

- [4] PN-EN 1997-2: 2009 Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- [5] PN-EN 1990:2004 Eurokod 0: Podstawy projektowania konstrukcyjnego
- [6] PN-S-02205: 1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania
- [7] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 14 maja 1997 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących autostrad płatnych. Dz. U. z dnia 19 czerwca 1997 r., Nr 62, poz. 392

- [8] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Dz. U. Nr 43/1999 r.
- [9] Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych, Część 1 i 2. GDDP, Warszawa 1998
- [10] Instrukcja obserwacji i badań osuwisk drogowych. GDDP, Warszawa 1999
- [11] Wytyczne wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym. GDDP, Warszawa 2002 ■



JAROSŁAW
KUŹNIEWSKI

Politechnika Wrocławska
Katedra Dróg i Lotnisk
jaroslaw.kuzniowski@
pwr.wroc.pl

Wpływ wybranych parametrów na moduły sztywności mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych

Ponowne wykorzystanie materiałów z nawierzchni drogowych zarówno przy remontach, jak i przy budowie nowych dróg rozwija się w Polsce od kilkunastu lat. Dodawanie destruktu

asfaltowego do wytwarzania nowych mieszanek stosowanych w drogownictwie dało bardzo korzystne wyniki techniczne i ekonomiczne. Jedną z takich mieszanek jest mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna (mce) składająca się z destruktu asfaltowego (materiał pochodzi ze starych recyklowanych nawierzchni), kruszywa mineralnego, cementu i emulsji asfaltowej. Wszystkie te składniki powinny być wymieszane w odpowiednich proporcjach i zagęszczane w warunkach wilgotności optymalnej, aby powstała jednorodna mieszanka, co jest niezbędne do uzyskania wiarygodnych i porównywalnych wartości parametrów wytrzymałościowych.

Identyfikację modułów sztywności mieszanek mce wykonuje się w celu wykorzystania ich w mechanistycznych metodach wymiarowania nawierzchni drogowych.

Moduł sztywności mieszanki jest to stosunek naprężenia do odkształcenia w jednoosiowym stanie naprężenia i odkształcenia.

W artykule przedstawiono wyniki badań modułów sztywności mieszanek mce o różnym składzie, w różnej temperaturze badania. Określono także zależności modułów od zawartości cementu, asfaltu w badanej temperaturze: +40°C, +20°C, +5°C i -5°C.

Skład badanych mieszanek

Badania modułu sztywności zostały wykonane na mieszanekach mineralno-cementowo-emulsyjnych o zróżnicowanym składzie tj. o różnej zawartości cementu i asfaltu (emulsji). Do badań przygotowano 12 różnych receptur mieszanki, według których formowano próbki do przeprowadzenia badań:

- destruktu asfaltowy – 60% (m/m),
- kruszywo doziarniające (kruszywo łamane) – 40% (m/m),
- przy zawartości cementu 2% (m/m) i zawartości asfaltu 3%, 4%, 5%, 6% (m/m),

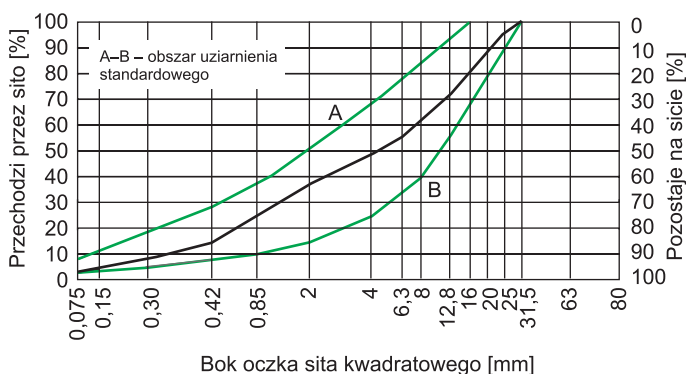
- przy zawartości cementu 3% (m/m) i zawartości asfaltu 3%, 4%, 5%, 6% (m/m),
- przy zawartości cementu 4% (m/m) i zawartości asfaltu 3%, 4%, 5%, 6% (m/m),
- woda – 10% (m/m) (wilgotność optymalna uzyskana w badaniu Proctora).

Do badań użyte zostały próbki prostopadłościennych o wymiarach 50×50×300 mm (próbki małe) i 100×100×500 mm (próbki duże). Próbki formowano pod obciążeniem statycznym, zapewniając wymagany wskaźnik zagęszczenia.

W celu jednoznacznego rozróżniania poszczególnych receptur mieszanek, oznaczono je dwoma cyframi. Pierwsza określa procentową zawartość cementu w mieszance, a druga cyfra określa procentową zawartość asfaltu. Przykład: receptura 3/4 – określa 3% (m/m) cementu i 4% (m/m) asfaltu przypadające na 100% (m/m) mieszanki mineralnej.

Uziarnienie mieszanki mineralnej przeprowadzono metodą na mokro. Krzywą uziarnienia mieszanki mce – 60% (m/m) destruktu i 40% (m/m) kruszywa doziarniającego – o uziarnieniu 0/31,5 mm podano na rysunku 1.

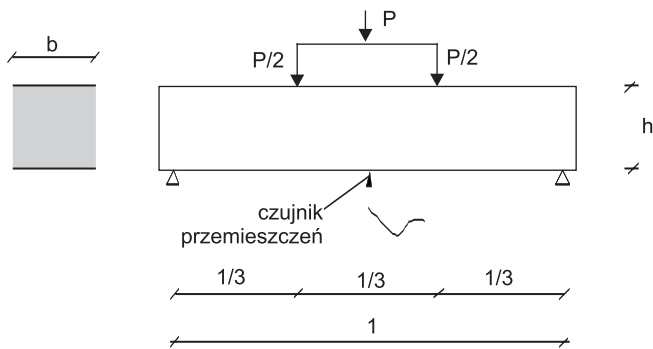
Kruszywo z destruktu, podanego w wyżej wymienionych proporcjach nie ma negatywnego wpływu na właściwości wytrzymałościowe mieszanki [2].



Rys. 1. Krzywa uziarnienia mieszanki mce o uziarnieniu 0/31,5 mm według [1]

Wyniki badań

Badania przeprowadzane były na próbkach po 28 dniach ich dojrzewania, w temperaturze: +40°C, +20°C, +5°C, -5°C i nie poddawanych wcześniej żadnym obciążeniom. Oznaczeń

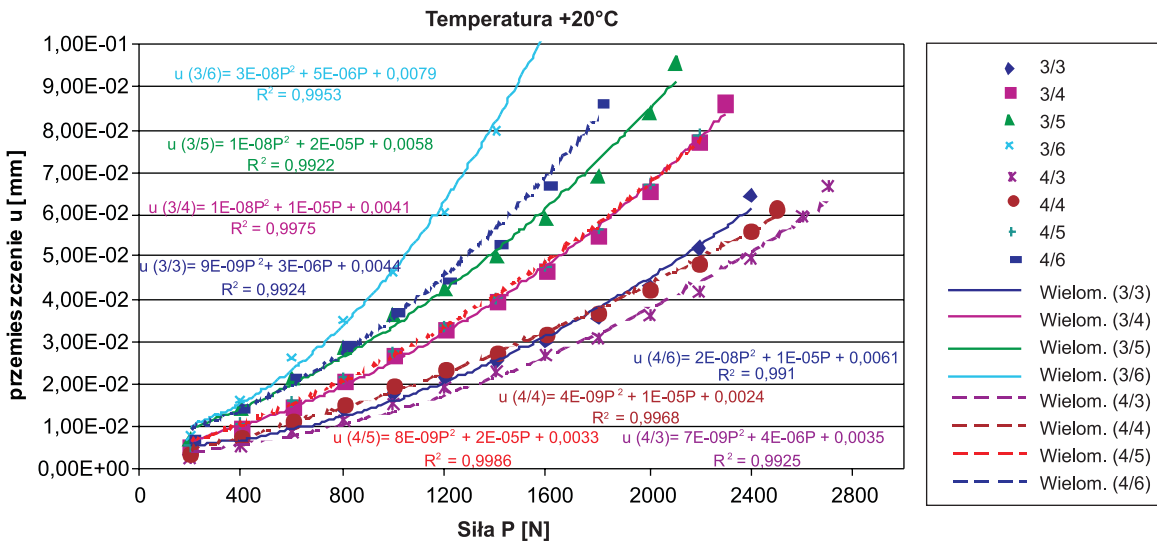


Rys. 2. Schemat badania do oznaczenia modułu sztywności

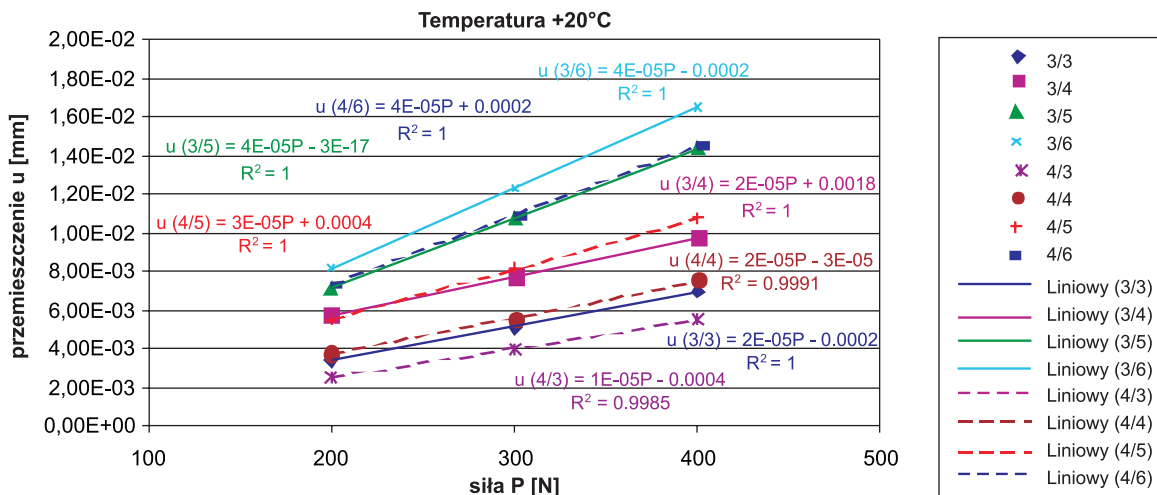
czeń modułów sztywności mieszanek mce dokonano na próbkach w postaci belki prostokątnej, obciążonej według schematu przedstawionego na rysunku 2, zgodnie z [3].

Do identyfikacji modułu sztywności wykorzystano obliczenia odwrotne. Wyznaczono przemieszczenie, które zostało wywołane działającym obciążeniem. Problem stanowiło przygotowanie bazy pomiarowej w taki sposób, aby pomiar przemieszczeń był rzeczywistym przemieszczeniem próbki. Przemieszczenia rejestrowano za pomocą czujników indukcyjnych.

W celu sprawdzenia warunków, w jakich mieszanka mce traci liniowość i zaczyna charakteryzować się nieliniowością, przeprowadzono rejestrację przemieszczenia sprężystego i obciążenia poszczególnych próbek o różnym składzie w zakresie temperatury od -5°C do +20°C. Ustalając zakres obciążeń do oznaczenia modułów sztywności próbek o wymiarach 100×100×500 mm dokonano pomiarów przemieszczeń pod obciążeniem. Zauważono, że przy stosowaniu obciążeń siłą do 400 N, w całym zakresie ww. temperatury, zależność przemieszczenie – obciążenie jest liniowe



Rys. 3. Zależność przemieszczenia od obciążenia określona na belkach, o wymiarach: 100×100×500 mm, w temperaturze +20°C



Rys. 4. Zależność przemieszczenia od obciążenia w zakresie 200–400 N określona na belkach, o wymiarach: 100×100×500 mm, w temperaturze +20°C

(rys. 3 i 4), więc w badaniach poprzestano na obciążaniu próbek siłą do 400 N (rys. 4) [2].

Do próbek o wymiarach 50×50×300 mm również określono zakres obciążenia, przy którym przemieszczenie zachowuje charakter liniowy. Są to wartości z przedziału od 50 N do 150 N [2].

Z przeprowadzonej analizy wynika, że zależność przemieszczenia od obciążenia przy wyższych zakresach obciążenia przestaje zachowywać charakter liniowy, co sugeruje, że zaznacza się wpływ nieliniowości. Określenie przedziału, w którym obciążenie – przemieszczenie zmienia się liniowo, pozwala na ustalenie zakresu stosowania modułów w modelach sprężystych nawierzchni drogowych.

Moduł sztywności określono z pomiarów przemieszczeń sprężystych belki (próbki) w środku rozpiętości pomiędzy parą sił obciążających. Założono, że położenie osi obojętnej belki w całym zakresie badawczym nie ulega zmianie. Wówczas z równania różniczkowego osi odkształconej belki zginanej (linii ugięcia) wyprowadzono zależność (1) na wartość modułu sztywności:

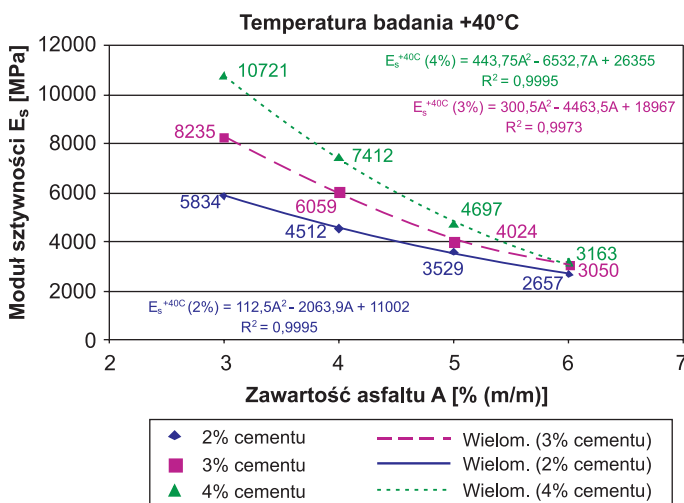
$$E = \frac{23 \cdot P \cdot l^3}{108 \cdot b \cdot h^3 \cdot u_{\max}}, \quad (1)$$

w której:

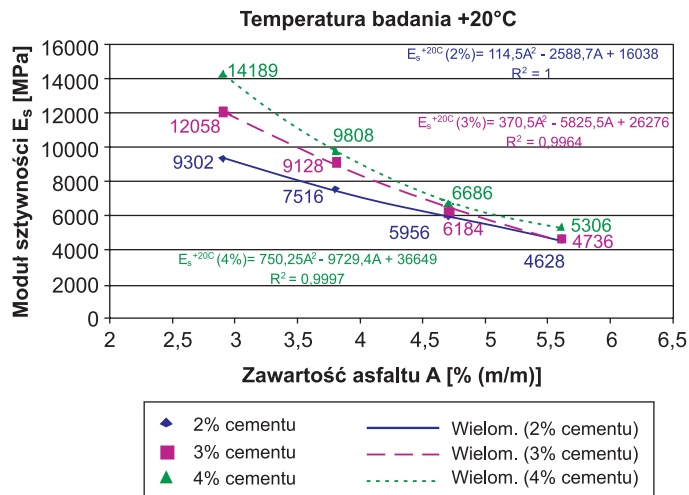
- E – moduł sztywności materiału [MPa],
- P – wartość siły skupionej (obciążenie) [N],
- l – rozpiętość między podporami [mm],
- b, h – szerokość i wysokość belki [mm],
- u_{\max} – ugięcie środka belki przy obciążeniu siłą P (strzałka ugięcia) [mm].

Wartości uzyskanych modułów sztywności przedstawiono na rysunkach 5–8 w zależności od temperatury próbek podczas badania.

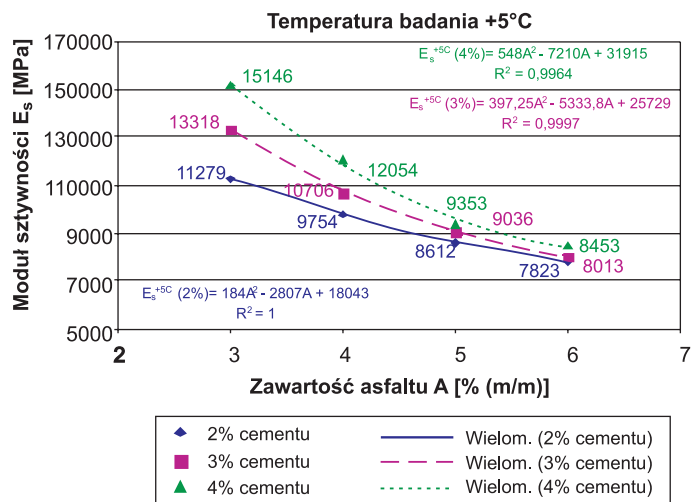
Badania wykazały, że moduły mieszanek mce wzrastają ze wzrostem zawartości cementu. Stwierdzono też, że większa zawartość asfaltu w próbkach, przy takiej samej ilości cementu, obniża wartości modułów.



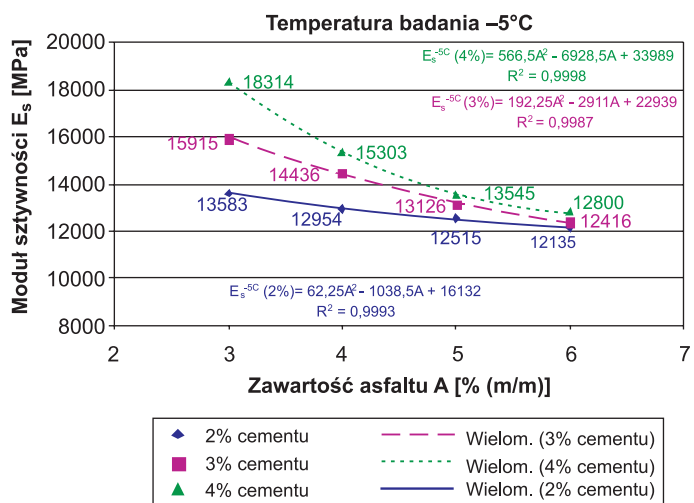
Rys. 5. Zależność modułu sztywności od zawartości asfaltu i cementu określona na belkach, o wymiarach: 100×100×500 mm, w temperaturze +40°C



Rys. 6. Zależność modułu sztywności od zawartości asfaltu i cementu określona na belkach, o wymiarach: 100×100×500 mm, w temperaturze +20°C



Rys. 7. Zależność modułu sztywności od zawartości asfaltu i cementu określona na belkach, o wymiarach: 100×100×500 mm, w temperaturze +5°C



Rys. 8. Zależność modułu sztywności od zawartości asfaltu i cementu określona na belkach, o wymiarach: 100×100×500 mm, w temperaturze -5°C

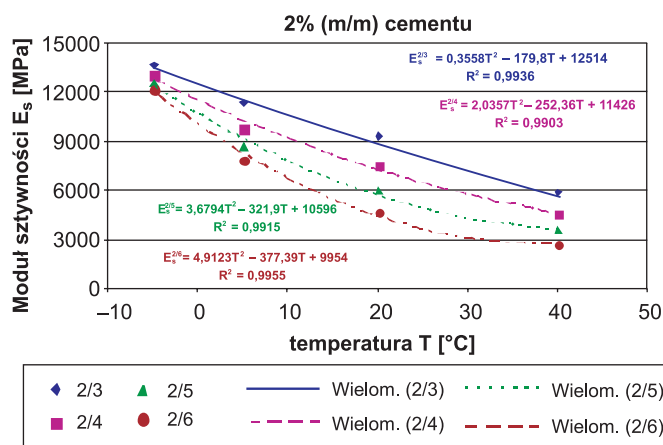
Również temperatura jest tym czynnikiem, który ma wpływ na wartość modułów. W rozpatrywanych składach mieszank, zmiana temperatury od +40°C do -5°C powoduje zwiększenie wartości modułu.

W mieszankach o takiej samej zawartości cementu, lecz różnych zawartościach asfaltu, obniżenie temperatury powoduje większe wzrosty wartości modułów mieszank o większej zawartości asfaltu. W mieszankach o różnych zawartościach cementu i 3% (m/m) asfaltu, w każdej z nich obserwujemy duże różnice w wartościach modułów tych mieszank (przedział 9300 – 14100 MPa, w temperaturze +20°C). Wzrost zawartości asfaltu do 6% (m/m) (w każdym zakresie temperatury i różnej zawartości cementu) powoduje, że wartości modułów tych mieszank są do siebie bardzo zbliżone. Wartości liczbowe różnią się w zależności od temperatury badania, a nie od składu mieszank.

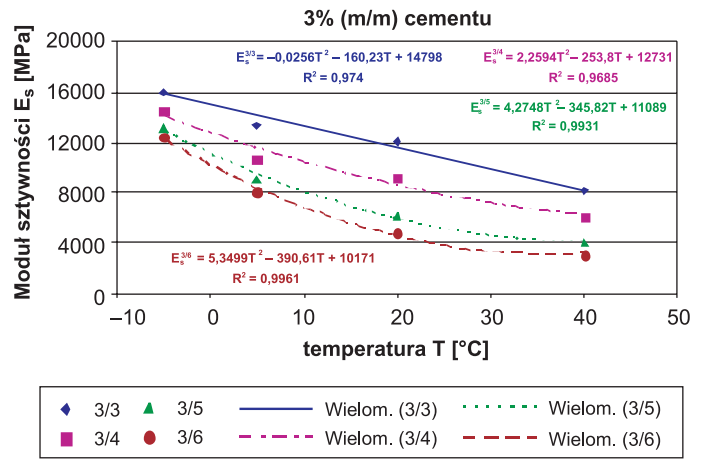
W mieszankach z niską zawartością cementu (2% m/m), w niskiej temperaturze badania (-5°C), przy wzroście ilości asfaltu od 3% (m/m) do 6% (m/m), moduły maleją w niewielkim stopniu w przedziale 12100–13500 MPa (o około 10%). Mieszanki zawierające więcej cementu są bardziej podatne na zmianę wartości modułów przy wzroście ilości asfaltu i temperatury. Gdy wzrośnie temperatura od -5°C do +20°C, a ilość asfaltu od 3% (m/m) do 6% (m/m), wartości modułów mieszanki mce maleją prawie trzykrotnie, tj. w zakresie 12100–4600 MPa. Większa zawartość asfaltu w mieszance mce wraz ze wzrostem temperatury powoduje obniżanie modułów. Zebrane wyniki z badań, w celu lepszego zobrazowania zachowania się mieszank mce w różnej temperaturze, zestawiono wspólnie na jednym rysunku, odpowiednio do zawartości cementu w mieszance.

Na rysunkach 9–11 przedstawiono korelację modułu sztywności próbek wykonanych z mieszank o różnych zawartościach asfaltu i w różnej temperaturze, odpowiednio dla zawartości 2%, 3% i 4% (m/m) cementu.

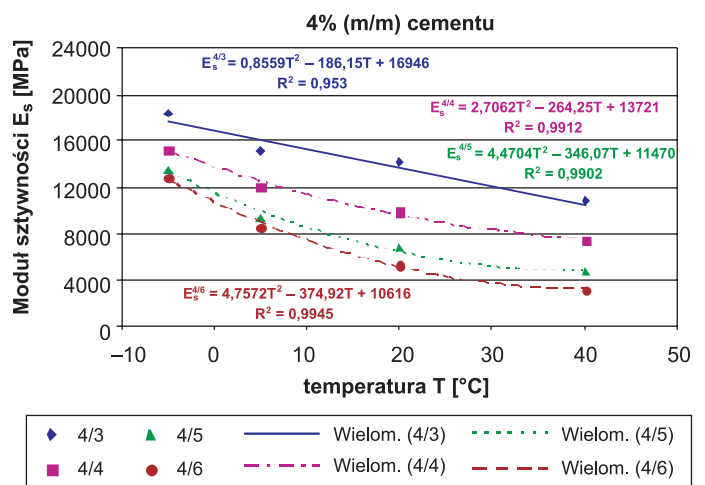
Z rysunków 9–11 wynika, że najwyższe wartości modułów uzyskują mieszanki przy minimalnej zawartości asfaltu 3% (m/m) i największej zawartości cementu 4% (m/m). Wartości te maleją wraz ze zwiększaniem się zawartości ilości asfaltu w mieszance i ze wzrostem temperatury. Najsilniej uwiadcniają się spadki wartości modułów (trzykrotne: z 12000



Rys. 9. Korelacja modułu sztywności mieszank o różnych zawartościach asfaltu i 2% (m/m) zawartości cementu, przy zmiennej temperaturze



Rys. 10. Korelacja modułu sztywności mieszank o różnych zawartościach asfaltu i 3% (m/m) zawartości cementu, przy zmiennej temperaturze



Rys. 11. Korelacja modułu sztywności mieszank o różnych zawartościach asfaltu i 4% (m/m) zawartości cementu, przy zmiennej temperaturze

do 4000 MPa) w mieszankach o najwyższej zawartości asfaltu (6% m/m) w temperaturze +40°C, w stosunku do mieszank o zawartości 3% (m/m) i temperaturze -5°C. Charakter zmiany wartości modułów jest analogiczny we wszystkich mieszankach. Różnice są tylko w wartościach.

Do otrzymanych wyników określono zależność modułu sztywności od zawartości cementu i asfaltu w badanej temperaturze: +40°C, +20°C, +5°C i -5°C. Wyniki tych badań, dotyczących próbek (dużych) o wymiarach 100×100×500 mm, zapisano w postaci funkcji matematycznej. Zależność ta przyjmuje postać (2):

$$E_s = (a_1 \cdot C + b_1) \cdot A^2 - (c_1 \cdot C - d_1) \cdot A + e_1 \cdot C \quad (2)$$

W zależności (2) poszczególne symbole oznaczają:

E_s – moduł sztywności materiału [MPa],

C – zawartość cementu [%] (m/m),

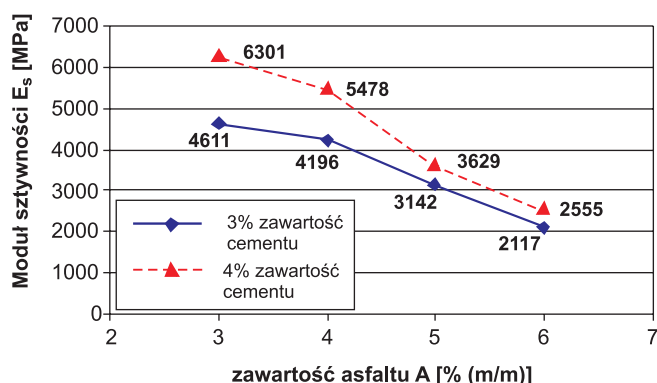
A – zawartość asfaltu [%] (m/m),

a_1, b_1, c_1, d_1, e_1 – współczynniki zależności, które zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie współczynników zależności (2) do określenia wartości modułów sztywności mieszank w badanej temperaturze

Temperatura badania	Współczynniki zależności dla modułu sztywności (E_s)	
	w równaniu	korel. R^2
+40°C	$a_i=99,29$ $b_i=2,45$ $c_i=1624,79$ $d_i=385,56$ $e_i=6355,96$	0,9983
+20°C	$a_i=246,22$ $b_i=-310,99$ $c_i=2911,87$ $d_i=2541,43$ $e_i=8879,24$	0,9962
+5°C	$a_i=250,92$ $b_i=-391,67$ $c_i=2834,88$ $d_i=3528,50$ $e_i=8307,96$	0,9972
-5°C	$a_i=214,3$ $b_i=360,67$ $c_i=2596,9$ $d_i=4086,28$ $e_i=8174,44$	0,9996

Na rysunku 12 przedstawiono przykładowy wykres obrazujący wartości modułów uzyskanych przy badaniu (małych) próbek o wymiarach: 50×50×300 mm, w temperaturze +20°C.



Rys. 12. Zależność modułu sztywności od zawartości asfaltu i cementu określona na belkach, o wymiarach: 50×50×300 mm, w temperaturze +20°C

Uzyskane wyniki badań przeprowadzonych na małych próbkach, potwierdziły – w zakresie jakości – wyniki badań przeprowadzonych na dużych próbkach.

Z analizy wykresu zamieszczonego na rysunku 12 wynika, że mieszanki mce o wyższej zawartości cementu (4% m/m) mają wyższe wartości modułów o około 20–30% w stosunku do mieszank o zawartości 3% (m/m) cementu. Wraz ze wzrostem zawartości asfaltu w mieszance mce wartości modułów maleją. Jednakże spadki tych wartości są większe w mieszankach o wyższej zawartości cementu. Można by określić, że mieszanki o mniejszej zawartości cementu są mniej podatne na obniżenie wartości modułów, gdy wzrasta zawartość asfaltu w mieszance mce.

Obserwując wartości modułów mieszank o tych samych recepturach i w tej samej temperaturze badania, określonych na próbkach 50×50×300 mm i 100×100×500 mm zauważono, że wartości modułów próbek małych są około 2–3 razy mniejsze. Prawdopodobnie stosunek wymiarów (frakcji) kruszywa mineralnego, wchodzącego w skład mieszanki mce, do wymiarów przekroju próbki ma wpływ na wartość modułu sztywności. Kruszywo użyte do przygotowania dużych próbek bardziej odpowiada uziarnieniu kruszywa używanego do budowy warstwy podbudowy.

Istotnym jest, aby badania mieszank przeprowadzać na jednakowych próbkach, tak aby uzyskiwane wyniki mogły być porównywane.

Wnioski

1. Badania modułów sztywności mieszank mce przeprowadzone w różnej temperaturze wykazały, że spadek temperatury badania wpływa na wzrost wartości modułów. Również większa zawartość asfaltu w mieszance w niskiej temperaturze powoduje wzrost wartości modułów. Przy zawartości 6% (m/m) asfaltu w mieszankach o zawartości cementu od 2% (m/m) do 4% (m/m), wartości modułów są do siebie bardzo zbliżone w tej samej temperaturze badania. Wraz z obniżaniem temperatury badania obserwuje się wzrost modułów. Przy niskiej zawartości cementu, w mieszankach o różnej zawartości asfaltu ich procentowe różnice są niewielkie i dochodzą do około 10%. Wraz ze wzrostem zawartości cementu do 4% (m/m), różnice w wartościach modułów analogicznych mieszank, są większe i dochodzą do około 40%.

2. Gdy maleje zawartość asfaltu w mieszance do ilości 3% (m/m), wówczas różnice w wartościach modułów mieszank o różnych zawartościach cementu są znacznie wyraźniejsze.

3. Analiza wyników zamieszczonych na rysunkach 5–11 potwierdza, że zmiana temperatury badania mieszanki ma istotny wpływ na wartości modułów. Moduły te zmieniają się wraz ze składem (cement, asfalt) i temperaturą badania mieszanki.

4. Wyniki badań przedstawione w artykule wskazują na możliwość identyfikacji modułów sztywności w mieszankach mce. Moduły te mogą być wykorzystane w mechanistycznych metodach wymiarowania do projektowania grubości warstw z mieszank mce.

5. W dotychczasowej praktyce w budownictwie drogowym w kraju do wytworzenia mieszank mce używa się destruktu z istniejących nawierzchni drogowych, co stwarza możliwość wtórnego wykorzystania materiałów drogowych i przyczynia się do redukcji kosztów wytworzenia mieszanki i ochrony środowiska naturalnego.

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] Kuźniowski J., *Wpływ parametrów mechanicznych mieszank mineralno-cementowo-emulsyjnych na nośność nawierzchni drogowych*, Raport serii PRE nr 1/2004, Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska; Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; Instytut Inżynierii Lądowej
- [3] PN-EN 12697-26:2007 *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszank mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 26: Sztywność* ■