dwoma. Krzywa dla tej mieszanki nie tylko przebiega wyraźnie niżej, ale również w zakresie kąta przesunięcia fazowego 14°-17° (zakres wysokich temperatur) wykazuje znamiona utraty ciągłości. Analiza charakterystyk badanych mieszanek na rysunkach 1 i 2 pozwala uznać (w zakresie niskich i średnich kątów przesunięcia fazowego) że krzywe te są ciągłe, ale dodatkowa ostrożność jest wymagana przy analizowaniu wyników mieszanki MCAS<sub>35/50</sub>.

Klasycznie uznaje się, że zasadę TTSP można stosować w zakresie niewielkich odkształceń, gdzie obserwowana jest liniowa lepkosprężystość lepiszczy i mma (odpowiednio do ok. 1% dla asfaltów i ok. 100  $\mu\text{m/m}$  [1]). Szereg badaczy wykazało jednak słuszność tej zasady w obszarze nieliniowej odpowiedzi mma (nawet w obliczu takich zjawisk jak przyrost odkształceń trwałych czy rozwój pęknięć) [9, 11]. Obserwacje te oraz analiza rysunków 1 i 2 pozwala przewidywać, że zasada TTSP będzie obowiązywała dla badanych mieszanek MCAS. Tym samym, powinno być możliwe przesunięcie uzyskanych wyników z różnych temperatur w domenę częstotliwości i uzyskanie krzywych wiodących w temperaturze referencyjnej 20°C.

Wielkość przesunięcia wyników eksperymentalnych ujmuje współczynnik przesunięcia temperaturowego  $a_T$  definiowany zgodnie z równaniem (1). Jego wartość zależna jest od różnicy logarytmu częstotliwości zredukowanej  $f_{red}$  i rzeczywistej  $f$ . Do obliczenia wartości współczynników  $a_T$  zdecydowano się wykorzystać zależność Williamsa-Landela-Ferry'ego (WLF) zgodnie z równaniem (2), gdzie  $C_I$  i  $C_{II}$  to stałe współczynniki dopasowania,  $T$  to temperatura badania a  $T_{ref}$  to temperatura referencyjna dla której konstruowana jest krzywa wiodąca.

$$\log f_{red} - \log f = \log a_T \quad (1)$$

$$\log a_T = -\frac{C_I(T - T_{ref})}{C_{II} + T - T_{ref}} \quad (2)$$

Do modelowania krzywych wiodących wybrano funkcję sigmoidalną (3):

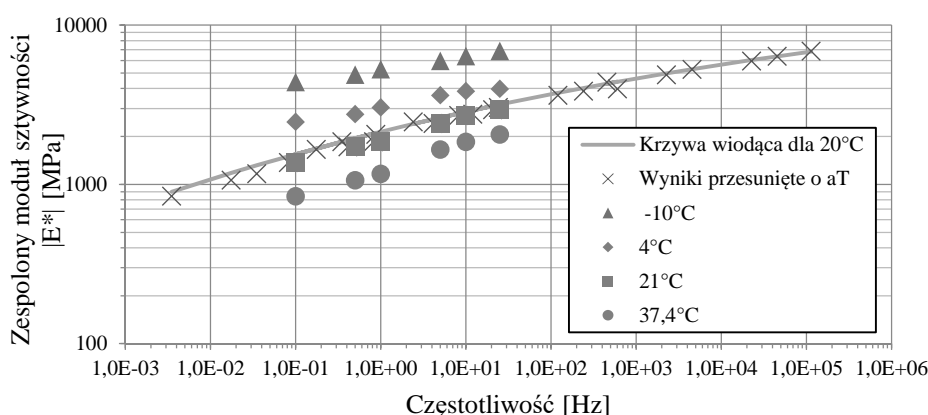
$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta + \gamma \log f_{red})} \quad (3)$$

Jako że parametry ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  i  $\delta$ ) tej funkcji nie reprezentują rzeczywistych właściwości badanych mieszanek, konieczne było wykonanie jednoczesnego dopasowania wartości zarówno dwóch stałych  $C_I$  i  $C_{II}$  funkcji WLF, jak również parametrów  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  i  $\delta$  (tabela 1). Do tego celu posłużono się metodą najmniejszych kwadratów, minimalizując sumę kwadratów różnic między przesuniętymi w domenie częstotliwości pomierzonymi wartościami zespolonego modułu sztywności a dopasowywaną krzywą wiodącą (rys. 3).

Tabela 1. Wartości stałych opisujących przebieg krzywych wiodących modułów zespolonych

Table 1. Fitted parameters for constructing complex moduli master curves

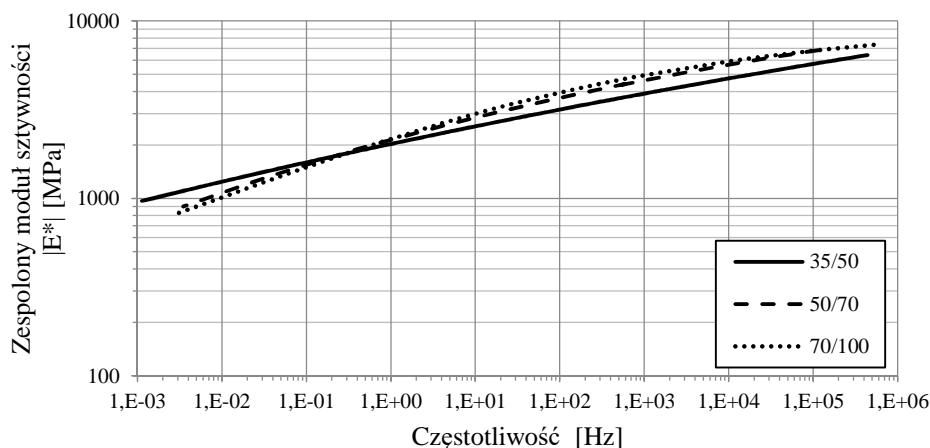
Mieszanka	$C_{I-20^\circ C}$	$C_{II-20^\circ C}$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
MCAS <sub>35/50</sub>	182,01	1314,98	19,7	-2,21	-0,06	-14,45
MCAS <sub>50/70</sub>	74,75	607,45	47,14	-3,76	-0,13	-42,77
MCAS <sub>70/100</sub>	216,87	1769,59	8,71	-1,85	-0,12	-4,18



Rys. 3. Sposób budowy krzywej wiodącej dla modułu zespolonego na przykładzie mieszanki MCAS50/70

Fig. 3. Master curve of CRM mixes with 50/70 foamed bitumen

Na rysunku 4 przedstawiono krzywe wiodące zespolonych modułów sztywności w temperaturze referencyjnej  $T_{ref} = 20^\circ C$ , odpowiadające trzem mieszankom MCAS zawierających w swoim składzie nowe lepszczce w formie asfaltu spienionego wytworzonego z asfaltów różniących się klasą penetracji. Podobnie jak na wykresach Cole-Cole i krzywych Blacka, zauważyć można odmienne zachowanie mieszanki MCAS<sub>35/50</sub>, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości (wysokich temperatur). Przebieg krzywych wiodących wskazuje na mniejszą wrażliwość temperaturową mieszanki z najtwardszym lepszczem, wyrażoną wartością zespolonych modułów sztywności o ok. 200 MPa większą w zakresie najniższych częstotliwości oraz niższą o ok. 1000 MPa w zakresie wysokich częstotliwości.



Rys. 4. Krzywe wiodące modułów zespolonych mieszanek MCAS z asfaltem spienionym o penetracjach 35/50, 50/70 i 70/100 dla temperatury 20°C

Fig. 4. Complex modulus master curves of CRM mixes with 35/50, 50/70, and 70/100 penetration foamed bitumen at 20°C

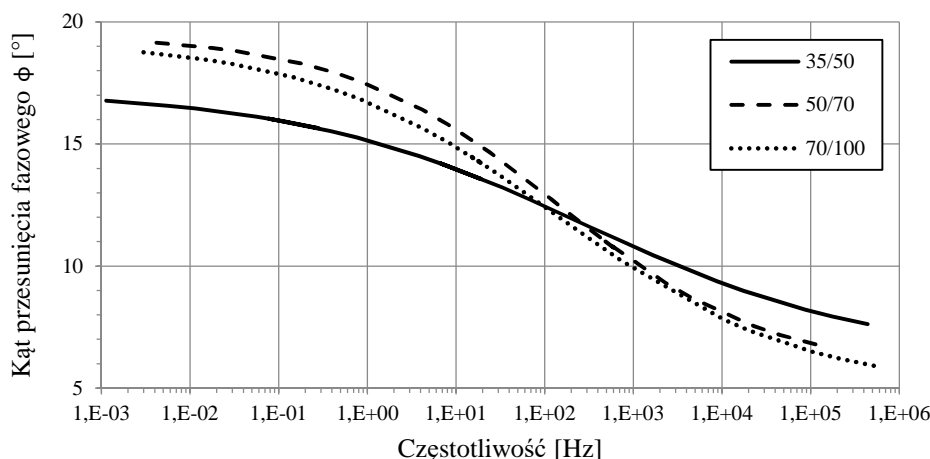
W przypadku mieszanek recyklowanych na zimno, inni badacze (m.in. [5]) wskazują na trudności w spełnieniu założenia TTSP dla kąta przesunięcia fazowego, co uniemożliwia często dopasowanie pojedynczej krzywej wiodącej dla tego parametru. Autorzy w badanych mieszankach MCAS odnotowali zauważalnie gorsze dopasowanie wartości kąta przesunięcia fazowego  $\phi$ , nie na tyle jednak, aby utworzenie krzywych wiodących przy obliczonych wcześniej współczynnikach przesunięcia temperaturowego  $a_T$  było niemożliwe. Przebieg utworzonych krzywych wiodących (rys. 5) jeszcze bardziej niż poprzednie zależności wskazuje na odmienne zachowanie mieszanki  $MCAS_{35/50}$ , która w całym spektrum częstotliwości charakteryzuje się mniejszą zmiennością wartości kąta przesunięcia fazowego.

#### 4. Wnioski

Porównując wyniki uzyskane dla mieszanek  $MCAS_{50/70}$  i  $MCAS_{70/100}$  stwierdzić można, iż rodzaj zastosowanego nowego lepiszcza miał niewielki wpływ na właściwości lepkosprężyste recyklowanej podbudowy. Uzyskane różnice w wartościach modułów dynamicznych i kątów przesunięcia fazowego mieszczą się w granicy ok. 11% dokładności metody oszacowanej zgodnie z AASHTO TP 62-07 (2009).

W przypadku mieszanki  $MCAS_{35/50}$  ocena jest utrudniona, na co wskazują nieciągłości w przestrzeni Blacka, które mogły mieć swoje źródło już na etapie wytwarzania mieszanki. Analizowane zagadnienie wymaga dalszych badań w celu potwierdzenia uzyskanych wyników, badań dotyczących trwałości zmęczeniowej mieszanek MCAS, oraz ich zachowania w zakresie dużych odkształ-

ceń. Przedstawione wyniki badań Autorów stawiają w dobrym świetle zapisy nowego katalogu typowych konstrukcji podatnych i półsztywnych odnoszące się do projektowania konstrukcji nawierzchni z mieszankami MCAS.



Rys. 5. Krzywe wodące kątów przesunięcia fazowego mieszanek MCAS z asfaltem spienionym o penetracjach 35/50, 50/70 i 70/100 dla temperatury 20°C

Fig. 5. Phase angle master curves for CRM mixes with 35/50, 50/70, and 70/100 penetration foamed bitumen at 20°C

## Literatura

- [1] Airey G.D., Rahimzadeh B., Collop A.C., Viscoelastic linearity limits for bituminous materials, *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 36 (2003), p. 643-647.
- [2] Chomicz-Kowalska A.: Zastosowanie recyklingu na zimno z asfaltem spienionym w regionie świętokrzyskim – Część 1, *Drogownictwo*, nr 6 (2015), s. 172-176.
- [3] Chomicz-Kowalska A.: Zastosowanie recyklingu na zimno z asfaltem spienionym w regionie świętokrzyskim – Część 2, *Drogownictwo*, nr 2 (2016), s. 46-54.
- [4] Chomicz-Kowalska A., Maciejewski K.: Multivariate optimization of recycled road base cold mixtures with foamed bitumen. *Procedia Engineering* 108 (2015), s. 436-444.
- [5] Godenzoni C., Graziani A., Bocci M.: Influence of reclaimed asphalt content on the complex modulus of cement bitumen treated materials. *Bituminous Mixtures & Pavements VI*, 2015, s 589-596. DOI: 10.1201/b18538-84.
- [6] Godenzoni C., Graziani A., Perraton D.: Complex modulus characterisation of cold-recycled mixtures with foamed bitumen and different contents of reclaimed asphalt, *Road Materials and Pavement Design* (2016), DOI: 10.1080/14680629.2016.1142467.
- [7] Iwański M, Chomicz-Kowalska A., Maciejewski K.: Application of synthetic wax for improvement of foamed bitumen parameters, *Construction and Building Materials*, Vol. 83 (2015), pp. 62-69, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.060.

- [8] Iwański M, Chomicz-Kowalska A., Ramiączek P., Maciejewski K., Iwański M. M.: Wpływ laboratoryjnych metod zagęszczania na właściwości fizykomechaniczne recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem spienionym. *Budownictwo i Architektura*, Vol. 13, nr 1 (2014), s. 53-62.
- [9] Nguyen M.L, Sauze´at C., Di Benedetto H., Tapsoba N.: Validation of the time-temperature superposition principle for crack propagation in bituminous mixtures *Materials and Structures* 7/2013, DOI 10.1617/s11527-012-9954-7.
- [10] Olard F., Di Benedetto H.: General 2S2P1D model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes, *Road Materials and Pavement Design*, 4:2, 185-224, DOI: 10.1080/14680629.2003.9689946.
- [11] Zhao Y., Kim R.Y.: The time-temperature superposition for asphalt mixtures with growing damage and permanent deformation in compression. *TRB 2003 Annual Meeting*.

## **INFLUENCE OF BITUMEN TYPE ON VISCO-ELASTIC PROPERTIES OF COLD RECYCLED MIXES WITH FOAMED BITUMEN**

### **S u m m a r y**

The article presents results concerning visco-elastic properties of deep cold recycled mixes with foamed bitumen, in scope of the penetration range of the new added bitumen (in range od 35/50 to 70/100). The recycled mixes contained 50% of reclaimed asphalt and 30% of reclaimed crushed stone mase and 20% of virgin aggregates. Portland cement was used as a biding agent in amount of 2% and 2.5% of foamed bitumen was added. The samples prepared in gyrotory compactor were subjected to cyclic compressive loading in accordance with AASHTO TP 62-07 (2009) in different temperatures (-10°C, 4°C, 21°C, 37,4°C) and at 6 frequency sweeps at each temperature (25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,1 Hz). For all of the three mixes the values of complex moduli and phase angles were obtained. The utilization of time-temperature superposition principle enabled to shift the experimental data in the frequency domain and to fit sigmoidal functions, resulting in a fitting of master curves for complex moduli and phase angles. The construction of master curves as a function of loading frequency made it possible to compare the visco-elastic properties of the produced mixes with foamed bitumen. No significant differences were found between the mixes containing new 50/70 and 70/100 bitumen, whereas the mix with 35/50 was different.

**Keywords:** foamed bitumen, CRM, cold recycled mixes, base course, complex modulus

*Przesłano do redakcji: 07.06.2016 r.*

*Przyjęto do druku: 30.06.2016 r.*

DOI: 10.7862/tb.2016.75