

Marcin GAJEWSKI, Stanisław JEMIOŁO

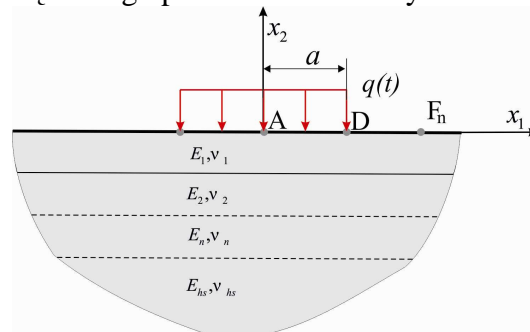
## **ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKRYWANIA BRAKU ZESPOJENIA WARSTW ASFALTOWYCH W BADANIU FWD**

### *Streszczenie*

*W pracy zaprezentowano analizę numeryczną testu FWD jako dynamicznego zadania sprężystości i lepko-sprężystości przy założeniu symetrii osiowej. Analiza ta została przeprowadzona przy zastosowaniu programu MES ABAQUS w celu oceny możliwości rozpoznawania braku połączenia między poszczególnymi warstwami na podstawie charakteru funkcji przemieszczenia w wybranych punktach na powierzchni konstrukcji warstwowej nawierzchni drogowej. Możliwość rozpoznania tego typu uszkodzenia przez analizę odpowiedzi konstrukcji ma istotne znaczenie w diagnostyce nawierzchni drogowych.*

### **WSTĘP**

W budownictwie drogowym badanie FWD (Falling Weight Deflectometer) jest jednym ze sposobów oceny odkształcalności podłoża (podbudowy drogi), nawierzchni przed remontem oraz wykonanej nawierzchni w ramach jej diagnostyki, [4-5, 8, 9]. Jest to badanie, które w stosunkowo prosty sposób można przeprowadzić, a potrzebny sprzęt w porównaniu np. z ugięciomierzem laserowym TSD (Traffic Speed Deflectometer) jest bardziej dostępny. Ocena konstrukcji warstwowej może odbywać się na podstawie interpretacji rozwiązania zadania brzegowego sprężystości albo lepko-sprężystości przy założeniu symetrii osiowej zadania i jego porównania z wynikami uzyskanymi w badaniu FWD. Schemat tego zagadnienia brzegowo-początkowego przedstawiono na rys. 1.



**Rys. 1.** Schemat zagadnienia brzegowo-początkowego służącego do interpretacji testu FWD

Najprostszym modelem nawierzchni jest układ sprężystych izotropowych  $n$ -warstw (o modułach Younga  $E_n$  i współczynnikach Poissona  $\nu_n$ ) spoczywających na półprzestrzeni sprężystej (hs). Warstwa górna jest obciążana impulsem  $q(t)$  rozłożonym na powierzchni koła o promieniu  $a$ . Wynikiem badania jest funkcja ugięcia  $u_2(x_1, t)$  szacowana na podstawie pomiarów ugięcia w wybranych punktach oznaczonych na rys.1 jako  $F_n$ . Funkcja ta może być porównana z innymi funkcjami zgromadzonymi w bazie danych, co pozwala na określenie zmian odkształcalności badanej nawierzchni. Na podstawie badania FWD możliwe jest także szacowanie modułów Younga poszczególnych warstw, [4,10]. Jednoznaczne ich wyznaczenie nie jest możliwe, gdyż moduły Younga i stałe Poissona wchodzi do rozwiązania nieliniowo. Zazwyczaj w celu oszacowania modułów Younga stosuje się kolejne uproszczenia takie jak: zastąpienie układu rzeczywistego układem trzech charakterystycznych warstw: asfaltowej, podbudowy i podłoża rodzimego, przyjęcie *a priori* współczynników Poissona i grubości warstw, przyjęcie modułu podłoża na podstawie badań geotechnicznych.

W tej pracy podjęto próbę oceny braku zespolenia między warstwami nawierzchni drogowej na podstawie wyników badania FWD. W tym celu przyjęto najprostszą możliwą sytuację, tzn. przyjęto, że moduły Younga i stałe Poissona dla wszystkich warstw są jednakowe. Rozwiązywane zadania różnią się tylko tym, że na pewnej przyjętej głębokości mamy ciągłość przemieszczeń albo tej ciągłości brak.

## 1. SFORMUŁOWANIE ZAGADNIENIA BRZEGOWO-POCZĄTKOWEGO

Zagadnienie propagacji fali wywołanej impulsem ciśnienia w nieskończonej półprzestrzeni sprężystej albo lepko-sprężystej zamodelowano jako dynamiczne zadanie osiowo-symetryczne, por. rys. 1 i w celu jego rozwiązania zastosowano metodę elementów skończonych i program ABAQUS [1-3].

Zastosowano relacje konstytutywne sprężystości materiału izotropowego (por. [7]) oraz lepko-sprężystości w całkowitej postaci relaksacyjnej, z jednakowymi czasami relaksacji dla części dewiatorowej i kulistej stanu naprężenia i odkształcenia, w którym moduły odkształcalności postaciowej i objętościowej rozwija się w szereg Prony'ego, por. instrukcję programu ABAQUS [1-3]. Dodatkowo, przyjęto, że liczba Poissona ma stałą wartość  $\nu_o = 0.25$ , zaś funkcje relaksacji części dewiatorowej i kulistej są następujące:

$$G_R(t) = \frac{E_R(t)}{2(1+\nu_o)}, \quad K_R(t) = \frac{E_R(t)}{3(1-2\nu_o)}, \quad (1)$$

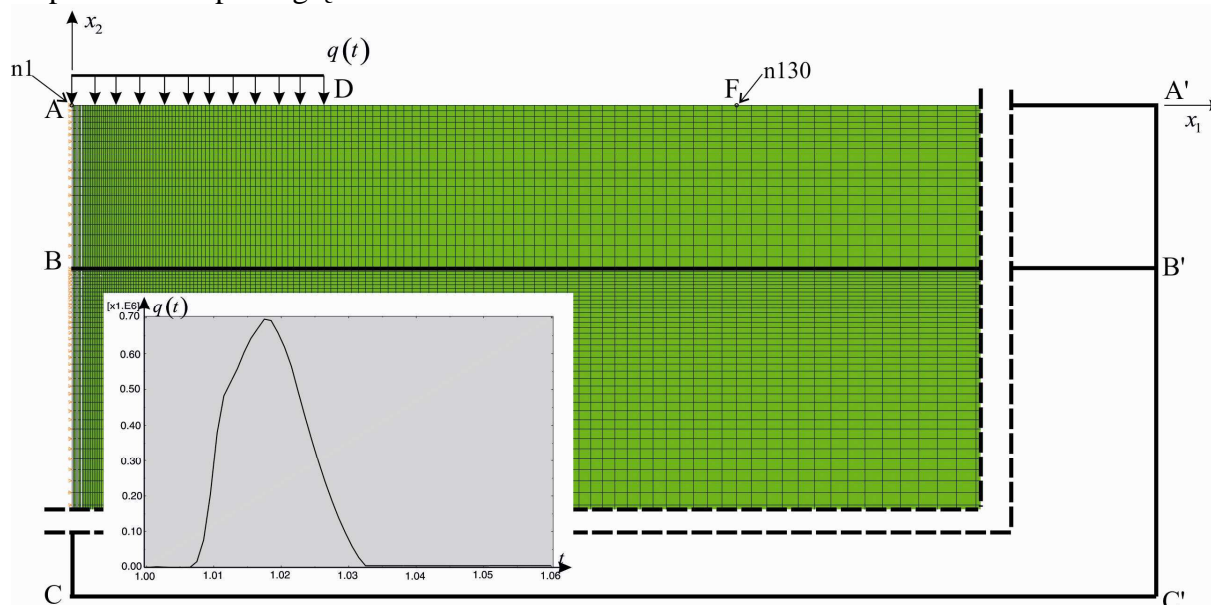
gdzie

$$E_R(t) = E_0 \left( 1 - \sum_{k=1}^N \bar{e}_k^p (1 - e^{-t/\tau_k}) \right). \quad (2)$$

We wszystkich przypadkach przyjęto, że  $E_0 = 20$  [GPa]. Parametry modelu lepko-sprężystości, tj.  $\bar{e}_k^p$  i  $\tau_k$  w funkcji relaksacji (2) przyjęto zgodnie z wynikami badań doświadczalnych przeprowadzonych dla betonu asfaltowego. W wyniku zastosowania optymalizacji nieliniowej uzyskano następujące wyniki:  $\bar{e}_1^p = 0.7438$ ,  $\tau_1 = 0.02$  [s],  $\bar{e}_2^p = 0.2141$  i  $\tau_2 = 0.3$  [s], zakładając tylko dwa wyrazy szeregu Prony'ego.

Siatkę MES utworzono wykorzystując symetrię zadania, por. rys. 1 i 2, co pozwoliło na zamodelowanie obszaru (o wymiarach AA' = 3 [m] i AC = 3 [m]) 19260 (180x107) elementami typu CAX4R oraz 287 elementami CINPE4. Analiza propagacji fal

w nieskończonym ośrodku sprężystym wymaga użycia specjalnych elementów (CINPE4), które zapewnią, że fale nie odbiją się od brzegów z zadanymi warunkami przemieszczeniowymi, por. [6] i [11]. W prezentowanym zadaniu elementy te modelują brzeg  $A'C'$  i  $CC'$ . Na brzegu  $AA'$  zadano zerowe obciążenia, a obciążenie w postaci impulsu ciśnienia  $q(t)$  przyłożono na kole o promieniu  $a=0.15[m]$ , którego promień w wyniku symetrii na rys. 2 jest oznaczony jako AD. Wykres funkcji  $q(t)$  zamieszczono także na rys. 2. Funkcja ta jest typowa w przypadku testu FWD, por. [5] i została zdefiniowana na podstawie zapisu ugięciomierza FWD.



**Rys. 2.** Schemat MES analizowanego zadania brzegowo-początkowego oraz funkcja obciążenia

Zadanie rozwiązano w dwóch krokach. W kroku pierwszym (przy  $t \in [0,1][s]$ ) uwzględniono obciążenie ciężarem własnym ( $\rho=2500 [kg/m^3]$ ) przyjmując jednocześnie, że  $q(\mathbf{x},t)=0$ , zaś w drugim kroku (przy  $t \in [1,1.06][s]$ ) zrealizowano impuls obciążenia modelujący oddziaływanie płyty upadającej na nawierzchnię w aparacie FWD.

Rozwiązano cztery warianty zadania:

- pełne zespolenie (ciągłość przemieszczeń wymuszona przez wspólne węzły) wzdłuż  $BB'$ ,
- brak zespolenia (na głębokości 0.20 [m], tj.  $x_2 = -0.20 [m]$ ) – zadanie kontaktowe ze współczynnikiem tarcia  $f=0$ ,
- brak zespolenia – zadanie kontaktowe ze współczynnikiem tarcia  $f=0.5$ ,
- brak zespolenia – zadanie kontaktowe ze współczynnikiem tarcia  $f=1.0$ .

W przypadku braku zespolenia, zadanie sformułowano w ramach standardowego algorytmu kontaktowego dostępnego w programie ABAQUS/Standard. W kierunku normalnym przyjęto sformułowanie określone jako tzw. „hard contact”, zaś w stycznym przyjęto liniowe prawo kontaktu w sformułowaniu z funkcją kary. W sformułowaniu tym siła tarcia jest wprost-proporcjonalna do normalnej siły ściskającej a współczynnik proporcjonalności to współczynnik tarcia.

We wszystkich rozważanych przypadkach w pierwszym kroku (ciężar własny) zadanie rozwiązano jako statyczne, zaś w drugim kroku wszystkie zadania zostały rozwiązane jako zadania dynamiczne w sformułowaniu niejawnym („implicit”). W algorytmie rozwiązującym,

w drugim kroku, przyjęto ograniczenia na minimalną ( $10^{-15}$ [s]) i maksymalną długość przyrostu (0.05[ms]). We wszystkich zadaniach uzyskano bardzo dobrą zbieżność, a kolejne przyrosty miały maksymalną długość tj. 0.05[ms].

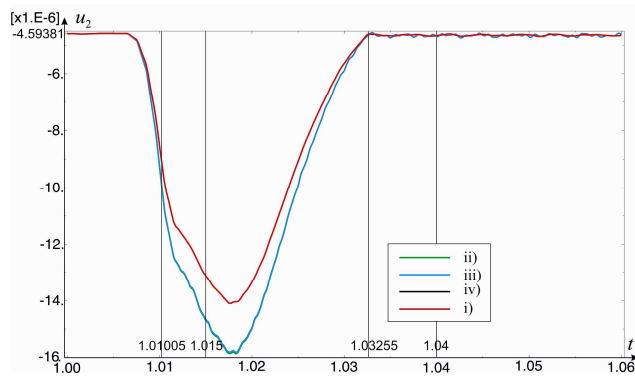
## 2. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

### 2.1. Zadanie sprężystości

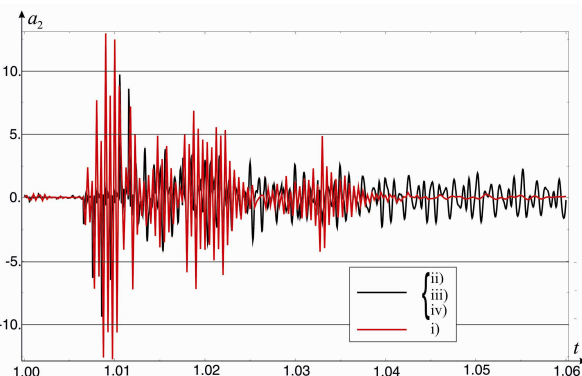
W zadanej funkcji obciążenia  $q(t) = P(t)/(\pi r^2)$  maksymalna wartość impulsu siły  $P(t)$  wynosi 49.78046 [kN] i jest osiągnięta przy  $t = 1.0185$ [s]. Przemieszczenie pionowe węzła n1 (rys. 2) przy obciążeniu ciężarem własnym określone na podstawie rozwiązania MES wynosi  $u_2 = -4.59381$  [ $\mu\text{m}$ ]. W tab.1 zestawiono wyniki na minimalne ugięcie (maksymalne co do wartości bezwzględnej) w węźle n1 dla poszczególnych wariantów zadania. W przypadku zadania dynamicznego, w którym warstwy są zespolone, przemieszczenie minimalne wynosi  $u_2 = -14.0962$  [ $\mu\text{m}$ ]. We wszystkich przypadkach braku zespolenia wartości przemieszczenia są co do wartości bezwzględnej większe w stosunku do wartości występujących przy pełnym zespoleniu (zarówno w przypadku zadania statycznego jak i dynamicznego). W ekstremalnym przypadku różnica przekracza 12%, a więc jest możliwa do detekcji nawet przy istotnych błędach pomiarowych aparatury badawczej.

**Tab. 1.** Wartości minimalnych przemieszczeń oraz czasów po jakich te przemieszczenia nastąpiły w węźle n1 dla poszczególnych wariantów zadania

Wariant zadania	zespolone	$f=1.0$	$f=0.5$	$f=0.0$
$\min(u_2)$ [ $\mu\text{m}$ ]	-14.0962	-15.7875	-15.8229	-15.860
$t_{\min}$ [s]	1.01775	1.0183	1.0183	1.01825



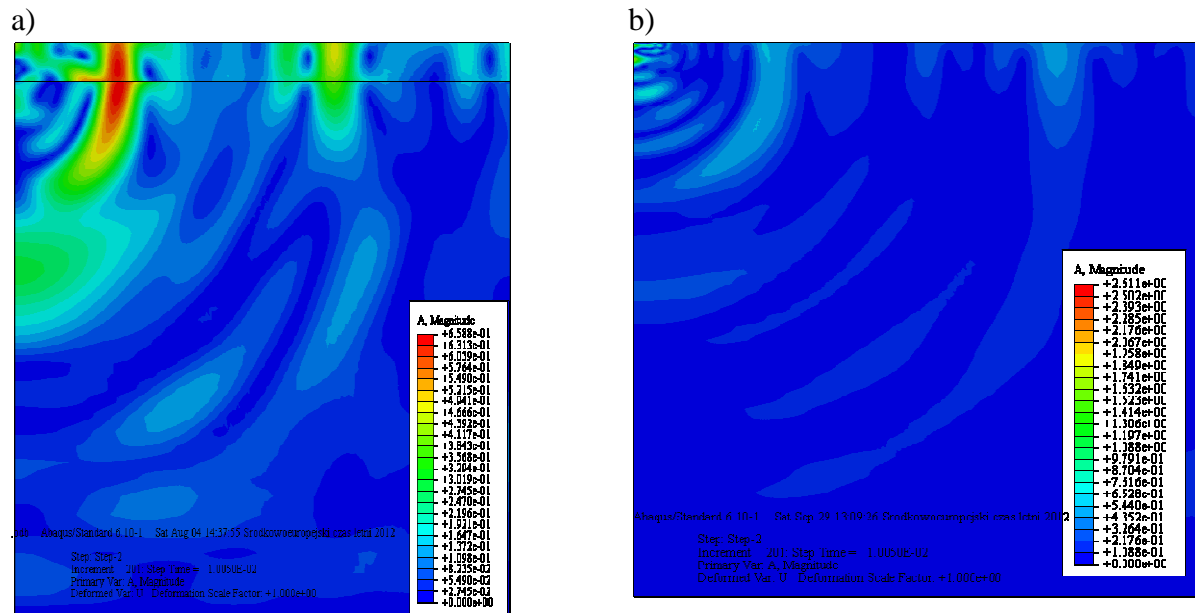
**Rys. 3.** Przemieszczenie pionowe w węźle n1 (w [m]) w funkcji czasu (kroku drugiego) dla poszczególnych wariantów zadania



**Rys. 4.** Przyspieszenie pionowe w węźle n1 (w [ $\text{m/s}^2$ ]) w funkcji czasu (kroku drugiego) dla poszczególnych wariantów zadania

Na rys. 3 zamieszczono funkcje przemieszczenia pionowego w węźle n1 dla poszczególnych wariantów zadania. Należy zauważyć, że współczynnik tarcia w zadaniach z brakiem zespolenia warstw ma drugorzędne znaczenie, a uzyskane przebiegi czasowe nie różnią się nawet na grubość linii. Na tym samym rysunku zaznaczono również wybrane chwile (1.01005, 1.015, 1.03255 i 1.04 [s]), w których sporządzono wykresy wybranych

wielkości mechanicznych prezentowanych w dalszej części artykułu. Na rys. 4 zamieszczono wykresy funkcji przyspieszenia pionowego w węzle n1 dla poszczególnych wariantów zadania. W tym przypadku również potwierdza się obserwacja, że współczynnik tarcia w analizowanych zadaniach kontaktowych ma drugorzędne znaczenie. Dodatkowo można stwierdzić, że ekstremalne wartości przyspieszeń są większe w przypadku zadania z zespolonymi warstwami. Jednak analizując okres po wygaśnięciu impulsu obciążającego, tj. przy  $t \in [1.035, 1.06]$  [s], można zaobserwować, że ekstremalne wartości przyspieszeń pionowych są większe w zadaniach kontaktowych i osiągają wartości bliskie 0.2-0.3g.

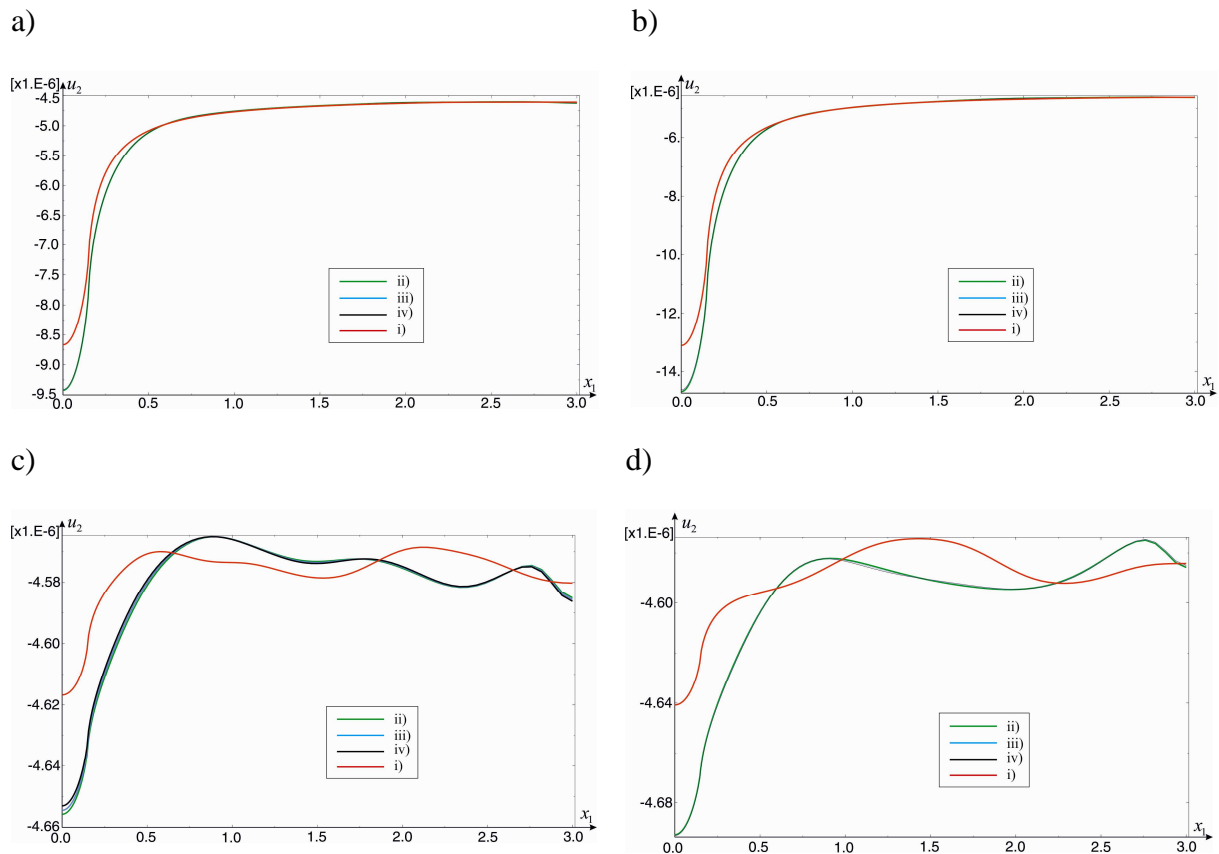


**Rys. 5.** Wykres warstwiczny normy przyspieszenia w chwili  $t=1.01005$  [s]: a) zadanie kontaktowe przy  $f=0.0$ , b) zadanie z zespolonymi warstwami

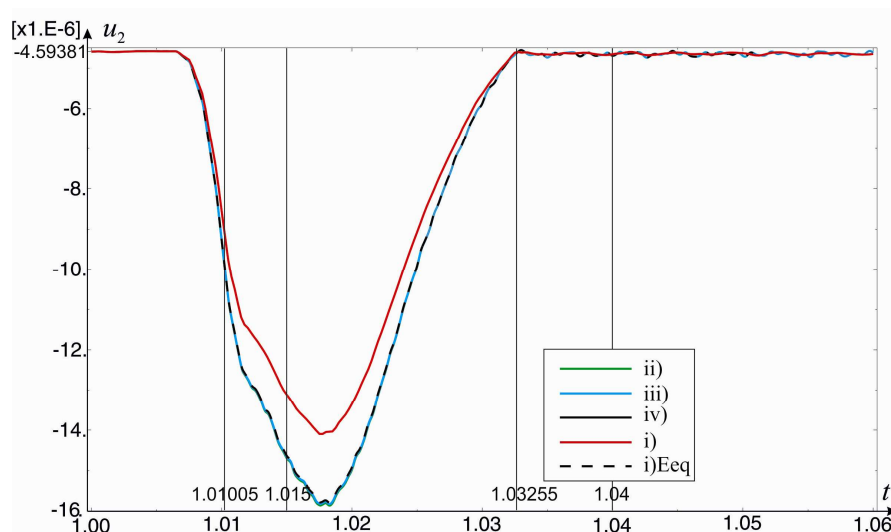
Na rys. 5 zamieszczono przykładowe wykresy warstwiczne normy przyspieszenia w chwili  $t=1.01005$  [s]. Porównanie tych wykresów pokazuje wyraźne różnice jakościowe i ilościowe między zadaniami kontaktowymi a zadaniem z zespolonymi warstwami. Należy jednak zaznaczyć, że w badaniu FWD rejestrowane są przemieszczenia na powierzchni (w rozpatrywanych zadaniach na brzegu AA'), a wtedy występują różnice co do wartości przemieszczenia, ale charakter odpowiedzi konstrukcji jest analogiczny, por. rys. 3. Na rys. 6 zamieszczono wykresy składowej pionowej ugięcia w funkcji zmiennej  $x_1$ , czyli tzw. „czasę ugięć” w wybranych chwilach.

Analiza wykresów zamieszczonych na rys. 6 pozwala zauważyć, że we wszystkich wybranych chwilach minimalne przemieszczenie jest co do wartości bezwzględnej większe dla wariantów bez zespolenia niż w zadaniu z zespoleniem. Oznacza to, że jeżeli analizujemy przy pomocy badania FWD jednolity odcinek drogi otrzymując odczyty na minimalne przemieszczenie, to gwałtowny jego wzrost co do wartości bezwzględnej może oznaczać brak zespolenia warstw. Z drugiej strony wzrost co do wartości bezwzględnej ugięcia może świadczyć również o tym, że materiał z którego wykonano dany odcinek nawierzchni ma niższy moduł Younga, a warstwy są prawidłowo zespolone. Wobec tego w analizowanym zadaniu zmienmy moduł sprężystości materiału tak, żeby ekstremalne ugięcie wynosiło tyle, co dla zadania kontaktowego przy  $f=0$ . Moduł Younga np. z rozwiązania statycznego [7] można wtedy oszacować jako równy  $E_0=17.8308$  [GPa] (równoważny moduł Younga). Po rozwiązaniu takiego zadania (tj. zadania z zespolonymi warstwami o niższym module

Younga) można sporządzić wykres ugięcia pionowego w funkcji czasu, por. rys. 7. Z rys. 7 wynika, że bardzo trudne, a nawet niemożliwe jest odróżnienie braku zespolenia warstw od sytuacji, w której zespolone warstwy mają niższy moduł Younga, jedynie na podstawie analizy funkcji ugięcia w węźle n1.



**Rys. 6.** Wykresy składowej pionowej przemieszczenia w funkcji zmiennej  $x_1$  w wybranych chwilach a) 1.01005, b) 1.015, c) 1.03255 i d) 1.04 [s], odpowiadające poszczególnym wariantom zadania



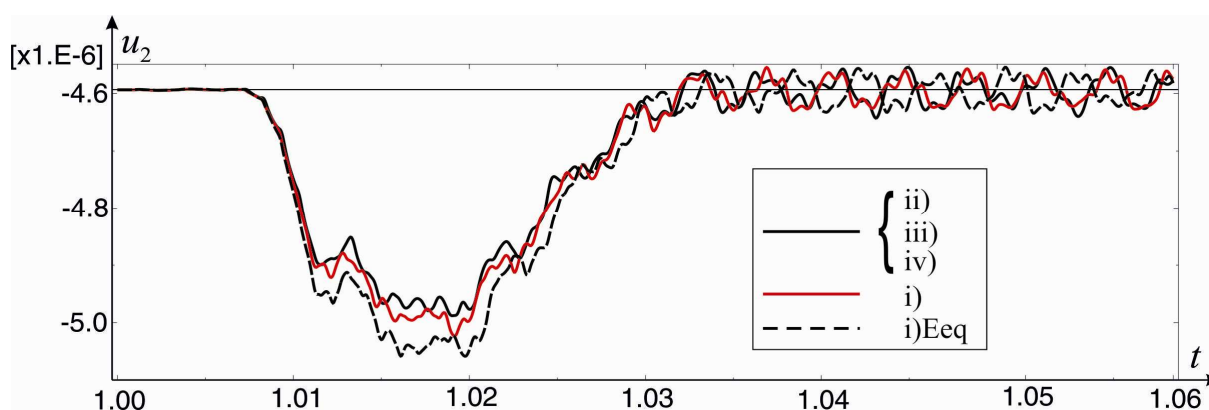
**Rys. 7.** Przesunięcie pionowe w węźle n1 (w [m]) w funkcji czasu (kroku drugiego) dla poszczególnych wariantów zadania (w tym dla zadania z zespolonymi warstwami i tzw. równoważnym modułem Younga)

Analizując dalej rozwiązanie, na podstawie oceny przebiegów czasowych funkcji ugięcia pionowego np. w węźle n130 (tj. węźle, który leży w istotnej odległości od miejsca realizacji naprężeniowych warunków brzegowych) można zaproponować następujący sposób postępowania przy rozpoznawaniu braku zespolenia warstw:

- 1) czy w analizowanym przypadku  $|\min(u_2(0,t))| > |u_2^{A-por}|$ ?
- 2) a) tak → idź do punktu iii),  
b) nie → warstwy zespolone (albo brak zespolenia a moduł ma wyższą wartość\*),
- 3) w wybranym punkcie, który leży w istotnej odległości od miejsca realizacji naprężeniowych warunków brzegowych, sprawdź, czy zachodzi warunek  $|\min(u_2(x_1^F, t))| < |u_2^{F-por}|$ ?
- 4) a) tak → idź do punktu v),  
b) nie → idź do punktu vi),
- 5) brak zespolenia,
- 6) warstwy zespolone, ale o mniejszym module Younga.

\*- ten przypadek nie był analizowany

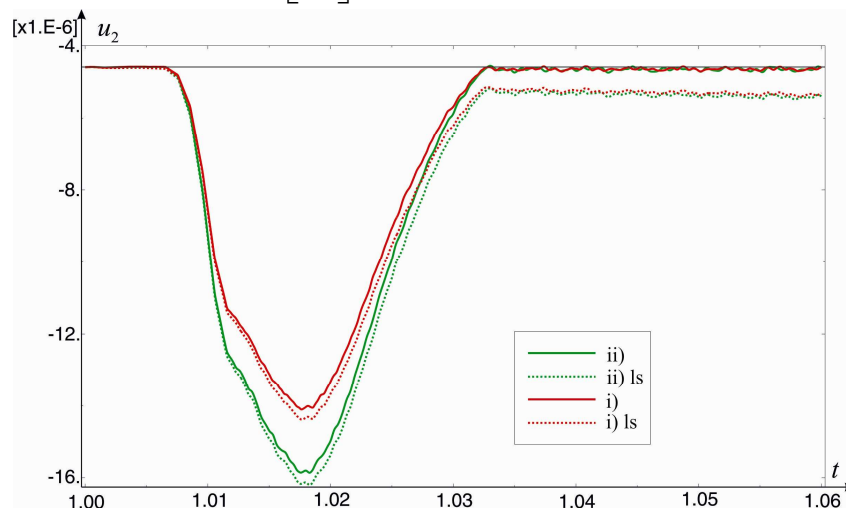
W powyższym algorytmie  $u_2^{A-por}$  i  $u_2^{F-por}$  stanowią wielkości porównawcze przemieszczeń, zmierzone na wcześniejszym odcinku drogi odpowiednio w punkcie A i wybranym punkcie  $F_n$ . Wyjaśnienie sposobu postępowania stanowi rys. 8, na którym można zauważyć że minimalna wartość ugięcia pionowego w węźle n130 w przypadku braku zespolenia jest co do wartości bezwzględnej mniejsza od tej wartości w przypadku zadania z zespolonymi warstwami i tym samym modulem Younga. W przypadku zadania z zespolonymi warstwami i niższym modulem Younga, minimalna wartość przemieszczenia pionowego co do wartości bezwzględnej w węźle n130 jest zdecydowanie większa od dwóch pozostałych.



**Rys. 8.** Przemieszczenie pionowe w węźle n130 (w [m]) w funkcji czasu (kroku drugiego) dla poszczególnych wariantów zadania (w tym dla zadania z zespolonymi warstwami i tzw. równoważnym modulem Younga)

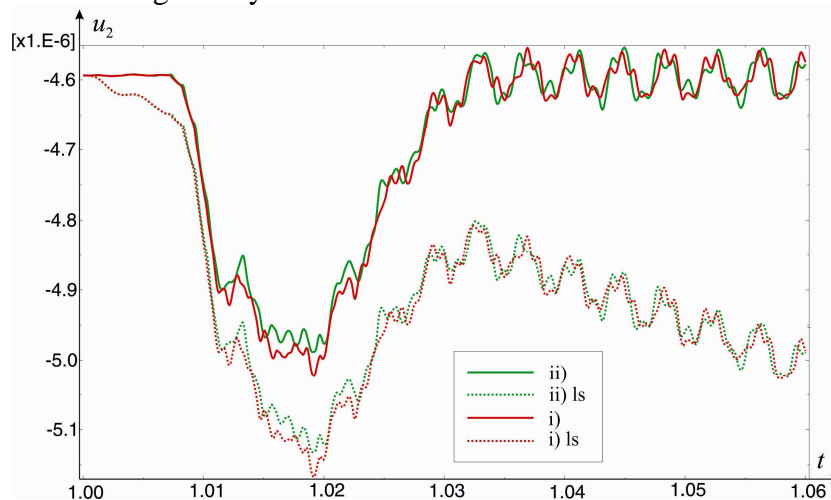
## 2.2. Zadanie lepko-sprężystości

W przypadku materiałów lepko-sprężystych rozwiązano tylko dwa warianty zadania, tj. zadanie z warstwami zespolonymi i zadanie kontaktowe z zerowym współczynnikiem tarcia. Dane materiałowe do zadania zamieszczono w pkt. 2.1. Dane tam zaprezentowane dotyczące relaksacji wyznaczono na podstawie badań doświadczalnych dla typowego betonu asfaltowego w temperaturze  $T = 20[^\circ\text{C}]$ .



**Rys. 9.** Przemieszczenie pionowe w węźle n1 (w [m]) w funkcji czasu (kroku drugiego) dla poszczególnych wariantów zadania (linie przerywane dotyczą wariantu z relacjami konstytutywnymi lepko-sprężystości)

Na rys. 9 i 10 zamieszczono wykresy przemieszczenia pionowego w funkcji czasu w przypadku analizowanych wariantów zadania (tj. zadanie z warstwami zespolonymi i zadanie kontaktowe z zerowym współczynnikiem tarcia) dla sprężystości i lepko-sprężystości. Na podstawie tych wykresów można stwierdzić, że wnioski wyciągnięte w przypadku sprężystości można przenieść na sytuację, w której materiał jest lepko-sprężysty. Należy jednak zauważyć, że w przypadku lepko-sprężystości po przekroczeniu czasu  $t = 1.03$  [s] przemieszczenie pionowe oscyluje wokół pewnej funkcji, którą można określić jako malejącą. Kolejne obliczenia i analizy wykazały, że minimum dla czasu około  $t = 1.02$  [s] jest minimum globalnym.



**Rys. 10.** Przemieszczenie pionowe w węźle n130 (w [m]) w funkcji czasu (kroku drugiego) dla poszczególnych wariantów zadania (linie przerywane dotyczą wariantu z relacjami konstytutywnymi lepko-sprężystości)



### 3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Artykuł dotyczy zagadnienia interpretacji wyników testu FWD. Na podstawie przeprowadzonej analizy można sformułować następujące wnioski:

- a) Na podstawie funkcji przemieszczenia pionowego w osi obciążenia można wykryć brak zespolenia tylko wtedy, gdy mamy pewność odnośnie do wartości modułów sztywności dla analizowanej lokalizacji badania FWD.
- b) Gdy nie ma pewności co do wartości modułów sztywności warstw w danej lokalizacji, brak zespolenia może być pomyłony z sytuacją, w której warstwy są połączone, ale moduł sztywności jest znacznie niższy niż w innych lokalizacjach (w analizowanym przypadku niższy o około 12%).
- c) Możliwa jest detekcja braku zespolenia, jeżeli oprócz analizy odpowiedzi w punkcie na osi obciążenia, poddana analizie zostanie także odpowiedź nawierzchni w pewnej istotnej odległości od tej osi – patrz algorytm podany w punkcie 2.1.
- d) Do detekcji braku zespolenia przydatna może być także analiza składowej pionowej przyspieszenia, por. rys. 4 i wnioski pod nim zamieszczone.

## ANALYSIS OF DETECTION ABILITY OF THE LACK OF BOUNDING OF ASPHALT LAYERS USING FWD

### *Abstract*

*The paper presents a numerical analysis of FWD test (Falling Weight Deflectometer) as a dynamic task of elasticity and visco-elasticity with the assumption of axial symmetry. The analysis was carried out using ABAQUS FEM software to evaluate the ability to recognize the lack of bounding between the different layers based on the nature of the displacement function at selected points on the surface of the pavement layer structure. The ability to recognize this type of damage by structural response analysis is important in the design and maintenance diagnosis of road structures.*

### BIBLIOGRAFIA

1. *ABAQUS Theory manual*, V. 5.8., Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, 1998.
2. *ABAQUS/Standard User's manual*, Version 5.8., Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, 1998.
3. *ABAQUS/Standard Verification manual*, Version 5.8., Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, 1998.
4. Benedetto A., Tosti F., Di Domenico L.: Elliptic model for prediction of deflections induced by a Light Falling Weight Deflectometer. *Journal of Terramechanics*, 49, 1–12, 2012.
5. Graczyk M.: Nośność konstrukcji nawierzchni wielowarstwowych w krajowych warunkach klimatycznych, *Studia i materiały*, z. 63, IBDiM, Warszawa 2010.
6. Lysmer J., Kuhlemeyer R., L.: *Finite dynamic model for infinite media*. *Journal of the Engineering Mechanics Division of the ASCE*, 859-877, 1969.
7. Nowacki W.: *Teoria sprężystości*. PWN, Warszawa 1970.
8. Picoux B., El Ayadi A., Petit C.: Dynamic response of a flexible pavement submitted by impulsive loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 845–854, 2009.

9. Seo J.-W., Kim S.-I., Choi J.-S., Park D.-W.: Evaluation of layer properties of flexible pavement using a pseudo-static analysis procedure of Falling Weight Deflectometer. *Construction and Building Materials* 23, 3206–3213, 2009.
10. Szwed A., Jemioło S., Analiza pól przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia w sprężystej warstwie połączonej z półprzestrzenią, *Theoretical Foundations of Civil Engineering, Polish-Ukrainian-Lithuanian Transactions*, W. Szcześniak [ed], str. 663-670, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2007.
11. Zienkiewicz O. C., Emson C., Bettess P.: *A novel boundary infinite element*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 19, 393-404, 1983.

***Autorzy:***

**dr inż. Marcin GAJEWSKI** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej,  
Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie

**prof. dr. hab. inż. Stanisław JEMIOŁO** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii  
Lądowej