

Identyfikacja wartości wtórnego modułu odkształcenia na podstawie impulsowych testów dynamicznych w modelu nawierzchni drogowej



ANDRZEJ POŻARYCKI

Politechnika Poznańska
andrzej.pozarycki@put.poznan.pl



TOMASZ GARBOWSKI

Politechnika Poznańska
tomasz.garbowski@put.poznan.pl

Testy płytą statyczną VSS, należą do grupy jednych z najczęściej stosowanych badań budowy komunikacyjnych w warunkach in situ. W oparciu o wyniki tych testów, oznaczeniu podlegają dwa parametry określane mianem pierwotnego i wtórnego modułu odkształcenia (odpowiednio E_{v1} oraz E_{v2}). W nawiązaniu do definicji stanu granicznego nośności, można założyć, że wartość E_{v2} oznaczona za pomocą obciążenia statycznego płytą o średnicy 300 mm określa nośność nawierzchni jezdni w odniesieniu zarówno do warstw

niezwiązanych, jak i związanych. Wymagane minimalne wartości wtórnego modułu odkształcenia E_{v2} są przedmiotem stosownych specyfikacji technicznych (OST), gdzie w zależności od funkcji jaką pełni dana warstwa w konstrukcji nawierzchni jezdni podaje się ich dopuszczalne granice. W artykule analizę ograniczono do parametrów oznaczonych metodą VSS, na powierzchni kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie (kłsm). Rozważania dotyczą dwóch przypadków, które wynikają z potencjalnej potrzeby określania tych parametrów zarówno w warunkach gdy jest swobodny dostęp do warstwy kłsm (etap kontroli wykonawczej), ale również gdy kolejne prace powodują całkowite zakrycie podbudowy, utrudniając wykonanie testów VSS (etap decyzji o zabiegach w ramach systemów zarządzania nawierzchniami lub wspomaganie decyzji o wzmocnieniu).

Motywacja, cel i zakres badań

Pomimo, że badania inwazyjne konstrukcji nawierzchni jezdni stanowią wciąż znaczącą część prac w tym obszarze, to grupa testów nieniszczących jest źródłem poszukiwań zarówno o charakterze naukowym, jak i praktycznym, generowanym przez potrzeby zarządców dróg. W takim kontekście testy ugięciomierzem dynamicznym typu FWD/HWD czy RWD (*Rolling Weight Deflectometers*), są wciąż tematem wielu prac. Wyniki testów tymi urządzeniami (siły, przemieszczenia) w połączeniu z modelem numerycznym lub analitycznym nawierzchni wykorzystywane są do identyfikacji parametrów warstw nawierzchni (przy założeniu fazy sprężystej są to moduły sztywności/sprężystości), najczęściej poprzez minimalizację różnicy między wartościami teoretycznymi (obliczonymi na podstawie modelu matematycznego), a tymi, które wyzna-

czono na podstawie eksperymentu [4][5]. Stopień skomplikowania modelu analityczno-numerycznego wpływa bezpośrednio na jakość otrzymywanych wyników (dokładność identyfikacji wartości modułów). W modelach można uwzględnić zarówno nieliniowość materiałową (nieliniowa sprężystość, lepkosprężystość, plastyczność,), jak i geometryczną np. w postaci definicji szczepności międzywarstwowej. Wpływ temperatury i wilgotności w gruncie na procedurę identyfikacji parametrów warstw nawierzchni przedstawiano w pracy [15]. Problem wiarygodności i powtarzalności wyników badań FWD omówiono w pracach [14]. W literaturze można znaleźć znaczną liczbę prac poświęconych tematowi identyfikacji modułu sprężystości w oparciu o wyniki testów dynamicznych FWD w powiązaniu z różnymi metodami obliczeniowymi [12][17][18][3][6][8][7][10][11][9][16]. Znacznie mniej pozycji poświęca się tematowi, które poruszają zagadnienie korelacji wartości wtórnego modułu odkształcenia E_{v2} z modułem sprężystości [13][1], której wadą jest fakt, że użyteczność uzyskanych tym sposobem równań jest ograniczona do szczególnych warunków testowych nawierzchni jezdni, co hamuje ten kierunek prac badawczych. W pracy [2] opisano związki pomiędzy modułem E_{v2} zidentyfikowanym w oparciu o testy dynamiczne i statyczne, podkreślając znaczenie badań dynamicznych.

Zagadnienie związku między wartością modułu Younga E , a wartościami siecznych modułów E_{v2} mają swoje konkretne zastosowanie jeżeli by pamiętać, że wielkość E_{v2} jest często używana przez inżynierów jako przybliżenie modułu sprężystości. Można się o tym przekonać studiując wartości modułów podłoża nawierzchni, zestawione np. w Rozporządzeniu MTiGM „Warunki techniczne...” umieszczone w Dz.U. 1999.43.430.

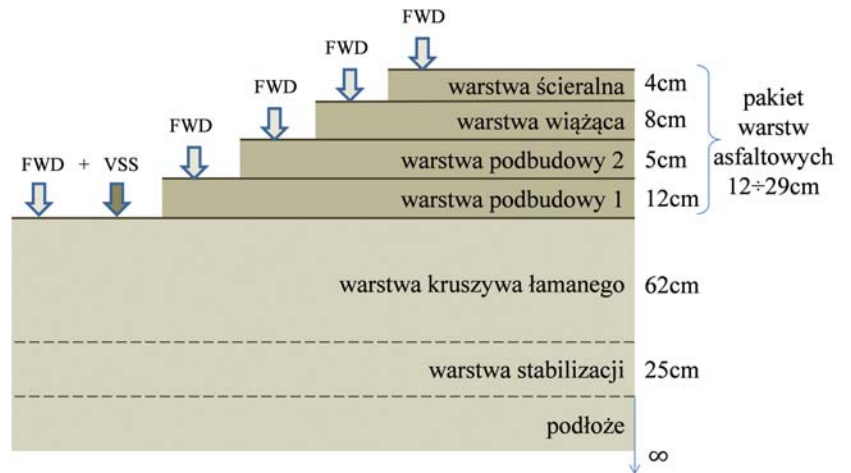
Główny cel zaprezentowanych analiz sprowadza się do wskazania warunków kontroli warstw podbudowy nawierzchni jezdni z kłsm, poprzez obliczenie wartości wtórnego modułu odkształcenia na podstawie badań urządzeniem FWD. Test ten w połączeniu z analizą odwrotną służy w pierwszym etapie obliczeń jako narzędzie do identyfikacji modułów warstw modelu nawierzchni jezdni. W dalszej kolejności, zidentyfikowane parametry są wykorzystane jako zmienne wejściowe do symulacji komputerowej testu VSS. W konsekwencji obliczona jest wartość modułu E_{v2} .

Nowatorskim elementem analiz jest możliwość wykorzystania zaproponowanej procedury do kontrolowania jakości wykonania i stanu technicznego niższych warstw nawierzchni drogowych, ograniczając się do badań urządzeniem FWD na dowolnej warstwie nawierzchni usytuowanej powyżej tej, którą poddaje się ocenie.

Pomiary na odcinku badawczym

Odcinek do testowania zlokalizowano w obszarze zurbanizowanym, na jednej z ulic miasta Poznania. Zdecydowano, że szczegółowej analizie będzie podlegać tylko część ulicy podanej przebudowie. Po wstępnych oględzinach „koryta” do dalszych badań wskazano jednolitą sekcję o długości 245 m (fotografia 1). Na odcinku badawczym wyznaczono 29 przekrojów testowych, a wykonana nawierzchnia jezdni (rysunek 1) składa się z sześciu warstw (trzy warstwy asfaltowe (2 × AC WMS i SMA), podbudowa pomocnicza (kłsm), podłoże ulepszone (głina piaszczysta stabilizowana silmentem) i podłoże (głina piaszczysta)). Warstwy podbudowy z betonu asfaltowego i kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie, ze względów technologicznych były układane w dwóch etapach. Powiązanie między warstwami asfaltowymi zapewniono za pośrednictwem warstw szczepnych z emulsji asfaltowej D70/100 w ilości 0,3 ÷ 0,5 kg/m². Na konstrukcję nawierzchniłożyły się warstwy o łącznej grubości 111 cm (łącznie z warstwą ulepszonego podłoża). Wykonana nawierzchnia jest nawierzchnią podatną, zaprojektowaną do obciążenia ruchem o kategorii KR6.

Jednym z zadań programu badawczego była seria badań VSS na warstwie podbudowy z kłsm (10 sztuk), a następnie seria testów FWD na każdej kolejnej warstwie asfaltowej (rysunek 1).



Rys. 1. Zakres pomiarów VSS i FWD w zadaniu oceny Ev2 na warstwie kłsm

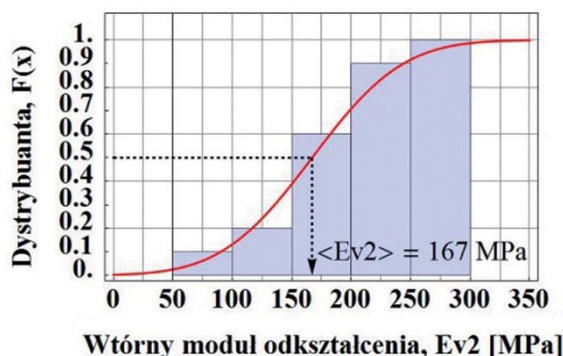
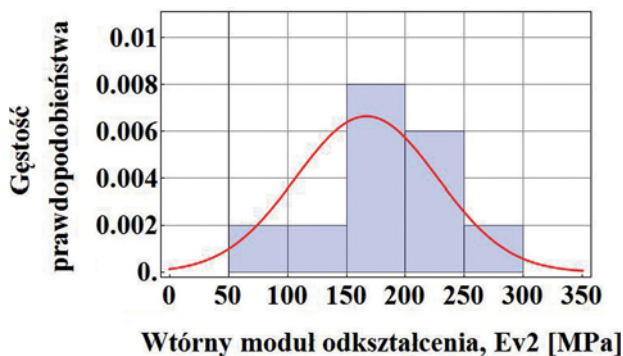
Na warstwie podbudowy z kruszywa zastosowano test FWD z siłą dynamiczną równą 30 kN (kierując się potrzebą uzyskania wiarygodnych pomiarów, gwarantowanych w zakresie pracy geofonów do 2 mm). Na kolejnych warstwach asfaltowych nawierzchni, wartość siły zwiększono do 50 kN. Wszystkie badania FWD przeprowadzono w tych samych przekrojach, w których wykonany był wcześniej test VSS, zapewniając sobie możliwość pracy z tym samym modelem nawierzchni na poszczególnych etapach analizy (fotografia 2).



Fot. 1. Odcinek drogi w okresie budowy a) widok podłoża (Gp), b) widok zawałowanego kruszywa łamanego uszczelnionego miatłem



Fot. 2. Widok przekrojów pomiarowych do metod: a) VSS, b) FWD



Rys. 2. Parametry statystyczne oznaczonych *in situ* wartości Ev_2 na powierzchni warstwy kłsm

Badania na powierzchni warstwy kruszywa stabilizowanego mechanicznie przeprowadzono w zakresie ciśnień pod sztywną płytą od 0.0 do 0.45 MPa. Do obliczenia wartości siecznego modułu odkształcenia Ev_2 wykorzystano zakres: 0.35 i 0.25 MPa, a histogram z dystrybuantą do tej serii pomiarowej przedstawiono na rysunku 2. Przeprowadzone testy normalności rozkładu nie dały podstaw do odrzucenia hipotezy o rozkładzie normalnym (najmniejsza z otrzymanych wartości $p = 0.49 \gg 0.05$), więc do dalszych analiz przyjęto założenie że rozkład oznaczonych w eksperymencie wartości Ev_2 jest normalny.

Średnia wartość modułu wyznaczona w testach statycznych płytą VSS na powierzchni warstwy kłsm wynosi 167 MPa, a odchylenie standardowe jest równe 60 MPa.

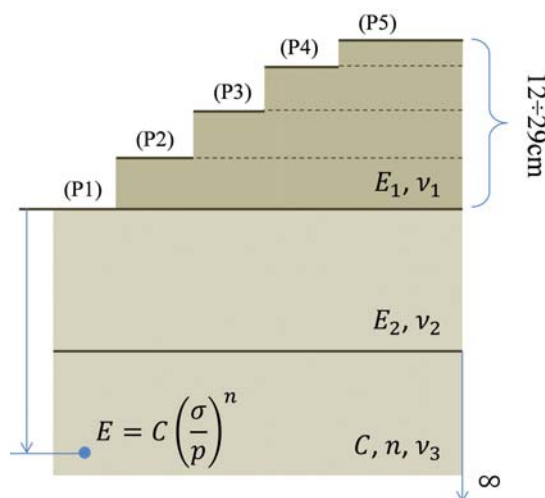
Model obliczeniowy

Na podstawie zgromadzonych danych z testów VSS i FWD określana jest wartość modułu Ev_2 warstwy niezwiązanej. W pierwszej kolejności przeprowadzona jest procedura identyfikacji warstw nawierzchni i odpowiednie moduły sprężystości/sztywności są przypisane do każdej z warstw nawierzchni. Aby tego dokonać zastosowano metody analizy odwrotnej, w której za pomocą numerycznego lub analitycznego modelu (zawierającego wszystkie szukane moduły E_i) obciążonego w sposób określony w eksperymencie, określany jest przekrój czaszy ugięć w kierunku osi podłużnej drogi (linia przemieszczeń). Komputerowo wyznaczone wartości ugięć porównywane są z wartościami ugięć z eksperymentu, a następnie poprzez iteracyjną aktualizację modułów sztywności E_i , minimalizowana jest różnica między nimi. W drugim etapie przeprowadzana jest analiza numeryczna symulująca test VSS, w której wszystkie parametry modelu przyjmowane są na podstawie wartości uzyskanych z poprzedniego etapu.

Obliczenia odwrotne przeprowadzono wykorzystując rozwiązanie równań równowagi statycznej ośrodków wielowarstwowych spoczywających na półprzestrzeni sprężystej przy użyciu opracowanego przez autorów programu MLETR. Założenia do identyfikacji modułów sprężystości są następujące:

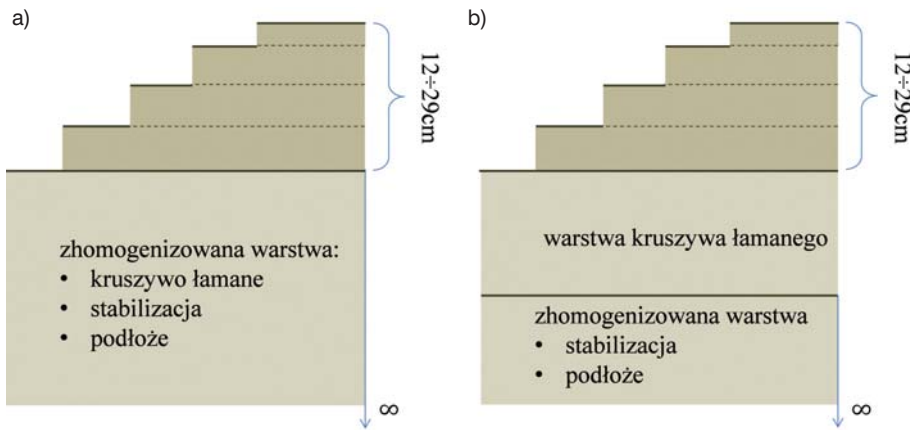
- warstwy z mma traktowane są jako 'pakiet' (rysunek 2),
- pomiędzy warstwami założona jest pełna szczepność,
- do optymalizacji błędu RMS wykorzystano algorytm Gaussa-Newtona,

- przyjmuje się, że warstwy są nieskończenie długie w kierunku poziomym,
- warstwy mają stałą grubość,
- najniższa warstwa jest modelowana jako półprzestrzeń w kierunku pionowym,
- wszystkie warstwy są jednorodne, izotropowe, materiały warstw asfaltowych przyjęto jako liniowo sprężyste, opisane modułem sprężystości E i współczynnikiem Poissona ν ,
- model materiałowy warstwy podłoża przyjęto jako nieliniowo sprężyste, w którym moduł sztywności zależy od wartości naprężeń w gruncie (rysunek 3).

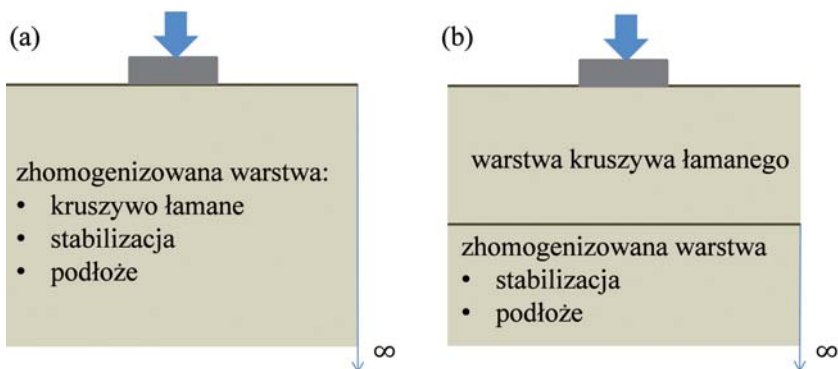


Rys. 3. Model materiałowy podłoża realizujący koncepcję tzw. resilient modulus (wartość p jest wielkością referencyjną, którą często przyjmuje się jako wartość odpowiadającą ciśnieniu atmosferycznemu – w analizach przyjęto $p = 0.1 \text{ MPa}$)

Na potrzeby identyfikacji parametrów niezbędnych do obliczenia wartości wtórnych modułów odkształcenia do symulowanych pomiarów na powierzchni kłsm (etap 1), wzięto pod uwagę modele nawierzchni przedstawione na rysunku 4 (uwaga – autorzy artykułu nie zajmowali się matematycznym formułowaniem ani rozwiązywaniem zagadnienia homogenizacji jednakże w kontekście analizy odwrotnej, w której wykorzystano model wielowarstwowy sprowadzony do jednej warstwy o zastępczej sztywności, homogenizacja dotyczy zdefiniowanego a priori zagadnienia. Identyfikując parametry efektywne (uśrednione) modelu sprowadzonego do jednej



Rys. 4. Modele nawierzchni testowane podczas etapu identyfikacji wartości modułów warstw



Rys. 5. Modele numeryczne nawierzchni do symulacji testu VSS, a) jednowarstwowy, b) dwuwarstwowy

warstwy autorzy założyli, że model jest już wstępnie zhomogenizowany czyli ma cechy modelu równoważnego w sensie „uśrednionego zachowania”).

Dysponując wartościami parametrów z pierwszego etapu, wartości wtórnego modułu odkształcenia obliczono przy założeniu półprzestrzeni sprężystej obciążonej sztywną płytą w kształcie koła, co w konsekwencji prowadzi do znanej zależności określonej wzorem (1).

$$Ev2 = 0,75 \cdot D \frac{\Delta p}{\Delta s} \quad (1)$$

w którym: $Ev2$ – wtórny sieciowy moduł odkształcenia, D – średnica płyty obciążającej (30 cm), Δp – różnica wartości ciśnień przyjętych do obliczenia $Ev2$, Δs – różnica wartości ugięć odpowiadająca przyjętym wartościom .

W analizach przyjęto równą różnicę wartości ciśnień, do których konsekwentnie obliczono różnicę wartości ugięć wykorzystując dwa modele numeryczne: 1) model jednowarstwowy, w którym war-

stwy kruszywa, stabilizacji i podłoża zostały zhomogenizowane, oraz 2) model dwuwarstwowy (rysunek 5).

Wyniki

Wykorzystując modele opisane w poprzedniej części skanoartykułu uzyskano zestaw wyników do różnych konstrukcji nawierzchni. Zestaw wyników konkretnego modelu składa się z: (a) wyznaczonych modułów sprężystości każdej z warstw konstrukcji nawierzchni, (b) przemieszczeń pionowych w punkcie centralnym płyty VSS na powierzchni kruszywa łamanego o różnych wartościach ciśnienia i (c) policzonych wartości $Ev2$. Wybrane wyniki identyfikacji modułów sprężystości otrzymane dla 3-warstwowego modelu przedstawiono w tabeli 1. Oznaczenia wykorzystane w tabeli 1 zostały wyjaśnione już wcześniej na rysunku 3.

W ogólnym przypadku odnotowano, że zbieżność rozwiązania jest możliwa do uzyskania po zaledwie siedmiu iteracjach (rysunek 6), a wartość średnia błędów RMS (2) nie przekracza 2%.

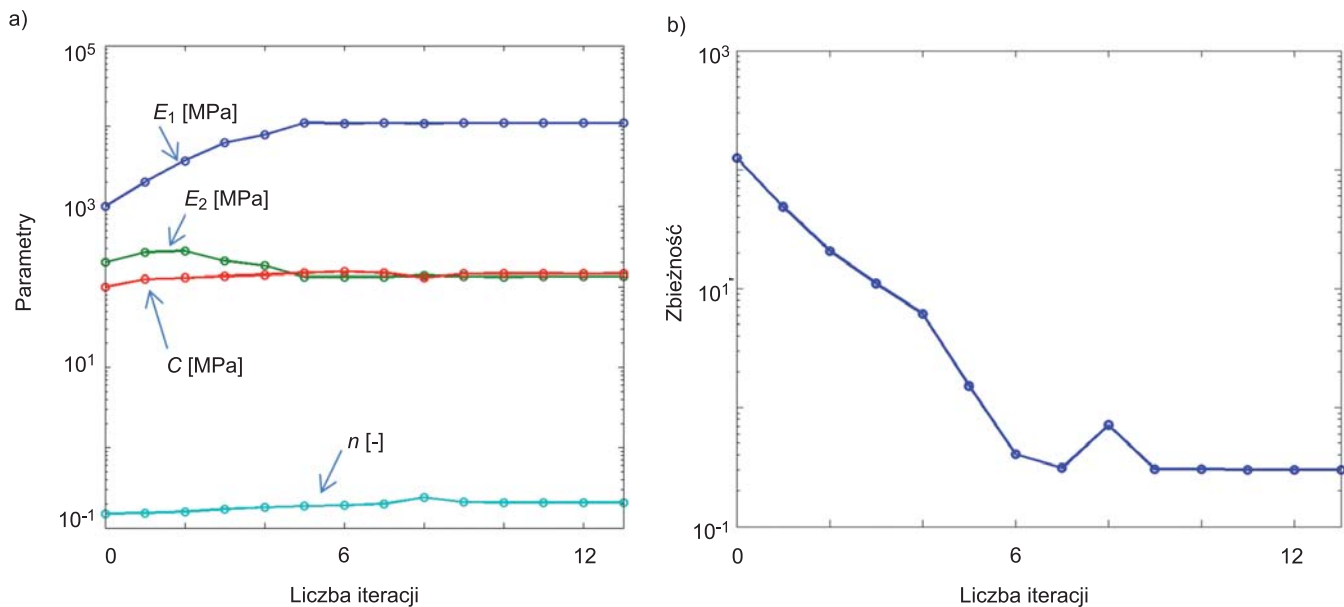
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{i=1} \left(\frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \cdot 100[\%] \quad (2)$$

w którym: RMS – pierwiastek błędów średniokwadratowy [%], d_{ci} – i-te obliczone wartości ugięcia nawierzchni, d_{mi} – i-te zmierzone wartości ugięć nawierzchni, n_d – liczba geofonów stosowanych w teście dynamicznym FWD.

Tabela 1. Wybrane wyniki identyfikacji wartości modułów E i $Ev2$ obliczone do modelu z 3 warstwami

| Pomiar FWD | | E1 | E2 | C | n | u1 | u2 | Ev2 | <Ev2> |
|-------------|---|---------|-------|-------|---------|---------|---------|--------|-------|
| (rysunek 4) | | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [-] | [mm] | [mm] | [MPa] | [MPa] |
| P(1) | A | 0.0 | 226.8 | 120.9 | -0.2122 | -0.2282 | -0.3231 | 237.06 | 224 |
| | B | 0.0 | 220.6 | 62.3 | -0.3731 | -0.2439 | -0.3501 | 211.86 | |
| P(2) | A | 9093.6 | 138.1 | 86.5 | -0.4874 | -0.3361 | -0.4777 | 158.80 | 147 |
| | B | 11707.6 | 128.6 | 86.4 | -0.5334 | -0.3952 | -0.5625 | 134.49 | |
| P(3) | A | 9491.0 | 112.1 | 172.5 | -0.2879 | -0.4307 | -0.6074 | 127.37 | 121 |
| | B | 11582.8 | 95.7 | 217.1 | -0.2326 | -0.4816 | -0.6772 | 115.03 | |
| P(4) | A | 15143.1 | 67.6 | 232.7 | -0.2243 | -0.6245 | -0.8779 | 88.78 | 107 |
| | B | 14895.8 | 99.3 | 257.3 | -0.1826 | -0.4500 | -0.6311 | 124.29 | |
| P(5) | A | 14236.8 | 98.0 | 257.5 | -0.1838 | -0.4569 | -0.6415 | 121.91 | 132 |
| | B | 13171.3 | 127.8 | 237.5 | -0.2054 | -0.3906 | -0.5497 | 141.40 | |

Uwaga: A, B – oznaczenie sekcji pomiarowych w ramach jednego odcinka jednorodnego (kryterium jednorodności odcinka przyjęto w postaci: $v \leq 25\%$, gdzie v – współczynnik zmienności zbioru wartości $Ev2$ z pomiarów).



Rys. 6. Przykładowe ścieżki zbieżności, a) parametrów modelu, b) błędu RMS

Dyskusja

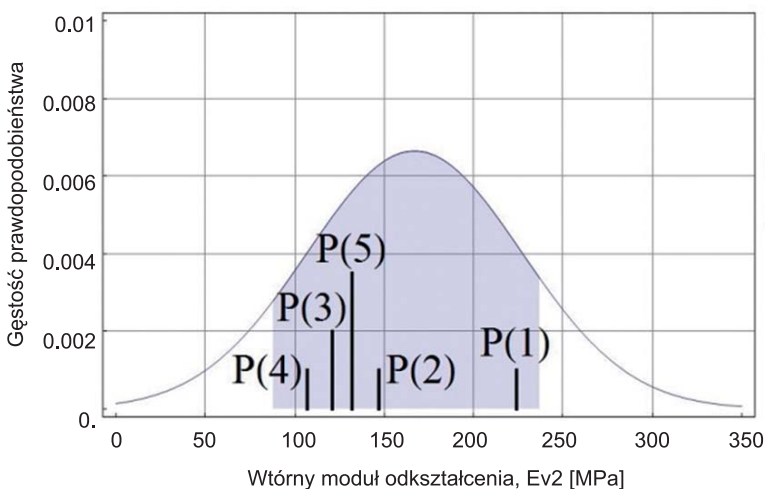
Wartości modułu E_{v2} obliczone przy pomocy modelu z 2 warstwami (BA + zhomogenizowane podłoże) zgodnie z przypuszczeniami, okazują się wyraźnie niedoszacowane, dlatego w zestawieniu wyników je pominięto. Z kolei z zestawienia w tabeli 1 wynika, że obliczone średnie wartości modułu $\langle E_{v2} \rangle$ w modelu 3-warstwowym, zależą od grubości warstw asfaltowych ułożonych na warstwie, dla której szacuje się wartość modułu siecznego. Warto tu zauważyć, że w wyniku konfrontacji skrajnych wartości E_{v2} przedstawionych w tabeli 1, z rozkładem gęstości prawdopodobieństwa wartości pomierzonych (rysunek 2), prawdziwy jest warunek:

$$P(\min(E_{v2}) = 89 < E_{v2}^{\text{obliczone}} \leq \max(E_{v2}) = 237) = 0,781527 \approx 0,8 \quad (3)$$

To oznacza, że średnie wartości obliczone z pomiarów FWD na każdej powierzchni warstwy nawierzchni jezdni branej pod uwagę, w poszczególnych sekcjach pomiarowych (A, B w tabeli 1) mieszczą się w 80% przedziale pewności wartości pomierzonych (rysunek 7).

Biorąc jednak pod uwagę parametry rozkładu zmierzonych wartości E_{v2} ($N[167,60]$), obliczone wartości E_{v2} są konsekwentnie obarczone relatywnie szerokim przedziałem ufności.

Warto tu jednak zwrócić uwagę na praktyczny aspekt rozwiązania. Wiedząc, że stan graniczny nośności podbudowy kłsm określony jest w tym przypadku warunkiem $E_{v2} \geq 150$ MPa, zidentyfikowana wartość z pomiarów FWD na powierzchni kruszywa zwraca zadowalający wynik w porównaniu do wartości oznaczonej na podstawie pomiarów VSS ($E_{v2}^{\text{pomiar}} = 167$ MPa, $E_{v2}^{\text{obliczone}} = 239$ MPa). Decyzja doty-



- P(1) – FWD_kłsm (p-wa pom.)
- P(2) – FWD_AC WMS (p-wa1)
- P(3) – FWD_AC WMS (p-wa2)
- P(4) – FWD_AC WMS (w-ca)
- P(5) – FWD_SMA (s-na)

Rys. 7. Wartości obliczonych modułów E_{v2} (kłsm) w zależności od grubości przykrycia warstwami asfaltowymi (od 0 do 29 cm) w konfrontacji z gęstością prawdopodobieństwa wartości E_{v2} oznaczonych metodą VSS (zaczieniony obszar oznacza prawdopodobieństwo 80%)

cząca potwierdzenia prawidłowych parametrów warstwy zkruszywa w obu przypadkach byłaby pozytywna.

W kontekście oceny stanu technicznego podbudowy pomocniczej w warunkach, gdy są już wykonane warstwy asfaltowe, z obliczeń wynika, że średnia wartość w analizowanej jednorodnej sekcji spełnia warunek $Ev2_{obliczone} \geq 127 \pm 2 \cdot 17 = 127 \pm 34$ MPa. W porównaniu do wartości średniej oznaczonej metodą VSS na powierzchni warstwy kłsm jest to wartość mniejsza o 40 MPa.

Na uwagę zasługuje fakt, że pomimo zaawansowanego modelu materiałowego podłoża, wyniki uzyskano dla wciąż mocno uproszczonej wersji modelu badań FWD.

Podsumowanie

Obliczanie wartości wtórnych modułów odkształcenia $Ev2$ dolnych warstw konstrukcji nawierzchni jezdni jest ważnym zagadnieniem zarówno w obszarze kontroli jakości prac, jak i we wspomaganiu decyzji w systemach zarządzania nawierzchniami. Wyniki uzyskane w pełni kontrolowanych warunkach z zastosowaniem standardowego sprzętu i procedury testu VSS nie zawsze są poprawne, a czasem nawet niemożliwe do wykonania, w związku z tym dodatkowa kontrola (*a posteriori*) wydaje się istotną alternatywą. Przedstawiona metodologia jest nowatorską procedurą opartą o wyniki standardowych testów FWD, ale wykorzystanych w niestandardowy sposób. Test dynamiczny ugięciomierzem w połączeniu z analitycznym (lub numerycznym) modelem nawierzchni jezdni i analizą odwrotną służą jako wstępny krok do identyfikacji modułu odkształcenia wtórnego. Znając moduły sprężystości każdej warstwy nawierzchni (z pewną dokładnością) można stosunkowo łatwo wykonać symulację 'w przód' testu VSS z wstępnie określonymi parametrami modelu. Z tego punktu wystarczy już tylko zrobić mały krok, aby obliczyć wartości modułu $Ev2$. W konsekwencji przeprowadzonych doświadczeń można stwierdzić, że:

1. Oszacowane wartości $Ev2$ z zasymulowanego testu VSS na powierzchni warstwy kłsm mieszczą się w 80% przedziale ufności wartości oznaczonych w oparciu o pomiary in-situ metodą statycznej płyty. Oznacza to realną możliwość stosowania przedstawionej tu procedury w praktyce.
2. Niedokładne odwzorowanie rzeczywistego układu warstw nawierzchni w modelu skutkuje błędami, których wartość wykracza poza ramy powszechnie akceptowanych standardów.
3. Prezentowane tu podejście oparte na metodach analitycznych, numerycznych i eksperymentalnych może służyć jako narzędzie do diagnozy *a-posteriori* warstw podłoża i podbudowy nawierzchni (tj. jako narzędzie do kontroli nośności dolnych warstw nawierzchni, np. w warunkach gdy warstwy z betonu asfaltowego są już wykonane). Ten aspekt ma znaczenie na etapie podejmowania decyzji w ramach systemowego zarządzania nawierzchniami.

Należy również podkreślić, że w przekonaniu autorów, przy odpowiednio zaprogramowanej procedurze badań linii ugięć nawierzchni w teście dynamicznym, możliwe jest również oszacowanie drugiego z parametrów metody VSS,

a mianowicie wartości pierwotnego modułu odkształcenia $Ev1$. Takie kompleksowe ujęcie problemu umożliwi rozszerzenie prezentowanej tu procedury o ocenę wskaźnika odkształcenia, będącego miarą zagęszczenia badanych ośrodków.

Bibliografia

- [1] Bertulienė, L. 2012. *Assesment, research of strength measurement methods on subgrade of experimental road pavement*, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 7(3): 228-236
- [2] Bertulienė, L.; Laurinavičius A.; Vaitkus A. 2010. *Research and evaluation of methods for determining deformation modulus of a base course of road pavement*. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 5(2): 110-115
- [3] Ceylan, H.; Guclu, A.; Tutumluer, E.; Thompson, M. 2005. *Backcalculation of full-depth asphalt pavement layer moduli considering nonlinear stress-dependent subgrade behavior*. The International Journal of Pavement Engineering. 6(3): 171-182
- [4] G. Maier, G. Bolzon, V. Buljak, T. Garbowski and B. Miller, *Synergistic combinations of computational methods and experiments for structural diagnosis*. Computer Methods in Mechanics. Lectures of the CMM 2009, Eds. M. Kuczma, K. Wilmanski, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 453-476, 2010
- [5] G. Maier, V. Buljak, T. Garbowski, G. Cocchetti and G. Novati, *Mechanical characterization of materials and diagnosis of structures by inverse analyses: some innovative procedures and applications*. International Journal of Computational Methods, praca w druku
- [6] Goktepe, B.; Emine, Agar E.; Lav H. 2006. *Advances in backcalculating the mechanical properties of flexible pavements*. Advances in Engineering Software. 37: 421-431
- [7] Gopalakrishnan, K. 2009. *Backcalculation of Non-Linear Pavement Moduli Using Finite-Element Based Neuro-Genetic Hybrid Optimization*. The Open Civil Engineering Journal. 3: 83-92
- [8] Grenier, S.; Konrad, J. 2009. *Dynamic interpretation of falling weight deflectometer tests on flexible pavements using the spectral element method: backcalculation*. Canadian Journal of Civil Engineering. 36: 957-968
- [9] Kutay, E.; Chatti K.; Lei L. 2011. *Backcalculation of Dynamic Modulus Mastercurve from Falling Weight Deflectometer Surface Deflections*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2227: 87-96
- [10] Lav, H.; Goktepe, B.; Lav A. 2009. *Backcalculation of Flexible Pavements Using Soft Computing*. Intelligent and Soft Computing in Infrastructure Systems Engineering. 259: 67-106
- [11] Lee, H. S.; Kim, J. 2011. *Backcalculation of dynamic modulus from resilient modulus test data*. Canadian Journal of Civil Engineering. 38: 582- 592
- [12] Mooney, M.; Miller G.; et. al.2000. *Importance of invasive measures in assessment of existing pavement*. Journal of Performance of Constructed Facilities. 14(4)
- [13] Pantelidis, L. 2008. *Determining of the soil strength characteristics through the plate bearing test*. Foundations of Civil and Environmental Engineering.
- [14] Rocha, S.; Tandon, V.; Nazarian, S. 2004. *Falling Weight Deflectometer Fleet. Repeatability and Reproducibility*. Road Materials and Pavement Design. 5(2): 215-238
- [15] Salour, F.; Erlingsson, S. 2013. *Investigation of a pavement structural behaviour during spring thaw using falling weight deflectometer*. Road Materials and Pavement Design
- [16] Saltan, M; Terzi, S.; Küçüksille, E. 2011. *Backcalculation of pavement layer moduli and Poisson's ratio using data mining*. Expert Systems with Applications. 38: 2600-2608
- [17] Von Quintus, H. L.; Simpson, A. L. 2002. *Back-Calculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections*. Federal Highway Administration. McLean
- [18] Xu, B.; Ranjithan, R.; Kim, R. 2002. *Case studies: using APLCAP for asphalt pavement layer condition assessment*. Journal of the Transportation Research Board ■