

dów. Równocześnie należy umożliwić stosowanie do niższych warstw z mma, asfaltów o większym stopniu penetracji, które cechuje dobra odporność na działanie ujemnych wartości temperatury. Problem spękań niskotemperaturowych był w Polsce do niedawna ignorowany bądź uwzględniany w bardzo niewielkim stopniu. Jest to bardzo niepokojące, ponieważ jak wskazują najnowsze badania, spękania niskotemperaturowe znacznie obniżają trwałość zmęczeniową nawierzchni. Znacznie więcej energii poświęcano odporności mma na szkodliwe działanie zamarzającej wody (badania ITSR), starając się w jak najprostszy sposób wyeliminować problem. Doprowadziło to do stworzenia specyfikacji technicznych, w których zamiast oznaczania optymalnej zawartości lepiszcza w mma narzuca się z góry bardzo dużą zawartość lepiszcza, stanowiącą jakoby remedium na obniżenie trwałości nawierzchni i spękania niskotemperaturowe. Jednak o ile większa zawartość lepiszcza zazwyczaj pozytywnie wpływa na trwałość nawierzchni asfaltowej oraz jej odporność na szkodliwe działanie wody (w tym wody zamarzającej), może mieć bardzo negatywny wpływ na jej odporność na spękania niskotemperaturowe (większa rozszerzalność i skurcz temperaturowy mma). W związku z tym wydaje się być niezbędny powrót do dobrej praktyki projektowania mma metodą poszukiwania optymalnej zawartości lepiszcza.

Bibliografia

- [1] A. Woś, *Klimat Polski*, PWN, Warszawa 1999
- [2] K. Kożuchowski, *Klimat Polski – Nowe spojrzenie*, PWN, Warszawa 2011
- [3] E. Bednorz (red.), *Klimat Polski na tle klimatu Europy. Warunki termiczne i opadowe*, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań 2010
- [4] H. Lorenc (red.), *Atlas Klimatu Polski*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 2005
- [5] P. Radziszewski, J. Piłat, K. Kowalski, J. Król, M. Sarnowski, *Weryfikacja wymagań i metod oceny właściwości lepkosprężystych krajowych asfaltów i asfaltów modyfikowanych*, Warszawa 2011
- [6] Strona internetowa Departamentu Rolnictwa Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej: www.usda.gov, dostęp 20.11.2012
- [7] Polska Norma PN-EN 12831 *Instalacje grzewcze w budynkach – Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego*
- [8] A. Werpachowska, Praca dyplomowa – *Wpływ warunków atmosferycznych na rozkład temperatury w konstrukcji nawierzchni drogowej*, Politechnika Szczecińska 2004
- [9] J. Sudyka, R. Borucki, A. Grączewski, J. Kusiak, Sprawozdanie z realizacji pracy pt: *Wpływ parametrów termiczno-mechanicznych nawierzchni asfaltowej na trwałość zmęczeniową nawierzchni*, Warszawa 2005
- [10] M. Strzeszewski, P. Wereszczyński, *Norma PN-EN 12831. Nowa metoda obliczania projektowego obciążenia. Poradnik*
- [11] Załącznik do zarządzenia nr 102 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19 listopada 2010 roku: *Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych, WT-2 2010 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania techniczne*
- [12] Strona internetowa poświęcona programowi Superpave <http://www.superpave.psu.edu>, dostęp 20.11.2012 ■



JAROSŁAW
KUŹNIEWSKI

Politechnika Wrocławska
jaroslaw.kuzniowski@pwr.
wroc.pl

Badania modułu sztywności mieszanek mce w aparacie NAT

Badanie modułów sztywności mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (mce) wykonuje się w celu określenia zachowania się mieszanki,

na skutek oddziaływań zewnętrznych, przekazywanych na poszczególne warstwy konstrukcyjne nawierzchni jezdni. Badania modułów sztywności (oraz współczynników Poissona i odporności zmęczeniowych) są przydatne w projektowaniu konstrukcji jezdni metodami mechanistycznymi. Natomiast właściwości lepkoplastyczne (szczególnie warstw wierzchnich), wyznaczane poprzez moduły sztywności pełzania i koleinowanie, dają podstawę do oceny mieszanki w wysokiej temperaturze latem.

Moduł sztywności mieszanki jest to stosunek naprężenia do odkształcenia. Termin ten jest używany jako zastępczy wobec bezwzględnej wartości modułu zespolonego lub modułu sztywności sprężystej.

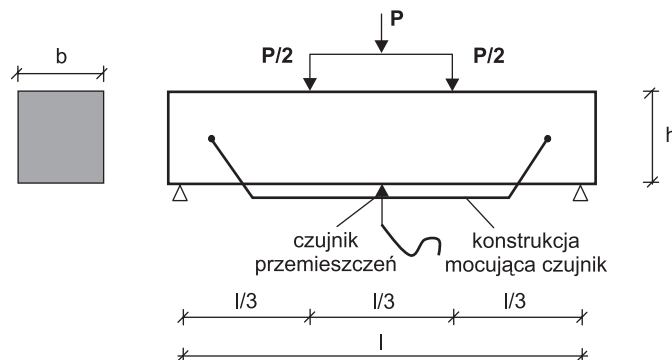
W zależności od sposobu obciążenia można określić rodzaje modułów:

- moduł sprężystości wzdłużnej,
- moduł sprężystości poprzecznej,

- moduł sprężystości objętościowej,
- moduł kompleksowy.

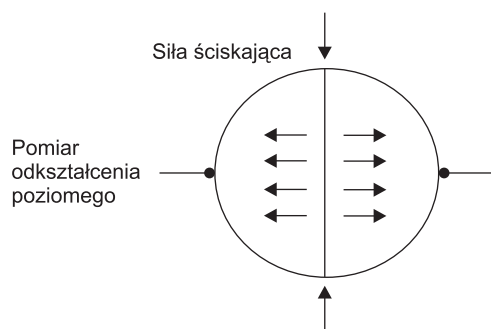
Pomiary modułów można przeprowadzać dwoma metodami:

- na belce prostopadłościowej, obciążonej według schematu przedstawionego na rysunku 1,



Rys. 1. Schemat badania zginania do oznaczenia statycznego modułu sprężystości na belce prostopadłościowej

- na próbkach walcowych, obciążanych krótkotrwałym impulsem w aparacie NAT, według schematu przedstawionego na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat badania modułu sztywności sprężystej na próbce walcowej, w aparacie NAT



Fot. 1. Stanowisko do oznaczenia dynamicznego modułu sprężystości w aparacie NAT (fot. J. Kuźniewski)

Schemat obciążenia belki prostokątnej przy wyznaczaniu statycznego modułu sprężystości na próbkach, przedstawia rysunek 1, zgodnie z [3].

Poniżej przedstawione będą wyniki uzyskane z badań przy zastosowaniu drugiej metody, które przeprowadzono na próbkach o różnych składach recepturowych w różnej temperaturze.

Moduł sprężystości określony w aparacie NAT

Duże osiągnięcia w dziedzinie badań mieszanek mineralno-asfaltowych i wykorzystywania wyników w mechanistycznej analizie pracy nawierzchni drogowej ma Uniwersytet w Nottingham w Wielkiej Brytanii [4]. Tam też prowadzono intensywne prace nad skonstruowaniem sprzętu do uzyskiwania danych o cechach wytrzymałościowych materiałów, w wyniku których został opracowany aparat *Nottingham Asphalt Tester* (NAT).

Do podstawowych części składowych aparatu NAT należą:

- siłownik pneumatyczny przekazujący obciążenie,
- rama testująca, składająca się z zespołu stalowych elementów, których zadaniem jest przeniesienie obciążenia na próbkę,
- rama utrzymująca próbkę, różna w zależności od typu prowadzonego testu, przez którą przekazywane jest obciążenie,
- czujniki przemieszczenia rejestrujące przemieszczenia próbki,
- jednostka sterowania cyfrowego,
- komputer z zainstalowanym programem sterującym,
- komora klimatyczna utrzymująca stałą temperaturę badanej próbki,
- sprężarka zapewniająca ciśnienie potrzebne do uzyskania pożądanego obciążenia.

Na rysunku 2 i fotografii 1 przedstawiono odpowiednio schemat obciążania próbki walcowej oraz stanowisko badania.

Przy pomocy tego aparatu można wykonać kilka rodzajów badań [5]:

- modułu sztywności sprężystej mieszanek (docelowe odkształcenie lub naprężenie),
- pełzania pod obciążeniem statycznym i dynamicznym,
- zmęczenia.

Badania te mogą być przeprowadzane w zakresie temperatury od -10°C do $+60^{\circ}\text{C}$.

Test modułu sztywności sprężystej wykonywany jest w urządzeniu (NAT) metodą rozciągania pośredniego. Badanie to nie jest wprost związane z określeniem odporności mieszanki na deformacje trwałe. Trzeba jednak zaznaczyć, że istnieje związek pomiędzy odpornością na deformacje trwałe, a wielkością modułu sztywności sprężystej. Badanie to można przeprowadzić w niskim zakresie naprężeń, a zatem jest nieniszczące i badane próbki mogą być użyte do innych doświadczeń. Obciążenie, w tym przypadku, przykładane jest po tworzącej walca, a próbka jest ściskana wzdłuż osi pionowej, co w konsekwencji powoduje powstawanie naprężeń rozciągających i odkształceń wzdłuż osi poziomej. Za pomocą czujników przemieszczeń można uzyskać poziome odkształcenia i znając wartości przykładowego naprężenia rozciągającego oblicza się moduł sztywności wg zależności (1):

$$E = \frac{P}{\Delta \cdot t} \cdot (0,2732 + \nu), \quad (1)$$

w której:

P – siła ściskająca [N],

ν – współczynnik Poissona,

t – grubość próbki [mm],

Δ – poziome przemieszczenie (deformacja sprężysta) [mm].

W trakcie przeprowadzania badania, program sterujący tym badaniem pozwala na regulację czasu obciążania, określa temperaturę badania, którą weryfikują specjalne czujniki temperatury. Program też ustala odpowiednią wartość siły ściskającej, aby utrzymać stałą wartość naprężenia, co zapobiega zniszczeniu próbki podczas badania. Cykl badania – według tego programu – składa się z obciążenia wstępnego i 5 impulsów badawczych. W wyniku przeprowadzenia tego testu otrzymujemy średni moduł sztywności z 5 cykli

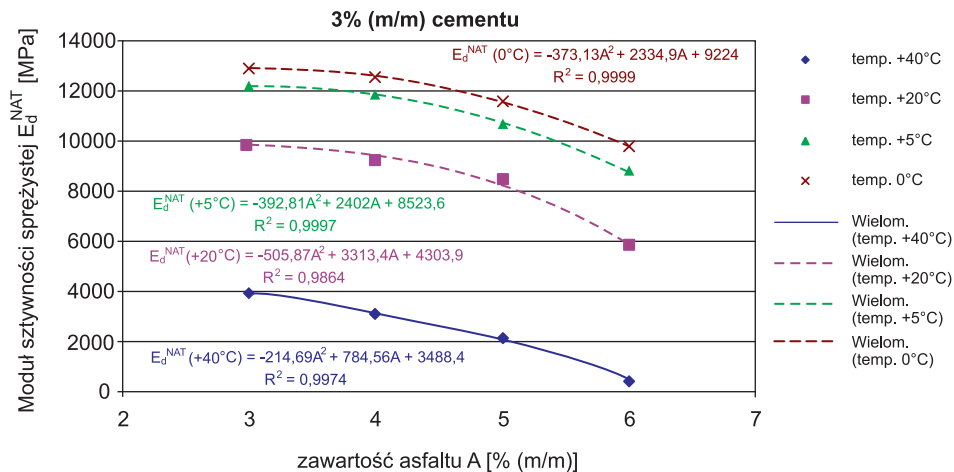
obciążenia oraz kąt przesunięcia fazowego pomiędzy naprężeniem a odkształceniem. Zależność modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego pozwalają na ocenę właściwości mieszanki i lepsza asfaltowego w niskiej temperaturze.

Badania statycznego modułu sprężystości zostały przeprowadzone na próbkach wykonanych z mieszank mce o zróżnicowanym składzie, tj. o różnej zawartości cementu i asfaltu (emulsji). Do badań przygotowano 8 różnych receptur mieszanki, według których przygotowywano i formowano próbki walcowe do przeprowadzenia badań. Skład mieszanki stanowiły: destruk asfaltowy, w którym zawartość asfaltu wynosiła 2,95% (m/m), kruszywo doziarniające, cement portlandzki w ilości 3% lub 4% (m/m), woda oraz emulsja asfaltowa w takiej ilości, aby zawartość wytrąconego z niej asfaltu, łącznie z asfaltem zawartym w destrukcie, wynosiła w kolejnych seriach próbek badawczych: 3%, 4%, 5% i 6% (m/m). Temperatura mięknięcia wg PiK wyekstrahowanego asfaltu z destruktu wynosiła 43°C, natomiast rodzaj asfaltu (wg penetracji w temp. 25°C i wartości temperatury mięknięcia wg PiK) pozostałego po odparowaniu wody z emulsji sklasyfikowano jako 160/220. Próbkę formowano tak, że przy każdej z wymienionych zawartości cementu, występowała każda, zaprogramowana zawartość asfaltu. Uziarnienie mieszanki mineralnej oznaczano metodą na mokro. Krzywa uziarnienia mieszanki mce o składzie: 60% (m/m) destruktu i 40% (m/m) kruszywa doziarniającego o uziarnieniu 0/31,5 mm, spełniała wymagania, tzn. znajdowała się w granicach krzywych dobrego uziarnienia, zgodnie z [1].

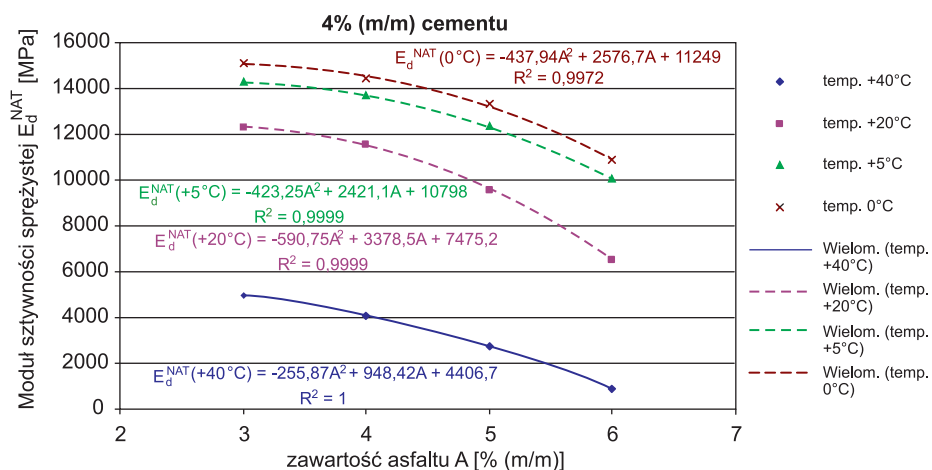
Próbki mieszank mce były testowane w temperaturze: 0°C, +5°C, +20°C i +40°C. Do badania użyto próbek marshallowskich o $\phi = 100$ mm i wysokości $h = 63$ mm. Test wykonano podając docelowy czas przyrostu siły (0,124 s – standardowe), a także docelowe naprężenie poziome wynoszące 100 kPa. Ponadto, do badań przeprowadzanych w różnej temperaturze, przyjęto inne współczynniki Poissona. I tak: w przypadku temperatury +40°C i +20°C współczynnik Poissona $\nu = 0,35$, w temperaturze +5°C $\nu = 0,30$, a w temperaturze 0°C $\nu = 0,25$.

Zestawienie średnich wartości modułów sztywności sprężystej próbek, przygotowanych według poszczególnych receptur, badanych w różnej temperaturze przedstawiono na rysunkach 3–5.

Uzyskane wyniki z badania modułu sztywności sprężystej świadczą o tym, że wartości modułów mieszank o wyższej



Rys. 3. Zależność wartości modułu sztywności sprężystej od zawartości asfaltu (zawartego w destrukcie asfaltowym i wytrąconego z emulsji asfaltowej) i temperatury badania uzyskane na próbkach marshallowskich przy 3% (m/m) zawartości cementu



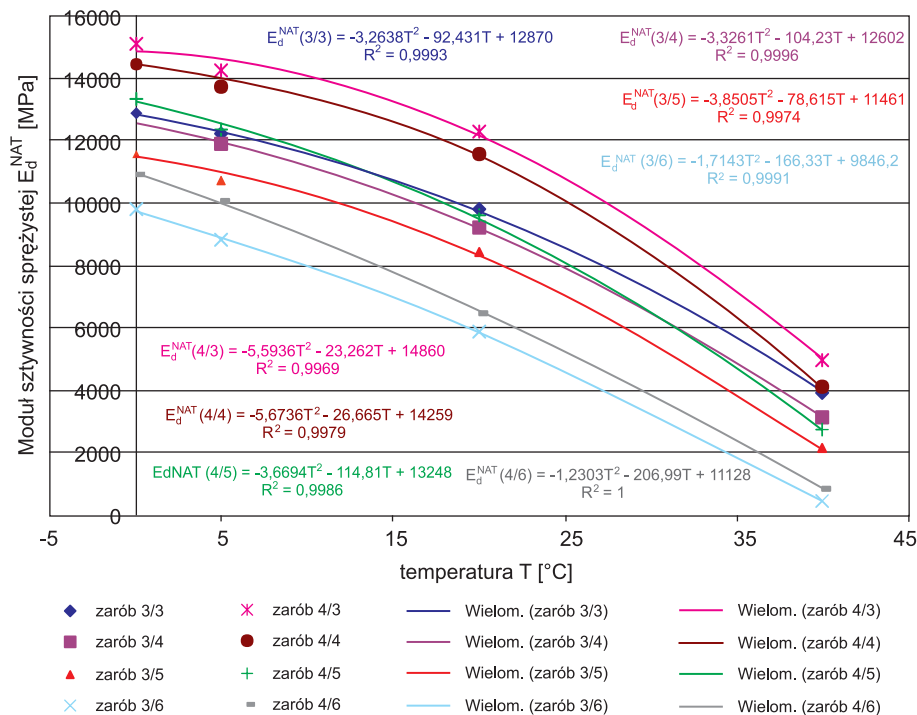
Rys. 4. Zależność wartości modułu sztywności sprężystej od zawartości asfaltu (zawartego w destrukcie asfaltowym i wytrąconego z emulsji asfaltowej) i temperatury badania przeprowadzonego na próbkach marshallowskich przy 4% (m/m) zawartości cementu

zawartości cementu przy porównywalnych zawartościach asfaltu są wyższe. Jednocześnie zaznacza się negatywny wpływ asfaltu na wartości modułów, gdyż większa zawartość asfaltu w mieszance powoduje obniżenie wartości modułów.

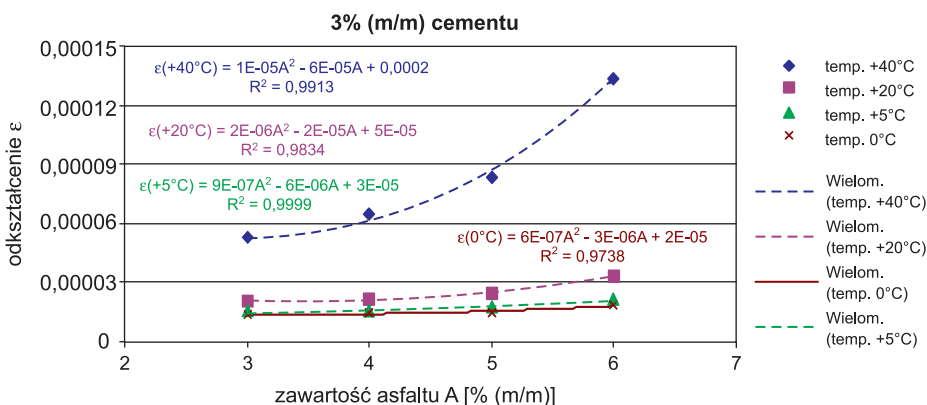
Podobnie negatywny wpływ na wielkość wartości modułu badanych mieszank zaobserwowano przy wyższej temperaturze badania. Wpływ temperatury na moduł sztywności jest wyraźny. Wraz ze wzrostem temperatury, spadki wartości modułu są coraz większe. Potwierdza to jeden z wniosków otrzymanych przy badaniu statycznego modułu sztywności, a mianowicie, że mieszanka mce wykazuje właściwości materiału lepkosprężystego.

Istotne znaczenie do określenia własności mieszank mce ma wielkość odkształcenia od przyłożonego obciążenia. Uzyskane wyniki z badania w aparacie NAT zestawiono na rysunkach 6 i 7.

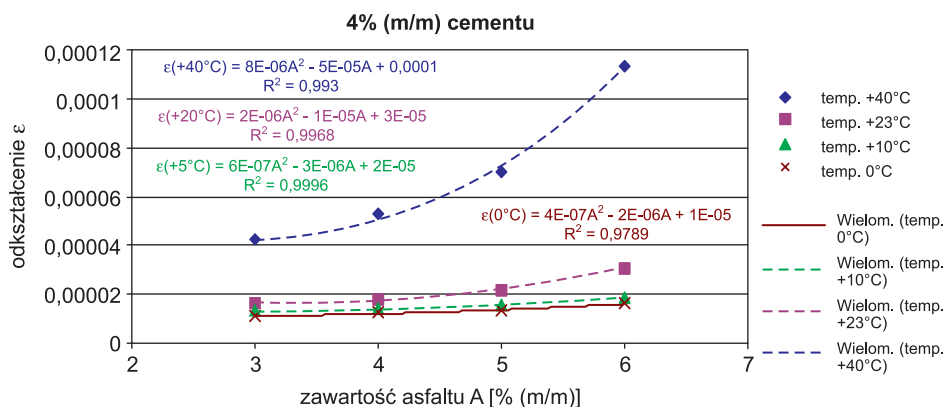
Zaobserwowano tutaj, że temperatura ma istotny wpływ na wielkość odkształcenia. O ile w próbkach badanych w temperaturze od 0°C do +20°C przy zawartości cementu 3%



Rys. 5. Zależność wartości modułu sztywności sprężystej od temperatury badania przeprowadzonego na próbkach marshallowskich



Rys. 6. Zależność wartości odkształcenia od zawartości asfaltu (zawartego w destrukcie asfaltowym i wytrąconego z emulsji asfaltowej) i temperatury badania przeprowadzonego na próbkach marshallowskich przy 3% (m/m) zawartości cementu w mieszance mce



Rys. 7. Zależność wartości odkształcenia od zawartości asfaltu i temperatury badania przeprowadzonego na próbkach marshallowskich przy 4% (m/m) zawartości cementu w mieszance mce

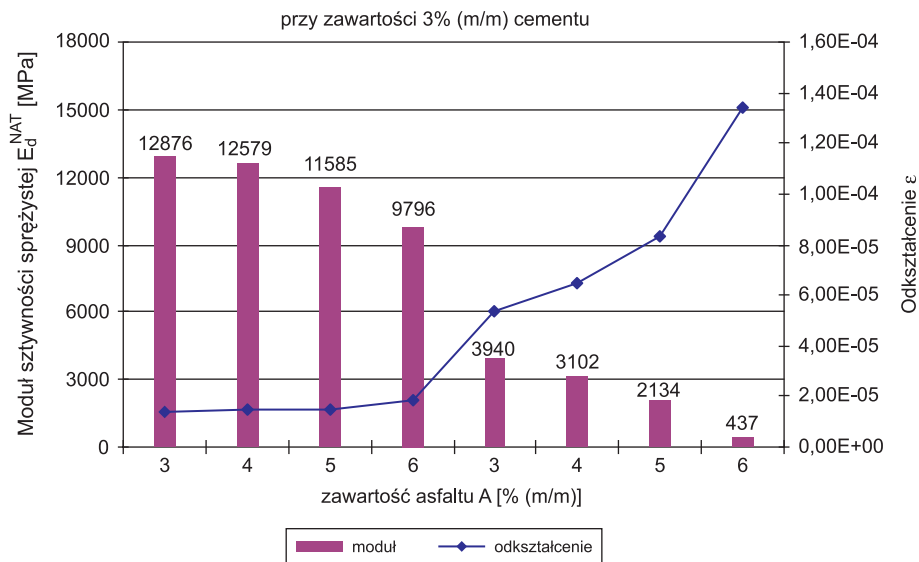
i 4% (m/m) wielkości odkształcenia były zbliżone i w niewielkim stopniu obserwowano ich przyrost wraz ze wzrostem zawartości asfaltu, to przy temperaturze +40°C wartości odkształcenia były znacznie wyższe i ich przyrost odbywał się w sposób bardziej dynamiczny wraz ze wzrostem zawartości asfaltu.

Zestawienie średnich wartości modułów sztywności sprężystej oraz otrzymanych odkształceń próbek mieszanki mce, zawierających 3% (m/m) oraz 4% (m/m) cementu, badanych w skrajnej temperaturze 0°C i +40°C, pokazano na rysunkach 8 i 9.

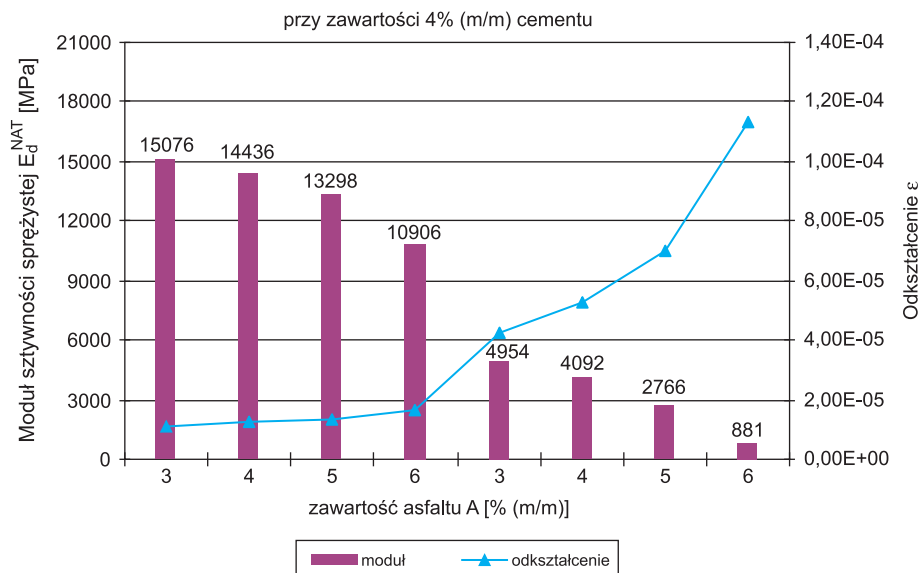
Z przedstawionych wyników badań można zauważyć, że wartości modułów sztywności sprężystej maleją wraz ze wzrostem zawartości asfaltu w mieszance. Większe spadki zaobserwowano przy mieszankach o wyższej zawartości cementu. Ponadto mieszanki mce o wyższej zawartości cementu 4% (m/m) mają wyższe wartości modułów o około 10-30% w stosunku do mieszanki o zawartości 3% (m/m) cementu w temperaturze 0°C i około 30-50% w temperaturze +40°C. Zdecydowanie w inny sposób niż wartości modułów układają się wartości odkształcenia tych mieszanki. Otrzymane odkształcenia w temperaturze 0°C nie odbiegają od siebie zbyt wyraźnie w mieszankach o zawartości zarówno 3% (m/m) jak i 4% (m/m) cementu. Wartości te wzrastają łagodnie wraz ze wzrostem ilości dodanego asfaltu. Odkształcenie badanych próbek w temperaturze +40°C jest znacznie większe niż przy temperaturze 0°C. Gdy wzrasta zawartość asfaltu w mieszance, wówczas różnice w odkształceniach próbek o zawartości 3% i 6% (m/m) asfaltu są kilkakrotnie większe.

Wnioski

Badanie dynamicznego modułu sprężystości w aparacie NAT przeprowadzone na specjalnie przygotowanych do tego badania próbkach marshallowskich o wymiarach: $\phi = 100$ mm i wysokości $h = 63$ mm pozwalają określić zależność zmiany wartości modułów sprężystości od składu mieszanki i temperatury badania. Pokazują, że wartości modułów wyraźnie maleją wraz ze wzrostem temperatury



Rys. 8. Zależność wartości modułu sztywności sprężystej i odkształcenia od zawartości asfaltu (zawartego w destrukcie asfaltowym i wytrąconego z emulsji asfaltowej) i temperatury badania, uzyskane na próbkach marshallowskich przy 3% (m/m) zawartości cementu w mieszance mce



Rys. 9. Zależność wartości modułu sztywności sprężystej i odkształcenia od zawartości asfaltu i temperatury badania, uzyskane na próbkach marshallowskich przy 4% (m/m) zawartości cementu w mieszance mce

badanej mieszanki oraz wzrostem zawartości asfaltu w tej mieszance. Większa ilość cementu w mieszance powoduje wzrost wartości modułów. Wraz ze wzrostem temperatury i zawartości asfaltu w mieszance wyraźnie zaznacza się wzrost wartości odkształceń przy tej samej wartości obciążenia. Odkształcenia te są bardziej znaczące przy wyższej temperaturze badań.

Po wykonaniu badania modułu sztywności mieszanek mce w aparacie (NAT) określono następujące zależności:

- modułu sztywności od zawartości asfaltu przy dwóch różnych zawartościach cementu 3% i 4% (m/m) i przy różnej temperaturze,
- modułu sztywności od temperatury,

- odkształceń od zawartości asfaltu przy dwóch różnych zawartościach cementu: 3% i 4% (m/m) i przy różnej temperaturze,
- modułu sztywności i odkształcenia od zawartości asfaltu i cementu.

Mieszanka mce, w zależności od temperatury i czasu działania obciążenia, pracuje w stanach od lepkiego do sprężystego. Im krótszy jest czas przyłożenia siły lub niższa temperatura badania, tym większe jest przesunięcie w strefę stanu sprężystego. Mieszanka mce w stanie lepko-sprężystym wykazuje wartości kąta przesunięcia fazowego pomiędzy 0–90°. Im mniejsze wartości tego kąta, tym materiał jest sztywniejszy. Mieszanka mce sztywnieje podczas oziębiania. Istotne jest, aby w niskiej temperaturze był większy kąt przesunięcia fazowego. Mieszanka jest wtedy bardziej odporna na pękanie w niskiej temperaturze w eksploatowanej nawierzchni.

Bibliografia

- [1] IBDiM – Informacje, Instrukcje zeszyt nr 61 – Warunki techniczne wykonywania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE) (Wyd. II uzupełnione, zastępuje „I”-53 z 1997 r.), Warszawa 1999
- [2] J. Kuźniewski, Wpływ parametrów mechanicznych mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych na nośność nawierzchni drogowych, Raport serii PRE nr 1/2004, Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska; Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; Instytut Inżynierii Lądowej
- [3] PN-EN 12697-26:2007 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco, Część 26: Sztywność
- [4] K. Błażejowski, S. Styk, D. Sybilski, Nowoczesne metody badań mieszanek mineralno-bitumicznych – Nottingham Asphalt Tester, Drogownictwo 4/1995
- [5] Cooper Research Technology Ltd., Nottingham Asphalt Tester – Instrukcja obsługi, 1998 ■

Badania naukowe zostały wykonane w ramach realizacji Projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju” współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka. Temat badawczy 4.2. Recykling istniejących nawierzchni drogowych, powtórne wykorzystanie odzyskanych materiałów – prognozowanie ich trwałości.