



PIOTR RADZISZEWSKI¹⁾
JERZY PIŁAT²⁾
ANDRZEJ PLEWA³⁾
JAN KRÓL⁴⁾

KONSTRUKCJE ASFALTOWYCH NAWIERZCHNI DROGOWYCH Z ZASTOSOWANIEM KRUSZYW POŁODOWCOWYCH

STRESZCZENIE. Celem pracy była ocena przydatności kruszyw polodowcowych do warstw konstrukcyjnych nawierzchni na podstawie wyników badań modułu sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych oraz analizy strukturalnej konstrukcji asfaltowych nawierzchni drogowych o kategorii ruchu KR1 - KR6. Obliczono trwałości zmęczeniowe konstrukcji nawierzchni o układzie warstw zgodnie z Katalogiem oraz konstrukcję nawierzchni o wydłużonym okresie trwałości. Udowodniono, że istnieje możliwość projektowania warstw konstrukcyjnych nawierzchni drogowych z zastosowaniem kruszyw polodowcowych.

1. WSTĘP

Realizacja programu rozbudowy sieci drogowej w Polsce wymaga poszukiwania nowych materiałów do produkcji kruszyw. Takimi materiałami mogą być złoża

¹⁾ prof. dr hab. inż. – Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

²⁾ prof. dr hab. inż. – Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

³⁾ dr inż. – Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej

⁴⁾ dr inż. – Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

materiałów polodowcowych. Duże złoża osadów kruszyw polodowcowych, występujące w regionie północno-wschodniej Polski w województwie podlaskim, mogą być cennym surowcem do produkcji kruszyw drogowych. Należy prowadzić badania nad stosowaniem w większym stopniu kruszyw ze złóż polodowcowych, a głównie kruszyw przekruszonych przydatnych do różnych warstw konstrukcyjnych nawierzchni.

Tematyka wykorzystania kruszyw polodowcowych w nawierzchniach asfaltowych z rejonu Polski północno-wschodniej była nielicznie podejmowana w referatach i artykułach [1 - 3]. W pracy [3] stwierdzono, że kruszywa łamane z otoczków oraz inne kruszywa lokalne uznawane za wątpliwe i gorszej jakości mogą z powodzeniem być stosowane do mieszanek mineralno-asfaltowych o wysokim module sztywności AC WMS. W dotychczasowej praktyce budowy dróg wykorzystuje się kruszywo z naturalnie rozdrobnionego surowca skalnego do różnych warstw nawierzchni o kategorii ruchu KR1 i KR2.

Celem badań podjętych przez autorów była ocena przydatności kruszyw polodowcowych do warstw konstrukcyjnych nawierzchni na podstawie badań funkcjonalnych. Badania właściwości funkcjonalnych wykonano na mieszankach mineralno-asfaltowych z kruszywami polodowcowymi przeznaczonych do warstw konstrukcyjnych nawierzchni o kategorii ruchu KR1 - KR6. Przeprowadzono analizę strukturalną konstrukcji nawierzchni drogowych kategorii ruchu KR1 - KR6 na podstawie przyjętych modeli konstrukcji nawierzchni. Obliczono trwałości zmęczeniowe konstrukcji nawierzchni o układzie warstw zgodnie z Katalogiem [4] oraz konstrukcję nawierzchni o wydłużonym okresie trwałości.

2. ZAKRES BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Badania doświadczalne mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych do warstw nawierzchni drogowych kategorii ruchu KR1 - KR6 wykonano z wykorzystaniem kruszyw polodowcowych ze złóż Polski północno-wschodniej. Na podstawie wyników badania kruszyw polodowcowych z kopalń: Kruszbet, Szumowo i Racewo [2], określono składy mieszanek mineralnych przeznaczonych do różnych kategorii ruchu zgodnie z WT-1 i WT-2 [5, 6] oraz różnych warstw konstrukcyjnych nawierzchni. Do zaprojektowanych mieszanek mineralnych dobrano optymalne zawartości lepiszczy asfaltowych. Badaniom poddano następujące rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych:

- warstw konstrukcyjnych nawierzchni KR1 - KR2 z kruszywami polodowcowymi niełamanymi:
 - AC 22 P 50/70,
 - AC 16 W 50/70,
 - AC 8 S 50/70,
 - AC 8 S PMB 45/80-55,

- SMA 5 50/70,
- SMA 5 PMB 45/80-55,
- do warstw konstrukcyjnych nawierzchni KR3 - KR4 z kruszywami polodowcowymi łamanymi:
 - AC 22 P 35/50,
 - AC 16 W 35/50,
 - AC 8 S PMB 45/80-55,
 - SMA 5 PMB 45/80-55,
 - SMA 8 PMB 45/80-55,
- do warstw konstrukcyjnych nawierzchni KR5 - KR6 z kruszywami polodowcowymi łamanymi:
 - AC 22 P 35/50,
 - AC 16 W 35/50,
 - SMA 8 PMB 45/80-55,
 - SMA 11 PMB 45/80-55,
 - AC BBTM 8 A PMB 45/80-55,
 - AC BBTM 11 A PMB 45/80-55.

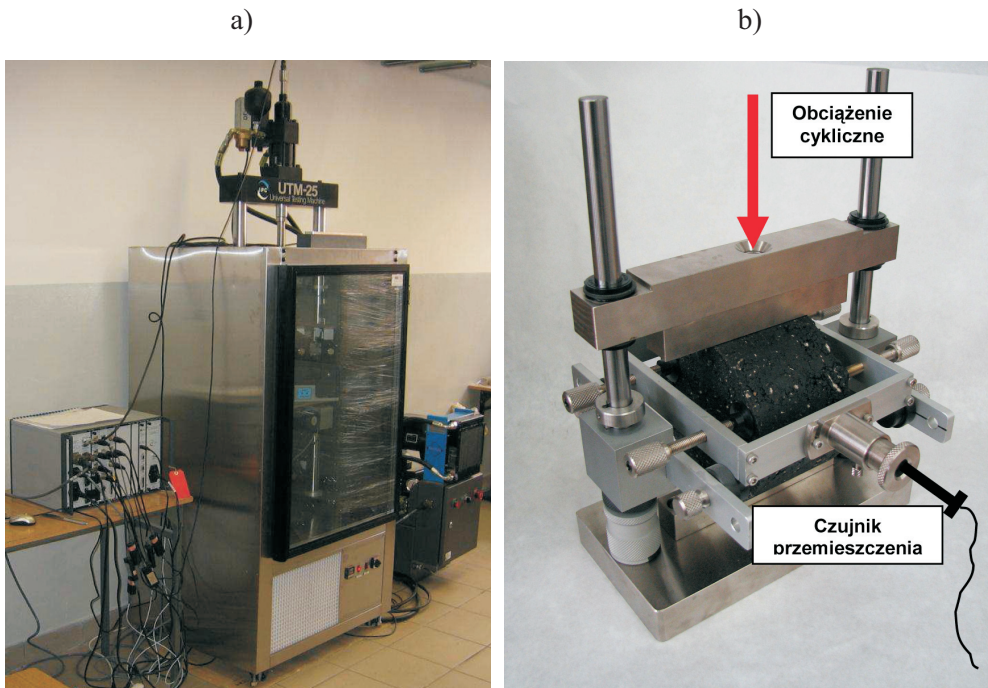
Do określenia składu mieszanek zastosowano następujące symbole: AC – beton asfaltowy, SMA – mastyks grysowy, AC BBTM – mieszanka mineralno-asfaltowa do warstw ścieralnych o nieciągłym uziarnieniu, PMB – asfalt modyfikowany polimerem, P – warstwa podbudowy, W – warstwa wiążąca, S – warstwa ścieralna, A – rodzaj uziarnienia mieszanki BBTM.

W wymienionych mieszankach mineralno-asfaltowych zastosowano kruszywa polodowcowe: piasek płukany, piasek łamany, żwir, żwir kruszony i grysy.

3. OPIS I WYNIKI BADAŃ MODUŁU SZTYWNOŚCI MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH

Badanie modułu sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych przeprowadzono, zgodnie z procedurą podaną w PN-EN 12697-26 zał. C [7] na próbkach cylindrycznych, zagęszczonych ubijakiem Marshalla, oraz na próbkach cylindrycznych wyciętych wiertnicą z płyt zagęszczonych przez wałowanie. Próbki cylindryczne poddano dalszej obróbce polegającej na wyrównaniu przecinarką powierzchni tak, aby wysokość cylindrów wynosiła $50 \div 55$ mm. Przed badaniem próbki umieszczano na 4 godziny w komorze klimatycznej urządzenia UTM-25 (rys. 1) w temperaturze badania

wynoszącej 5°C, 10°C i 20°C. Następnie próbki poddawano działaniu 5-ciu wstępnych impulsów sił. Z każdego z kolejnych 5-ciu impulsów siły automatycznie dokonano pomiaru przyłożonej siły i odkształcenia. Wynikiem badania modułu sztywności była średnia wartość uzyskana z pomiarów 5-ciu impulsów w dwóch położeniach próbki (obrót próbki o kąt 90° w stosunku położenia wyjściowego).



Rys. 1. Stanowisko badawcze do pomiaru modułu sztywności: a) komora klimatyczna z uniwersalną dynamiczną maszyną wytrzymałościową UTM-25, b) układ pomiarowy rozciągania pośredniego z zamontowaną próbką cylindryczną
Fig. 1. Test setup for stiffness modulus test: a) climatic cabin and universal testing machine UTM-25, b) indirect tensile test device with cylindrical specimen

Wyniki badań modułu sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych, kategorii ruchu KR1 - KR2 przedstawiono w tablicy 1 (badanie na próbkach Marshalla), mieszanek o kategorii ruchu KR3 - KR6 (badanie na próbkach Marshalla) w tablicy 2, mieszanek o kategorii KR3 - KR6 (próbki wycięte z zagęszczonej przez wałowanie płyty) w tablicy 3. Na rysunkach 2 oraz 3 przedstawiono wykresy modułów sztywności oznaczonych na próbkach Marshalla, a na rysunku 4 na próbkach wyciętych z zagęszczonej płyty przez wałowanie.

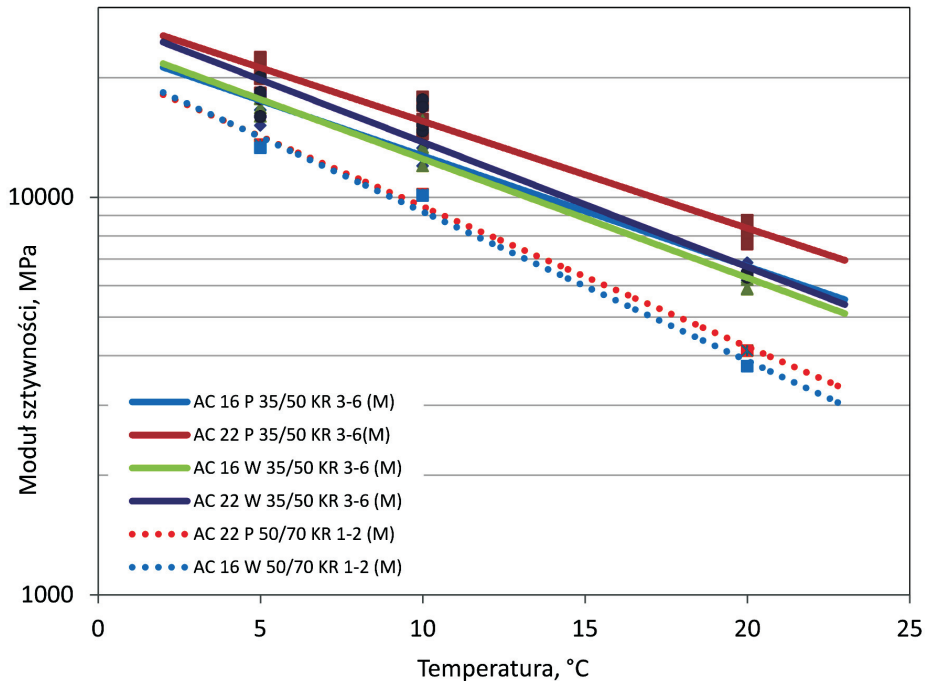
Tablica 1. Podstawowe właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych z kruszywami polodowcowymi; próbki zagęszczane w ubijaku Marshalla
 Table 1. Volumetric properties of asphalt mixtures with aggregate from glacier deposits; specimen compacted by Marshall hummer

| Rodzaj mieszanki mineralno-asfaltowej | Właściwości | |
|--|-------------------------------|--------------------------------|
| | Zawartość asfaltu B [v/v %] | Wolna przestrzeń V_m [v/v %] |
| Mieszanki mineralno-asfaltowe kategorii ruchu KR1 - KR2 z kruszywami polodowcowymi niełamanymi | | |
| AC 22 P 50/70 | 4,8 | 6,9 |
| AC 16 W 50/70 | 5,0 | 4,8 |
| AC 8 S 50/70 | 7,4 | 2,8 |
| AC 8 S PMB 45/80-55 | 6,4 | 2,1 |
| SMA 5 50/70 | 7,5 | 3,4 |
| SMA 5 PMB 45/80-55 | 7,5 | 3,4 |
| Mieszanki mineralno-asfaltowe kategorii ruchu KR3 - KR6 z kruszywami polodowcowymi łamanymi | | |
| AC 16 P 35/50 | 4,0 | 7,3 |
| AC 22 P 35/50 | 4,0 | 6,5 |
| AC 16 W 35/50 | 4,7 | 5,0 |
| AC 22 W 35/50 | 4,5 | 5,0 |
| SMA 8 PMB 45/80-55 | 6,6 | 3,6 |
| SMA 11 PMB 45/80-55 | 6,3 | 3,9 |
| BBTM 8 A PMB 45/80-55 | 6,5 | 3,9 |
| BBTM 11 A PMB 45/80-55 | 6,5 | 2,6 |

Tablica 2. Wyniki badania modułu sztywności próbek z mieszanek mineralno-asfaltowych kategorii ruchu KR1 - KR2 z kruszywami polodowcowymi niełamanymi; próbki zagęszczane w ubijaku Marshalla

Table 2. Stiffness modulus test results for asphalt mixtures with aggregate from glacier deposits. Mixture for traffic KR1 - KR2 category; specimen compacted by Marshall hammer

| Rodzaj mieszanki mineralno-asfaltowej | Moduł sztywności [MPa] | | |
|---------------------------------------|------------------------|-------|------|
| | Temperatura badania | | |
| | 5°C | 10°C | 20°C |
| AC 22 P 50/70 | 13560 | 10180 | 4110 |
| AC 16 W 50/70 | 13310 | 10100 | 3760 |
| AC 8 S 50/70 | 7320 | 5740 | 1520 |
| AC 8 S PMB 45/80-55 | 7470 | 5810 | 2010 |
| SMA 5 50/70 | 7200 | 5370 | 1830 |
| SMA 5 PMB 45/80-55 | 8050 | 5840 | 2380 |

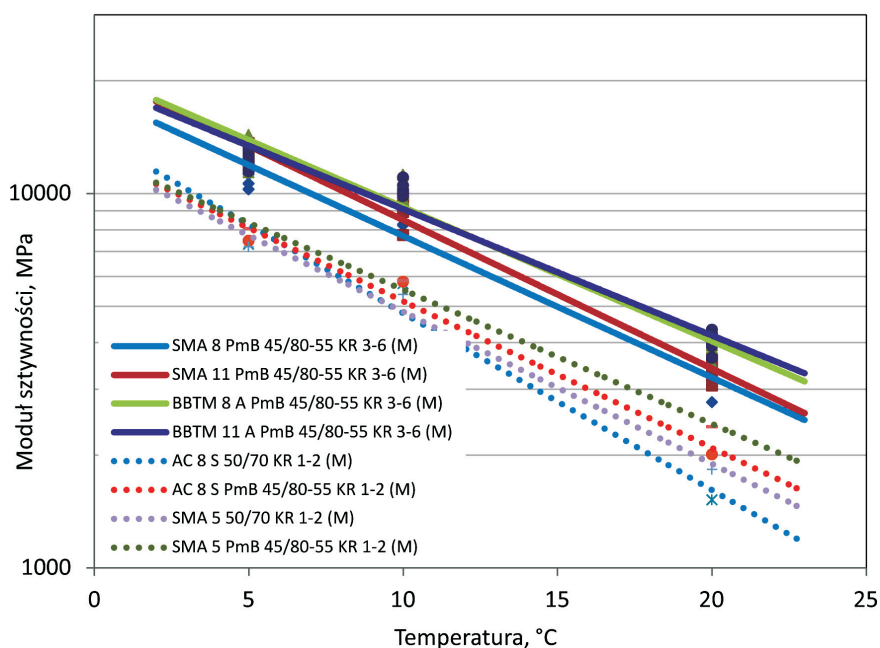


Rys. 2. Moduł sztywności w skali logarytmicznej w funkcji temperatury próbek z betonu asfaltowego do warstwy podbudowy i warstwy wiążącej zagęszczanych ubijakiem Marshalla (M)
Fig. 2. Stiffness modulus (logarithmic scale, temperature on horizontal axis) test results for subgrade and binder coarse asphalt concrete; specimen compacted by Marshall hammer (M)

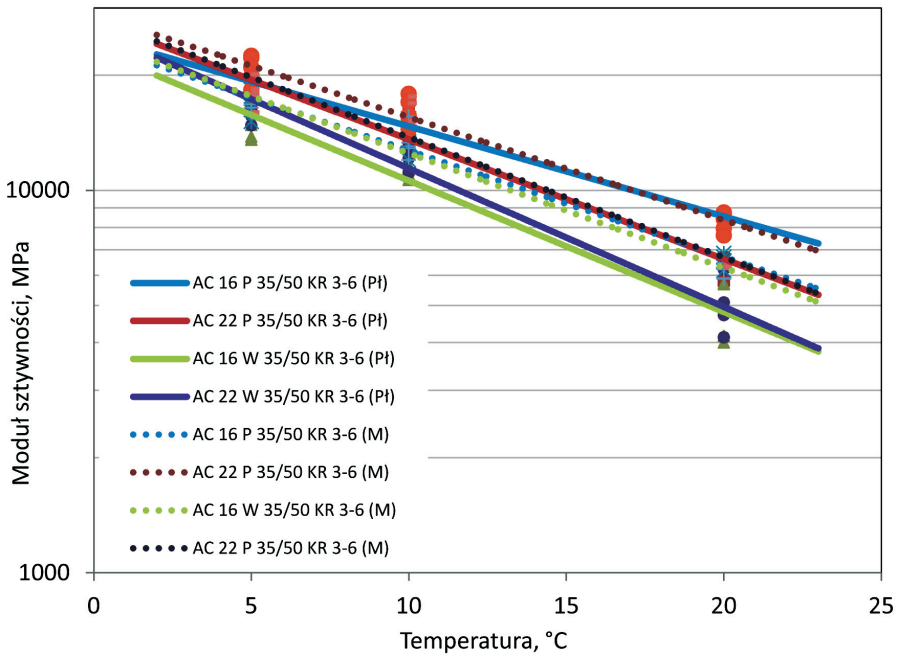
Tablica 3. Wyniki badania modułu sztywności próbek z mieszanek mineralno-asfaltowych kategorii ruchu KR3 - KR6 z kruszywami polodowcowymi łamanymi; próbki zagęszczane w ubijaku Marshalla

Table 3. Stiffness modulus test results for asphalt mixtures with aggregate from glacier deposits. Mixture for traffic KR3 - KR6 category; specimen compacted by Marshall hammer

| Rodzaj mieszanki mineralno-asfaltowej | Moduł sztywności [MPa] | | |
|---------------------------------------|------------------------|-------|------|
| | Temperatura badania | | |
| | 5°C | 10°C | 20°C |
| AC 16 P 35/50 | 16743 | 13707 | 6549 |
| AC 22 P 35/50 | 20766 | 16112 | 8282 |
| AC 16 W 35/50 | 16917 | 13370 | 6148 |
| AC 22 W 35/50 | 18035 | 15896 | 6372 |
| SMA 8 PMB 45/80-55 | 11038 | 8671 | 3117 |
| SMA 11 PMB 45/80-55 | 12782 | 9179 | 3329 |
| BBTM 8 A PMB 45/80-55 | 12985 | 10223 | 3900 |
| BBTM 11 A PMB 45/80-55 | 12320 | 10332 | 4011 |



Rys. 3. Moduł sztywności w skali logarytmicznej w funkcji temperatury próbek z SMA, BBTM i AC S do warstwy ścieralnej zagęszczanych ubijakiem Marshalla (M)
 Fig. 3. Stiffness modulus (logarithmic scale, temperature on horizontal axis) test results for SMA and BBTM mixture and wearing coarse asphalt concrete; specimen compacted by Marshall hammer (M)



Rys. 4. Moduł sztywności w skali logarytmicznej w funkcji temperatury próbek z betonu asfaltowego do warstwy podbudowy i warstwy wiążącej zagęszczanych ubijakiem Marshalla (M) i metodą wałowania (Pł)

Fig. 4. Stiffness modulus (logarithmic scale, temperature on horizontal axis) test results for subgrade and binder coarse asphalt concrete; specimen prepared with slab compactor (Pł

Tablica 4. Wyniki badania modułu sztywności próbek z mieszanek mineralno-asfaltowych kategorii ruchu KR3 - KR6 z kruszywami polodowcowymi łamanymi; próbki wycięte z zagęszczonej płyty
Table 4. Stiffness modulus test results for asphalt mixtures with aggregate from glacier deposits. Mixture for traffic KR3 - KR6 category; specimen prepared by slab compactor

| Rodzaj mieszanki mineralno-asfaltowej | Moduł sztywności [MPa] | | |
|---------------------------------------|------------------------|-------|------|
| | Temperatura badania | | |
| | 5°C | 10°C | 20°C |
| AC 16 P 35/50 | 18214 | 16047 | 8309 |
| AC 22 P 35/50 | 18464 | 14777 | 6445 |
| AC 16 W 35/50 | 14975 | 11544 | 4740 |
| AC 22 W 35/50 | 16234 | 12688 | 4854 |

Na podstawie wyników badania modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych, przedstawionych w tablicach 1 - 4, można stwierdzić występowanie zależności

modułów sztywności od rodzaju kruszywa (łamane i niełamane), twardości i rodzaju lepiszcza oraz rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowej. Mieszanki mineralno-asfaltowe przeznaczone do warstwy podbudowy i warstwy wiążącej nawierzchni o kategorii ruchu KR1 - KR2, z kruszywa połodowcowego niełamanego charakteryzują się niższymi wartościami modułu sztywności w odniesieniu do mieszanek z kruszywem łamanym, kategorii ruchu KR3 - KR6 (rys. 2). Niższe wartości modułu sztywności mieszanek kategorii ruchu KR1 - KR2 można tłumaczyć zastosowaniem w mieszankach kruszywa niełamanego oraz lepiszcza o mniejszej twardości (50/70). Mieszanki mineralno-asfaltowe do warstw ścieralnych przeznaczone do kategorii ruchu KR1 - KR2 wykazują również niższe wartości modułów sztywności w odniesieniu do mieszanek przeznaczonych do warstwy ścieralnej do kategorii ruchu KR3 - KR6 (rys. 3). Na podstawie analizy wartości modułów sztywności (rys. 3) można stwierdzić, że największy wpływ na sztywność mieszanek do warstwy ścieralnej ma rodzaj zastosowanego kruszywa oraz uziarnienie mieszanki mineralnej. Można zauważyć, że wartości modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych do warstwy ścieralnej przedstawione na rysunku 3 zależą w większym stopniu od rodzaju szkieletu mineralnego mieszanki a w mniejszym stopniu od rodzaju lepiszcza asfaltowego.

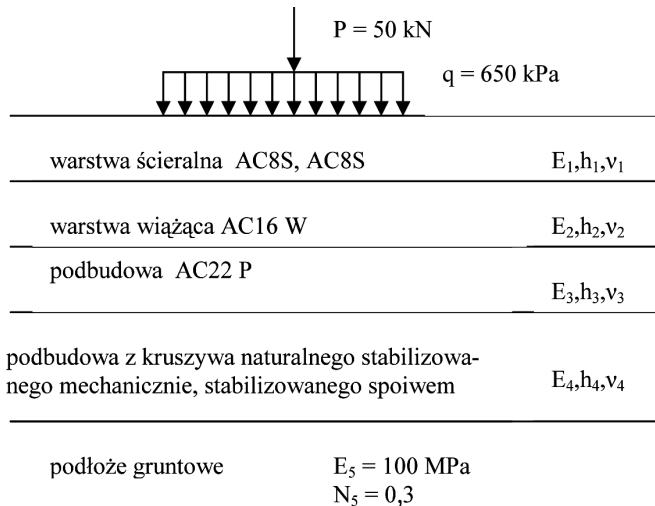
Wyniki analizy wpływu sposobu przygotowywania próbek na moduły sztywności przedstawiono na rysunku 4. Stwierdzono, że próbki wycięte z płyty zagęszczanej przez wałowanie mają niższe moduły sztywności niż próbki zagęszczane udarowo.

Wyniki badania modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych zastosowano w analizie trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni. Do obliczeń przyjęto wartości modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych zagęszczonych metodą wałowania. Laboratoryjna metoda zagęszczania próbek mieszanek mineralno-asfaltowych przez wałowanie odpowiada w większym stopniu rzeczywistym warunkom zagęszczania warstw nawierzchni niż udarowa metoda z zastosowaniem ubijaka Marshalla.

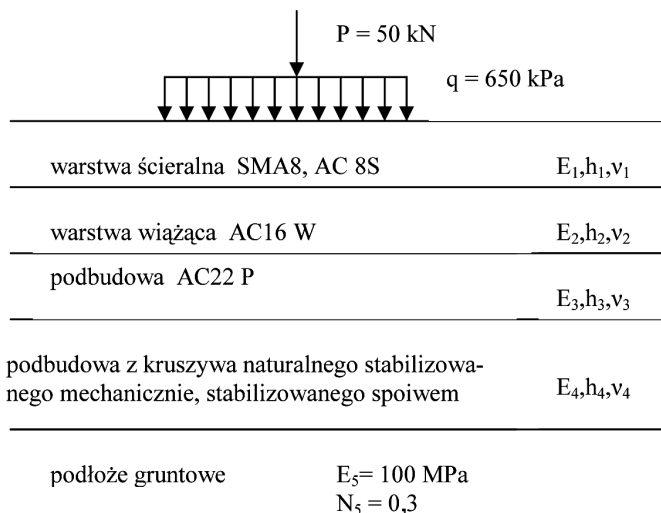
4. ANALIZA STRUKTURALNA KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI DROGOWYCH KR1 - KR6

Wyniki badania modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych zastosowano w analizie trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni. Do obliczeń przyjęto wartości modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych zagęszczonych metodą udarową z zastosowaniem ubijaka Marshalla i metodą wałowania. W obliczeniu konstrukcji nawierzchni drogowej kategorii ruchu KR3 - KR6 uwzględniono dwa warianty konstrukcji przyjmując wartości modułu sztywności w zależności od metody zagęszczenia. Obliczone warianty konstrukcji dotyczą warstwy wiążącej i podbudowy, ze względu na to że inicjacja spękań zmęczeniowych rozpoczyna się w dolnych warstwach konstrukcji nawierzchni asfaltowej. Laboratoryjna metoda zagęszczania próbek mieszanek mineralno-asfaltowych przez wałowanie odpowiada w większym stopniu rzeczywistym warunkom zagęszczania warstw nawierzchni, niż udarowa metoda z zastosowaniem ubijaka Marshalla.

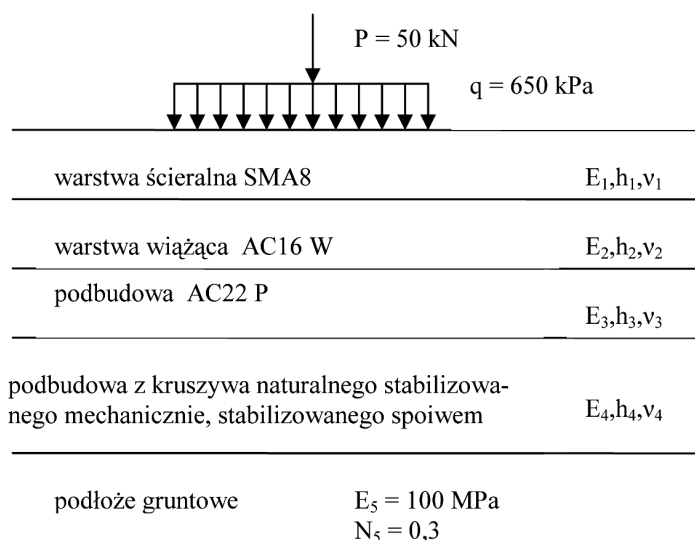
Typowe konstrukcje nawierzchni o obciążeniu KR1 - KR6, przedstawione w Katalogu Typowych Konstrukcji i Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [4], poddano analizie trwałości zmęczeniowej. Przyjęto układ warstw według Katalogu [4], do warstw konstrukcyjnych zastosowano kruszywa ze złóż polodowcowych, uwzględniając w obliczeniach wartości modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych podanych w tabelicy 2 - 4. Analizie mechanicznej poddano konstrukcje nawierzchni przedstawione na rysunkach 5 - 7.



Rys. 5. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni drogowej KR1 - KR2
Fig. 5. Model for pavement structure analysis for traffic KR1 - KR2 category



Rys. 6. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni drogowej KR3 - KR4
Fig. 6. Model for pavement structure analysis for traffic KR3 - KR4 category

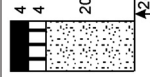
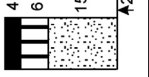

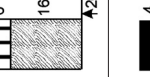
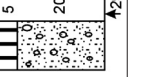


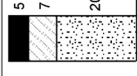

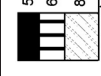
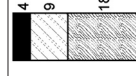

Rys. 7. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni drogowej KR5 - KR6
 Fig. 7. Model for pavement structure analysis for traffic KR5 - KR6 category

Układ warstw konstrukcyjnych nawierzchni z zastosowaniem kruszyw polodowcowych, grubości warstw oraz wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej przedstawiono w tablicach 5 i 6. Obliczenia trwałości zmęczeniowej wykonano z uwzględnieniem temperatury warstw asfaltowych zgodnie z Katalogami [4] i [8] w zakresie: -2°C , 10°C i 23°C . Wartość współczynnika Poissona przyjęto zgodnie z [8]. Obliczenia naprężeń i odkształceń w analizowanych konstrukcjach wykonano przy użyciu programu komputerowego BISAR 3.0 [9]. Na podstawie wyników badań modułów sztywności w temperaturze 5°C , 10°C i 20°C , obliczono wartości modułów sztywności w temperaturze odpowiadającej równoważnej temperaturze w okresie zimy: -2°C , w okresie wiosny i jesieni: $+10^{\circ}\text{C}$ oraz w okresie lata $+23^{\circ}\text{C}$.

Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni drogowych (zgodnie z kryteriami podanymi w tablicach 5 i 6) kategorii ruchu KR1 - KR2 przedstawiono w tablicy 5, konstrukcji nawierzchni drogowych kategorii ruchu KR3 - KR6 w tablicy 6 (I – obliczenia na podstawie wartości modułów sztywności próbek zagęszczanych ubijakiem Marshalla, II – obliczenia na podstawie wartości modułów sztywności próbek zagęszczanych wałowaniem).

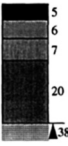
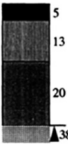
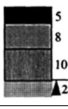

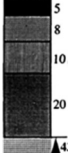
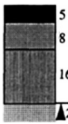
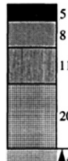
Tablica 5. Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni o obciążeniu KR1 - KR2
 Table 5. Results of fatigue life calculation of pavement structure for traffic KR1 - KR2 category

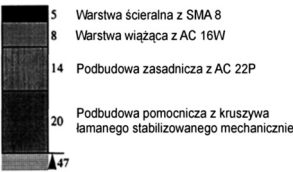
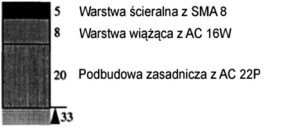
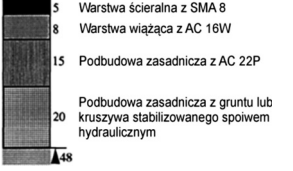
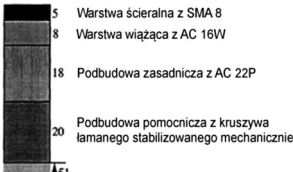
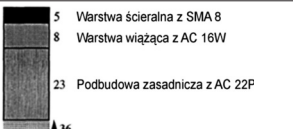
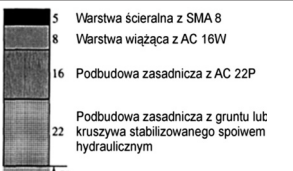
| Konstrukcja nawierzchni drogowej | Obliczona trwałość zmęczeniowa nawierzchni | | Wymagana trwałość zmęczeniowa nawierzchni | Metoda wzmocnienia nawierzchni |
|---|---|-------------------------------------|---|---|
| | Kryterium spekań zmęczeniowych warstwy asfaltowej | Kryterium deformacji strukturalnych | | |
| Nawierzchnia drogi kategorii ruchu KR1 | | | | |
|  <p>Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego Podbudowa z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie lub tuczni kamiennego</p> | 1 558 654 | 68 626 | | Zwiększyć grubość warstwy wiążącej o 1 cm |
|  <p>Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego Podbudowa z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie lub tuczni kamiennego</p> | 1 728 873 | 81 041 | | Zwiększyć grubość warstwy wiążącej o 1 cm |
|  <p>Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego Podbudowa z betonu asfaltowego</p> | 616 895 | 262 891 | 90 000 | |
|  <p>Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego Podbudowa z gruntu lub kruszywa stabilizowanego spoiwem hydraulicznym</p> | 92 918 | 90 000 | | |
|  <p>B-KR1 Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego Podbudowa z kruszywa naturalnego stabilizowanego mechanicznie</p> | 720 239 | 80 869 | | Zwiększyć grubość warstwy wiążącej o 1 cm |

| Konstrukcja nawierzchni drogowej | Obliczona trwałość zmęczenia nawierzchni | | Wymagana trwałość zmęczenia nawierzchni | Metoda wzmocnienia nawierzchni |
|---|---|-------------------------------------|---|---|
| | Kryterium spękań zmęczenia warstwy asfaltowej | Kryterium deformacji strukturalnych | | |
| Nawierzchnia drogi kategorii ruchu KR2 | | | | |
| <p>5 Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego</p> <p>7 Podbudowa zasadnicza z betonu asfaltowego</p> <p>20 Podbudowa pomocnicza z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie lub tłucznia kamiennego</p>  <p>A32</p> | 764 999 | 440 435 | 510 000 | Zwiększyć grubość warstwy wiążącej o 1 cm |
| <p>5 Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego</p> <p>9 Podbudowa zasadnicza z betonu asfaltowego</p> <p>15 Podbudowa pomocnicza z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie lub tłucznia kamiennego</p>  <p>A29</p> | 1 002 768 | 16 627 333 | | |
| <p>5 Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego</p> <p>6 Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego</p> <p>8 Podbudowa zasadnicza z betonu asfaltowego</p>  <p>A19</p> | 1 806 001 | 1 459 079 | | |
| <p>4 Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego</p> <p>9 Podbudowa zasadnicza z betonu asfaltowego</p> <p>18 Podbudowa pomocnicza z gruntu lub kruszywa stabilizowanego spoiwem hydraulicznym</p>  <p>A31</p> | 2 547 116 | 510 000 | | |
| <p>5 Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego</p> <p>9 Podbudowa zasadnicza z betonu asfaltowego</p> <p>20 Podbudowa pomocnicza z kruszywa naturalnego stabilizowanego mechanicznie</p>  <p>A34</p> | 674 243 | 957 061 | | |

Tablica 6. Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni o obciążeniu KR3 - KR6

Table 6. Results of fatigue life calculation of pavement structure for traffic KR3 - KR6 category

| Konstrukcja nawierzchni drogowej | Obliczona trwałość zmęczeniowa nawierzchni | | Wymagana trwałość zmęczeniowa nawierzchni | |
|--|---|-------------------------------------|---|-----------|
| | Kryterium spękań zmęczeniowych warstwy asfaltowej | Kryterium deformacji strukturalnych | | |
| Nawierzchnia drogi kategorii ruchu KR3 | | | | |
|  <p>5 Warstwa ścieralna z SMA 8 6 Warstwa wiążąca z AC 16W 7 Podbudowa zasadnicza z AC 22P 20 Podbudowa pomocnicza z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie</p> | I | 4 797 000 | 15 307 000 | 2 500 000 |
| | II | 3 736 000 | 14 254 000 | |
|  <p>5 Warstwa ścieralna z SMA 8 13 Podbudowa zasadnicza z AC 22P 20 Podbudowa pomocnicza z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie</p> | I | 5 398 000 | 15 948 000 | |
| | II | 3 158 000 | 13 967 000 | |
|  <p>5 Warstwa ścieralna z SMA 8 8 Warstwa wiążąca z AC 16W 10 Podbudowa zasadnicza z AC 22P</p> | I | 10 691 000 | 16 507 000 | |
| | II | 7 271 000 | 14 635 000 | |
|  <p>5 Warstwa ścieralna z SMA 8 14 Podbudowa zasadnicza z AC 22P 20 Podbudowa zasadnicza z gruntu lub kruszywa stabilizowanego spoiwem hydraulicznym</p> | I | 6 700 000 | 18 759 000 | |
| | II | 4 357 000 | 14 650 000 | |
| Nawierzchnia drogi kategorii ruchu KR4 | | | | |
|  <p>5 Warstwa ścieralna z SMA 8 8 Warstwa wiążąca z AC 16W 10 Podbudowa zasadnicza z AC 22P 20 Podbudowa pomocnicza z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie</p> | I | 17 303 000 | 65 883 000 | 7 300 000 |
| | II | 12 058 000 | 60 119 000 | |
|  <p>5 Warstwa ścieralna z SMA 8 8 Warstwa wiążąca z AC 16W 16 Podbudowa zasadnicza z AC 22P</p> | I | 38 298 000 | 47 304 000 | |
| | II | 25 706 000 | 41 399 000 | |
|  <p>5 Warstwa ścieralna z SMA 8 8 Warstwa wiążąca z AC 16W 11 Podbudowa zasadnicza z AC 22P 20 Podbudowa zasadnicza z gruntu lub kruszywa stabilizowanego spoiwem hydraulicznym</p> | I | 23 424 000 | 51 282 000 | |
| | II | 16 197 000 | 40 158 000 | |
| <p>I – obliczenia na podstawie wartości modułów sztywności próbek zagęszczanych ubijakiem Marshalla II – obliczenia na podstawie wartości modułów sztywności próbek zagęszczanych wałowaniem</p> | | | | |

| Konstrukcja nawierzchni drogowej | Obliczona trwałość zmęczeniowa nawierzchni | | Wymagana trwałość zmęczeniowa nawierzchni | |
|---|---|-------------------------------------|---|--------------|
| | Kryterium spełnień zmęczeniowych warstwy asfaltowej | Kryterium deformacji strukturalnych | | |
| Nawierzchnia drogi kategorii ruchu KR5 | | | | |
|  | I | 38 853 000 | 120 317 000 | 14 600 000 |
| | II | 26 750 000 | 108 431 000 | |
|  | I | 80 733 000 | 85 485 000 | |
| | II | 53 865 000 | 74 314 000 | |
|  | I | 80 764 000 | 101 082 000 | |
| | II | 57 705 000 | 86 591 000 | |
| Nawierzchnia drogi kategorii ruchu KR6 | | | | |
|  | I | 81 255 000 | 205 921 000 | ≥ 14 600 000 |
| | II | 55 472 000 | 183 871 000 | |
|  | I | 135 169 000 | 127 527 000 | |
| | II | 89 671 000 | 110 484 000 | |
|  | I | 145 709 000 | 155 211 000 | |
| | II | 108 097 000 | 130 938 000 | |
| <p>I – obliczenia na podstawie wartości modułów sztywności próbek zagęszczanych ubijaniem Marshalla II – obliczenia na podstawie wartości modułów sztywności próbek zagęszczanych wałowaniem</p> | | | | |

Na podstawie obliczeń trwałości zmęczeniowej przedstawionych w tablicach 5 i 6, należy stwierdzić, że zastosowanie kruszyw łamanych ze złóż polodowcowych do warstw nawierzchni drogowych pozwala projektować konstrukcje nawierzchni spełniające wymagania dróg o obciążeniu KR1 - KR6. Większość typowych układów

warstw konstrukcji nawierzchni (podanych w Katalogach [4, 8]) z warstwami z mieszanek mineralno-asfaltowych, zawierających kruszywa ze złóż polodowcowych charakteryzują się trwałością zmęczeniową większą od wymaganej trwałości zmęczeniowej dla danej kategorii ruchu. W przypadku stosowania do warstw konstrukcyjnych nawierzchni mieszanek mineralno-asfaltowych z kruszywem polodowcowym nieprzekruszonym, konieczne jest zwiększenie grubości asfaltowej warstwy wiążącej o 1 cm (tabl. 5). Dotyczy to nawierzchni kategorii ruchu KR1 i KR2, do których zastosowano podbudowy z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie lub tłucznia kamiennego.

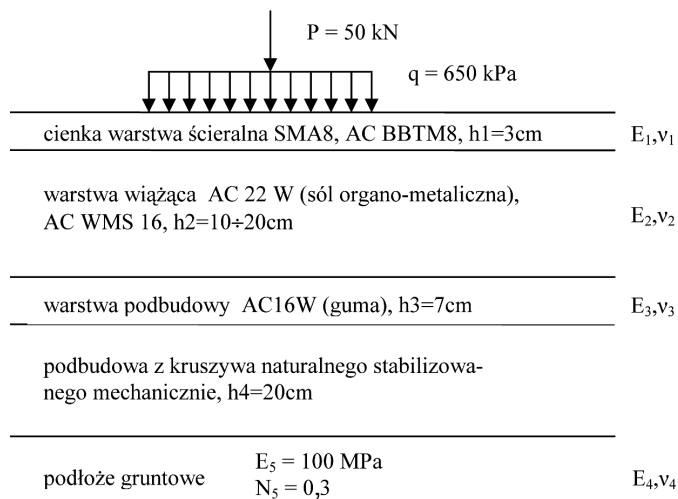
5. DOBÓR KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI O WYDŁUŻONYM OKRESIE TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Tradycyjne nawierzchnie asfaltowe powinny charakteryzować się dwudziestoletnią trwałością, gwarantującą w tym okresie projektowaną nośność oraz odporność na powstawanie zniszczeń wynikających z ruchu samochodowego oraz oddziaływania środowiska [4]. Wyniki obliczeń empirycznych, przedstawione w pracy w punkcie 4, dotyczące możliwości stosowania kruszyw polodowcowych do typowych konstrukcji wg Katalogu [4], wykazały wystarczającą trwałość konstrukcji nawierzchni o kategorii ruchu KR1 - KR6 z tymi kruszywami. W pracy podjęto próbę analizy możliwości zastosowania tego rodzaju kruszyw do nawierzchni o wydłużonym okresie trwałości wg koncepcji „Perpetual” [10].

Na trwałość nawierzchni drogowej, oprócz właściwości zastosowanych rodzajów mieszanek mineralno-asfaltowych, wpływają również: rodzaj warstw, ich grubość oraz układ warstw w konstrukcji nawierzchni. Powszechnie stosowane rozwiązania z warstwami nawierzchni typowymi z betonu asfaltowego [11], których grubość różnie a sztywność maleje wraz z głębokością ich ułożenia, nie odpowiadają koncepcji nawierzchni o wydłużonym, w stosunku do tradycyjnych nawierzchni, okresie eksploatacji. Do warstw ścieralnych konstrukcji o wydłużonym okresie eksploatacji stosuje się cienkie warstwy ścieralne wykonane z mieszanki mineralno-asfaltowej odpornej na koleinowanie, trwałe, szczelne i szorstkie. Szczególną uwagę zwraca się na warstwę wiążącą, która ma bardzo duży wpływ na niezawodność pracy konstrukcji nawierzchni. Warstwa wiążąca powinna być grubsza od obecnie stosowanych w Polsce (4 - 9 cm), jej grubość powinna wynosić powyżej 10 cm [12], charakteryzować się wysoką odpornością na deformacje trwałe i wykazywać dużą trwałość zmęczeniową. Podbudowa może być znacznie cieńsza od dotychczas stosowanych, o mniejszej sztywności i dużej trwałości zmęczeniowej. Według francuskiej koncepcji dąży się do budowy podbudów i warstw wiążących z betonu asfaltowego o wysokim module sztywności [13].

W obliczeniach przyjęto model konstrukcji o wydłużonym okresie eksploatacji z cienką warstwą ścieralną, pogrubioną, sztywną warstwą wiążącą i cienką, elastyczną, o podwyższonej trwałości zmęczeniowej warstwą podbudowy (rys. 8). Warstwę wiążącą stanowi beton asfaltowy z dodatkiem usztywniającym soli organometalicznej

lub beton asfaltowy o wysokim module sztywności (AC WMS). W obu mieszankach zastosowano kruszywa łamane ze złóż polodowcowych. Wartości modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych użytych do warstw konstrukcyjnych nawierzchni o wydłużonym okresie trwałości przedstawiono w tablicy 7, a w tablicy 8 przedstawiono wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej analizowanej konstrukcji z różnymi grubościami warstwy wiążącej. Obliczenia przeprowadzono wg wzorów metody mechanistycznej obowiązującej w Polsce wg Katalogu wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych [8].



Rys. 8. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni o wydłużonym okresie trwałości zmęczeniowej

Fig. 8. Model for “perpetual” structure for pavement with increasing fatigue life

Tablica 7. Obliczone wartości modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych przyjęte do obliczeń konstrukcji o wydłużonym okresie trwałości zmęczeniowej
Table 7. Calculated stiffness modulus of asphalt mixtures use to calculation of “perpetual” structure for pavement with increasing fatigue life

| Rodzaj mieszanki | Wartość modułu sztywności [MPa] | | |
|---|---------------------------------|--------|-------|
| | -2°C | 10°C | 23°C |
| SMA 8 PMB 45/80-55 | 14 880 | 8 670 | 1 580 |
| AC 22W (sól organometaliczna) ^{*)} | 24 200 | 15 600 | 6 300 |
| AC WMS 16 ^{**)} | 25 600 | 18 600 | 7 000 |
| AC 16W (guma) ^{***)} | 15 050 | 8 990 | 2 430 |

^{*)} Beton asfaltowy z kruszywami polodowcowymi, z asfaltem 35/50 modyfikowanym dodatkiem soli organometalicznej (sól organometaliczna w ilości 2% w stosunku do masy asfaltu)

^{**)} Beton asfaltowy o wysokim module sztywności z kruszywami polodowcowymi

^{***)} Beton asfaltowy z kruszywami polodowcowymi, z asfaltem 50/70 modyfikowanym dodatkiem miazgu gumowego w ilości 18% w stosunku do masy asfaltu

Tablica 8. Obliczona trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni drogowej o wydłużonym okresie trwałości zmęczeniowej z zastosowaniem kruszyw polodowcowych

Table 8. Calculation of fatigue life for structure of "perpetual" pavement with mixture based on aggregate from glacier deposits

| Grubość warstwy wiążącej [cm] | Obliczona trwałość zmęczeniowa nawierzchni | Okres eksploatacji [lata] (SDR = 3000 osi 100 kN/pas/dobę) |
|---|--|--|
| Warstwa wiążąca z AC 22W (sól organometaliczna) | | |
| 10 | 36 657 000 | 33 |
| 12 | 51 531 000 | 47 |
| 14 | 70 871 000 | 65 |
| 16 | 95 658 000 | 87 |
| Warstwa wiążąca z AC WMS 16W | | |
| 10 | 38 648 000 | 35 |
| 12 | 54 778 000 | 50 |
| 14 | 76 061 000 | 69 |
| 16 | 103 566 000 | 95 |

Na podstawie obliczeń trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni drogowej przedstawionej na rysunku 8 można stwierdzić, że istnieje możliwość projektowania konstrukcji nawierzchni z zastosowaniem kruszyw polodowcowych o wydłużonym okresie eksploatacji.

Przeprowadzone obliczenia według wzorów analityczno-empirycznych wskazują, że w celu wydłużenia okresu eksploatacji nawierzchni powyżej 50 lat należy stosować w przyjętym układzie warstw nawierzchni, warstwę wiążącą z betonu asfaltowego o podwyższonym module sztywności (AC WMS). Grubość warstwy wiążącej powinna wynosić nie mniej niż 14 cm. Do warstwy wiążącej można stosować beton asfaltowy z dodatkiem soli organometalicznej, a do warstwy podbudowy beton asfaltowy z lepiszczem gumowo-asfaltowym.

7. WNIOSKI

Na podstawie wyników badań i analiz można sformułować następujące wnioski:

- Możliwe jest zaprojektowanie z kruszywami ze złóż polodowcowych mieszanek mineralno-asfaltowych typu AC, BBTM i SMA do wszystkich warstw konstrukcyjnych nawierzchni asfaltowych kategorii ruchu KR1 - KR6.
- Badania wykazały, że możliwe jest projektowanie konstrukcji nawierzchni z kruszywami polodowcowymi dla kategorii ruchu KR1 - KR6, spełniających wymagania „Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych”.

- Istnieje możliwość projektowania konstrukcji nawierzchni o wydłużonym okresie eksploatacji z zastosowaniem kruszyw polodowcowych. Konstrukcja taka powinna składać się z następujących warstw: cienka warstwa ścieralna z mieszanki SMA lub BBTM (ze względu na zmniejszenie hałasu uziarnienie mieszanki mineralnej 0/8), sztywna, stosunkowo gruba warstwa wiążąca z betonu asfaltowego (beton asfaltowy o podwyższonym module sztywności AC WMS, minimum 14 cm grubości), stosunkowo cienka, elastyczna podbudowa z mieszanki mineralno-asfaltowej (beton asfaltowy o zwiększonej trwałości zmęczeniowej z lepiszczem modyfikowanym miałem gumowym).

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Radziszewski P., Piłat J., Kowalski K., Król J.*: Use of Aggregate from Glacier Deposits in High-Traffic Asphalt Pavements: A Polish Experience. TRB 90th Annual Meeting. Paper No 11-1420, CD, 2011
- [2] *Radziszewski P., Piłat J., Plewa A., Radziszewski R.*: Ocena właściwości kruszyw polodowcowych z regionu Polski północno-wschodniej do budowy nawierzchni asfaltowych. 56 Konferencja Naukowa KILiW PAN oraz KN PZITB, Kielce - Krynica 2010, 383 - 390
- [3] *Sybilski D., Mularzuk R., Bańkowski W., Maliszewska D., Maliszewski M.*: Beton asfaltowy o wysokim module sztywności AC WMS z kruszywami lokalnymi. Drogi i Mosty nr 4/2007, 53 - 85
- [4] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. GDDP, Warszawa 1997
- [5] WT-1 Kruszywa 2008: Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach publicznych. IBDiM, Warszawa 2008
- [6] WT-2 Nawierzchnie asfaltowe 2008: Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych. IBDiM, Warszawa 2008
- [7] PN-EN 12697-26: Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 26: Sztywność, Załącznik C – Badanie rozciągania pośredniego na próbce cylindrycznej (IT-CY)
- [8] Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych. GDDP, Warszawa 2001
- [9] *Read J., Whiteoak D.*: The Shell Bitumen handbook. 5th edition. Shell Bitumen, Telford Publishing, London 1998
- [10] *Monismith C.L.*: Analytically based asphalt pavement design and rehabilitation: Theory to practice, 1962-1992. Transport Research Record No. 1354, 1992, 5 - 26
- [11] *Piłat J., Radziszewski P.*: Nawierzchnie asfaltowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2007
- [12] *Newcomb D., Willis R., Tim H.D.*: Perpetual Asphalt Pavements: A Synthesis. Asphalt Pavement Alliance, 2010
- [13] *Sanders P.J., Nunn M.*: The application of Enrobe a Module Eleve in flexible pavements. TRL Report No 636, 2005

INFORMACJE DODATKOWE

Artykuł powstał w wyniku realizacji w latach 2009 - 2010 pracy badawczej na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie oraz realizacji Pracy Statutowej w Politechnice Warszawskiej w 2010 r.

STRUCTURE OF ASPHALT PAVEMENTS WITH USE OF AGGREGATE FROM GLACIER DEPOSITS

Abstract

The aim of this study was to evaluate possibilities application of aggregates from glacier deposits to asphalt mixtures to be used for flexible pavement layers. Applicability of aggregate from glacier deposits was established on a basis of pavement structure analysis for traffic KR1 - KR6 category and test results of asphalt mixture stiffness modulus. Fatigue life of pavement structure in accordance to Polish guide for typical pavements was calculated together with structural design for "perpetual" pavement. Test results proved that aggregates from the glacier deposits could, indeed, be used for the structural layers in asphalt pavements.