ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1999
Seria: TRANSPORT z.38 Nr kol. 1433

Jerzy PAWLICKI
Jan MANDULA

KONTROLA PARAMETRÓW JAKOŚCIOWYCH NAWIERZCHNI DROGOWYCH METODĄ PRĘDKOŚCI FAZOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób sprawdzania oraz wyniki obliczeń parametrów jakościowych nietradycyjnej nawierzchni drogowej metodą dynamiczną. Spośród licznych modeli opisujących właściwości mechaniczne i kinetyczne nawierzchni można wyodrębnić trzy zasadnicze grupy: modele dynamiczne, modele wykorzystujące teorię pełzania i konsolidacji oraz teorię sprężystości.

CONTROL OF ROAD SURFACES QUALITY PARAMETERS WITH PHASE VELOCITIES METHOD

Summary. The models characterizing mechanic and kinetic properties of the road can be divide into three main groups: using the resilience theory, the crawl and consolidation theory and the dynamic models. In the article there is described way of calculation and checking up the quality parameters of non-traditional road surface with the dynamic method.

1. WSTĘP

Metoda prędkości fazowych należy do nieniszczących metod kontroli jakości nawierzchni drogowych, w której rejestruje się prędkość rozprzestrzeniania fal harmonicznych. Prędkości fazowe fal określa się na podstawie parametru przesunięcia fazy pomiędzy drganiami wygenerowanymi przez środek wzbudzający, który wysyła fale sinusoidalne o znanej częstotliwości f do konstrukcji nawierzchni, a drganiami odbiornika umieszczonego w ustalonej odległości.

$$c = f \cdot \lambda \,, \tag{1}$$

gdzie λ - długość fali obliczona z pomiaru przesunięcia fazowego.

Ten sposób oceny przydatności użytkowej nawierzchni znajduje zastosowanie zarówno po ukończeniu budowy, jak też w trakcie układania poszczególnych warstw. Bada się więc jakość i własności:

a) wykonanych nawierzchni sztywnych, półsztywnych, podatnych oraz podłoża gruntowego,

b) warstw podczas ich układania,

c) wybranych warstw po zakończeniu procesu budowy,

d) budowli ziemnej.

Kontroli i obserwacjom poddawane są głównie :

- równość nawierzchni,
- przygotowanie i dobór składu mieszanki i materiałów nawierzchniowych,
- dotrzymanie warunku grubości,
- zmiany nośności górnych warstw, spowodowane obciążeniem ruchem i warunkami atmosferycznymi,
- zmiany sztywności pokrycia jezdni wynikające z czasu eksploatacji,
- stan warstw podbudowy,
- jakość podłoża i jego zagęszczenie.

2. METODA PRĘDKOŚCI FAZOWYCH

Parametrami diagnozy stanu nawierzchni są między innymi:

a) E_{df} - dynamiczny moduł sprężystości przy rozciąganiu i ściskaniu,

b) G_{df} - dynamiczny moduł sprężystości przy ścinaniu,

c) h_{ekw} - ekwiwalentna grubość warstwy,

d) $E_{df}J$ - dynamiczna sztywność na zginanie,

e) w_o - ugięcie nawierzchni od pionowego normowego obciążenia na krążku.

W jednorodnej, izotropowej oraz idealnie sprężystej przestrzeni mogą się rozchodzić fale dylatacyjne i ścinające. Rozprzestrzeniają się bez dyspersji, to znaczy, że ich prędkość nie zależy od częstotliwości f lub od długości fali λ.

Prędkość fal dylatacyjnych oblicza się ze wzoru:

$$c_1 = \sqrt{\frac{E_{df}(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1+2\nu)}}, \tag{2}$$

gdzie: ρ - masa objętościowa materiału

ν - współczynnik Poissona.

Prędkość fal podłużnych wynosi:

$$c_0 = \sqrt{\frac{E_{df}}{\rho}}, \tag{3}$$

a w płycie

$$c_3 = \sqrt{\frac{E_{df}}{\rho(1-\nu)^2}} \tag{4}$$

Ruch cząstek materiału przy rozchodzeniu się fal ścinających jest prostopadły do kierunku posuwania się fali. Prędkość tych fal otrzymuje się ze wzoru:

$$c_2 = \sqrt{\frac{G_{df}}{\rho}} \tag{5}$$

Prędkość rozchodzenia się fal Rayleigha w izotropowej, jednorodnej i doskonale sprężystej półprzestrzeni oblicza się z równania (1).

$$\kappa^6 - 8\kappa^4 - (24 - 16\alpha^2)\kappa^2 + (16\alpha^2 - 16) = 0, \tag{6}$$

przy czym

$$\kappa = \frac{c_R}{c_2} \tag{7}$$

i

$$\alpha^2 = \frac{c_1^2}{c_2^2} = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \tag{8}$$

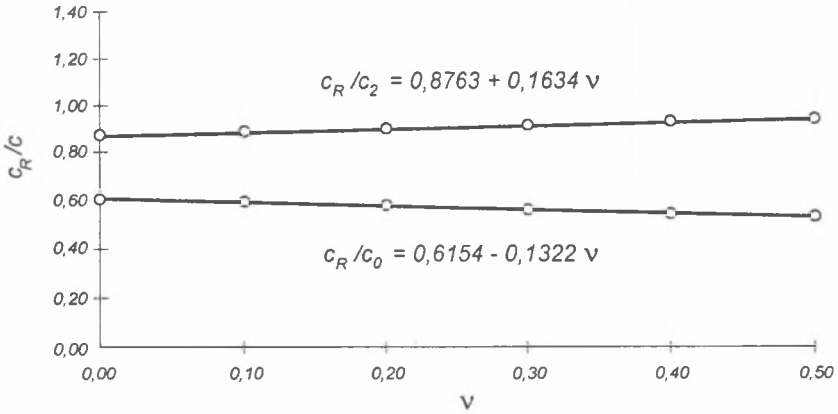
Przy aplikacji metody prędkości fazowych w konstrukcjach nawierzchni w warunkach wysokich częstotliwości i gdy długość fali jest mała w stosunku do grubości wierzchniej warstwy, można zmierzyć prędkości rozchodzenia się fal, odpowiadające prędkościom powierzchniowym fal w warstwie wierzchniej. Wtedy można zastosować równanie (6). Rozwiązanie stanowią wartości stosunków prędkości c_R/c_2 i c_R/c_0.

Ich przebieg w funkcji współczynnika Poissona pokazano na rys. 1.

Wartości stosunków oblicza się z zależności:

$$\frac{c_R}{c_2} = 0{,}8763 + 0{,}1634\,\nu \tag{9}$$

$$\frac{c_R}{c_0} = 0{,}6154 - 0{,}1322\,\nu \tag{10}$$



Rys. 1. Wartości stosunków prędkości fal powierzchniowych
Fig. 1. Proportion values of speed of surface waves

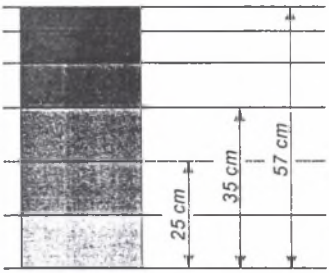
3. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA METODY DO OBLICZENIA PARAMETRÓW WARSTWY STABILIZOWANEJ CEMENTEM

Mieszankę warstwy podbudowy z kruszywa stabilizowanego cementem nawierzchni drogi 1/18 (rys. 2) ułożono w dwóch 10 cm warstwach. Maksymalną masę objętościową ρ = 1990 kg/m^3 osiągnięto przy 6% zawartości cementu B-S32,5R oraz optymalnej wilgotności w_{OPT} = 11,1%.

Wytrzymałość na ściskanie badano w laboratorium zawsze na trzech próbkach metodą destrukcyjną w wilgotnym środowisku. Po 7 dniach dojrzewania osiągnięto średnią wartość 2,3 MPa, natomiast po 28 dniach i 10 cyklach zamrażania próbki wykazywały średnią wytrzymałość 3,1 MPa (odpowiada wartościom SC II).

W tej sprężystej warstwie podbudowy mogą rozchodzić się zarówno fale podłużne, jak też fale zginające. Kształt krzywych dyspersji prędkości fazowych fal c zależy od stosunku grubości płyty h do długości fali λ. Teoretyczny przebieg krzywych dyspersji prędkości w podbudowie dla współczynnika Poissona λ = 0,22 przedstawia rys.3 (por.tabl.1).

Podstawowa gałąź prędkości fazowych fal podłużnych wychodzi z prędkości rozprzestrzeniania się tych fal w płycie c_3 przy znacznych długościach fal λ.



ABS II	5 cm	Beton asfaltowy
ABS III	6 cm	Beton asfaltowy
OK II	11 cm	Kryszywo otoczone asfaltem
SC II	20 cm	Stabilizacja cementem zużla wielkopiecowego
ŠP	15 cm	Żużel wielkopiecowy (VPT VSŽ)
$\sum$	57 cm	

Rys. 2. Konstrukcja badanej nawierzchni
Fig. 2. Constructions of investigated road surface

Wraz ze skracaniem długości fali prędkość fazowa ulega zmniejszeniu, a przy małych wartościach λ zbliża się do wartości c_R – prędkości fal Rayleigha.

Podstawowa gałąź prędkości fazowych fal naprężenia zginającego w płycie posiada przy znacznych długościach fal wartość równą zero. Ze wzrostem stosunku h/λ prędkości fazowe fal zginających rosną, by przy małych długościach zbliżyć się do poziomu prędkości fal powierzchniowych c_R.

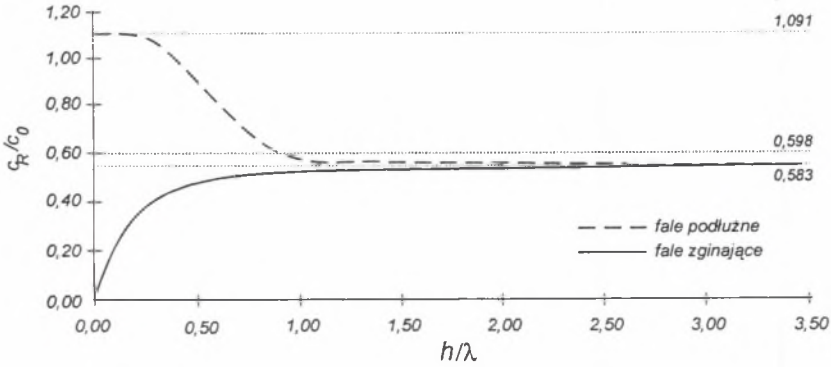
Tablica 1

Wartości teoretycznych stosunków prędkości

ν	c_R/c_0	c_2/c_0	c_3/c_0
0,22	0,586	0,640	1.025

Źródło: [2]

Diagnozowaną warstwę podbudowy (żużel wielkopiecowy stabilizowany cementem) układano w dwóch podwarstwach o grubości 10 cm każda. Wyniki zaprezentowane w tablicach 2 i 3 odnoszą się odpowiednio do częściowo i całościowo wykonanej konstrukcji. Obserwacje przeprowadzono 15 dni po ułożeniu dolnej i 8 dni – górnej podwarstwy na trzech wybranych odcinkach drogi. Jednorodność stabilizowanej spoiwem hydraulicznym masy oraz jakość jej wbudowania w nawierzchnię opisują zmierzona długość fali λ lub prędkość rozprzestrzeniania się fali c, które wraz z grubością, ale również z powodu starzenia się stabilizowanego materiału wzrastają.



Rys. 3. Krzywe dyspersji prędkości fazowych fal
Fig. 3. Curves of the phase velocities dispersion of the waves

Tablica 2
Wyniki pomiarów warstwy (10 cm)

Częstotliwość	λ	c
[Hz]	*[m]*	$[m \cdot s^{-1}]$
5000	0,139	695
1000	0,463	463
500	0,713	357
300	0,896	269
200	1,218	244

Źródło: [2]

Tablica 3
Wyniki pomiarów warstwy (20 cm)

Częstotliwość	λ	c
[Hz]	*[m]*	$[m \cdot s^{-1}]$
5000	0,172	860
1000	0,671	671
500	1,002	501
300	1,298	389
200	1,669	334

Źródło: [2]

Korzystając z danych zamieszczonych w tablicach 2 i 3 określono wartości prędkości fal powierzchniowych c_R, następnie prędkości fal podłużnych c_0 i c_2, a przy znanej masie objętościowej warstwy łatwo można było ustalić moduły E_{df} i G_{df} (tabl. 4).

Tablica 4
Wybrane parametry warstwy podbudowy nawierzchni

Grubość warstwy	c_R	c_0	c_2	c_3	E_{df}	G_{df}
[cm]	$[m \cdot s^{-1}]$	$[m \cdot s^{-1}]$	$[m \cdot s^{-1}]$	$[m \cdot s^{-1}]$	*[MPa]*	*[MPa]*
10	834	1424	912	1460	4037	1655
20	925	1578	1010	1617	4951	2031

Źródło: [2]

4. PODSUMOWANIE

Z porównania tablic 2 i 3 wynika, że prędkość rozchodzenia się fal c przy wszystkich częstotliwościach wzrosła w warstwie grubszej. Ze wzrostem grubości i wieku badanego składnika konstrukcji rosną prędkości c_r, c_0, c_2 i c_3, co odzwierciedla przyrost modułu dynamicznego E_{df} i G_{df}.

Wprawdzie zastosowana metoda prędkości fazowych nie może zastąpić statycznej metody obciążeniowej, dostarcza ona jednak wiele informacji o własnościach materiałów nawierzchni, sztywności i jakości. Umożliwia ponadto obserwacje zmian jakościowych w warstwach konstrukcyjnych zbudowanych z materiału nietradycyjnego, jakim jest żużel wielkopiecowy.

Literatura

1. Martinček G.: Dynamická diagnostika vozoviek. Vydavatelstvo SAVVEDA, Bratislava 1983.
2. Mandula J.: Kontrola kvalitativnych parametrov vozovky metodon fázových rýchlosti. Materiały Konferencyjne seminarium nt. „Kvalita, normy a technické predpisy v cestnom stavitel'stve", Žilinska univerzita, Žilina, 4-5 luty 1999, s. 132 – 138

Recenzent: Doc. dr inż. Zbigniew Ginalski

Wpłynęło do Redakcji 15.10.1999 r.

Abstract

The models characterizing mechanic and kinetic properties of the road can be divide into three main groups: using the resilience theory, the crawl and consolidation theory and the dynamic models. In the article there is described way of calculation and checking up the quality parameters of non-traditional road surface with the dynamic method.

The paper deals with the results of long-term observation of the road construction of highway connection in Košice on the road I/68. The reason for the observation of this

construction was the usage blast-furnace slag from the Eastern Slovak Iron-Works (VSŽ Košice). The slag was used in protection and filtration layers (faction 0-32) and cemented bottom layer (faction 0-16). Diagnostics of individual construction layers and pavement as a whole was carried out by dynamic non-destructive method of phase velocities.