

Numeryczny model właściwości lepkosprężystych warstw nawierzchni jezdni z betonu asfaltowego

Andrzej Pożarycki¹, Przemysław Górnaś²

^{1,2} Instytut Inżynierii Lądowej, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Poznańska, e-mail: ¹andrzej.pozarycki@put.poznan.pl, ²przemyslaw.gornas@put.poznan.pl

Streszczenie: Bez względu na złożoność prowadzonych analiz konstrukcji nawierzchni jezdni, zawsze o wysokim stopniu odwzorowania rzeczywistych warunków stanowią wartości parametrów, które należy ustalić w sposób doświadczalny lub poprzez wiarygodną identyfikację wstecz parametrów danego modelu. W pracy, poprzez szczegółową analizę numeryczną modelu belki poddanej czystemu zginaniu i obciążeniom cyklicznym, ustalono lepkosprężyste parametry materiału próbki z mieszanki mineralno-asfaltowej. W dalszej kolejności wyznaczone parametry materiałowe wykorzystano do budowy numerycznego modelu nawierzchni jezdni. W wyniku konfrontacji rezultatów obliczeń dla modelu i wyników pomiarów ugięciomierzem dynamicznym FWD, potwierdzono zbieżność wyników na poziomie dokładności akceptowanej z punktu widzenia inżynierskiego.

Słowa kluczowe: lepkosprężystość, model Weichertera, mieszanki mineralno-asfaltowe, numeryczny model nawierzchni jezdni

1. Wprowadzenie

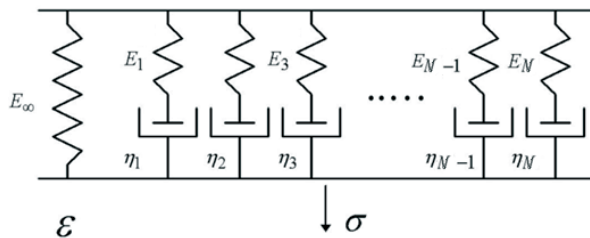
Do indywidualnego projektowania konstrukcji nawierzchni jezdni bądź projektowania jej wzmocnienia zaleca się wykorzystanie metod mechanistycznych [15, 16]. Taka procedura wymaga przeprowadzenia analiz stanu naprężeń i odkształceń w modelu nawierzchni jezdni. Powszechnie do analizy korzysta się między innymi z programów: BISAR, Everseriess, MnPave, Noah i innych. W wymienionych aplikacjach do obliczeń wykorzystuje się model nawierzchni jezdni oparty o teorię warstw sprężystych spoczywających na półprzestrzeni sprężystej (Layers Elastic Theory model, w skrócie model LET). Fakt ten wynika z relatywnie prostej implementacji modelu LET do obliczeń ze względu na wymaganą liczbę parametrów do jego definicji, która dla jednej warstwy modelu jest ograniczona do trzech: modułu sprężystości, współczynnika Poissona i grubości warstwy.

Należy zdawać sobie sprawę z uproszczonego charakteru przedstawianych zjawisk fizycznych analizowanych przy wykorzystaniu modeli. W przypadku modelu nawierzchni jezdni LET, jednym z założeń jest matematyczny opis wszystkich warstw modelu jako materiałów sprężystych. W odniesieniu do warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych (w skrócie MMA), których właściwości zależą od czasu obciążenia i temperatury, założenie sprężystych właściwości materiałów dla modelowanych warstw z MMA jest w pełni poprawne tylko w stosunku do warunków niskich (ujemnych) temperatur lub bardzo krótkiego czasu działania obciążenia. W przypadku dodatniej temperatury i dłuższego czasu oddziaływania obciążenia w modelu należy uwzględnić właściwości lepkie materiału, który wówczas jest ciałem lepkosprężystym. Zastosowana symplifikacja sprężystych właściwości materiałów w modelu nawierzchni jezdni LET, może powodować błędne decyzje projektowe.

Istnieją programy (np. VEROAD) umożliwiające implementację modeli materiałów warstw innych niż sprężyste, między innymi jako matematycznego opisu właściwości ciała lepkosprężystego. Wiąże się to z koniecznością zdefiniowania większej liczby parametrów w stosunku do modelu LET, których określenie wartości nie jest oczywiste i często kłopotliwe. Próby wyznaczenia parametrów lepkosprężystych dla modeli materiałów warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych podjęto między innymi w pracach [6, 8, 13], w których ograniczono się tylko do przedstawienia metod wyznaczania parametrów dla modeli materiałów MMA, nie dając odpowiedzi o słuszności ich implementacji w modelach nawierzchni jezdni. Z tego powodu autorzy pracy podjęli się kompleksowego podejścia do kwestii określenia parametrów modelu materiałowego warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych. Przedstawiona została metoda wyznaczenia parametrów lepkosprężystych funkcji relaksacji dla modelu materiału z mieszanek mineralno-asfaltowych na podstawie wyników przeprowadzonych badań laboratoryjnych oznaczania sztywności metodą belki zginanej 4-punktowo obciążonej (4PB-PR) wg normy PN-EN 12697-26:2007. Następnie zweryfikowano otrzymane parametry materiałowe poprzez przeprowadzenie obliczeń dla numerycznego modelu nawierzchni jezdni ze zdefiniowanymi parametrami modelu materiału dla warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych, których rezultaty porównano z wynikami badań nawierzchni ugięciomierzem dynamicznym FWD wykonanymi dla odcinka, z którego pobrano próbki do badań laboratoryjnych.

2. Definicja modelu warstw asfaltowych

W mieszanekach mineralno-asfaltowych jako materiałach reologicznie złożonych zachodzi wiele różnych procesów reologicznych, między innymi pełzanie i relaksacja. Istnieje cały szereg modeli materiałowych opisujących właściwości ciał lepkosprężystych, których wybór zależy od analizowanego zjawiska. W pracy ze względu na krótki czas przyrostu obciążenia w teście porównawczym analizy (ugięciomierzem dynamicznym FWD), jako model materiału lepkosprężystego przyjęto uogólniony model Maxwella (model Weicherta). Model ten z założenia nadaje się do opisu matematycznego zjawisk wywołanych obciążeniem krótkotrwałym. Schemat wykorzystanego modelu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat uogólnionego modelu Maxwella (modelu Weicherta)

Opis właściwości lepkosprężystych modelem Weicherta realizuje się za pośrednictwem funkcji relaksacji $E_r(t)$ (rysunek 2), która często na potrzeby modeli numerycznych jest definiowana w postaci szeregu Prony'ego (1).

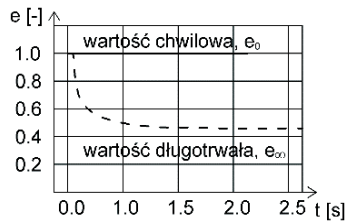
$$E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = E_0 - \sum_{i=1}^N E_i \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (1)$$

gdzie: $E_r(t)$ – wartość modułu relaksacji zależna od czasu [MPa], E_0 – wartość modułu chwilowego (moduł statyczny) [MPa], określona wzorem (2), N – liczba podukładów

szeregowych (modeli Maxwella), E_∞ - wartość modułu długotrwałego [MPa], E_i i τ_i (czas relaksacji określony zależnością (3)) - parametry szeregu Prony'ego, η_i - współczynnik lepkości, t - czas [s] [1, 2, 7].

$$E_0 = E_\infty + \sum_{i=1}^N E_i \quad (2)$$

$$\tau_i = \frac{\eta(i)}{E_i} \quad (3)$$



Rys. 2. Znormalizowane wartości funkcji relaksacji w czasie $e(t)$

Wartości graniczne funkcji relaksacji są równe $E_0 = E_r(0)$, $E_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} E_r(t)$. Parametry niezbędne do opisu funkcji relaksacji można uzyskać na podstawie:

- Badań pełzania – określenie właściwości materiału w funkcji czasu,
- Badań relaksacji – określenie właściwości materiału w funkcji czasu,
- Badań pod obciążeniem harmonicznym zmiennym – określenie właściwości materiału w funkcji częstotliwości [9].

Należy jednak zwrócić uwagę na dwie pierwsze metody, dla których w celu wyznaczenia parametrów szeregu Prony'ego korzysta się z wykresów zależności odpowiednio odkształcenia i naprężenia w funkcji czasu w teście pełzania lub relaksacji. W obu przypadkach występuje problem wyznaczenia wartości parametru E_0 ze względu na brak fizycznej możliwości przyłożenia natychmiastowego obciążenia próbki. W związku z tym w pracy zdecydowano się wykorzystać metodę badań pod obciążeniem harmonicznym zmiennym wyznaczania modułu sztywności 4PB-PR wg normy PN-EN 12697-26:2007, której problem nie dotyczy. Wiąże się to jednak z wykonaniem kilku badań dla tej samej próbki i warunków, różniących się tylko częstotliwościami obciążenia. Dla każdego badania uzyskuje się wartości modułu zespolonego i kąta przesunięcia fazowego (patrz pkt. 4), na podstawie których identyfikuje się poprzez aproksymację funkcją relaksacji (szeregiem Prony'ego) parametry materiału lepkosprężystego. Postać szeregu Prony'ego (1) określa właściwości materiału w funkcji czasu. W celu zmiany domeny funkcji (4) wykorzystano transformatę Fouriera. Rezultatem transformacji są postacie wzorów (5) i (6), które umożliwiają obliczenie wartości części rzeczywistej i urojonej modułu zespolonego w funkcji częstotliwości, a ich suma (7) jest równa modułowi zespolonemu [1, 2, 7].

$$f(t) \rightarrow f(\omega) \quad (4)$$

$$E' = E_0 - \sum_{i=1}^N E_i + \sum_{i=1}^N \frac{E_i \cdot \tau_i^2 \cdot \omega^2}{1 + \tau_i^2 \cdot \omega^2} \quad (5)$$

$$E'' = \sum_{i=1}^N \frac{E_i \cdot \tau_i \cdot \omega}{1 + \tau_i^2 \cdot \omega^2} \quad (6)$$

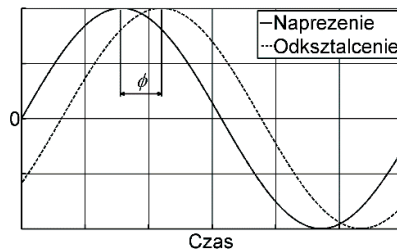
$$E^* = E' + E'' \quad (7)$$

gdzie: E^* - moduł zespolony [MPa], E' - część rzeczywista modułu zespolonego [MPa], E'' - część urojona modułu zespolonego [MPa], ω - częstotliwość kątowna [1/s].

3. Badanie dynamiczne oznaczenia modułu sztywności 4PB-PR

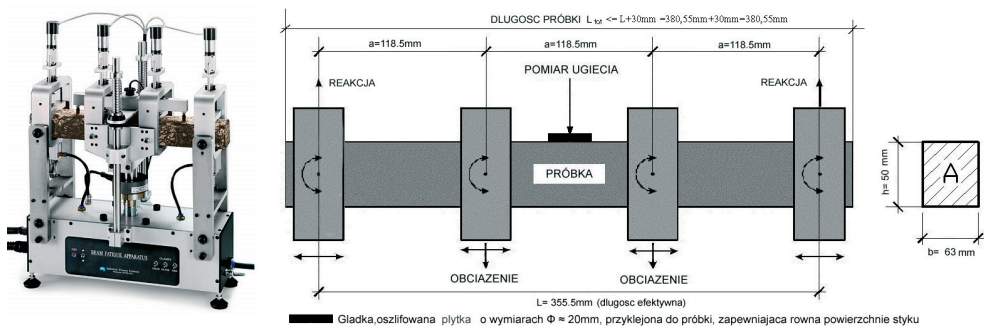
Wartość modułu MMA w analizach teoretycznych jest przyjmowana jako wartość bezwzględna wielkości modułu zespolonego opisanego wzorem (7), który powszechnie traktuje się jako przybliżenie modułu sprężystości dla MMA i nazywa się modułem sztywności wzdłużnej $|E^*|$ [3, 9].

Według normy PN-EN 12697-26:2007 moduł sztywności definiowany jest jako wartość bezwzględna modułu zespolonego, a więc zależność pomiędzy naprężeniem i odkształceniem dla materiału liniowo lepkosprężystego, który został poddany obciążeniu w postaci funkcji sinusoidalnej w czasie t . Powstające w materiale naprężenia równe $\sigma \cdot \sin(\omega \cdot t)$ powodują powstanie opóźnionego w czasie o tzw. kąt przesunięcia fazowego ϕ odkształcenia $\varepsilon \cdot \sin(\omega \cdot (t - \phi))$. Na rysunku 3 przedstawiono omówioną zależność [5, 11].



Rys. 3. Poglądowy obraz typowego przesunięcia w czasie wykresu względem o kąt przesunięcia fazowego ϕ dla obciążenia harmonicznym zmiennym

Jedną z dostępnych metod wg normy PN-EN 12697-26:2007 oznaczania modułu sztywności jest badanie belki zginanej obciążonej harmonicznym (oznaczanej często symbolem 4PB-PR). Próbkę belkową umieszczoną w aparacie pomiarowym i schematyczne warunki podparcia belki przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Próbkę umieszczoną w aparacie pomiarowym oraz schemat warunków podparcia belki [9]

Badania oznaczenia modułu sztywności wg normy PN-EN 12697-26:2007 wykonano w różnych częstotliwościach obciążenia harmonicznego: 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz. Badania wykonano dla próbek wyciętych z warstwy podbudowy z betonu asfaltowego o uziarnieniu 0-25, dla której przeprowadzono testy ugięciomierzem dynamicznym FWD. Badania laboratoryjne wykonano w temperaturze 16°C, która odpowiada temperaturze dla przeprowadzonych testów ugięciomierzem dynamicznym FWD.

4. Wyznaczenie parametrów modelu materiału lepkosprężystego na podstawie wyników badań laboratoryjnych

Opis właściwości lepkosprężystych w obliczeniach numerycznych, między innymi w metodzie elementów skończonych, którą wykorzystano w pracy do budowy modelu badania 4PB-PR i nawierzchni jezdni, można zrealizować za pośrednictwem definicji funkcji relaksacji, która jest wyznaczana w odniesieniu do modułu sprężystości postaciowego (Kirchhoffa (8)) i objętościowego (Helmholtza (9)).

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (8)$$

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 + 2 \cdot \nu)} \quad (9)$$

gdzie: G - moduł postaciowy (Kirchhoffa) [MPa], K - moduł objętościowy (Helmholtza) [MPa], E - moduł sprężystości (Younga) [MPa], ν - współczynnik Poissona [-].

Parametry materiału lepkosprężystego (szeregu Prony'ego) zostały wyznaczone poprzez ich identyfikację algorytmem Nelder Mead, dla których uzyskano najlepsze dopasowanie funkcji relaksacji do wartości modułów rzeczywistych i urojonych wyznaczonych na podstawie wyników badań laboratoryjnych 4PB-PR. Ogólne postacie znormalizowane wzorów funkcji relaksacji (szeregów Prony'ego) wykorzystanych do aproksymacji przedstawiają wzory (10) i (11), dla których szukane parametry zapisano pogrubioną czcionką: G_0 , g_i i τ_i [1, 2, 7].

$$G' = G_0 \left(1 - \sum_{i=1}^N g_i + \sum_{i=1}^N \frac{g_i \cdot \tau_i^2 \cdot \omega^2}{1 + \tau_i^2 \cdot \omega^2} \right) \quad (10)$$

$$G'' = G_0 \left(\sum_{i=1}^N \frac{g_i \cdot \tau_i \cdot \omega}{1 + \tau_i^2 \cdot \omega^2} \right) \quad (11)$$

Jako kryterium optymalizacyjne przyjęto sumę pierwiastków błędu średnio-kwadratowego (root mean squared error, w skrócie RMSE) modułów rzeczywistych i urojonych, w odniesieniu do ich wartości obliczonych i laboratoryjnych (13).

$$RMSE = \sqrt{MSE(G')} + \sqrt{MSE(G'')} = \left(\sqrt{\frac{1}{n_d} \cdot \sum_{i=1}^{n_d} \left(\frac{G'_{obl} - G'_{lab}}{G'_{lab}} \right)^2} + \sqrt{\frac{1}{n_d} \cdot \sum_{i=1}^{n_d} \left(\frac{G''_{obl} - G''_{lab}}{G''_{lab}} \right)^2} \right) \cdot 100\% \quad (12)$$

gdzie: $RMSE$ [4] - pierwiastek błędu średnio-kwadratowego [%], MSE - błąd średnio-kwadratowy [%], G'_{obl} - obliczona wartość części rzeczywistej modułu odpowiadającego i -

tej częstotliwości, G'_{lab} - szukana wartość części rzeczywistej modułu odpowiadającego i -tej częstotliwości, G''_{obl} - obliczona wartość części urojonej modułu odpowiadającego i -tej częstotliwości, G''_{lab} - szukana wartość części urojonej modułu odpowiadającego i -tej częstotliwości, n_d - liczba częstotliwości, dla których przeprowadzono badania.

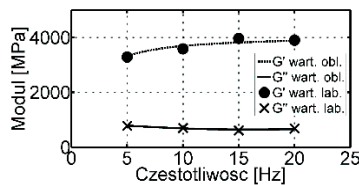
Identyfikację parametrów przeprowadzono dla szeregowych modeli Prony'ego z różną liczbą podukładów szeregowych (modeli Maxwella). Otrzymane wyniki zebrano w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki identyfikacji parametrów szeregu Prony'ego

N	G_0 [MPa]	g_1 [-]	g_2 [-]	g_3 [-]	g_4 [-]	τ_1 [-]	τ_2 [-]	τ_3 [-]	τ_4 [-]	RMSE [%]
1	4286,81	0,3687	-	-	-	0,1237	-	-	-	15,79
2	6131,19	0,3679	0,2257	-	-	0,0088	0,2432	-	-	5,63
3	5874,54	0,2357	0,1827	0,1588	-	0,2451	0,0099	0,0102	-	5,64
4	6540,54	0,1915	0,3940	3,6674e-7	0,0126	0,1948	0,0062	0,0648	0,1386	6,94

*gdzie: N - liczba podukładów szeregowych (modele Maxwella)

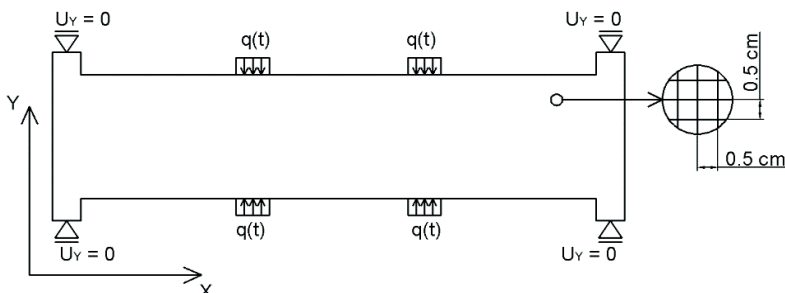
Do dalszych obliczeń przyjęto model o $N = 2$, dla którego uzyskano najlepsze dopasowanie (najniższa wartość RMSE). Wyniki aproksymacji dla modelu $N = 2$ przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wyniki aproksymacji modułów ścinania G' i G''

5. Weryfikacja zidentyfikowanych parametrów modelu materiału warstw asfaltowych

W celu weryfikacji zidentyfikowanych parametrów materiału lepkosprężystego wykonano numeryczny model belki 4PB-PR, dla której zdefiniowano wyznaczone parametry modelu materiału lepkosprężystego. Schemat statyczny i dyskretyzację ośrodka ciągłego (elementy kontynuacyjne w płaskim stanie naprężenia, ośmiowęzłowe, o wymiarach $0,5 \times 0,5$ cm) dla modelu belki przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat statyczny i dyskretyzacja ośrodka ciągłego elementami ośmiowęzłowymi, kontynuacyjnymi w płaskim stanie naprężenia o wymiarach $0,5 \times 0,5$ cm dla modelu belki 4PB-PR

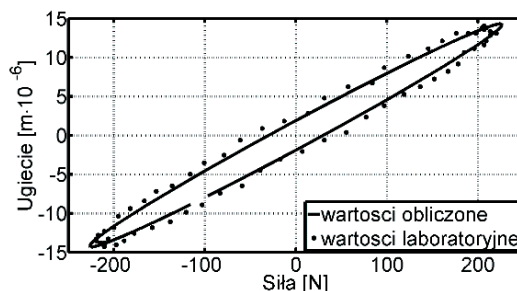
Otrzymane wyniki obliczeń dla modelu badania 4PB-PR w postaci wartości ugięć dla belki porównano z wynikami badań laboratoryjnych. Rezultaty weryfikacji, jako średnie

względne różnice wartości ugięć obliczonych dla modeli poddanych obciążeniom o różnych częstotliwościach zebrano w tabeli 2. Referencją do obliczenia błędów względnych były odpowiadające im wyniki badań laboratoryjnych.

Tabela.2. Średnie błędy względne wartości ugięć obliczonych dla modeli

Częstotliwość obciążenia [Hz]	5	10	15	20
Średni błąd względny wartości ugięć [%]	9,69	7,11	8,95	8,29

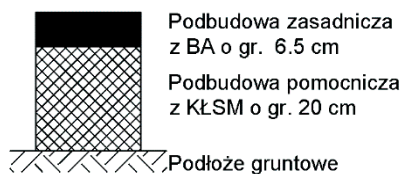
Na rysunku 7 przedstawiono wykres zależności ugięcia od siły w oparciu o wyniki obliczeń numerycznych i badań laboratoryjnych belki 4PB-PR, dla 50 cyklu obciążenia o częstotliwości 15 Hz i temperaturze 16°C.



Rys. 7. Przykład uzyskanej zależności ugięcie-siła (linia ciągła) w oparciu o wyniki obliczeń numerycznych oraz wyniki obliczone na podstawie badań (symbole punktowe) dla częstotliwości obciążenia 15 Hz i temperatury 16°C ($RMSE = 8,95\%$)

6. Konfrontacja rezultatów obliczeń dla modeli nawierzchni jezdni

Wykonano również obliczenia dla dwóch numerycznych modeli nawierzchni jezdni. Modele różnią się przyjętymi wartościami parametrów materiałowych modelowanej warstwy podbudowy zasadniczej z mieszanki mineralno-asfaltowej, dla konstrukcji nawierzchni jezdni, której schemat układu warstw przedstawiono na rysunku 8.

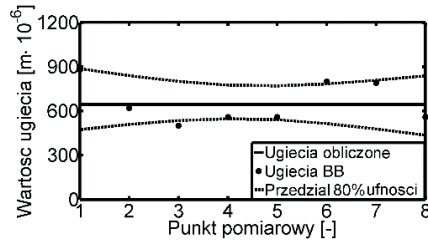


Rys.8. Schemat układu warstw modelu konstrukcji nawierzchni jezdni

Dla pierwszego modelu nawierzchni jezdni (oznaczonego symbolem A), model materiału warstwy z MMA przyjęto jako sprężysty. Moduł sprężystości tej warstwy przyjęto jako równy modułowi sztywności wyznaczonemu na podstawie badania 4PB-PR wg PN-EN 12697-26:2007 w temperaturze 16°C i częstotliwości obciążenia równej 10 Hz. W drugim modelu (B), przyjęto lepkosprężysty model materiału warstwy z MMA, którego parametry opisano i zweryfikowano już wcześniej.

Pozostałe warstwy modelu nawierzchni jezdni, podbudowa pomocnicza i podłoże gruntowe przyjęto jako warstwy sprężyste, a ich moduły zidentyfikowano na podstawie wyników badań ugięciomierzem dynamicznym FWD wykonanych na warstwie podbudowy zasadniczej z BA. Następnie w celu ich weryfikacji wykonano analizę wprzód, symulując model badania metodą belki Benkelmana (BB) na warstwie podbudowy pomocniczej

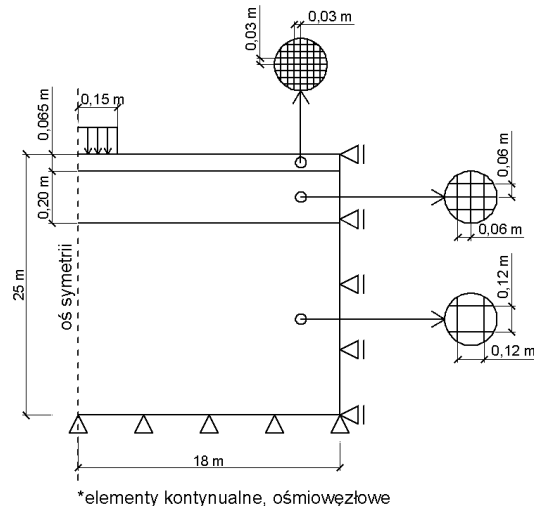
z KLSM. Do obliczeń wykorzystano wartości średnie ugięć nawierzchni jezdni z 27 zrzutów obciążenia ugięciomierzem dynamicznym typu FWD. Obliczone wartości ugięć porównano z wynikami badań BB, których rezultaty przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Porównanie wartości ugięć obliczonych dla modelu i dla badania BB

W wyniku obliczeń identyfikacyjnych (przy założeniu stałej wartości współczynników Poissona równej 0.3), otrzymano następujące wartości parametrów poszczególnych warstw modelu: $E_{KLSM} = 67$ MPa, $E_{podłoże} = 101$ MPa. Podkreśla się tu fakt, że najprawdopodobniej zastosowanie modelu sprężystego poskutkowało wystąpieniem tzw. efektu kompensacji [12]. Jednak z uwagi na analizowane zjawisko efekt kompensacji nie ma wpływu na rezultaty obliczeń, co potwierdzają uzyskane wyniki przedstawione na rysunku 9.

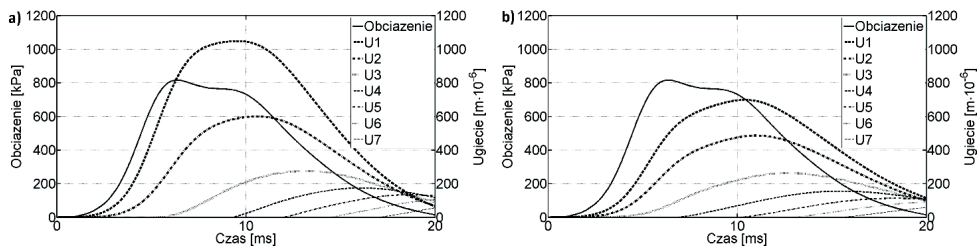
Po ustaleniu parametrów materiałowych dla warstw modeli nawierzchni jezdni, w dalszej kolejności zadeklarowano pozostałe parametry wymagane na potrzeby metody elementów skończonych. Szczegóły tej analizy zostały przekazane w formie publikacji do wydawnictwa IBDiM „Drogi i Mosty Roads and Bridges”, a w tej pracy problem wymiarów modeli i ich dyskretyzacji elementami skończonymi został rozwiązany w sposób, który gwarantuje uzyskanie wartości błędów numerycznych poniżej 10% (przyjmując jako referencję rozwiązanie metodą warstw sprężystych LET [10]) (rysunek 10).



Rys. 10. Schemat numerycznego modelu nawierzchni jezdni (obciążenie zgodnie z rysunkiem 11)

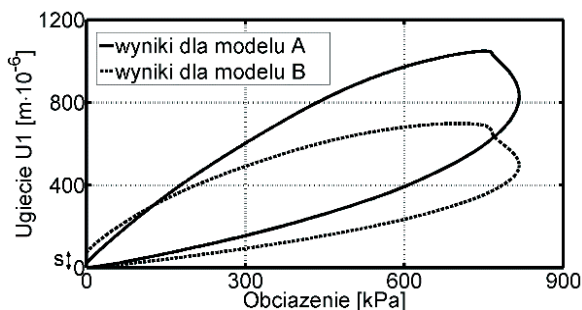
Analizy dla numerycznych modeli nawierzchni jezdni odpowiadały pod względem obciążenia oraz lokalizacji punktów pomiarowych względem osi obciążenia, warunkom i parametrom wykonanych testów ugięciomierzem dynamicznym dla modelowanej nawierzchni. Wyniki dla modelu (A) i (B) w postaci wykresów wartości obciążenia oraz odpowiadających mu w czasie obliczonych wartości ugięć, przedstawiono odpowiednio na

rysunkach 11a i 11b, na którym oznaczenia U1, U2, ..., U7 odpowiadają kolejnym punktom pomiarowym wartości ugięć począwszy od osi obciążenia.



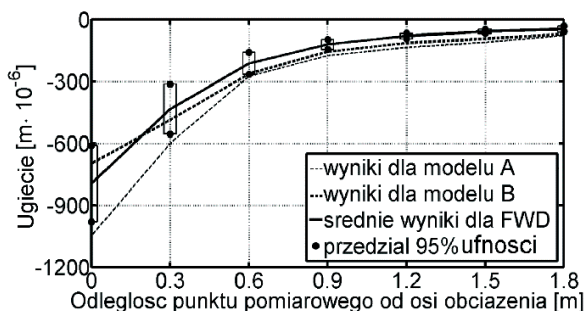
Rys. 11. Wykresy wartości obciążenia i ugięć w czasie dla modeli a) (A) oraz b) (B)

W celu weryfikacji wpływu zdefiniowanych właściwości lepkosprężystych dla warstwy podbudowy zasadniczej z MMA w modelu (B), wykonano wykresy (rys. 12) zależności obliczonych dla modeli (A) i (B) wartości ugięcia U1 w osi obciążenia. Dla rezultatów analizy modelu (B), ze zdefiniowanym materiałem lepkosprężystym warstwy odpowiadającej podbudowie z betonu asfaltowego, zauważono przesunięcie „s” dla chwili kiedy zarejestrowana wartość obciążenia wyniosła 0 kPa. Fakt ten potwierdza wpływ zdefiniowanych właściwości lepkosprężystych warstwy na uzyskaną postać wyników.



Rys. 12. Zależność obliczonych dla modeli (A) i (B) wartości ugięcia U1 w osi obciążenia od wartości obciążenia

Kolejnym etapem było porównanie maksymalnych wartości ugięć, otrzymanych na podstawie obliczeń dla numerycznych modeli nawierzchni jezdni oraz wyników badań ugięciomierzem dynamicznym FWD (rysunek 13).



Rys. 13. Przedstawienie wartości ugięć obliczonych dla modeli (A) i (B) modelu nawierzchni jezdni oraz średnie wyniki badań ugięciomierzem dynamicznym FWD wraz z przedziałem 95% ufności

7. Dyskusja i wnioski

W oparciu o szczegółową analizę wyników obliczeń dla modeli numerycznych i badań laboratoryjnych podjęta została próba weryfikacji parametrów lepkosprężystych betonu asfaltowego dla warstwy podbudowy. Parametry zostały ustalone przy wykorzystaniu laboratoryjnej metody testu zginania belki pryzmatycznej pod obciążeniem harmonicznym wg PN-EN 12697-26:2007. W odróżnieniu od powszechnie stosowanych testów na potrzeby oznaczenia parametrów lepkosprężystości opisano możliwość szerszego wykorzystania wyników badań testu znanego pod nazwą 4PB-PR. Środek ciężkości zawartych tu treści, położony został na proces pozyskiwania parametrów dla modeli bardziej złożonych niż modele sprężyste, których określenie jest często problematyczne. Potwierdzono możliwość wykorzystania tych parametrów do potrzeb modelu obliczeniowego nawierzchni z relatywnie małą grubością warstw asfaltowych (tu 6,5 cm). Analizy dowodzą, że:

- Najniższą wartość błędu RMS identyfikacji parametrów szeregu Prony'ego dla próbek belkowej z mieszanki mineralno-asfaltowej uzyskano na poziomie 6% dla modelu Weichert'a z dwoma podukładami szeregowymi (modelami Maxwella, $N = 2$).
- Stwierdzono zadowalającą zbieżność (uzyskano średnią względną różnicę wartości ugięć mniejszą od 10%) rozwiązania numerycznego i wyników badań laboratoryjnych 4PB-PR dla różnych częstotliwości obciążenia.
- Wyniki obliczeń numerycznych dla modelu nawierzchni jezdni zostały zweryfikowane w oparciu o wyniki testu belką Benkelmana wykonanego na powierzchni warstwy podbudowy pomocniczej z KSLM. Analiza zgodności wyników dla modelu i rzeczywistych badań potwierdziła słuszość przyjętych założeń dla 80% przedziału ufności wartości ugięć.
- Ustalono, że proponowana w pracy procedura oznaczania parametrów lepkosprężystych poprawnie definiuje materiał warstwy podbudowy z betonu asfaltowego na potrzeby obliczeń numerycznych. W modelu pomimo krótkiego czasu działania obciążenia efekt lepkosprężystości jest wyraźnie widoczny w postaci kąta przesunięcia fazowego.
- Linia ugięć obliczona dla modelu nawierzchni jezdni z warstwą z mieszanki mineralno-asfaltowej, opisanej jako materiał lepkosprężysty, w zakresie wartości ugięć mierzonych w sąsiedztwie osi obciążenia, które zależą głównie od właściwości pierwszej warstwy, mieści się w 95% przedziale ufności, wyznaczonym na podstawie badań empirycznych ugięciomierzem dynamicznym na odcinku doświadczalnym w kontrolowanych warunkach.

Literatura

- 1 Benedetto H., Olard F., Sauzéata C., Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: From binders to mixes, Road Materials and Pavement Design, Volume 5, 2004
- 2 Deigan R. J., Modeling and experimental investigations of the shock response of viscoelastic foams, ProQuest, 2007
- 3 Der Van Poel C., A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data, Journal of Applied Chemistry, Volume 4, Issue 5, 1954
- 4 Everseries user's guide Pavement Analysis Computer Software and Case Studies, Department of Transportation, Washington, 2005
- 5 Gawel I., Kalabińska M., Piłat J., Asfalty drogowe, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2001

- 6 Jaczewski M., Mejłun Ł., Wyznaczanie parametrów lepkosprężystego modelu Burgersa mieszanek mineralno-asfaltowych na podstawie badania pod obciążeniem dynamicznym, *Drogownictwo*, nr 11, 2013
- 7 Liao Y., Viscoelastic FE Modeling of Asphalt Pavements and Its Application to U.S. 30 Perpetual Pavement, ProQuest, 2007
- 8 Liu Y., You Z., Determining Burger's Model Parameters of Asphalt Materials Using Creep-Recovery Testing Data, *Pavement mechanics and materials, modeling, testing, and performance*, 2008
- 9 Pożarycki A., Analiza trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych, Rozprawa doktorska, Instytut Inżynierii Lądowej, Politechnika Poznańska, Poznań, 2009
- 10 Pożarycki A., Identyfikacja liczby i grubości warstw modelu nowej nawierzchni odcinka próbnego metodami sztucznej inteligencji, *Drogi i mosty*, nr 2, 2012
- 11 Stefańczyk B., Mieczkowski P., Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wykonawstwo i badania, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2009
- 12 Ullidtz P., Coetzee N. F., Analytical procedures in nondestructive testing pavement evaluation, *Transportation research record*, No. 1482, 1995
- 13 Yan H., Zhang X., Zhang L., Methods of Fitting the Prony Series of Viscoelastic Models of Asphalt Mixture Based on Dynamic Modulus, *American Society of Civil Engineers*, 2011
- 14 PN-EN 12697-26:2007 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 26: Szywność
- 15 Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Dz. U. nr 43 z 1999 r., poz. 430 z późn. zm.
- 16 GDDP, Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 2001

The numeric model of the properties of viscoelastic pavement layers made of asphalt concrete

Andrzej Pożarycki¹, Przemysław Górnaś²

^{1,2} *Institute of Civil Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Poznan University of Technology, e-mail: ¹andrzej.pozarycki@put.poznan.pl, ²przemyslaw.gornas@put.poznan.pl*

Abstract: Regardless of the complexity of performed analyses of pavement construction, the evidence for the high level of the real conditions rendering can be seen in the parameter values which need to be determined experimentally or through a reliable traceability of the parameters of a given model. By means of a detailed numeric analysis of a beam model, to which pure bending and periodic loading were applied, the authors determined the viscoelastic parameters of the sample HMA material. Next, the materials, defined in this way, were used for the construction of a pavement model. As a result of the juxtaposition of the calculation for the pavement model and the results of calculations performed with FWD, it was possible to confirm the convergence of the results on the level of accuracy accepted from the engineering perspective.

Keywords: viscoelasticity, Weichert model, hot mix asphalt, numerical model of road pavement

