

Sztywność mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych wbudowanych w nawierzchnię drogową

Jarosław Kuźniewski, Łukasz Skotnicki



dr inż. Łukasz Skotnicki

Politechnika Wrocławska,
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk

lukasz.skotnicki@pwr.edu.pl



dr inż. Jarosław Kuźniewski

Politechnika Wrocławska,
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk

jaroslaw.kuzniewski@pwr.edu.pl

W ramach realizacji grantu badawczego Katedra Dróg i Lotnisk Politechniki Wrocławskiej w latach 2010-2014 brała udział w projekcie: „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”. Szczegółowa nazwa Pakietu Tematycznego (PT): PT4 Recykling materiałów i elementów budowlanych, materiały alternatywne. Zakres tematu badawczego obejmował recykling istniejących nawierzchni drogowych oraz powtórne wykorzystanie odzyskanych materiałów i prognozowanie ich trwałości.

Podstawowym celem tematu badawczego było opracowanie procedur badań i oceny trwałości zmęczeniowej materiałów odzyskanych z nawierzchni drogowych i powtórnie scalonych w technologii na zimno za pomocą spoiw asfaltowych i cementowych. Materiały te przeznaczone są do wbudowania w podbudowy asfaltowych oraz betonowych nawierzchni drogowych. W ramach programu badawczego wykonano laboratoryjne badania cech fizycznych, wytrzymałościowych oraz zmęczeniowych powstałych konglomeratów – mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Opracowano także kryteria oceny jakości recyklowanych i powtórnie wbudowanych materiałów. W celu weryfikacji przydatności innowacyjnej technologii wykonano odcinek doświadczalny na ul. Avicenny we Wrocławiu. W kolejnych latach eksploatacji odcinka doświadczalnego prowadzono monitorowanie stanu nawierzchni wraz z oceną nośności konstrukcji. W artykule zamieszczono wybrane wyniki badań przedstawiające wpływ zmian temperatury na sztywność mieszanek MCE oraz charakterystykę odcinka doświadczalnego.

Mieszanka MCE

Ponowne wykorzystanie materiałów z nawierzchni asfaltowych przy remontach, jak i w budowie nowych dróg, rozwija się w Polsce od ponad 10 lat. Dodawanie destruktu asfaltowego do wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych w otaczarkach dało bardzo korzystne wyniki techniczne i ekonomiczne. Pomimo tego technologie te nie są w Polsce należycie rozwijane, jak ma to miejsce w krajach Europy Zachodniej i USA [2, 4, 5, 6, 8]. W ostatnich latach wykorzystuje się zaledwie 2% destruktu do wytwarzania mieszanek w otaczarkach. Pozostały destruktu jest wykorzystywany w technologii mieszanek MCE oraz do utwardzania dróg gruntowych, poboczy i robót ziemnych [3]. Mieszanka MCE może składać się z:

- samego destruktu otrzymanego bezpośrednio z frezowania nawierzchni lub z kruszenia brył z rozbiórki nawierzchni, jeżeli będzie ona spełniała wymagania dotyczące uziarnienia,
- bez spełnienia warunku dotyczącego uziarnienia, destruktu powinien być wówczas ulepszony kruszywem mineralnym,
- mieszanka mineralna może też być przygotowana z nowego kruszywa mineralnego.

Projektowanie składu mieszanki MCE [1] powinno być uzależnione od projektu konstrukcji nawierzchni. Doziarnienie destruktu może nastąpić ze względów konstrukcyjnych, gdy zachodzi konieczność zachowania wymaganej krzywej uziarnienia. Odpowiednie cechy wytrzymałościowe mieszanki MCE można uzyskać tylko poprzez staranne dobranie jej szkieletu mineralnego oraz zastosowanie materiałów składowych o dobrej jakości.

Program badawczy

Na potrzeby projektu ustalono zakres badań materiałów recyklowanych, oraz przygotowano stanowiska badawcze w Laboratorium Zakładu Dróg i Lotnisk Politechniki Wrocławskiej – rys. 1.

Badania mieszanek MCE prowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie wyko-

nano badania mieszanek MCE mające na celu uchwycenie zmian cech materiałowych w funkcji temperatury i składu. W drugim etapie wykonano badania i analizy sztywności oraz trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Określenie modułów sztywności w zmiennych temperaturach pozwoliło na ocenę odkształcalności badanych mieszanek oraz umożliwiło uzyskanie parametrów opisujących modele obliczeniowe nawierzchni drogowych wykonanych w technologii recyklingu MCE. Badania zmęczeniowe pozwoliły na ocenę trwałości zmęczeniowej w funkcji liczby powtarzalnych obciążeń. Identyfikacja zmiany modułów podczas badań zmęczeniowych umożliwiła ocenę kryteriów zmęczenia analizowanych mieszanek. Efektem końcowym prac było opracowanie modeli oraz kryteriów zmęczeniowych pozwalających na przygotowanie algorytmów wymiarowania nawierzchni drogowych zawierających recyklowane materiały i wbudowane w technologii na zimno. Weryfikacją przydatności opracowanej procedury było wykonanie odcinka doświadczalnego wraz z monitorowaniem stanu konstrukcji nawierzchni i badaniami wyrzykowymi.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań optymalizacyjnych modułów sztywności. Z punktu widzenia prognozowania trwałości zmęczeniowej nawierzchni drogowych istotne są moduły sztywności i trwałość zmęczeniowa. Moduł sztywności mieszanek MCE określano metodami statycznymi oraz dynamicznymi w maszynach wytrzymałościowych.

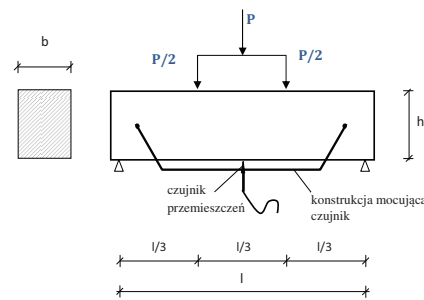
Sztywność mieszanek MCE

Badania statycznych modułów sztywności mieszanek MCE przeprowadzono, wykorzystując do tego celu maszynę wytrzymałościową stosowaną do badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Przyłożone obciążenie i czujniki przemieszczeń zastosowano zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 2, zgodnie z [7].

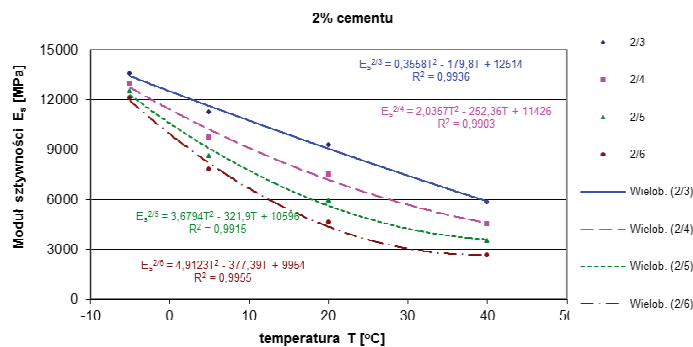
Moduł sztywności określono z pomiarów przemieszczeń sprężystych belki (próbki) w środku rozpiętości pomiędzy parą sił obciąża-



1. Laboratorium Zakładu Dróg i Lotnisk



2. Schemat badania zginania do oznaczenia statycznego modułu sztywności



3. Moduł sztywności mieszanki MCE przy zmiennej temperaturze

jących. 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:

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

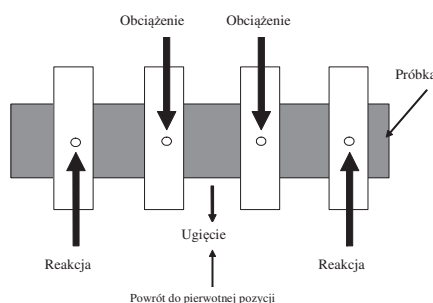
gdzie:

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].

Na rys. 3 przedstawiono korelację modułu sztywności próbek wykonanych z mieszanki MCE, o różnych zawartościach asfaltu i w różnej temperaturze, dla zawartości 2% (m/m) cementu.

Z rys. 3 wynika, że najwyższe wartości modułów statycznych uzyskują mieszanki z minimalną zawartością asfaltu 3% (m/m). Moduły maleją wraz ze zwiększaniem się zawartości asfaltu w mieszance i ze wzrostem temperatury. Charakter zmiany wartości modułów statycznych jest analogiczny we wszystkich analizowanych mieszankach.

Przeprowadzono również badania zespolonego modułu sztywności (modułu kompleksowego) metodą zginania belki 4 punktowej (4PB – Four Point Bendig). Schemat badania został przedstawiony na rys. 4.



4. Schemat obciążania próbki w badaniu zginania belki 4 punktowej

Pod wpływem przyłożonego obciążenia, rejestrowana jest odpowiedź materiału w postaci ugięcia, a pośrednio naprężenie. To pozwala na wyznaczenie sztywności mieszanki MCE – zespolonego modułu z zależności (2):

$$E = \frac{\sigma(t, T)}{\varepsilon(t, T)} \quad (2)$$

gdzie:

E – zespolony moduł sztywności mieszanki MCE [MPa],
 σ – naprężenie podczas badania [MPa],
 ε – odkształcenie jednostkowe w środku rozpiętości próbki [-],
 T – temperatura badania [°C],
 t – czas badania [cykle].

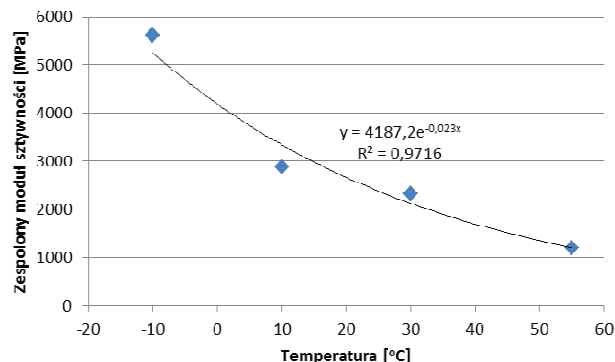
Przeprowadzono badania zespolonego modułu sztywności mieszanki MCE w różnej temperaturze badawczej. Analizowano zespolony moduł sztywności mieszanki MCE w zakresie temperatur, jakie mogą wystąpić w warstwach konstrukcyjnych nawierzchni drogowej. Proponowany przedział temperaturowy wynosił od -10°C do +55°C. Na rys. 5 pokazano trend zmian wartości zespolonego modułu sztywności w funkcji temperatury.

Wartość zespolonego modułu sztywności spada wraz ze wzrostem temperatury badawczej, dążąc asymptotycznie do wartości ok. 1000 MPa. Dla temperatury średniorocznej +10°C zespolony moduł sztywności mieszanki MCE wynosi ok. 3500 MPa. Zmiany temperatury wpływają na sztywność mieszanki MCE, jednak gradient zmian jest zdecydowanie mniejszy w porównaniu do konwencjonalnych mieszanki MMA.

Badania statyczne oraz badania dynamiczne wykazały wpływ składu i temperatury na uzyskiwane wartości modułów sztywności. Próbkę mieszanki MCE w badaniach dynamicznych charakteryzowały się niższymi sztywnościami w porównaniu do testów statycznych. Testy statyczne mogą służyć ocenie wpływu składu mieszanki MCE na ich sztywność, natomiast do dalszych analiz zmężeń proponuje się wykorzystanie badań dynamicznych modułów sztywności, na belkach zginanych czteropunktowo, z uwagi na lepsze odwzorowanie charakterystyki obciążenia nawierzchni (ruch pojazdów samochodowych).

Odcinek doświadczalny

Wbudowane materiały w istniejącą nawierzchnię ulicy Avicenny utraciły swoją nośność i trwałość zmęczeniową. Zaproponowano wykonanie nawierzchni w technologii recyklingu na zimno na istniejących



5. Trend zmian sztywności mieszanki MCE w funkcji temperatury

materiałach i wykonanie na ich bazie mieszanki cementowej (MC) i mieszanki cementowo-emulsyjnej (MCE). Mieszanka typu MC stanowiła wzmocnienie podłoża, natomiast mieszanka MCE została wbudowana w dolną warstwę podbudowy. Na podstawie badań laboratoryjnych opracowano projekt receptury mieszanki MCE do zastosowania na odcinku doświadczalnym.

Ulica Avicenny zlokalizowana jest w zachodniej części Wrocławia, łączy między sobą dwa ważne osiedla: Oporów oraz Muchobór Wielki. Przed wykonaniem odcinka doświadczalnego ulica posiadała liczne uszkodzenia, pokazane na rys. 6.



6. Ulica Avicenny – zachodni pas ruchu

Z uwagi na zły stan nawierzchni ulicy, zaproponowano technologię remontu, uwzględniającą innowacyjną technologię recyklingu na miejscu. Proces technologiczny wykonywania doświadczalnego odcinka przedstawiał się następująco:

- frezowanie istniejącej nawierzchni,
- odwóz destruktu na odkład, ewentualne jego doziarnienie,
- poszerzenie koryta oraz pogłębienie na całej szerokości,
- dowóz części destruktu do koryta i rozłożenie go na całej szerokości koryta,
- wyprofilowanie destruktu, wymieszanie recyklerem z gruntem podłoża i zastabilizowanie cementem,
- na otrzymanej warstwie stabilizacji (grunt podłoża + destruktu + cement) rozłożenie pozostałej części destruktu i wykonanie mieszanki MCE,
- ułożenie warstwy łączącej z slurry seal,
- ułożenie warstw asfaltowych.

Wybrany etap wykonywania odcinka doświadczalnego, pokazany został na rys. 7.



7. Zagęszczanie warstwy MCE



8. Odcinek doświadczalny po wykonanym remoncie – stan zerowy

Po wykonaniu warstw recyklowanych nawierzchnia odcinka doświadczalnego została wykończona warstwami asfaltowymi: warstwa wiążąca z betonu asfaltowego, natomiast warstwa ścieralna z mieszanki typu SMA. Ogólny widok innowacyjnej nawierzchni po wykonaniu odcinka doświadczalnego pokazano na rys. 8.

Po okresie eksploatacji wynoszącym 2 lata (obciążenie ruchem KR4) wykonano analizy stanu odcinka i oceny przydatności stosowanej technologii. Przedmiotem rozważań była ocena nośności, trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni odcinka doświadczalnego.

Ocenę nośności przeprowadzono w oparciu o pomiary czaszy ugięć nawierzchni wykonane za pomocą ugięciomierza dynamicznego typu FWD. W tab. 1 zestawiono moduły uzyskane z badań identyfikacyjnych zaraz po oddaniu nawierzchni do eksploatacji oraz po 2 latach eksploatacji.

Analizując uzyskane wartości modułów nasuwają się następujące spostrzeżenia:

- moduły mieszank mineralno-asfaltowych mają o ok. 20% mniejsze wartości, wynikać to może z faktu, że badania po 2 latach przeprowadzono w temperaturze ok. 3-4 stopnie wyższej niż badania w stanie zerowym,
- moduły warstwy MCE w stanie zerowym są porównywalne z wartościami dynamicznych modułów uzyskanymi w warunkach laboratoryjnych,
- moduły warstwy MCE są prawie dwukrotnie wyższe po 2 latach eksploatacji niż bezpośrednio po wykonaniu,
- wzrosły również po 2 latach eksploatacji moduły podłoża o ok. 50%.

Fakt wzrostu modułów podłoża i warstwy MCE należy tłumaczyć obecnością cementu w tych warstwach.

Podsumowanie

Przedstawione wyniki prac badawczych mieszank mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE) pozwalają na stwierdzenie, że mieszanka ta może być stosowana jako warstwa podbudowy w konstrukcjach nawierzchni. Zawarty w mieszance cement zapewnia jej większą sztywność i wytrzymałość. Obecność asfaltu w mieszance zwiększa lepkość i eliminuje skurcz, nadaje mieszance właściwości regeneracji mikropęknięć na styku zaczyn cementowy-kruszywo-asfalt. Mieszanki te dobrze się formują i zagęszczają przy optymalnej wilgotności.

W efekcie prowadzonych prac w ramach realizacji grantu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju” zaproponowano własną metodykę badań modułów na beleczkach obciążonych czteropunktowo oraz zaproponowano metodykę badań zmęczeniowych. Wykorzystując te badania wprowadzono metodykę oceny trwałości zmęczeniowej warstw konstrukcji z mieszankami MCE, która ma istotne znaczenie przy projektowaniu nawierzchni drogowych.

Technologię zweryfikowano na rzeczywistej konstrukcji nawierzchni odcinka doświadczalnego. Wykonano badania nośności nowej nawierzchni drogowej. Uzyskano satysfakcjonujące rezultaty. Stwierdzono dużą zbieżność wartości zespolonego modułu sztywności określonego metodami laboratoryjnymi w stosunku do sztywności rzeczywistej warstwy MCE oszacowanej metodami obliczeniowymi. Korelacja wyników pozwala na stwierdzenie, iż stosowane metody projektowania i wykonywania mieszank MCE, a także metody teoretyczne szacowania sztywności przyszłej

warstwy, wykonanej w technologii recyklingu, są właściwe.

Porównując nowe materiały z konwencjonalnymi rozwiązaniami, wskazano na pozytywne efekty ekonomiczne, środowiskowe i technologiczne proponowanej technologii. ◀

Materiały źródłowe

- [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] Issa R., Zaman M. M., Miller G. A., Senkowski L. J., Characteristics of Cold Processed Asphalt Millings and Cement-Emulsion Mix, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, Asphalt Mixtures, Materials and Construction, no. 1767, 2001
- [3] Jabłoński K., Rybczyński M., Szrajber W., Polskie doświadczenia w recyklingu nawierzchni asfaltowych w otaczarkach, Drogownictwo 2/2003
- [4] Milton L. J., Earland M., Design guide and specification for structural maintenance of highway pavements by cold in-situ recycling. TRL report 386, Transport Research laboratory, England 1999
- [5] Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme, Conception et dimensionnement des structures de chaussée, Guide technique, LCPC, SETRA, Décembre 1994
- [6] Neussner E., Kaltrecycling-Bauweisen im Härte-test - das Projekt Nauberg, Strasse und Autobahn nr 2/2000
- [7] PN-EN 12697-26:2007. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszank mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 26: Sztywność
- [8] Weinert F., Merkblatt Kaltrecycling in situ - Betonstrassentagung 2001, Heft 25 (FGSV: Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau (M KRC), Entwurf 2002, Köln 2002

Tab. 1. Zestawienie otrzymanych wartości modułów dla ulicy Avicenny

Rodzaj warstwy	Moduł, po oddaniu do eksploatacji [MPa]	Moduł po 2 latach eksploatacji [MPa]
Warstwy z mieszanki mineralno-asfaltowej	23 700	18 670
Warstwa z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej, MCE	4250	8150
Grunt stabilizowany cementem + Podłoże gruntowe	132	193