

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.



mgr inż. Eryk Mączka
Wydział Budownictwa
Lądowego i Wodnego
Politechnika Wrocławska
Opiekun naukowy:



dr hab. inż. Piotr Mackiewicz
Wydział Budownictwa
Lądowego i Wodnego
Politechnika Wrocławska

Wytrzymałość i trwałość mieszanki mineralno-asfaltowej zależy od wielu czynników [1], [2], [3]: składu mieszanki, stopnia zagęszczenia, temperatury, czasu i wielkości obciążenia. W drogownictwie istotnym parametrem stosowanym w ocenie nośności nawierzchni jest moduł sztywności zależny głównie od warunków, w jakich się go określa (temperatura badania, czas trwania obciążenia). W niskich temperaturach wartość modułu MMA jest wysoka, a materiał „pracuje” sprężyste, natomiast w wysokich temperaturach wartość modułu jest niska, a materiał wykazuje cechy lepko-sprężyste. Popularną i powszechnie stosowaną w ocenie cech materiałowych jest metoda zginania belek – dynamicznie lub statycznie.

Opis metody badawczej

Badanie 4BP w próbie statycznej polegało na obciążaniu pryzmatycznej próbki monotonicznie zmiennym obciążeniem. Zastosowano schemat statyczny belki wolnopodpartej. Obciążenie przekazywano siłownikiem poprzez pomocniczą stalową konstrukcję, która to transformowała przyłożoną siłę na belkę MMA w dwóch punktach, tworząc schemat czteropunktowego zginania. Badaniu poddano trzy belki MMA o wymiarach 38 x 6 x 5 cm wykonane z mieszanki AC16W (zaw. lepiszcza 4,5%) przeznaczone na warstwę wiążącą. Skład mieszanki do badań był zgodny z warunkami technicznymi [7] obowiązującymi w Polsce. W obrębie pasma o stałym momencie na każdej badanej belce MMA zostały zamontowane symetrycznie dwa tensometry papierowe o długości bazy

BADANIE MMA

Mieszanki mineralno-asfaltowe (MMA) są materiałami powszechnie stosowanymi w warstwach konstrukcji nawierzchni. Aby odpowiednio spełniały swoje zadanie, muszą przejść szereg badań oraz posiadać odpowiednie właściwości, z których najważniejsza jest wytrzymałość.

6,0 cm. Na ścianie belki dodatkowo zamontowano blaszkę umożliwiającą rejestrowanie przemieszczenia z czujnika LVDT. Schemat badania oraz próbkę na stanowisku zaprezentowano na rys. 1.

Przed przystąpieniem do badania próbki podlegały kondycjonowaniu w temperaturze 25°C przez trzy godziny. Dzięki temu uzyskano jednorodny rozkład temperatury w całej próbce. Badanie realizowano w czterech etapach. Etap 1. – obciążanie do określonej wartości siły. Etap 2. – zatrzymanie przyrostu siły po osiągnięciu żądanej wartości na okres 5 s. Etap 3. – odciążanie do poziomu „zerowego”. Etap 4. – bez obciążenia badanej próbki – czas obserwacji wyników 20 s. Eksperyment został przeprowadzony przy stałej prędkości obciążania i odciążania. Uzyskiwane parametry podlegały bezpośredniej kontroli na skomputeryzowanym sprzęcie badawczym podłączonym do prasy.

Badanie wykonano w układzie czterocyklowym o wybranych poziomach obciążenia (P_{max}), które wynosiły odpowiednio: 0,023 kN, 0,043 kN, 0,052 kN, 0,058 kN.

Wyznaczanie modułu sztywności

Wykorzystując otrzymane pomiary naprężenia i odkształcenia, przeprowadzono wyznaczanie modułu sztywności mieszanki za pomocą trzech sposobów. W sposobie pierwszym, zgodnie z [1], [8] oraz [9], wyznaczono moduł siecny (zwany dalej modulem E_1) w punkcie, dla którego osiągnięto siłę maksymalną dla danego cyklu zgodnie ze wzorem:

$$E_1(P_{max}) = \frac{\Delta\sigma(P_{max})}{\Delta\varepsilon(P_{max})} \quad (1)$$

w którym:

- $E_1(P_{max})$ – moduł sztywności przy zginaniu, dla siły P_{max} [MPa],
- $\Delta\sigma(P_{max})$ – przyrost naprężeń dla siły P_{max} [MPa],
- $\Delta\varepsilon(P_{max})$ – przyrost odkształceń dla siły P_{max} [-].

W sposobie drugim określono moduł sztywności na podstawie najdłuższego odcinka stycznej do krzywej w przedziale obciążenia ($0 \div P_{max}$). Moduł ten oznaczono E_2 .

Do trzeciego sposobu wykorzystano aproksymację funkcją liniową, stosując metodę najmniejszych kwadratów. Zakres tej aproksymacji przeprowadzono w przedziale siły ($0 \div P_{max}$). Moduł ten oznaczono E_3 . Sposoby wyznaczania modułów zamieszczono na rys. 2.

Podczas wykonania cyklu na podstawie zarejestrowanych punktów stwierdzono wystąpienie zjawiska degradacji, oznaczone na rys. 2. parametrem m . Jest ono szczególnie ważne dla MMA, ponieważ podczas jego występowania dochodzi do uszkodzeń strukturalnych w materiale. Skutkiem jest obniżenie sztywności mieszanki oraz przyrost odkształceń trwałych. Parametr degradacji przeanalizowano dla układu czterocyklowego. Wyniki przedstawiono w kolejnym punkcie artykułu. Przykładowe wyniki zidentyfikowanych parametrów zamieszczono na rys. 3.

Analizy wyznaczonych modułów sztywności dokonywano dla trzech próbek

w pierwszym cyklu o poziomie obciążenia $P_{max} = 0,023$ kN. Warto podkreślić, iż wyznaczone krzywe na rys. 3. dla E_2 , E_3 oraz m charakteryzują się wysokim (powyżej 0,90) współczynnikiem determinacji.

Po odciążeniu w przytoczonym cyklu zarejestrowano wystąpienie odkształceń na poziomie około 12×10^{-6} . Odkształcenia sprężyste stanowią 12,1 [%], a odkształcenia trwałe 87,9 [%]. Stwierdzone odkształcenia trwałe są duże, jednak mieszczą się w zakresie odkształceń występujących w typowych nawierzchniach drogowych [2]. Podobne zależności jak dla próbki nr 3 otrzymano dla próbek nr 1 i 2. Porównanie modułów wyznaczonych omawianymi metodami zamieszczono na rys. 4.

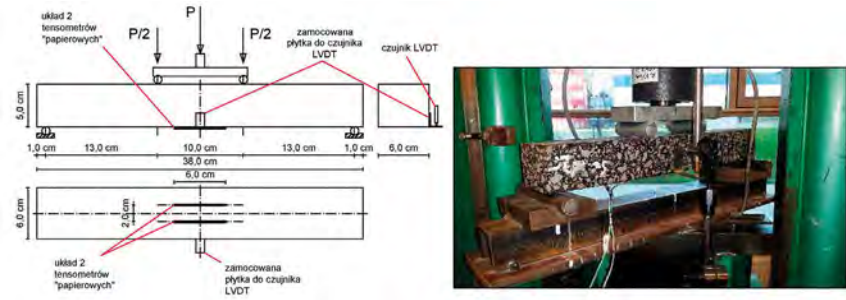
Z wykresu znajdującego się na rys. 4 można odczytać, iż najmniejszy rozrzut wyników otrzymano, korzystając z metody wyznaczania modułu siecznego E_1 . Moduły E_2 i E_3 charakteryzują się znacznie wyższym współczynnikiem zmienności oraz odchyleniem standardowym od modułu E_1 . Oznacza to, iż dokładniejszą metodą wyznaczania sztywności mieszanki jest metoda modułu siecznego E_1 . Warto wspomnieć, że różnice w uzyskiwanych wartościach mogą również wynikać ze zróżnicowanego ułożenia kruszywa w każdej próbce. W ocenie całościowej analizowanych wyników, w przyjętych warunkach badania, wyznaczone moduły nie różnią się istotnie względem siebie – współczynnik zmienności wynosi za ledwie 7,3%.

Analiza wielocyklowa

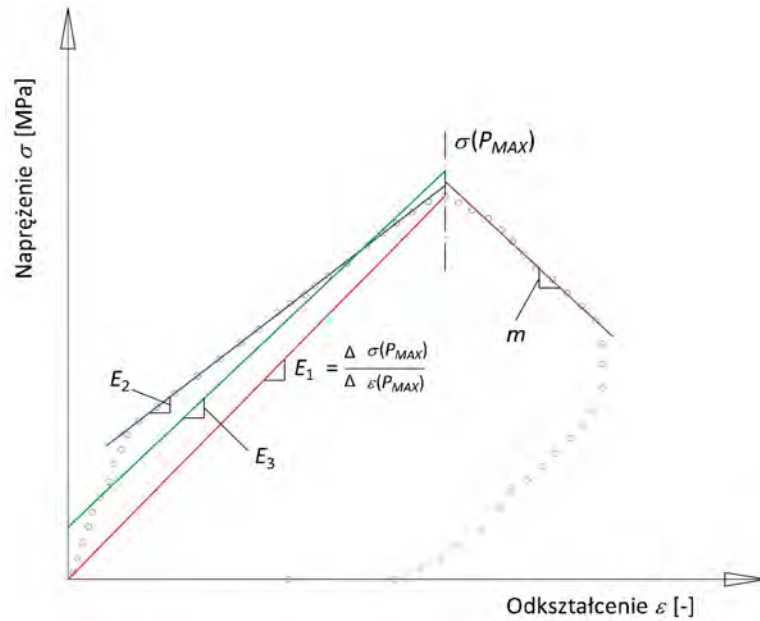
Na podstawie rozpatrywanych metod określania modułu sztywności oraz parametru degradacji przeanalizowano zmienność tych wartości w czterech cyklach przy zmiennym poziomie maksymalnego obciążenia. Sprawdzone również zmienność modułu siecznego od siły maksymalnej cyklu pierwszego w pozostałych cyklach – z uwagi na najmniejszy rozrzut wyników od średniej. Przykład wykonanej analizy zamieszczono na rys. 5.

Na rys. 5. można dostrzec „nieliniowe” zachowanie się materiału w trakcie obciążenia w każdym cyklu, a największe w cyklu czwartym. Dodatkowo obserwuje się zmniejszanie modułu sztywności oraz przyrost odkształceń trwałych wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia. Wskazuje to na dominującą aktywność cech lepkich materiału. Uzyskane wyniki wartości modułów i parametru degradacji w analizie czterocyklowej uśredniono w odniesieniu do trzech próbek i przedstawiono na rys. 6.

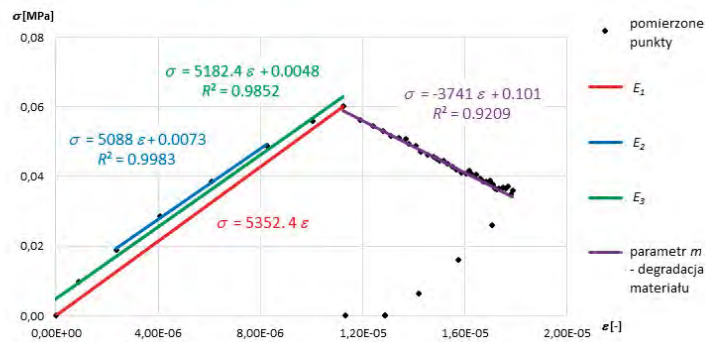
Największy moduł sztywności w każdej z metod uzyskano w pierwszym cyklu. Związane jest to bezpośrednio z nienaruszoną strukturą materiału. Dla kolejnych cykli wartości sztywności zmniejszają się. Dotyczy



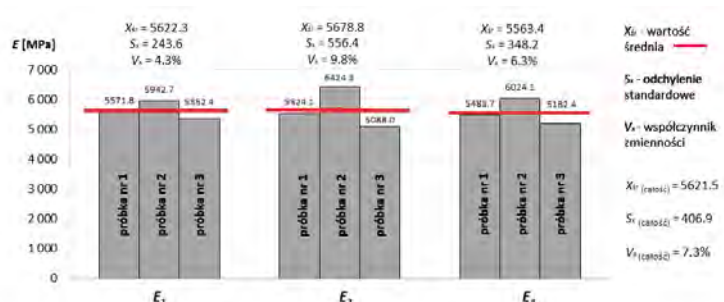
Rys. 1. Schemat statyczny badania i widok próbki na stanowisku badawczym
Fig. 1. Static scheme and view of sample on research position



Rys. 2. Sposoby wyznaczania modułów sztywności oraz parametru degradacji m
Fig. 2. Methods for determining stiffness modules and degradation parameter



Rys. 3. Przykład wyznaczania modułów sztywności oraz parametru degradacji m dla próbki nr 3
Fig. 3. Example of methods for determining stiffness modules and degradation parameter for sample no 3



Rys. 4. Porównanie wyznaczonych modułów w zależności od stosowanej metody
Fig. 4. Comparison of designated modules depending on the method used

to modułów wyznaczonych wszystkimi trzema metodami. Największe zmiany zaobserwowano pomiędzy cyklem pierwszym a drugim. Dla kolejnych cykli moduł zaczyna się stabilizować. Dotyczy to jednak tylko modułu stycznego E_2 oraz modułu siecznego E_1 (dla $P = 0,023$ kN). Pozostałe moduły (E_1 i E_3) w cyklu czwartym zaczynają obniżyć swoją wartość. Wskazuje to na znaczne zmiany strukturalne zachodzące w mieszanke. Na tym etapie mogą pojawiać się mikropęknięcia osłabiające strukturę materiału.

Jak pokazano na rys. 6., w badanych próbkach dostrzega się stałą zależność parametru degradacji materiału m niezależnie od przykadanego poziomu obciążenia oraz kolejnych cykli. W odniesieniu do warunków przeprowadzonego badania wysunięto hipotezę, że uszkodzenia wewnątrz obciążanych próbek MMA w poszczególnych cyklach kumulują się liniowo, niezależnie od rodzaju wymuszenia (czas przytrzymania obciążenia, obciążenie, liczba cykli).

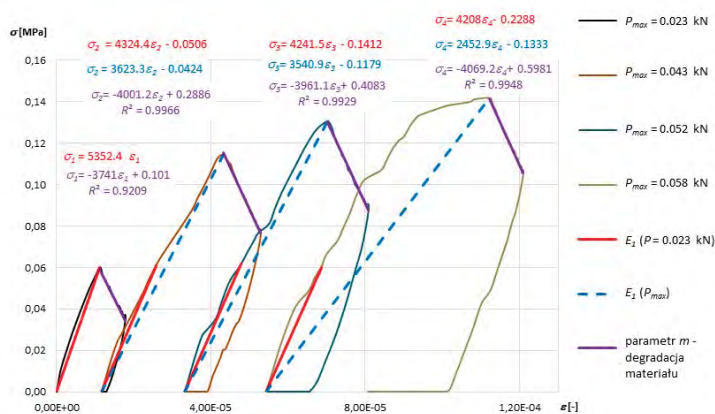
Na podstawie wyników przeprowadzonego eksperymentu na rys. 6. przeanalizowano również uzyskane wartości modułów sztywności z próby statycznej w odniesieniu do próby dynamicznej 4BP – wyniki badań zostały zaczerpnięte z pracy [2] (dla tego samego składu oraz warunków termicznych mieszanki). Moduł sztywności, wyznaczony wszystkimi metodami w pierwszym cyklu, jest zbliżony z wartością modułu dynamicznego.

Podsumowanie

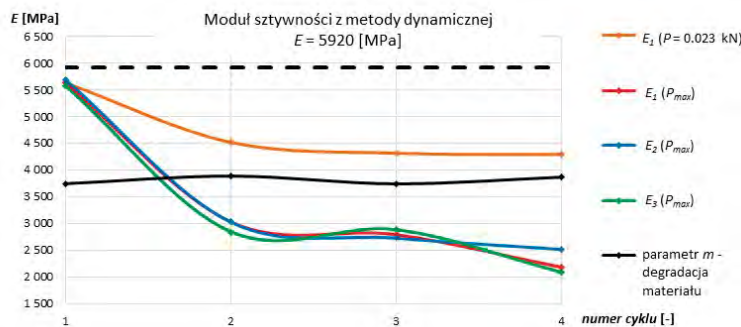
Zaprezentowana metoda eksperymentalna posiada duży potencjał w określaniu modułu sztywności w odniesieniu do zadanych warunków termicznych i określonego składu mieszanki.

Stwierdzono, że niezależnie od zastosowanej metody wyznaczania modułu uzyskuje się jego zbliżone wartości w pierwszym cyklu. Ze względów praktycznych zaleca się w dalszych analizach oceny cech materiałowych MMA stosować moduł sieczny (E_1). Metoda modułu siecznego pozwala wyznaczyć jego wartość w sposób jednoznaczny.

Badania z wykorzystaniem cykli obciążenia pozwalają obserwować zmiany strukturalne zachodzące w materiale oraz poziom jego degradacji. Ze wzrostem liczby cykli moduł sieczny E_1 dla niskiego poziomu siły $P = 0,023$ kN stabilizuje się. W czwartym cyklu stwierdzono, że moduły (E_1 i E_3) zależne od siły maksymalnej zaczynają obniżyć swoją wartość, wskazując na znaczne zmiany strukturalne zachodzące w mieszanke. Stwierdzono, że wartości wszystkich wyznaczonych modułów z pierwszego cyklu są zbliżone do wartości modułu wyznaczonego w metodzie dynamicznej. Na podstawie przepro-



Rys. 5. Przykład analizy zmienności modułu sztywności w cyklach dla próbki nr 3
Fig. 5. An example of analysis of stiffness module variation in cycles for sample no 3



Rys. 6. Analiza zmienności modułów i parametru degradacji w czterech cyklach przy zmiennym poziomie obciążenia
Fig. 6. An Analysis of module variability and degradation parameter in four cycles at a variable load level

wadzonych analiz stwierdzono, iż wyznaczany moduł sztywności w metodzie statycznej czteropunktowego zginania może być stosowany w modelowaniu i ocenie trwałości nawierzchni drogowej.

Bibliografia

- [1] Błażejowski K., Styk S., Technologia Warstw Asfaltowych, WKiŁ, Warszawa 2004.
- [2] Mackiewicz P., Trwałość zmęczeniowa mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych w nawierzchniach drogowych, Oficyna Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2016.
- [3] Judycki J., Jacewski M., Jaskuła P., Lepkosprężyste modelowanie mieszanek mineralno-asfaltowych przy długim czasie obciążenia za pomocą krzywych wiodących i jego ograniczenia, „Drogownictwo” 2015, nr 10, s. 336-704.
- [4] Judycki J., Analiza niektórych własności reologicznych drogowego betonu asfaltowego poddanego działaniu obciążeń statycznych, Praca doktorska, Instytut Budownictwa Lądowego, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 1975.
- [5] Judycki J., Pszczoła M., Jaskuła P., Modyfikacja metody zginania belek z mieszanek mineralno-asfaltowych i ocena ich parametrów reologicznych, VII Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce 2001.
- [6] PN-EN 12697-26:2012. Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 26: Sztywność.
- [7] GDDKiAWT-2 2014 cz. I – Mieszanki Mineralno-Asfaltowe – Wymagania Techniczne. Warszawa 2014.
- [8] Pszczoła M., Judycki J., Badania mieszanek mineralno-asfaltowych w niskiej temperaturze, „Drogownictwo” 2013, nr 3, s. 80-85.
- [9] Nagórski R., Mechanika nawierzchni drogowych w zarysie, PWN, Warszawa 2014.

ABSTRACT: TEST OF MINERAL ASPHALT MIXTURES IN THE STATIC FOUR POINT BENDING TEST AT TEMPERATURE 25°C

The article presents an experimental method for testing beams made of AC16W mineral-asphalt mix in a static four-point bending test. Tests were performed at a fixed measuring temperature of 25°C and for different load levels. The conditions of the study that specify the variable characteristics of asphalt mixtures were specified. Attention was paid to the material specificity of the mixtures and the variability of the stiffness modulus was analyzed. Different ways of its determination with different load cycles are presented. The obtained results of the modules were compared with the results obtained in the dynamic test. The identification of the secant modulus from the dependence of the load curve between strain and stress for the first cycle was indicated.

Key words: mineral asphalt mix, four-point bending, stiffness modulus, permanent deformation