

- [3] Terex MS-4, informacja producenta 25/2/2013, <http://goo.gl/O4jUb>
- [4] Terex CR652RX, informacja producenta wg stanu na: 25/2/2013, <http://goo.gl/KWK7Y>
- [5] Terex CR662RM, informacja producenta wg stanu na: 25/2/2013, <http://goo.gl/lxPvx>
- [6] Ingersoll Rand Blaw Knox MC-330, informacja producenta wg stanu na: 25/2/2013, <http://goo.gl/QttLd>
- [7] J. Mahoney, S.A. Zinke, J.E. Stephens, L.A. Myers, J.A. DaDalt, *Application of Infrared Thermographic Imaging to Bituminous Concrete Pavements – Final Report*. Report 2229-F-03-7, Connecticut Advanced Pavement Laboratory, Connecticut Transportation Institute, 2003
- [8] D.J. Nener-Plante, A. Zofka, *Long-Term Study on Asphalt Mixture Segregation in Connecticut: Preliminary Results on Use of MTV*, 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways, and Airfields, University of Illinois at Urbana-Champaign, June 29 – July 2, 2009
- [9] Gilbert K., *Thermal Segregation*, Raport przygotowany dla Colorado Department of Transportation, Listopad 2005
- [10] T. Cho Y. Bode T., Jim Y.-R., *Infrared Thermography-Driven Flaw Detection and Evaluation of Hot Mix Asphalt Pavements*, Raport przygotowany dla Nebraska Department of Roads, Styczeń 2010
- [11] J. Song, M. Abdelrahman, E. Asa, *Use of a Thermal Camera during Asphalt Pavement Construction*, Raport przygotowany dla North Dakota Department of Transportation, Wrzesień 2009
- [12] J. Harris, F. Parker, M. Stroup-Gardiner, 2004. *Effect of Material Transfer Devices on Flexible Pavement Smoothness*. Transportation Research Record Vol. 1900: 50-55
- [13] J. Henault, D. Larsen, 2006. *Thermal Imaging of Hot-Mix Asphalt Paving Projects in Connecticut*. Transportation Research Record Vol. 1946: 130-138
- [14] K. Oba, M. Partl, 2000. *Non-Destructive Detection of Distress in Asphalt Pavements and Bridge Deck Surfacing Using IR-Thermography*. Road Materials and Pavement Design Vol. 1: 407-418.
- [15] M. Stroup-Gardiner, R. Brown, 2000. NCHRP Report 441: Segregation in Hot-Mix Asphalt Pavements. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- [16] Automatic Road Analyzer, ARAN (Connecticut Department of Transportation) informacja wg stanu na: 25/2/2013, <http://goo.gl/2X1y3>
- [17] Laser Road Imaging System (LRIS), INO, informacja wg stanu na: 25/2/2013, <http://goo.gl/H2ccm> ■



MARIUSZ JACZEWSKI

Politechnika Gdańska
Mariusz.jaczewski@willis.pg.gda.pl



ŁUKASZ MEJŁUN

Politechnika Gdańska
lukasz.mejlon@willis.pg.gda.pl

Wyznaczanie parametrów lepkosprężystego modelu Burgersa mieszanek mineralno-asfaltowych na podstawie badania pod obciążeniem dynamicznym

Określenie modelu warstw asfaltowych

Właściwości warstw asfaltowych w konstrukcjach nawierzchni są zależne od ich temperatury i czasu obciążenia. Ma to swoje odzwierciedlenie w modelach materiałowych przyjmowanych do symulacji pracy warstw asfaltowych w konstrukcjach nawierzchni drogowych. O ile model sprężysty stosowany jest do modelowania mieszanek mineralno-asfaltowych

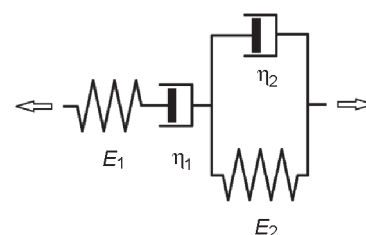
w temperaturze niskiej (ujemnej), to w temperaturze wysokiej (dodatniej) pojawia się konieczność uwzględniania także właściwości lepkich – mieszanek mineralno-asfaltowe modelowane wówczas są jako ciała lepkosprężyste.

Modele reologiczne mieszanek mineralno-asfaltowych są stosowane powszechnie na całym świecie. Także Katedra Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej od dawna zajmuje się reologią tych materiałów. Już Borkowski i Judycki [3], a później także inni stosowali modele reologiczne mieszanek mineralno-asfaltowych. Pracę kontynuują Mariusz Jaczewski [4] i Łukasz Mejłun [6] pod kierunkiem prof. Józefa Judyckiego, stosując modele lepkosprężystości w wysokiej (dodatniej) temperaturze.

Jednym z najchętniej stosowanych lepkosprężystych modeli reologicznych jest czteroparametrowy model Burgersa (rys. 1.) określony dwoma modułami sprężystości – E_1 [MPa] i E_2 [MPa] oraz dwoma współczynnikami lepkości – η_1 [MPa·s] i η_2 [MPa·s].

Parametry reologiczne modelu Burgersa wyznacza się wykorzystując wynik badania pełzania mieszanki mineralno-asfaltowej pod obciążeniem statycznym, lub o większą liczbę wyników z badania pod obciążeniem dynamicznym.

W przypadku pierwszej metody korzysta się z wykresu prezentującego zmianę odkształceń próbki w funkcji czasu, podczas jej obciążenia i po jej odciążeniu. Po przyłożeniu w sposób natychmiastowy stałego co do wartości obciążenia, trwającego określony czas, obserwuje się pewne natychmiastowe odkształcenie materiału, a następnie zjawisko jego płynięcia – wzrost odkształceń w czasie pod stałym obciążeniem. Po natychmiastowym odciążeniu próbki obserwować



Rys. 1. Model Burgersa ciała lepkosprężystego

można spadek tych odkształceń do pewnej stałej wartości. Określenie parametrów reologicznych Burgersa odbywa się drogą aproksymacji oraz interpretacji geometrycznej wykresu przy znajomości wielkości i czasu działania obciążenia. Trudność wyznaczenia tych parametrów wynika m.in. z kłopotliwego dopasowania funkcji opisującej krzywą pełzania. Problemem często bywa także wyznaczenie na podstawie krzywej pełzania modułu E_1 z powodu braku fizycznej możliwości przyłożenia obciążenia w sposób natychmiastowy do badanej próbki, czego wymaga ta metoda.

Lepszym sposobem wydaje się wykorzystanie wyników badania pod obciążeniem dynamicznym. Wymaga się jednak przeprowadzenia tego badania na tej samej próbce, w takich samych warunkach, ale przy kilku różnych wartościach częstotliwości zmiany obciążenia. Do każdej wartości i -tej częstotliwości uzyskuje się parę wartości – moduł dynamiczny E_i^* [MPa] oraz kąt przesunięcia fazowego φ_i [°]. Na ich podstawie oblicza się parametry modelu Burgersa w temperaturze przeprowadzonego badania. Autorzy niniejszego artykułu do wyznaczenia modułów dynamicznych i kątów przesunięć fazowych wykorzystują aparat badawczy AMPT/SPT firmy IPC Global, a do wyznaczenia parametrów reologicznych Burgersa podprogram DEBUROAD wchodzący w skład pakietu oprogramowania VEROAD.

Metoda pozwala ponadto regulować za pomocą węg lepsze lub gorsze dopasowanie wyznaczanych parametrów do modułu dynamicznego lub kąta przesunięcia fazowego. Kolejną, ważną jej zaletą jest możliwość stworzenia zależności, tzw. krzywej wiodącej oraz krzywej Blacka, pozwalających wyznaczać wymienione parametry do dowolnej wartości temperatury i czasu obciążenia.

Przedstawiony powyżej sposób wyznaczania parametrów reologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych umożliwia znacznie szybsze i efektywniejsze uzyskiwanie wyników, w porównaniu z metodą wykorzystującą wyniki badań pod obciążeniem statycznym, w którym czas samego obciążenia, jak pokazują przeprowadzone badania, wynosić może nawet 7 200 sekund (w celu osiągnięcia ustabilizowania się szybkości zmian odkształcenia). Z badania tego otrzymujemy parametry przy jednej wartości temperatury i jednej wartości czasu obciążenia. Badanie dynamiczne w aparacie AMPT/SPT (jednej próbki) trwa zaś od ok. 15 do 30 minut, w zależności od temperatury badania. Wyniki otrzymuje się od razu do kilku różnych wartości częstotliwości obciążenia. Już 3 badania (3 różne temperatury) umożliwiają wyznaczenie krzywej wiodącej i krzywej Blacka mieszanki mineralno-asfaltowej, a zatem pozwalają określać moduł dynamiczny i kąt przesunięcia fazowego przy dowolnej wartości temperatury i czasu obciążenia. Nie występuje też problem z wyznaczaniem modułu sprężystości E_1 .

Połączenie badania modułu dynamicznego i kąta przesunięcia fazowego z programem VEROAD w celu uzyskania parametrów reologicznych Burgersa nie jest metodą nową, stosuje ją wielu badaczy na całym świecie, m.in. Nilson do analizy mechanicznej konstrukcji nawierzchni podatnej [8] czy D. Sybilski, W. Bańkowski i R. Mularzyk do oceny betonu asfaltowego o wysokim module sztywności (BA WMS) [9].

Program VEROAD, oprócz wyznaczania parametrów lepko-sprężystego modelu Burgersa, umożliwia przede wszyst-

kim symulacje i analizy pracy konstrukcji nawierzchni drogowych, zbudowanych z warstw sprężystych i/lub lepko-sprężystych, obciążonych poruszającym się kołem. Takie analizy, z wykorzystaniem tego programu, oprócz wspomnianych wcześniej badaczy, przeprowadzili również R. Nagórski, K. Błażejowski i K. Marczyk przy porównywaniu powstających odkształceń oraz trwałości nawierzchni standardowych oraz nawierzchni typu *perpetual pavement* [7].

Badanie dynamiczne z użyciem urządzenia AMPT/SPT

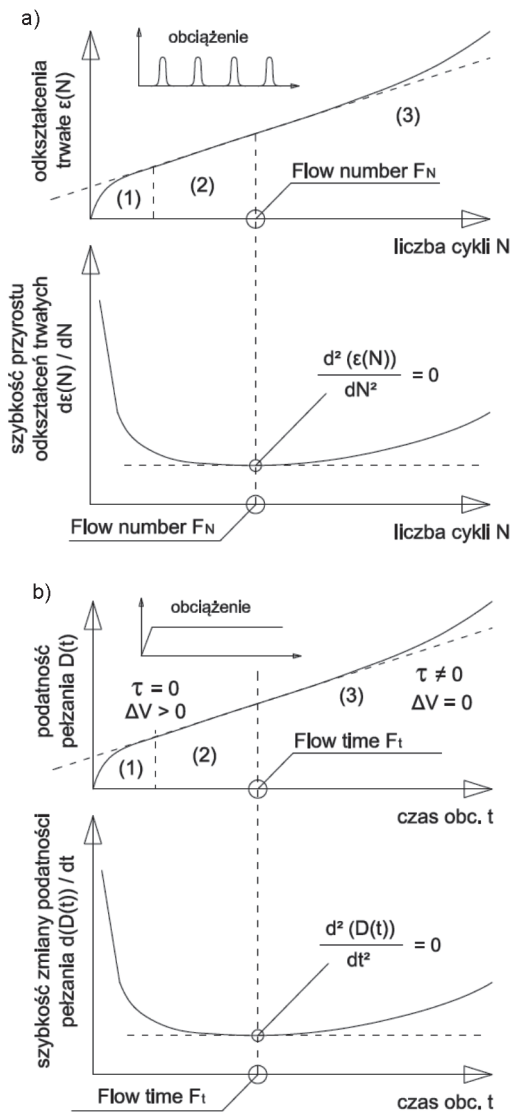
AMPT/SPT (*Asphalt Mixture Performance Tester*) firmy IPC Global jest aparatem służącym do badania mieszanek mineralno-asfaltowych zgodnie z [2] i [10].



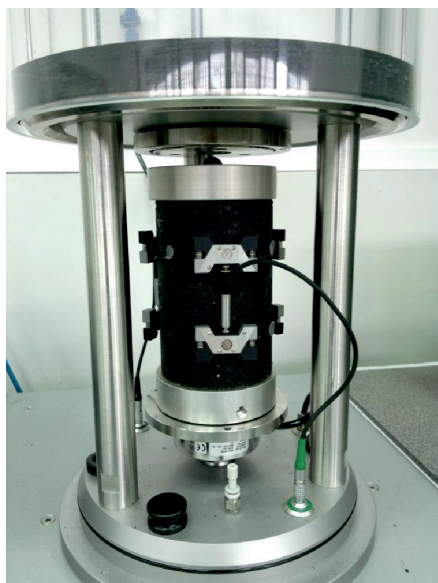
Rys. 2. Aparat AMPT/SPT (*Asphalt Mixture Performance Tester*) do badania mieszanek mineralno-asfaltowych – widok ogólny

Urządzenie pozwala na wykonywanie badań typu SPT (*Simple Performance Tests*): modułu dynamicznego E^* , *Flow Number* i *Flow Time*. *Flow number* oraz *Flow Time* są wartościami określającymi początek 3. strefy pełzania mieszanki mineralno-asfaltowej, tzw. „pełzania do zniszczenia”. *Flow number* określany jest w badaniu dynamicznym i interpretowany jako numer kolejnego cyklu obciążenia, odpowiadającego minimum szybkości przyrostu odkształceń trwałych – rys. 3.(A). *Flow time* natomiast określany jest w badaniu pełzania pod obciążeniem statycznym i odpowiada czasowi obciążenia, po upływie którego w mieszance mineralno-asfaltowej zaczyna działać ścinanie i nie zachodzi już kompresja (zmniejszanie objętości) – rys. 3.(B). *Flow time*, analogicznie do *Flow number*, odpowiada momentowi, gdy szybkość zmiany podatności pełzania $D(t)$ w funkcji czasu osiąga minimum.

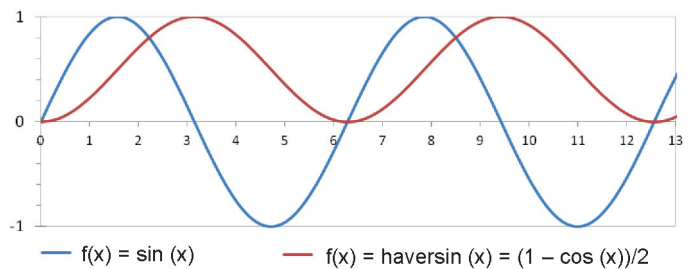
Badanie wykonuje się na próbkach walcowych o średnicy 100 mm i wysokości 150 mm. Próbkę umieszcza się w przezroczystej, podnoszonej komorze, w której utrzymywane są stałe, zadane przez laboranta warunki: ciśnienie (w granicach od 0 do 210 kPa) oraz temperatura (w granicach od 4°C do 60°C). Próbka jest obciążana osiowo przez siłownik,



Rys. 3. Interpretacja Flow number (a) oraz Flow time (b)



Rys. 4. Przygotowana do badania w AMPT/SPT, umieszczona w komorze badawczej próbka walcowa z zamocowanymi liniowymi czujnikami przemieszczeniowymi LVDT



Rys. 5. Porównanie dwóch możliwych do wyboru w aparacie AMPT/SPT przebiegów funkcji obciążenia (sin oraz haversin)

a siła przekazywana za pośrednictwem przegubu kulowego. Siła może wynosić maksymalnie 15 kN w badaniu statycznym lub 13,5 kN w badaniu dynamicznym. Pomiar dokonywany jest przez 3 liniowe czujniki przemieszczeniowe LVDT. Zamontowane są one na pobocznicę próbki w rozstawie co 120°.

Próbki przeznaczone do badania w warunkach kontrolowanych są wcześniej kondycjonowane i doprowadzane do założonej temperatury badania. Każdorazowo do programu sterującego wprowadza się wymiary próbki. Program ten, uwzględniając te wymiary, oblicza odkształcenia próbki na podstawie pomierzonych przez czujniki przemieszczeń i wyznacza żądane parametry materiałowe.

W badaniu dynamicznym przykładana siła ma wartość zmienną, zgodnie z zadanym przez laboranta przebiegiem. Można stosować, oprócz określonej indywidualnie, także np. zmienność sinusoidalną lub funkcję zmienności *haversin*.

Częstotliwość przykładanej siły zmienia się podczas badania i wynosi kolejno: 25 Hz, 20 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,2 Hz, 0,1 Hz, oraz 0,01 Hz. Do każdej wartości częstotliwości wyznaczana jest wartość modułu dynamicznego E^* [MPa] i kąt przesunięcia fazowego φ [°]. Pary tych wielkości dla każdej wartości częstotliwości są podstawą do wyznaczenia reologicznych parametrów lepkosprężystego modelu Burgersa.

Wyznaczanie krzywej wiodącej mieszanki mineralno-asfaltowej na podstawie wyników badań uzyskanych z AMPT/SPT

Procedurę wyznaczania krzywej przejściowej przedstawiono zgodnie z propozycją Bonaquista [1]. Krzywą wiodącą do mieszanki mineralno-asfaltowej lub innego materiału charakteryzującego się zachowaniem lepkosprężystym uzyskuje się na podstawie badań przeprowadzonych przy wybranych wartościach częstotliwości w trzech wartościach temperatury zależnych od rodzaju zastosowanego asfaltu. Uzyskane w badaniu poszczególne krzywe modułu sztywności $S(T, f)$ nasuwa się wzdłuż osi częstotliwości na krzywą modułu sztywności do wybranej wartości temperatury odniesienia, zgodnie z zasadą superpozycji czasowo-temperaturowej. Przesunięcie krzywej sztywności wzdłuż osi częstotliwości opisane jest współczynnikiem przesunięcia temperaturowego α_T , zależnym od temperatury. Współczynnik przesunięcia temperaturowego $\alpha_T(T)$ opisany jest wzorem Arrheniusa:

$$\log \alpha_T = \frac{\Delta E_a}{19.14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (1)$$

w którym:

ΔE_a – energia aktywacji (parametr dopasowania krzywej przewodniej)

T – temperatura badania, K

T_R – temperatura referencyjna, K

Moduł sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej przy dowolnej wartości temperatury T i częstotliwości f można wyznaczyć z krzywej przewodniej na podstawie wzoru:

$$S(T, f) = S \left(T_R, \frac{f}{\alpha_T} \right) \quad (2)$$

Krzywa przewodnia do mieszanki mineralno-asfaltowej może być opisana funkcją z rodziny sigmoidalnych lub funkcją wielomianową. W projekcie specyfikacji badania [1] proponowana jest czteroparametrowa funkcja sigmoidalna w postaci wzoru:

$$\log |E^*| = \delta + \frac{(Max - \delta)}{1 + \exp [\beta + \gamma \times (\log f + \log \alpha_T)]} \quad (3)$$

w którym:

$|E^*|$ – moduł dynamiczny, MPa

Max – maksymalny moduł ograniczający krzywą wiodącą, MPa

f – częstotliwość obciążenia w temperaturze badania, Hz

α_T – współczynnik przesunięcia temperaturowego

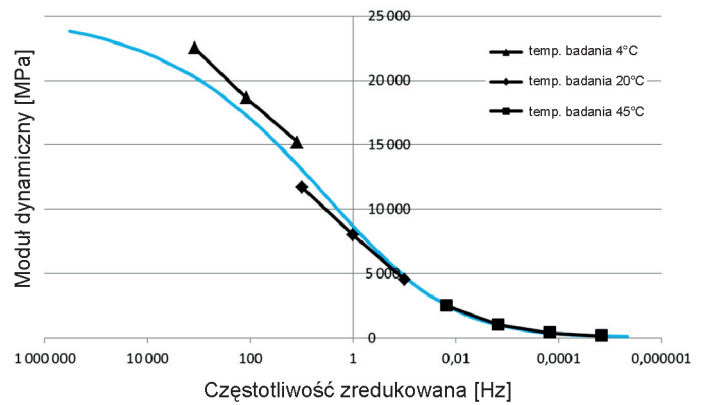
β, γ, δ – parametry dopasowania krzywej

Brakującą wielkość Max , czyli maksymalny moduł ograniczający krzywą wiodącą należy uzyskać z odrębnych badań lub z dostępnej w literaturze zależności (np. modelu Hirscha). Z przeprowadzonych prób wynika jednak, że wartości uzyskane z modelu Hirscha są na ogół niższe niż uzyskane w badaniu, co sugeruje niemożliwość wykorzystania tej zależności do materiałów stosowanych w Polsce.

Wyniki badań przeprowadzonych przez autorów dla betonu asfaltowego do warstwy wiążącej z asfaltem 35/50 oraz wyznaczoną za pomocą wzoru (3) krzywą przewodnią przedstawiono w tabeli 1 oraz na rys. 6.

Tabela 1. Wyniki badań uzyskane przez autorów w badaniu modułu dynamicznego w urządzeniu AMPT/SPT do betonu asfaltowego do warstwy wiążącej z asfaltem zwykłym 35/50

| Temperatura T [°C] | Częstotliwość f [Hz] | Moduł dynamiczny E* [MPa] | Kąt przesunięcia fazowego φ [°] |
|--------------------|----------------------|---------------------------|---|
| 4 | 25 | 23 934 | 6,3 |
| 4 | 10 | 22 530 | 6,6 |
| 4 | 1 | 18 640 | 8,3 |
| 4 | 0,1 | 15 237 | 10,4 |
| 20 | 25 | 13 215 | 12,5 |
| 20 | 10 | 11 749 | 14,0 |
| 20 | 1 | 8 024 | 18,8 |
| 20 | 0,1 | 4 577 | 25,4 |
| 45 | 25 | 3 244 | 31,3 |
| 45 | 10 | 2 492 | 31,1 |
| 45 | 1 | 1 034 | 31,7 |
| 45 | 0,1 | 390 | 29,8 |
| 45 | 0,01 | 168 | 26,1 |

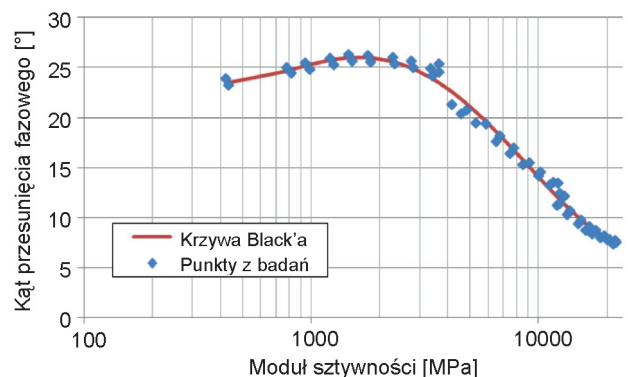


Rys. 6. Krzywa wiodąca przy temperaturze odniesienia 20°C, uzyskana na podstawie wyników badania przeprowadzonego przez autorów w urządzeniu AMPT/SPT na próbkach z betonu asfaltowego do warstwy wiążącej z asfaltem zwykłym 35/50

Wyznaczanie parametrów reologicznych przy użyciu VEROAD

Autorzy artykułu w celu wyznaczenia parametrów reologicznych modelu Burgersa korzystali z podprogramu DEBURROAD, wchodzącego w skład pakietu VEROAD (*Visco-Elastic Road Analysis Delft*) [11]. VEROAD jest zespołem podprogramów opracowanych przez Hopmana na Uniwersytecie Technicznym w Delft (Holandia), służących obliczeniom parametrów materiałowych i symulacjom konstrukcji nawierzchni drogowych.

Aby wyznaczyć parametry reologiczne modelu Burgersa potrzebne są pary wartości: moduł dynamiczny $|E_i^*|$ [MPa] oraz kąt przesunięcia fazowego φ_i [°] przy kilku różnych wartościach częstotliwości obciążenia. Wartość modułu dynamicznego E_i^* w dowolnej temperaturze oraz częstotliwości obciążenia uzyskuje się korzystając ze wzoru (3). Wartość kąta przesunięcia fazowego φ_i wyznacza się natomiast z krzywej Blacka (rys. 7), która przedstawia zależność kąta przesunięcia fazowego od modułu dynamicznego dla badanej mieszanki mineralno-asfaltowej.



Rys. 7. Krzywa Blacka uzyskana z badania w urządzeniu AMPT/SPT na próbkach z betonu asfaltowego do warstwy wiążącej z asfaltem zwykłym 35/50 według badań własnych autorów

Wartości parametrów modelu Burgersa wyznaczone są iteracyjnie w celu uzyskania najlepszego dopasowania modelu Proncka [11]. Iteracyjne podejście do problemu wyznaczenia

pożądanych parametrów wynika z liczby danych i liczby niewiadomych – na podstawie dwóch wartości (modułu dynamicznego i kąta przesunięcia fazowego) do każdego przypadku (każdej wartości temperatury) należy znaleźć cztery wartości parametrów reologicznych Burgersa – E_1, E_2, η_1, η_2 . Wartości tych parametrów uzyskuje się z następujących zależności:

$$S = \sqrt{\frac{1}{A^2 + B^2}} \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{B}{A}\right) \quad (5)$$

w której:

S – moduł dynamiczny, MPa

φ – kąt przesunięcia fazowego, °

$$A = \frac{1}{E_1} + \frac{E_2}{E_2^2 + (\eta_2 \cdot \omega)^2} \quad (6)$$

$$B = \frac{1}{\eta_1 \cdot \omega} + \frac{\eta_2 \cdot \omega}{E_2^2 + (\eta_2 \cdot \omega)^2} \quad (7)$$

ω – częstotliwość, Hz

Program DEBUROAD wyznacza dla danych wejściowych (różnych wartości temperatury, modułów dynamicznych oraz kątów przesunięcia fazowego) różniące się parametry modelu Burgersa. Istnieje zatem wiele czteroelementowych grup tych parametrów. Oprogramowanie umożliwia, przy użyciu wag, regulowanie ich lepszego lub gorszego dopasowania do modułu dynamicznego lub do kąta przesunięcia fazowego. HOPMAN uważa, że najbardziej optymalne jest takie dopasowanie, przy którym stosunek wagi modułu sztywności do wagi kąta fazowego wynosi 10:1, co oznacza, że dopasowanie wyników jest 10-krotnie lepsze do modułu sztywności, niż do kąta przesunięcia fazowego.

Przykładowe wartości parametrów modelu Burgersa uzyskane z pakietu VEROAD przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Przykładowe wyniki parametrów modelu Burgersa do AC 16 W z asfaltem zwykłym 35/50 uzyskane na podstawie badań własnych autorów

| Temperatura T [°C] | E_1 [MPa] | E_2 [MPa] | η_1 [MPa·s] | η_2 [MPa·s] |
|--------------------|-------------|-------------|------------------|------------------|
| -10 | 26 725 | 62 519 | 20 465 | 16 975 |
| 5 | 23 424 | 24 940 | 10 498 | 5 845 |
| 20 | 16 790 | 6 784 | 4 013 | 1 503 |
| 30 | 11 095 | 2 352 | 2 185 | 540 |
| 40 | 6 207 | 756 | 785 | 177 |
| 50 | 2 889 | 281 | 208 | 71 |
| 60 | 1 163 | 135 | 98 | 28 |

Zakończenie

Poprawne wyznaczenie parametrów reologicznych modelu Burgersa jest kluczowe dla właściwego opisu właściwości lepkosprężystych badanej mieszanki mineralno-asfaltowej, a w konsekwencji dla otrzymania poprawnych wyników obliczeń i symulacji konstrukcji nawierzchni w programach komputerowych.

Metoda wyznaczania parametrów reologicznych na podstawie badania modułu dynamicznego i kąta przesunięcia fazowego w połączeniu z oprogramowaniem VEROAD jest do tego bardzo dobrym narzędziem. Za stosowaniem tej metody powszechnie przemawia wiele jej zalet:

Metoda pozwala na szybkie, nieskomplikowane uzyskiwanie miarodajnych wyników.

Metoda ta jest znacząco szybsza niż badanie pełzania pod obciążeniem statycznym.

Nie istnieje problem kłopotliwej aproksymacji wykresu i odczytywania wartości parametrów reologicznych na tej podstawie (tak jak w metodzie wykorzystującej wyniki badań pełzania statycznego).

Z badania jednej próbki mieszanki mineralno-asfaltowej otrzymujemy wiele danych pomiarowych (przy kilku częstotliwościach obciążenia), w odróżnieniu od badania statycznego, w którym z pojedynczego badania otrzymuje się wyniki tylko przy jednej wartości obciążenia w konkretnej temperaturze.

Możliwa jest regulacja, za pomocą wag i/lub liczby iteracji obliczeń, jak najlepszego dopasowania otrzymywanych parametrów do teoretycznego modelu.

Na podstawie wyników już trzech badań (każde badanie w innej temperaturze) możliwe jest skonstruowanie krzywej wiodącej i krzywej Blacka do mieszanki mineralno-asfaltowej, pozwalających wyznaczać moduł dynamiczny, sztywność i kąt przesunięcia fazowego przy dowolnie wybranej wartości temperatury i dowolnego czasu obciążenia.

Bibliografia

- [1] R. Bonaquist, *NCHRP Report 614: Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice*, Project 9-29, Transportation Research Board, Washington 2008
- [2] R. Bonaquist R., *NCHRP Report 629: Ruggedness Testing of the Dynamic Modulus and Flow Number Tests with the Simple Performance Tester*, Final Report for Project 9-29, Transportation Research Board, Washington 2008
- [3] H. Borkowski, J. Judycki, *Reologia betonu asfaltowego i konstrukcji nawierzchni*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Nr 406, Gdańsk 1987
- [4] M. Jaczewski, *Laboratory Determination of Burger's Model Parameters for Visco-elastic Analysis of Road Pavement Materials*, w: 5th International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists InterTech 2012: proceedings, Poznań 2012
- [5] P.C. Hopman, *VEROAD: A viscoelastic multilayer computer program*, Transportation Research Board Business Office, TRB, Nr 1539, 1996
- [6] Ł. Mejłun, J. Judycki, *Analiza konstrukcji nawierzchni asfaltowych oparta o teorię lepkosprężystości*, Drogownictwo, Nr 10/2012
- [7] R. Nagórski, K. Błażejowski, K. Marcuk, *Analiza porównawcza odkształceń oraz trwałości nawierzchni asfaltowej typu „perpetual” nawierzchni standardowej*, Drogi i Mosty, 2012, Vol. 11, nr. 4, s. 311-327
- [8] R. Nilsson, *A viscoelastic approach to flexible pavements*, Licentiate Thesis, Division of Highway Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm 1999
- [9] D. Sybilski, W. Bańkowski, R. Mularzuk, *Ocena konstrukcji nawierzchni z BAWMS z zastosowaniem programu komputerowego VEROAD*, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, strona internetowa Polskiego Kongresu Drogowego, [dostęp: 12.04.2013], Dostęp w Internecie: <http://www.pkd.org.pl/pliki/referaty/sybilski_banowski_mularzuk.pdf>
- [10] M. Witczak, *NCHRP Project 9-19: Simple Performance Tests: Summary of Recommended Methods and Database*, Final Report for Project 9-19, Transportation Research Board, Washington 2005
- [11] *VEROAD: "User manual", Version 2000 April. Appendix B: "Additional Theory"*, NPC bv, Utrecht, Netherlands 2000 ■