



BOHDAN DOŁŻYCKI

Politechnika Gdańska
bohdan.dolzyccki@willis.pg.
gda.pl



MARIUSZ JACZEWSKI

Politechnika Gdańska
mariusz.jaczewski@willis.
pg.gda.pl



CEZARY SZYDŁOWSKI

Politechnika Gdańska
cezary.szydowski@willis.
pg.gda.pl

Wpływ zawartości środków wiążących na sztywność mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych

Artykuł powstał na podstawie referatu przedstawionego w dniu 27 maja 2016 roku na 12 międzynarodowej konferencji „Modern Building Materials, Structures and Techniques”, która odbyła się w Wilnie.

Głęboki recykling na zimno jest jedną z najczęściej stosowanych metod recyklingu zużytych nawierzchni podatnych. W jego zakres wchodzić dwie główne technologie, przy wykorzystaniu różnych środków wiążących lub ich kombinacji – mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne (MCE) oraz mieszanki związane asfaltem spienionym oraz cementem. Szczegółowo obydwie technologie zostały opisane w artykułach Dołżyckiego [1], Kukielki [2], a także Iwańskiego i wsp. [3].

Podstawowymi środkami wiążącymi używanymi w mieszankach mineralno-cementowo-emulsyjnych są cement oraz emulsja asfaltowa. Podstawowy materiał mineralny – destrukta asfaltowy – zwykle pochodzi ze starych zniszczonych nawierzchni dróg i charakteryzuje się

niekiedy dość niską jakością. Wymagania stawiane gotowym mieszankom są wysokie, szczególnie pod względem wytrzymałości materiału. W konsekwencji konieczne jest dodawanie dość dużej ilości środków wiążących do mieszanki, szczególnie cementu, który odpowiada za poprawę właściwości mechanicznych. Podejście takie stosowane jest w Polsce [4], a także krajach sąsiednich, np. w Niemczech [5].

Właściwości mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych w zasadniczym stopniu zależą od proporcji oraz interakcji zachodzących pomiędzy obydwojma stosowanymi środkami wiążącymi (Theyse i wsp. [6], Bocci i wsp. [7]). Dodatek emulsji asfaltowej wpływa na zwiększenie charakteru lepkiego mieszanki. Nawierzchnia zachowuje się bardziej jak nawierzchnia podatna, tzn. zwiększona jest wewnętrzna spójność mieszanki, zmniejszone jest ryzyko powstania spękań skurczowych, a także zwiększona odporność na działanie wody i mrozu. Dzięki temu wydłuża

się przewidywaną trwałość zmęczeniową całej nawierzchni. Nadmierna zawartość emulsji asfaltowej może skutkować znaczącym obniżeniem modułu sztywności. Z kolei dodatek cementu odpowiada za podwyższenie właściwości mechanicznych – modułu sztywności oraz wytrzymałości na rozciąganie, a także zwiększenie odporności na działanie wody i mrozu. Ponadto dodatek spoiwa cementowego pozwala uzyskać stosunkowo wysoką początkową wytrzymałość mieszanki MCE, co jest korzystne dla optymalnego wykorzystania przebudowywanej konstrukcji nawierzchni do celów ruchu technologicznego. Cement przyspiesza także rozpad emulsji asfaltowej. Z drugiej strony, obecność cementu wpływa na wyższy skurcz wykonanej mieszanki, co może skutkować powstaniem spękań skurczowych w warstwie z mieszanki MCE, a w konsekwencji powodować powstanie spękań odbitych na powierzchni wykonanej nawierzchni. Problem ten został szczegółowo opisany w artykułach Chomicz-Kowalskiej i wsp. [8] oraz Użarówskiego i wsp. [9].

Właściwości mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE) są wypadkową oddziaływania dwóch środków wiążących, które odpowiadają za powstanie zróżnicowanych wiązań chemicznych. Emulsja asfaltowa tworzy wiązania bitumiczne, które odpowiedzialne są za podatny charakter wybudowanej warstwy. Cement tworzy wiązania hydrauliczne, które odpowiadają za sztywność wykonanej warstwy. Wynikowy charakter warstwy z mieszanki MCE jest determinowany przez dominujący rodzaj wiązania chemicznego. W przypadku mieszanek MCE dominującym rodzajem wiązania chemicznego powinny być wiązania asfaltowe, ze względu na obniżanie ryzyka powstania spękań skurczowych. Wiązania hydrauliczne, które odpowiadają za sztywność oraz za odporność na warunki środowiskowe, nie powinny być całkowicie pomijane.

Głównym celem realizowanych badań była ocena wpływu poszczególnych rodzajów środków wiążących na moduł sztywności mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych, a także ustalenie limitu zawartości cementu.

Badane materiały

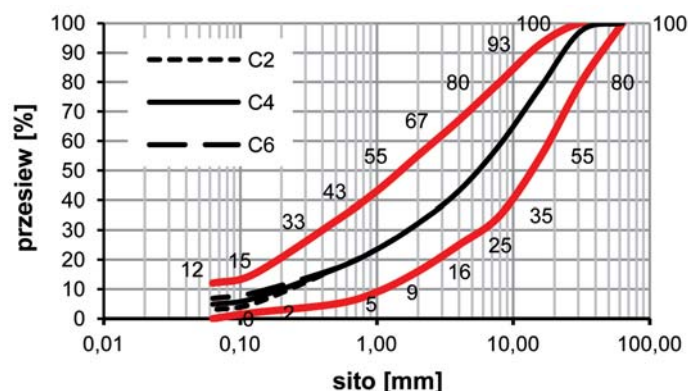
Sztywność mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych zależy od uziarnienia mieszanki mineralnej, ilości i rodzaju asfaltu w destrukcie oraz kombinacji zastosowanych środków wiążących. W celu oceny wpływu środków wiążących na sztywność podbudów MCE przebadano mieszankę

zaprojektowaną według obowiązujących wytycznych [4]. Mieszanek zaprojektowano wykorzystując destruk asfaltowy, kruszywo o ciągłym uziarnieniu 0/31,5 oraz kruszywo drobne 0/2. Skład procentowy zaprojektowanych mieszanek przedstawiono w tabeli 1, natomiast krzywe uziarnienia na rysunku 1. Na potrzeby badań przyjęto następujące oznaczenia mieszanek MCE: „C” oznacza zawartość procentową cementu, „E” oznacza zawartość procentową emulsji asfaltowej. Przykład mieszanki MCE zawierającej 2% cementu i 4% emulsji asfaltowej – C2E4.

Badaniom poddano 9 mieszanek ze zmienną zawartością środków wiążących, odpowiednio 2%, 4% i 6% każdego ze środków. Zastosowane kombinacje zestawiono w tabeli 2. W badaniach zastosowano emulsję asfaltową C60B5R oraz cement CEM I 32,5R. Wilgotność mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych określono wg metody Proctora, zgodnie z [4], uwzględniając wodę zawartą w emulsji oraz wpływ zwilżenia przez asfalt.

Tabela 1. Skład procentowy zaprojektowanych mieszanek MCE

	Mieszanka mineralna		
	C2	C4	C6
Cement [%]	2	4	6
Kruszywo drobne 0/2 [%]	10	8	6
Mieszanka o ciągłym uziarnieniu 0/31,5 [%]	18	18	18
Destrukt asfaltowy [%]	70	70	70



Rys. 1. Krzywe uziarnienia zaprojektowanych mieszanek MCE

Mieszanki MCE przygotowano w mieszarce mechanicznej według normy PN-EN 12697-35. Próbkę zagęszczano w prasie żyratorowej wg PN-EN 12697-31 do wskaźnika zagęszczenia przyjętego na poziomie 99%. Zagęszczano próbki o średnicy 100 mm i wysokości 170 mm. Po 14 dniach od zagęszczania górną i dolną płaszczyznę próbek docinano w celu uzyskania gładkich powierzchni i próbek

Tabela 2. Oznaczenia mieszanek MCE oraz kombinacje środków wiążących

Oznaczenie mieszanki MCE	Mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna (MCE)								
	C2E2	C2E4	C2E6	C4E2	C4E4	C4E6	C6E2	C6E4	C6E6
Zawartość cementu, [%]	2	2	2	4	4	4	6	6	6
Zawartość emulsji, [%]	2	4	6	2	4	6	2	4	6

o wysokości 150 mm. Po 28 dniach od zagęszczania przeprowadzono badania modułu sztywności. Zgodnie z normą AASHTO TP-79 próbki badawcze powinny być wycinane z próbek żyratorowych o średnicy 150 mm, jednak w przypadku mieszanek MCE z uwagi na obecność ziaren o dużej średnicy i niskiej wytrzymałości początkowej takie podejście okazało się niemożliwe do spełnienia.

Badania laboratoryjne

Moduł sztywności oraz kąt przesunięcia fazowego zostały wyznaczone w urządzeniu Simple Performance Tester (SPT) według AASHTO TP-79. W trakcie badania próbki poddawane są haversinusoidalnemu obciążeniu ściskającemu w trzech temperaturach: 4°C, 20°C i 40°C. Badanie przeprowadzane było w trybie kontrolowanego odkształcenia, w którym urządzenie dąży do utrzymania odkształcenia międzyszczytowego na poziomie 100 μ strain (100×10^{-6}). Odkształcenie mierzone było trzema czujnikami zamocowanymi na poboczniczy próbki w rozstawie co 120°. Baza pomiarowa czujników wynosiła 70 ± 1 mm. W przypadku każdej mieszanki MCE przebadano po 3 próbki w każdej temperaturze. Podczas pojedynczego badania moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego wyznaczone były w 9 częstotliwościach. W przypadku badania w temperaturze 40°C próbki poddawane były dodatkowemu obciążeniu o częstotliwości 0,01 Hz. Widok próbki podczas badania pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Widok próbki podczas badania w urządzeniu Simple Performance Tester (SPT)

Wyniki badań

Wyniki badań dotyczące wybranych częstotliwości przedstawiono w tabeli 3. Wybrano częstotliwości 10; 1; 0,1 i 0,01 Hz jako najbardziej reprezentatywne do pełnej oceny zachowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Porównanie modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego dla częstotliwości obciążenia 10 Hz i charakterystycznych temperatur przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Wybrana częstotliwość 10 Hz jest najczęściej stosowa-

Tabela 3. Moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego badanych mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych

Oznaczenie mieszanki	Temp. [°C]	Moduł sztywności [MPa]				Kąt przesunięcia fazowego [°]			
		Częstotliwość [Hz]				Częstotliwość [Hz]			
		10	1	0,1	0,01	10	1	0,1	0,01
C2E2	4	5 301	4 374	3 470	–	7,27	9,02	11,13	–
	20	2 969	2 112	1 431	–	13,10	15,81	17,80	–
	40	1 258	721	441	306	20,93	21,12	19,30	15,92
C2E4	4	5 456	4 410	3 344	–	8,51	10,58	13,21	–
	20	2 662	1 758	1 089	–	15,81	18,85	21,05	–
	40	1 006	524	293	193	23,63	23,52	20,92	16,69
C2E6	4	6 139	4 727	3 392	–	9,64	12,17	15,27	–
	20	2 711	1 655	936	–	18,72	22,34	24,52	–
	40	785	374	193	138	27,28	27,18	23,72	18,68
C4E2	4	7 451	6 383	5 261	–	5,88	7,40	9,34	–
	20	4 880	3 669	2 651	–	10,38	12,64	14,22	–
	40	2 257	1 436	954	711	17,36	17,19	14,92	11,28
C4E4	4	6 993	5 740	4 513	–	7,54	9,39	11,80	–
	20	4 224	2 946	1 940	–	13,40	16,26	18,20	–
	40	1 580	918	581	423	20,57	19,70	16,71	12,14
C4E6	4	7 044	5 605	4 253	–	8,36	10,37	12,83	–
	20	3 404	2 241	1 405	–	15,43	18,50	20,51	–
	40	1 374	755	441	304	22,15	21,77	18,67	13,41
C6E2	4	9 209	8 192	6 975	–	5,05	6,32	8,01	–
	20	6 872	5 285	3 883	–	9,42	11,49	13,05	–
	40	2 828	1 942	1 419	850	14,30	13,40	11,17	8,86
C6E4	4	8 373	6 983	5 583	–	6,51	8,10	10,13	–
	20	4 997	3 604	2 485	–	11,95	14,34	15,85	–
	40	2 255	1 427	963	721	17,99	17,20	14,61	10,93
C6E6	4	7 582	6 206	4 860	–	7,39	9,18	11,38	–
	20	4 613	3 221	2 127	–	13,24	15,91	17,72	–
	40	1 722	1 023	651	476	20,17	19,41	16,36	11,68

na przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni, ponieważ odpowiada ruchowi pojazdów z prędkością około 60 km/h. W przypadku modułu sztywności przedstawiono wyniki dla temperatury +20°C, ponieważ jest to temperatura najbardziej zbliżona do temperatury ekwiwalentnej nawierzchni, spośród trzech temperatur, w których prowadzono badania. Wyniki kąta przesunięcia fazowego podano dla temperatury +40°C, ponieważ w tej temperaturze najbardziej widoczne są różnice wynikające z lepkosprężystego charakteru badanego materiału.

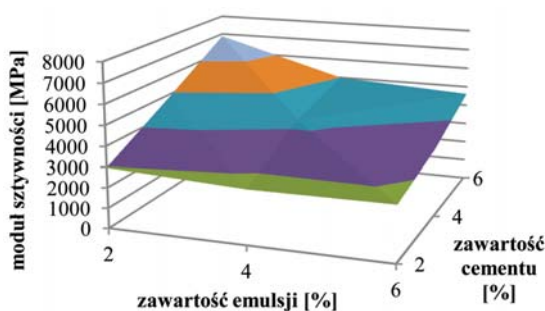
Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono krzywe wiodące modułu sztywności. Przyjęto procedurę opisaną w raporcie NCHRP 9-29 PP 02 [10]. Zastosowane do obliczeń równanie (1) zakłada użycie współczynnika przesunięcia obliczonego z równania Arrheniusa.

$$\log|E^*| = \delta + \frac{(Max - \delta)}{1 + e^{\beta \cdot \gamma \left\{ \log f + \frac{\Delta E_a}{19.14714} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right] \right\}}} \quad (1)$$

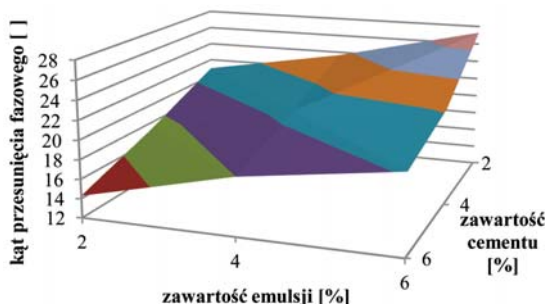
w którym:

- $|E^*|$ – moduł sztywności, psi
- Max – maksymalny moduł sztywności, psi
- f – częstotliwość, Hz
- T_R – temperatura referencyjna, K
- T – temperatura badania, K
- δ, β, γ – parametry dopasowania,
- ΔE_a – energia aktywacji (traktowana jako parametr dopasowania).

Krzywe wiodące dotyczące badanych mieszanek zestawiono w 6 grupach uzależnionych od kombinacji środków wiążących. Rysunki 5a, 5b i 5c pokazują krzywe wiodące w przypadku stałej zawartości cementu (odpowiednio 2, 4 i 6%), natomiast rysunki 5d, 5e i 5f przedstawiają krzywe wiodące w przypadku stałej zawartości emulsji asfaltowej (odpowiednio 2, 4 i 6%).

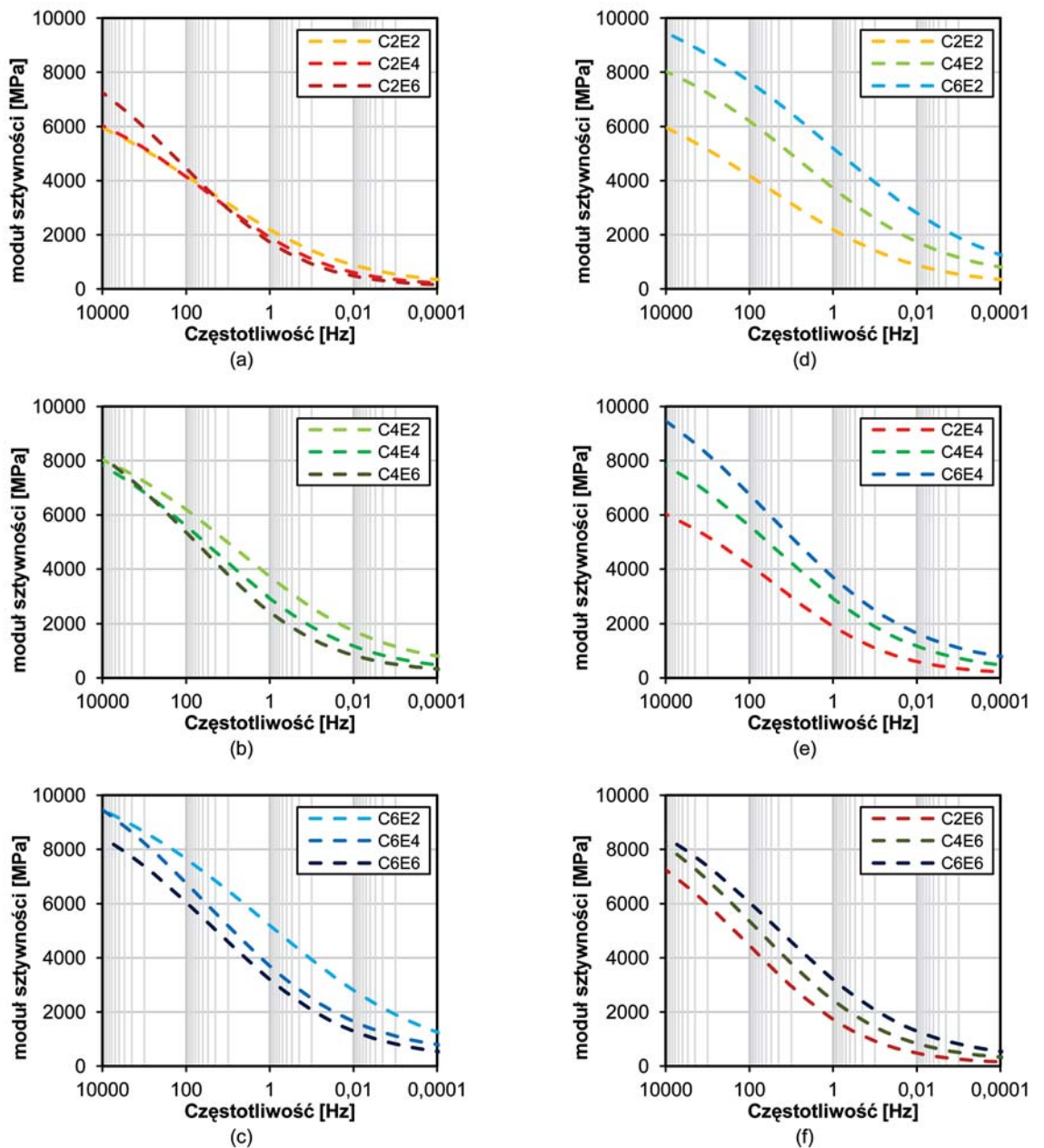


Rys. 3. Moduł sztywności mieszanek MCE wyznaczona w temperaturze 20°C i częstotliwości 10 Hz



Rys. 4. Kąt przesunięcia fazowego wyznaczony w temperaturze 40°C i częstotliwości 10 Hz

Rys. 5. Krzywe prowadzące moduły sztywności badanych mieszanek MCE dla stałych zawartości: cementu – a) 2%, b) 4%, c) 6%; emulsji – d) 2%, e) 4%, f) 6%



Analiza wyników oraz dyskusja

Przeprowadzone badania laboratoryjne pokazały złożony charakter mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Wpływ środków wiążących jest znaczący, jednak trudny do jednoznacznej oceny. Szczegółowa analiza pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Właściwości mieszanek MCE tzn. zarówno moduł sztywności oraz kąt przesunięcia fazowego, w przypadku wszystkich zbadanych kombinacji w bardzo dużym stopniu zależały od temperatury oraz częstotliwości (czasu) obciążenia. Zakres zmiany wartości wynosił od 5500 do 9000 MPa w przypadku modułu sztywności oraz od 9 do 18° w przypadku kąta przesunięcia fazowego. Taki rodzaj zachowania się materiału jest charakterystyczny dla materiałów lepko-sprężystych (np. mieszanek mineralno-asfaltowych).

2. Zgodnie z oczekiwaniami najwyższe wartości modułów sztywności uzyskano w przypadku kombinacji C6E2, a najniższe w przypadku kombinacji C2E6.

3. Wpływ środków wiążących jest bardziej widoczny w temperaturach wysokich, co związane jest z obecnością emulsji asfaltowej – składnikiem odpowiadającym za lepki charakter mieszanki MCE.

4. W niskich temperaturach charakter mieszanek MCE jest bliższy zachowaniu się materiałów związanych spoiwami hydraulicznymi. Moduły sztywności uzyskiwane w temperaturze 4°C przy częstotliwości 10 Hz są od 30 do 70% wyższe od uzyskiwanych przy częstotliwości 0,1 Hz. W przypadku temperatury 40°C, różnica ta wynosi od 100 do 300%. Wiązania hydrauliczne determinują charakter mieszanek MCE w temperaturach niskich, natomiast wiązania asfaltowe w temperaturach wysokich.

5. Wraz ze wzrostem zawartości emulsji asfaltowej, wpływ

zawartości cementu na moduł sztywności maleje. Największe zmiany wartości modułów sztywności stwierdzono przy 2% zawartości emulsji asfaltowej – każde dodatkowe 2% cementu zwiększa średni moduł sztywności o około 1500 MPa. Wartość ta maleje wraz ze zwiększaniem zawartości emulsji asfaltowej i wynosi odpowiednio 1000 i 500 MPa, przy zawartości emulsji asfaltowej wynoszących 4 oraz 6%.

6. Wpływ zwiększania zawartości emulsji asfaltowej, przy stałych zawartościach cementu jest bardziej złożony. Nie zaobserwowano znaczących zmian w średnich wartościach modułu sztywności przy zawartości cementu wynoszącej 2% – największe różnice widoczne są w niskiej temperaturze, gdy wpływ emulsji asfaltowej jest znikomy. Odmienny charakter był widoczny przy wyższych zawartościach cementu (4% oraz 6%). Największa zmiana widoczna jest przy zwiększeniu zawartości emulsji asfaltowej z 2 do 4%. Wpływ dodatkowej zawartości emulsji asfaltowej, ponad 4%, na moduł sztywności jest mniejszy.

7. Dodatkowe badania laboratoryjne konieczne są m.in. do prawidłowego określenia modułu maksymalnego mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Można to zaobserwować na rysunku 5b. Maksymalna wartość modułu sztywności określona przy najwyższej wartości częstotliwości w przypadku wszystkich mieszanek (C4E2, C4E4, C4E6) jest identyczna. Takie zachowanie nie jest jednolite w przypadku pozostałych zawartości cementu (odpowiednio 2 oraz 6%). W tych przypadkach dwie z trzech badanych mieszanek wykazały zbliżoną wartość maksymalnego modułu sztywności.

8. Przeprowadzone badania nie pozwoliły na jednoznaczne wyznaczenie granicy czysto sprężystego zachowania się mieszanek MCE. Zagadnienie to wymaga również dalszych badań.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły złożony charakter zachowania się mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE) pod obciążeniem. Różne rodzaje wiązań fizycznych oraz chemicznych, które tworzone są przez różne środki wiążące nie wykazały jednoznacznego wpływu na zachowanie się mieszanek. Jednoznaczna granica pomię-

dzy dominacją danego typu wiązania, hydraulicznego czy asfaltowego, nie została stwierdzona. W przypadku każdej z przebadanych recept, właściwości mechaniczne mieszanek w dużym stopniu zależały od czasu obciążenia oraz temperatury badania. Moduł sztywności mieszanek MCE wzrastał wraz ze zwiększaniem zawartości cementu, natomiast malał wraz ze wzrostem zawartości emulsji asfaltowej. W przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych większy wpływ na właściwości mechaniczne mieszanek MCE był widoczny w przypadku zmiany zawartości cementu.

Bibliografia

- [1] Dotżycki B. Badania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). *Budownictwo i Architektura* 2015;14(4):189-196.
- [2] Kukielka J. Trwałość podbudów z mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MMCE). *Budownictwo i Architektura* 2007;1:45-56.
- [3] Iwański M, Chmomicz-Kowalska A. The Effects of Using Foamed Bitumen and Bitumen Emulsion in the Cold Recycling Technology. Environmental Engineering The 8th International Conference. May 19–20, 2011, Vilnius, Lithuania, 1089-1096
- [4] Instrukcja projektowania i wbudowywania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). GDDKiA. Politechnika Gdańska 2013 www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/p/prace-naukowo-badawcze-w-trakcie_3434/instrukcja%20projektowania%20i%20wbudowywania%20mieszanek%20mineralno-cementowo-emulsyjnych-wersja-12-12-2013.pdf
- [5] Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau. Vol 636. FGSV. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßen. Köln 2005.
- [6] Theyse H, Long F, Harvey JT, Monismith CL. Discussion of Deep In-Situ Recycling (DISR). Technical Memorandum. TM-UCB-PRC-2004-6. Pavement Research Center. Institute of Transportation Studies. University of California Berkeley and University of California Davis 2004.
- [7] Bocci M, Grilli A, Cardone F, Graziani A. A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials. *Construction and Building Materials* 2011;25:773–778.
- [8] Chmomicz-Kowalska A, Maciejewski K. Multivariate optimization of recycled road base cold mixtures with foamed bitumen. 7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering (MATBUD'2015). *Procedia Engineering* 2015;108:436–444.
- [9] Użarowski L, Michael Maher M. Green Asphalt Pavement Technologies Are Sustainable Only if They Deliver Acceptable Performance. Annual Conference of the Transportation Association of Canada Charlottetown 2015, PEI
- [10] National Cooperative Highway Research Program. NCHRP Report 614. Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice. Transportation Research Board. Washington D.C. 2008.

Zapraszamy do prenumerowania DROGOWNICTWA w 2017 roku

prenumerata roczna normalna 250 zł } (w tym 5% VAT)
cena 1 egzemplarza 21 zł }

prenumerata roczna studencka 125 zł } (w tym 5% VAT)
cena 1 egzemplarza 10,50 zł }

Uprzejmie informujemy Szanownych Prenumeratorów, że egzemplarze „Drogownictwa” oraz faktury będą wysyłane po przesłaniu zamówienia na adres prenumerata.drogownictwo@sitkrp.org.pl oraz po wpłaceniu należnej kwoty na nasze konto:

38 1160 2202 0000 0000 2741 3872

Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Zarząd Krajowy
ul. Czackiego 3/5, 00-043 Warszawa

Redakcja