

WYBRANE ZAGADNIENIA DYNAMIKI NAWIERZCHNI DROGOWEJ PODATNEJ. ZASTOSOWANIE MES PRZY WYKORZYSTANIU PROGRAMU ABAQUS

Streszczenie

Podstawowym celem pracy jest budowa modelu numerycznego nawierzchni drogowej służącego do analizy dynamicznej wraz z jego walidacją i analizą czynników mających wpływ na poprawność wyników. Dodatkowo celem jest zbadanie wpływu efektów dynamicznych na ugięcia i kluczowe odkształcenia przy wymiarowaniu nawierzchni w porównaniu z wynikami analizy statycznej MES i wynikami obliczeń za pomocą programu VEROAD (przy wykorzystaniu metod analitycznych). Do wyznaczenia stanu przemieszczeń i odkształceń został użyty program ABAQUS/Explicit. Zastosowano model trójwymiarowy MES, tj. przyjęto obszar 3D modelowany elementami skończonymi, dokonano wyznaczenia rozmiarów tego obszaru wraz z odpowiednimi warunkami brzegowymi. Zamodelowano dwie drogowe konstrukcje nawierzchni, o liniowo-sprężystych własnościach materiałowych. Wpływ lepko-sprężystości warstw asfaltowych został uwzględniony przez przyjęcie modułów dynamicznych sztywności jako modułów sprężystości. W obliczeniach uwzględniono dwie prędkości obciążenia odpowiadające ruchowi pojazdów ciężkich – małą prędkość 5 km/h i typową 60 km/h. Wykazano, że przy przyjętych założeniach i danych wpływ efektów dynamicznych w porównaniu do modeli statycznych jest praktycznie pomijalnie mały.

WSTĘP

Poprawne projektowanie dróg kołowych ma niezwykle istotne znaczenie dla współczesnego życia społecznego i gospodarczego. W wyniku nieustającego wzrostu natężenia ruchu oraz rozwoju środków transportu inżynierowie stoją przed poważnym zadaniem – jeszcze bardziej precyzyjnego określania (prognozowania) trwałości dróg. Jednocześnie dynamiczny rozwój metod numerycznych i mocy obliczeniowej komputerów, pozwala na tworzenie bardziej kompleksowych modeli zjawisk fizycznych, uwzględniających czynniki wcześniej z konieczności pomijane. Powszechnie stosowana analiza nawierzchni drogowej podatnej przy założeniu obciążenia statycznego lub quasi-statycznego od pojazdu jest pewnym przybliżeniem, przypadkiem szczególnym, który należy uzupełnić o pełną analizę dynamiczną, wraz z porównaniem otrzymywanych wyników.

Podstawowym celem niniejszej pracy było zbudowanie modelu numerycznego nawierzchni drogowej służącego do analizy dynamicznej przy obciążeniu (stałym lub zmiennym w czasie) ruchomym kołem pojazdu o stałej prędkości, określenie najważniejszych czynników mających wpływ na dokładność otrzymywanych wyników oraz walidacja modelu. Rezultaty obliczeń z uwzględnieniem efektów dynamicznych dla obciążeń o stałej wielkości w czasie, ale ruchomych, zostały porównane z wynikami obliczeń statycznych, uwzględniając:

- wpływ „tylko” efektów dynamicznych, tj. wpływ sił bezwładności w modelu sprężystym nawierzchni,
- uwzględniając lepko-sprężyste właściwości materiałów warstw asfaltowych nawierzchni w wartościach efektywnych parametrów materiałowych tych warstw w modelu sprężystym oraz wpływ sił bezwładności.

Otrzymane wyniki obliczeń w przypadku obciążeń traktowanych jako statyczne zostały porównane z wynikami z programu VEROAD [1], które można traktować jako ściśle [2].

Celem szczegółowym praktycznym analizy nawierzchni w powyższym zakresie było pokazanie, że efekty dynamiczne przy małej i typowej stałej prędkości obciążenia nawierzchni oraz niezmienniej

lub stosunkowo nieznacznie zmiennej w czasie wartości tego obciążenia są niewielkie, co dodatkowo uzasadnia stosowanie statycznych i quasi-statycznych modeli obliczeniowych przy projektowaniu nawierzchni podatnych.

Podstawowym modelem mechanicznym nawierzchni drogowej przyjmowanym w procesie projektowania (wymiarowania) nawierzchni podatnych dróg jest wielowarstwowa półprzestrzeń sprężysta [7]. Kryteriami trwałości uwzględnianymi przy projektowaniu nawierzchni drogowej są: kryterium (zmęczeniowe) ze względu na spękania odbite i kryterium ze względu na deformacje podłoża przy obciążeniu cyklicznym [6]. Do ich zastosowania niezbędne są wartości maksymalne odpowiednio odkształcenia rozciągającego na spodzie warstwy asfaltowej, w której powstają spękania zmęczeniowe oraz odkształcenia ściskającego na powierzchni podłoża gruntowego. Wymienione kryteria określają liczbę osi obliczeniowych (tzw. trwałość obliczeniową), których przejazd powoduje zniszczenie nawierzchni. Opiswane są one, między innymi, wzorami empirycznymi według Instytutu Asfaltowego [6].

1. MODEL MECHANICZNY NAWIERZCHNI DROGOWEJ

Jako model mechaniczny wyjściowy nawierzchni drogowej przyjmujemy warstwową półprzestrzeń sprężystą. W najczęściej rozważanym przypadku zakłada się liniowo-sprężystą charakterystykę materiałową poszczególnych warstw nawierzchni (model materiału Hooke'a) [5]. Ze względu na lepko-sprężyste właściwości materiałów warstw asfaltowych uzasadnione jest przyjęcie jako modułów sprężystości mieszanek mineralno-asfaltowych modułów dynamicznych sztywności dla częstotliwości odpowiadającej charakterystycznej prędkości pojazdów drogowych [4].

Rozważano dwa modele konstrukcji nawierzchni drogowej. Warstwy w tych modelach założono jako jednorodne i izotropowe, o stałej grubości. Modelują one „fizyczne” (realne) warstwy nawierzchni drogowej (ostatnia warstwa – półprzestrzeń liniowo-sprężysta – modeluje podłoże gruntowe). Przyjęto pełną ciągłość

przemieszczeń na wspólnych powierzchniach warstw materiałowych – fizycznie oznacza to ich pełną szepność.

W pracy założono pionowe obciążenie nawierzchni drogowej. Według Rozporządzenia [7] dla standardowego pojazdu nacisk na oś obliczeniową wynosi 100 kN, co odpowiada naciskowi $P = 50$ kN pojedynczego koła pojazdu. Przyjęto równomierny rozkład nacisku opony na nawierzchnię o intensywności równej p , wynikającej w przybliżeniu z ciśnienia w oponie, przy założeniu kołowej powierzchni oddziaływania koła pojazdu na nawierzchnię [5]. Założenie o równomiernym oddziaływaniu opony na nawierzchnię oraz o kołowej powierzchni tego oddziaływania jest powszechnie przyjmowane, choć przybliżone.

W pracy rozpatrzono dwie wartości prędkości u obciążenia nawierzchni, reprezentujące ruch pojazdów o typowej i małej prędkości. Prędkości te odpowiadają (według [3], [4]) częstotliwościom f cyklu obciążenia przy określaniu modułów dynamicznych sztywności materiału $E = |E^*|$ w zespolonym prawie Hooke'a:

$$\sigma^* = E^* \varepsilon^* \quad (1)$$

przy

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{i\omega t}, \quad \varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)}, \quad E^* = E e^{i\varphi}, \quad \omega = 2\pi f \quad (2)$$

Dodatkowo w celu walidacji modelu przeprowadzono obliczenia statyczne dla $u = 0$ km/h.

1.1. Pierwszy model nawierzchni drogowej

Model pierwszy nawierzchni oznaczono symbolem M1. Zestawienie warstw nawierzchni i jej parametrów zawarto w tabeli 1. Dane parametrów materiałowych tego modelu pochodzą z pracy [5].

Tab. 1. Dane geometryczne i materiałowe dla poszczególnych warstw materiałowych nawierzchni – model M1

Lp.	Nazwa materiału	Moduł Younga [MPa]	Współczynnik Poissona [-]	Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Grubość warstwy [cm]
1	Warstwa ścierna z SMA	9800	0,3	2565	4
2	Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego	11500	0,3	2615	6
3	Podbudowa z betonu asfaltowego	10900	0,3	2623	12
4	Podbudowa z kruszywa łamanego niezwiązanego	400	0,3	2250	20
5	Podłoże ulepszone (grunt stabilizowany cementem)	300	0,3	2050	15
6	Podłoże gruntowe rodzime	100	0,35	1800	∞

W modelu M1 założono intensywność obciążenia $p = 650$ kPa [5]. Przyjęto niezależne od prędkości obciążenia moduły sprężystości. Model M1 wykorzystywano głównie do walidacji modelu obliczeniowego nawierzchni.

1.2. Drugi model nawierzchni drogowej

W drugim modelu nawierzchni, oznaczonym symbolem M2, jako moduły sprężystości warstw asfaltowych przyjęto zależne od częstotliwości obciążenia, a tym samym od prędkości pojazdu na

nawierzchni, moduły dynamiczne sztywności [5]. Założono następujące zależności częstotliwości f od prędkości koła u (według [4], [5]): dla $u = 5$ km/h – $f = 1,0$ Hz; dla $u = 60$ km/h – $f = 10,0$ Hz.

Wartości modułów sprężystości warstw asfaltowych wyznaczone dla temperatury 10°C. Poszczególne wartości podano w tabelach 2 i 3. Dane pochodzą z pracy [4].

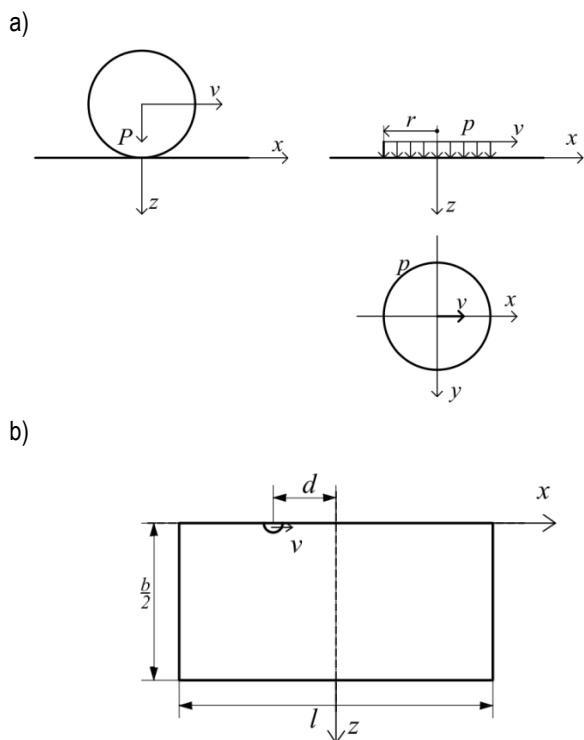
Tab. 2. Dane geometryczne i materiałowe warstw nawierzchni – model M2, $u = 60$ km/h

Lp.	Nazwa materiału	Moduł Younga [MPa]	Współczynnik Poissona [-]	Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Grubość warstwy [cm]
1	Warstwa ścierna z SMA	9837	0,3	2565	4
2	Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego	13818	0,3	2615	8
3	Podbudowa z betonu asfaltowego	12956	0,3	2623	19
4	Podbudowa z kruszywa łamanego niezwiązanego	400	0,3	2250	20
5	Podłoże ulepszone (grunt stabilizowany cementem)	300	0,3	2050	15
6	Podłoże gruntowe rodzime	100	0,35	1800	∞

Tab. 3. Dane geometryczne i materiałowe warstw nawierzchni – model M2, $u = 5$ km/h

Lp.	Nazwa materiału	Moduł Younga [MPa]	Współczynnik Poissona [-]	Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Grubość warstwy [cm]
1	Warstwa ścierna z SMA	5467	0,3	2565	4
2	Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego	10596	0,3	2615	8
3	Podbudowa z betonu asfaltowego	9561	0,3	2623	19
4	Podbudowa z kruszywa łamanego niezwiązanego	400	0,3	2250	20
5	Podłoże ulepszone (grunt stabilizowany cementem)	300	0,3	2050	15
6	Podłoże gruntowe rodzime	100	0,35	1800	∞

W modelu M2 założono intensywność obciążenia $p = 850$ kPa [4]. Schemat obciążenia nawierzchni drogowej przedstawiony jest na rysunku 1.



Rys. 1. a) Schemat obciążenia nawierzchni w modelu wyjściowym
b) Schemat obciążenia nawierzchni w modelu obliczeniowym

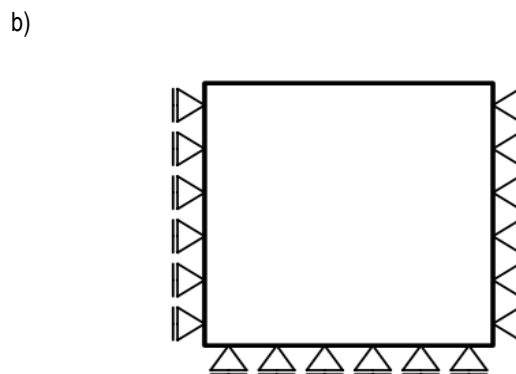
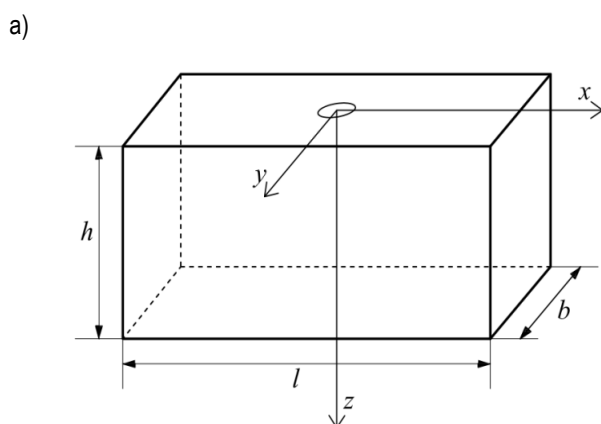
2. BUDOWA MODELI OBLICZENIOWYCH ORAZ ICH WALIDACJA

W celu zbudowania poprawnego modelu skończenie elementowego należy rozpatrzyć następujące zagadnienia:

- dobór rozmiarów obszaru półprzestrzeni warstwowej, który ma być zamodelowany elementami skończonymi wraz z warunkami brzegowymi,
- dobór sposobu przyłożenia obciążenia, tj. przyrostu wartości obciążenia w czasie do chwili osiągnięcia wartości docelowej oraz początkowego miejsca przyłożenia tego obciążenia,
- ustalenie siatki podziału na elementy skończone przyjętego obszaru i doboru typu elementów.

Wszystkie przedstawione w tym rozdziale testy służące walidacji modelu zostały przeprowadzone w odniesieniu do modelu M1.

W rozpatrywanym modelu obliczeniowym półprzestrzeń sprężysta została zamodelowana jako prostopadłościan o wymiarach $l \times b \times h$ (rys. 2a). W obliczeniach wykorzystano symetrię zadania względem płaszczyzny xz – rozpatrzono połowę założonego obszaru prostopadłościennego półprzestrzeni sprężystej. Przyjęto warunki brzegowe jak na rysunku 2b.



Rys. 2. a) Obszar modelu skończenie elementowego b) Warunki brzegowe na granicy rozważanego obszaru

Istotnym zagadnieniem jest także przyjęcie rozmiarów oraz warunków brzegowych dla rozważanego obszaru prostopadłościennego modelu obliczeniowego, by otrzymać poprawny wynik przemieszczeń jak w ośrodku półprzestrzennym (nieograniczonym). Dla modelu nawierzchni drogowej, z warunkami brzegowymi przedstawionymi na rysunku 2b, dla ustalonych wymiarów $l \times b$, zależność między ugięciem maksymalnym w_z , a wysokością h jest liniowa [4]. Pozwala to wyznaczyć wielkość h , dla której wartość przemieszczenia jest zgodna z rozwiązaniem quasi-analitycznym uzyskanym dla półprzestrzeni wielowarstwowej z programu VEROAD. W ramach walidacji modelu skończenie elementowego wyznaczono wartość

graniczną tej wysokości $h_d = 1,6758 \sqrt{b l}$. Kolejnym zagadnieniem dotyczącym doboru obszaru modelowania skończenie elementowego warstwowej półprzestrzeni sprężystej jest przyjęcie rozmiarów podstawy prostopadłościenu $l \times b$. W rozważaniach tych punktem wyjścia mogą być wyniki otrzymane dla modeli statycznych [5]. Wielkość $l \times b$ musi być na tyle duża, aby warunki brzegowe na ścianach bocznych nie miały wpływu na przemieszczenia pionowe ośrodka na odcinku przejazdu obciążenia. Dla rozpatrywanego modelu dokonano obliczeń dla kilku wymiarów $l \times b$ przy $h = h_d$ wyznaczonym zgodnie z opisaną procedurą. Dla $l = b = 10$ m uzyskano wynik ugięcia równy 0,241 mm identyczny z wynikiem z programu VEROAD. Te wymiary zostały przyjęte do dalszych analiz.

Dodatkowo otrzymana wysokość h może być zredukowana o wartość Δh przy zastosowaniu warunków brzegowych sprężystego podparcia podstawy obszaru podłożem Winklera o odpowiednio dobranym współczynniku sztywności k . Jego wartość oblicza się przy założeniu równomiernego rozłożenia naprężeń σ_{zz} . Stosując to założenie można bezpośrednio policzyć ugięcie u wynikające z obecności sprężystego podparcia przy zastosowaniu elementarnych wzorów teorii sprężystości. Ten sposób postępowania pozwala osiągnąć dokładne wyniki przemieszczeń pionowych [5]. Przykładowo, wyznaczono maksymalną wartość przemieszczenia dla kilku wartości wysokości modelu przy $l = b = 12$ m. Otrzymane wyniki przedstawione są w tabeli 4.

Tab. 4. Maksymalne przemieszczenia pionowe dla różnych wysokości modelu z uwzględnieniem poprawki od sprężystego podparcia

h [m]	Δh [m]	P [kN]	$l \times b$ [m ²]	E_z [MPa]	u [mm]	w_z [mm]	$w_z + u$ [mm]
17	3,11	50	144	160,5	0,0062	0,2352	0,2414
14	7,11	50	144	160,5	0,0127	0,2287	0,2414
10	10,11	50	144	160,5	0,0214	0,2200	0,2414
8	12,11	50	144	160,5	0,0257	0,2156	0,2413
6	14,11	50	144	160,5	0,0300	0,2106	0,2411

Na wyniki obliczeń znaczący wpływ ma sposób przyłożenia obciążenia. Realizacja przyłożenia ruchomego obciążenia w programie ABAQUS odbyła się za pośrednictwem elementu powłokowego o kształcie półkola o promieniu r i grubości 1 cm. Na górną powierzchnię tego elementu działało obciążenie równomierne o intensywności p . Przy użyciu programu ABAQUS między powierzchnią dolną elementu, a powierzchnią górną nawierzchni drogowej został zdefiniowany kontakt, który powoduje bezpośrednie przekazanie obciążenia. Z warunku równowagi elementu wypadkowa siła nacisku działająca na nawierzchnię musi być równa wypadkowej sile od ciśnienia p . Założone zostało zerowe tarcie między elementem obciążającym, a powierzchnią górną obszaru nawierzchni, stąd brak obciążenia stycznego do powierzchni górnej nawierzchni.

Został zbadany wpływ miejsca rozpoczęcia ruchu obciążenia na otrzymane wyniki. Ze względu na brak możliwości stworzenia modelu obliczeniowego, w którym obciążenie porusza się od „nieskończoności” do „nieskończoności” z założoną prędkością, istnieje konieczność doboru miejsca startu tak, aby wyniki były poprawne dla obszaru wybranego do analizy. Rozpatrzono różne wartości odległości d miejsca przyłożenia środka powierzchni obciążenia od początku układu współrzędnych w wybranym (dowolnym) przekroju nawierzchni. Otrzymane wyniki maksymalnego przemieszczenia dla wartości $d = 1$ m wynosiły 0,2413 mm, dla $d = 2$ m wynosiły 0,2416 mm, dla $d = 3$ m wynosiły 0,2417 mm. Na tej podstawie przyjęto $d = 1$ m.

Należy również przyjąć sposób narastania ciśnienia p w czasie, który zredukuje niepożądane efekty dynamiczne. W przypadku przyłożenia ciśnienia o wartości równej p w chwili początkowej otrzymali-byśmy efekt nagłego przyłożenia siły i związane z tym drgania. W związku z tym ciśnienie zamodelowano, jako rosnące liniowo w czasie równym T_p do wartości p (całkowity czas trwania analizy oznaczono jako T_k). W czasie przyrostu ciśnienia od zera do wartości p obciążenie się nie porusza. Prędkość, z jaką ma narastać obciążenie aby wykluczyć niepożądane zjawiska, silnie zależy od warunków zadania. Dla modelu M1 oraz modelu M2 została wykonana analiza wielkości drgań dla różnych czasów przyrostu wartości ciśnienia, przy założeniu braku ruchu powierzchni obciążenia. Na tej podstawie wybrane zostały wartości $T_p = 1,4$ s, dla których prowadzono dalszą analizę.

Kolejnym istotnym zagadnieniem jest podział modelowanego obszaru nawierzchni na elementy skończone. Rozważanie zagadnienia dynamicznego z ruchomą powierzchnią obciążenia powoduje konieczność zagęszczenia siatki elementów wzdłuż osi przejazdu. Znacząco komplikuje to siatkę elementów skończonych oraz zwiększa rozmiar zadania, które ze względu na zastosowanie analizy dynamicznej typu Implicit zajmuje dużo czasu i wymaga dużej mocy obliczeniowej. Podjęto różne możliwe sposoby ograniczające wielkość siatki. Nawierzchnia drogowa składa się z dwóch części, które połączono przy pomocy więzów *Tie* uniemożliwiających wzajemne przemieszczenia. Podział był motywowany koniecznością znacznego rozrzedzenia siatki elementów skończonych w obszarach dalszych od obciążenia, co byłoby trudne do zrealizowania przy modelowaniu nawierzchni przy pomocy jednej części. Podstawowa charakterystyka przyjętej siatki elementów skończonych przedstawia się następująco:

- Siatka składa się przede wszystkim z elementów graniastosłupowych o podstawie prostokątnej (prostopadościennych). W miejscach, w których było to konieczne ze względu na rozrzedzenie siatki użyto elementów o kształcie ostrosłupa lub graniastosłupa o podstawie trójkątnej.
 - Zastosowano liniowe funkcje kształtu.
 - Zastosowano elementy z całkowaniem zredukowanym.
 - Rozmiary elementów skończonych wynoszą minimalnie 1 cm \times 1 cm \times 0,5 cm w strefie przejazdu obciążenia. Wielkości te rosną wraz ze wzrostem współrzędnej z i w miarę oddalania się od obszaru przejazdu obciążenia. W modelu zostały zastosowane elementy, których stosunek boków wynosi maksymalnie 1:5. W miejscach kluczowych o dużych koncentracjach odkształceń stosunek długości boków wynosi maksymalnie 1:2.
- W tabeli 5 przedstawiono ostateczne wartości parametrów opisujących modele numeryczne wykorzystane w pracy.

Tab. 5. Zestawienie danych przyjętych do tworzenia modeli numerycznych

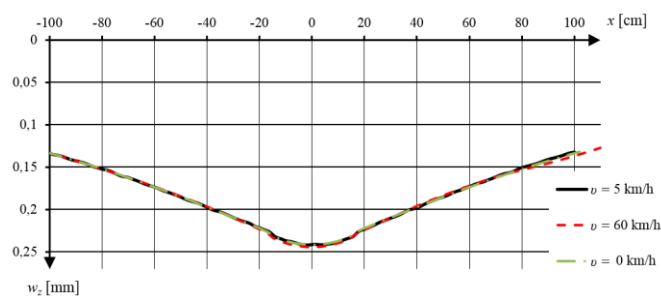
Model	v [km/h]	b [m]	l [m]	h_0 [m]	d [m]	T_p [s]	T_k [s]
M1	5	10	10	6	1	1,4	2,88
M1	60	10	10	6	1	1,4	1,64
M2	5	10	10	6	1	1,4	2,88
M2	60	10	10	6	1	1,4	1,64

Tab. 6. Maksymalne wartości ugięć i kluczowych odkształceń obliczonych przy użyciu programu VEROAD oraz ABAQUS – analiza statyczna i analiza dynamiczna dla prędkości 5 km/h i 60 km/h – model M1

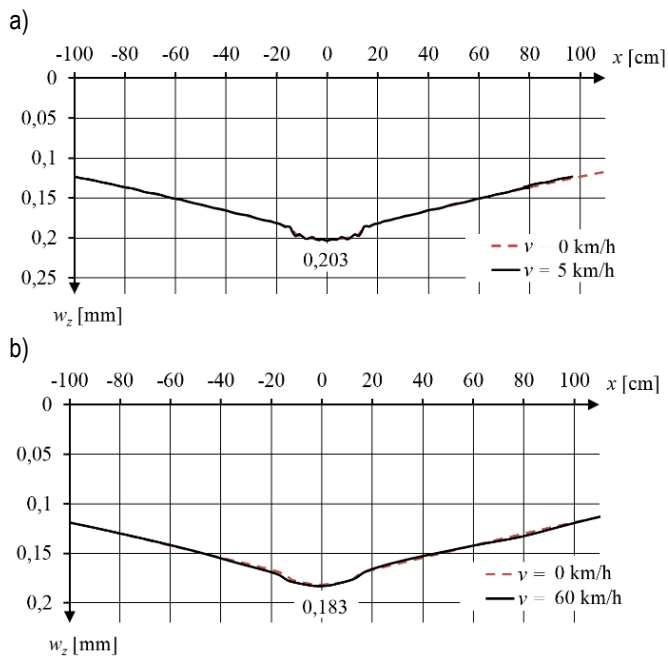
Rodzaj analizy	w_z [mm]	ϵ_{xx} [10^{-6}]	ϵ_{zz} [10^{-6}]
VEROAD, $v = 0$ km/h	0,241	62,42	-164,49
Statyczna, $v = 0$ km/h	0,241	60,13	-166,41
Dynamiczna, $u = 5$ km/h	0,241	60,12	-163,43
Dynamiczna, $u = 60$ km/h	0,242	60,15	-164,44

Tab. 7. Maksymalne wartości ugięć i kluczowych odkształceń obliczonych przy użyciu programu VEROAD oraz ABAQUS – analiza statyczna dla prędkości 5 km/h i 60 km/h – model M2

Rodzaj analizy	u [km/h]	w_z [mm]	ϵ_{xx} [10^{-6}]	ϵ_{zz} [10^{-6}]
VEROAD - statyczna	60	0,181	35,3	-95,2
MES - dynamiczna	60	0,183	34,3	-93,1
VEROAD - statyczna	5	0,202	44,8	-114,7
MES - dynamiczna	5	0,203	43,3	-116,7



Rys. 3. Przemieszczenie w_z na powierzchni górnej dla $x = 0$ i $y = 0$ w funkcji położenia środka powierzchni obciążenia wzdłuż osi x z prędkością $u = 5$ km/h i $u = 60$ km/h – model M1

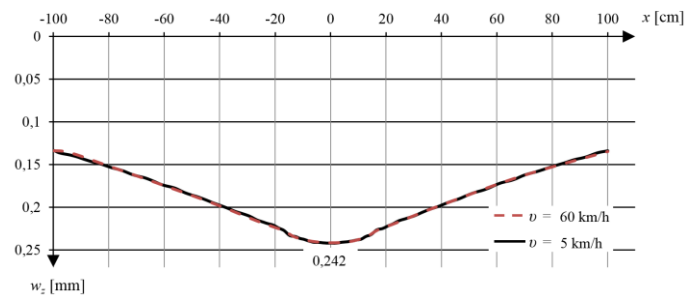


Rys. 4. Przemieszczenie w_z na powierzchni górnej dla $x = 0$ i $y = 0$ w funkcji położenia środka powierzchni obciążenia z prędkością $u = 0$ km/h oraz a) $u = 5$ km/h b) $u = 60$ km/h wzdłuż osi x dla wartości materiałowych opowiadających prędkości a) $u = 5$ km/h b) $u = 60$ km/h – model M2

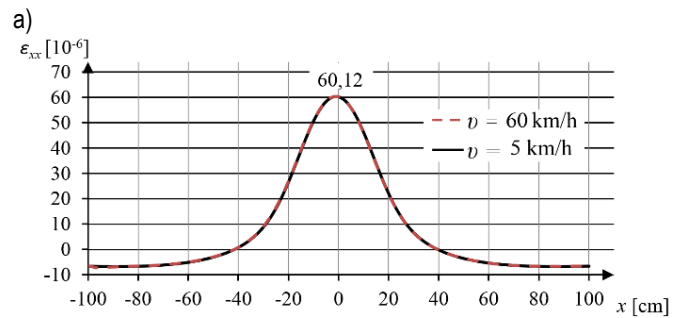
W tabeli 6 i 7 przedstawiono porównanie wartości maksymalnych ugięć i kluczowych odkształceń uzyskanych z analiz statycznych i dynamicznych za pomocą programów VEROAD i ABAQUS. Porównanie to jest istotne dla walidacji skończone elementowych modeli obliczeniowych, gdyż w programie VEROAD wykorzystywane są rozwiązania analityczne rozpatrywanych zagadnień przy zastosowaniu metod transformacyjnych zastosowanych do półprzeźreni warstwowej. Porównywano i analizowano głównie najważniejsze wielkości projektowe przy wymiarowaniu nawierzchni drogowych podatnych: przemieszczenia pionowe górnej powierzchni (ugięcia) w_z , odkształcenia poziome na powierzchni dolnej układu warstw asfaltowych ϵ_{xx} i odkształcenie pionowe na powierzchni górnej podłoża gruntowego ϵ_{zz} . Otrzymano zgodność rezultatów rozwiązań zagadnień dynamicznych i statycznych oraz rozwiązań zagadnień statycznych z programu VEROAD i ABAQUS dla modelu M1. Wartości przemieszczeń i odkształceń dynamicznych dla modelu M2 także różnią się niewiele od wartości odkształceń otrzymanych z programu VEROAD. Różnice względne przemieszczeń nie przekraczają 1,10% dla prędkości $u = 5$ km/h i 0,50% dla $u = 60$ km/h. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono otrzymane wyniki dla analizy dynamicznej w porównaniu z wynikami analizy statycznej dla tych samych wartości parametrów materiałowych nawierzchni.

3. ANALIZA NAWIERZCHNI DROGOWEJ PRZY RUCHOMYM OBCIĄŻENIU O STAŁEJ PRĘDKOŚCI

3.1. Wyniki obliczeń dla modelu M1 – obciążenie ruchome o stałej wartości



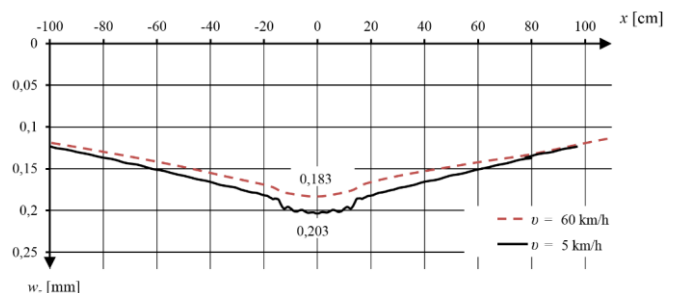
Rys. 5. Przemieszczenie w_z na powierzchni górnej dla $x = 0$ i $y = 0$ w funkcji położenia środka powierzchni obciążenia wzdłuż osi x z prędkością $u = 5$ km/h i $u = 60$ km/h – model M1



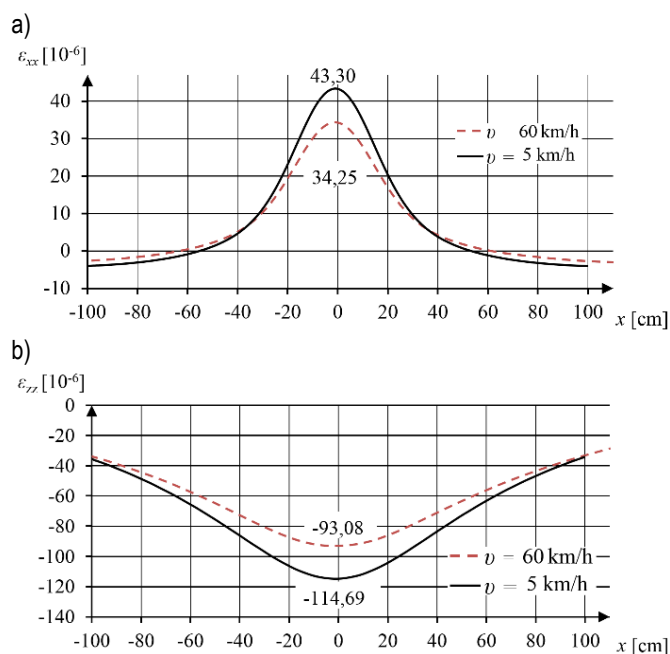
Rys. 6. Odkształcenie a) ϵ_{xx} na spodzie warstwy podbudowy asfaltowej b) ϵ_{zz} na powierzchni podłoża gruntowego dla $x = 0$ i $y = 0$ w funkcji położenia środka powierzchni obciążenia wzdłuż osi x z prędkością $u = 5$ km/h i $u = 60$ km/h – model M1

Wyniki obliczeń kluczowych odkształceń i ugięć pokazują mały wpływ wzrostu prędkości przejazdu na przemieszczenia dla modelu M1 (rys. 5 i 6). Nieco większe przemieszczenie pionowe odnotowano przy prędkości $u = 60$ km/h (maksymalna różnica względna jest równa 0,2%). W przypadku odkształceń różnica ta wynosiła 0,1% dla ϵ_{xx} i 1,8% dla ϵ_{zz} .

3.2. Wyniki obliczeń dla modelu M2 – obciążenie ruchome o stałej wartości



Rys. 7. Przemieszczenie w_z na powierzchni górnej dla $x = 0$ i $y = 0$ w funkcji położenia środka powierzchni obciążenia wzdłuż osi x dla prędkości obciążenia $u = 5$ km/h i $u = 60$ km/h – model M2

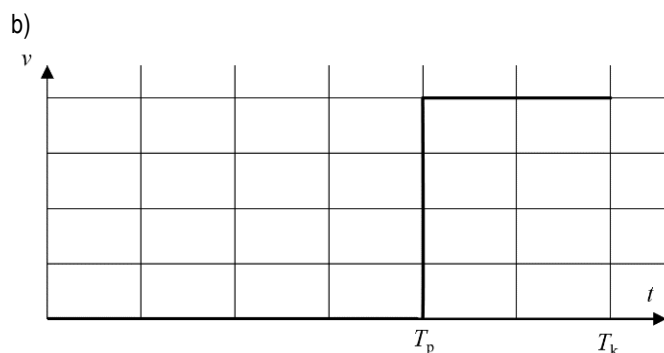
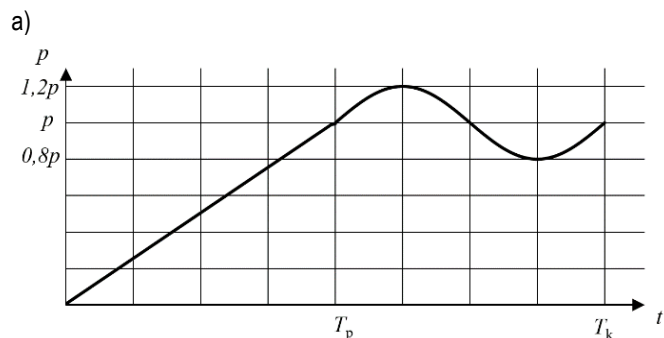


Rys. 8. Odształcenie a) ϵ_{xx} na spodzie warstwy podbudowy asfaltowej b) ϵ_{zz} na powierzchni podłoża gruntowego dla $x = 0$ i $y = 0$ w funkcji położenia środka powierzchni obciążenia wzdłuż osi x z prędkością $u = 5$ km/h i $u = 60$ km/h – model M2

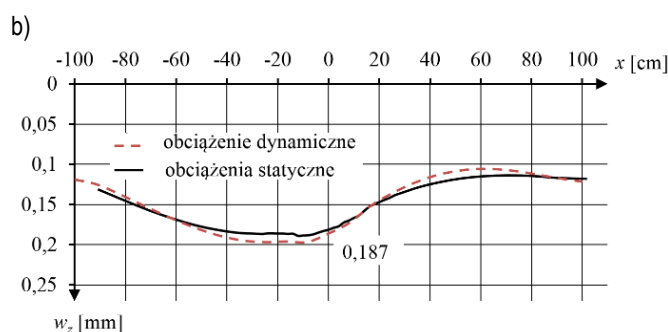
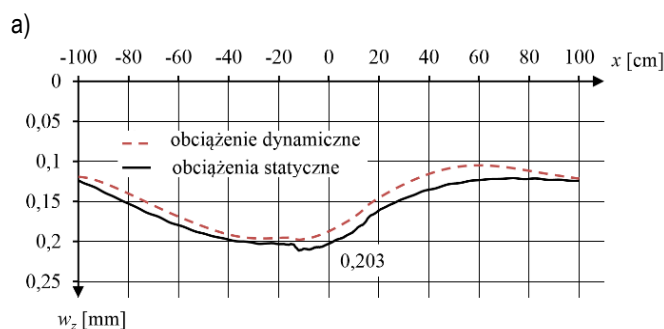
Wyniki obliczeń przemieszczeń pionowych pokazują większy wpływ wzrostu prędkości obciążenia na przemieszczenia dla modelu M2, niż to miało miejsce w modelu M1 (rys. 7 i rys. 8). Wynika to jednak z uwzględnienia wpływu prędkości obciążenia na wartości parametrów materiałowych warstw asfaltowych (dynamicznych modułów sprężystości). Maksymalne ugięcie dla prędkości $u = 60$ km/h wynosi 0,183 mm, a dla prędkości $u = 5$ km/h – 0,203 mm. Daje to różnice względne między przemieszczeniami na poziomie 9,85%. Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że wyniki obliczeń dynamicznych wartości przemieszczeń pionowych różnią się od wartości przemieszczeń statycznych nieznacznie.

3.3. Wyniki obliczeń dla modelu M2 – obciążenie ruchome pulsacyjne

W tym podrozdziale zostaną zaprezentowane wyniki obliczeń dla modelu M2 pod działaniem ruchomego obciążenia pulsacyjnego w porównaniu z wynikami dla obciążenia o stałej wartości w czasie – przy prędkości obciążenia $u = 5$ km/h i $u = 60$ km/h. Obciążenie pulsacyjne przedstawiono na rysunku 9a. Obciążenie początkowo narasta liniowo do wartości p , następnie jest zmienne według funkcji sinus o amplitudzie $0,2p$ i okresie równym $T_k - T_p$.



Rys. 9. a) Wykres obciążenia w czasie trwania analizy – obciążenie pulsacyjne b) Wykres prędkości powierzchni obciążenia w czasie trwania analizy dynamicznej nawierzchni



Rys. 10. Przemieszczenie pionowe w_z na powierzchni górnej dla $x = 0$ i $y = 0$ w funkcji położenia środka powierzchni obciążenia wzdłuż osi x z prędkością a) $u = 60$ km/h b) $u = 5$ km/h – model M2, obciążenie stałe i zmienne w czasie

Dla prędkości $u = 5$ km/h przemieszczenie pionowe przy współrzędnej położenia środka powierzchni obciążenia $x = 0$ jest o 0,3% większe dla analizy dynamicznej w porównaniu z analizą statyczną – dla prędkości $u = 60$ km/h różnica ta wynosi 2,5% (rys. 10).

WNIOSKI

Podstawowym celem pracy było zbudowanie modelu numerycznego nawierzchni drogowej służącego analizie uwzględniającej efekty dynamiczne. Model ten został zwalidowany rozwiązaniami statycznymi otrzymanymi za pomocą metody elementów skończonych i uzyskanymi z programu VEROAD.

Porównanie wyników analizy dynamicznej (dla prędkości obciążenia $u = 5$ km/h i $u = 60$ km/h) z wynikami analizy statycznej uzyskanymi z wykorzystaniem metody elementów skończonych z użyciem programu ABAQUS oraz z wynikami analizy statycznej z wykorzystaniem programu VEROAD pozwala sformułować następujące wnioski:

- Porównanie wyników dla modelu M1 dla obciążenia statycznego oraz obciążeń ruchomych o stałych wartościach w czasie (dla prędkości $u = 5$ km/h i $u = 60$ km/h) z programu ABAQUS

z wynikami obliczeń statycznych za pomocą programu VEROAD, pozwala stwierdzić, że uzyskane wyniki charakteryzują się dużą zgodnością. Wpływ sił bezwładności jest znikomy.

- b) Analizując wyniki dla modelu M2 dla prędkości obciążenia $u = 5$ km/h i $u = 60$ km/h w programie ABAQUS otrzymujemy bardzo dobrą zgodność z wynikami programu VEROAD. W modelu tym uwzględniony jest wpływ prędkości koła pojazdu oddziałującego na nawierzchnię na cechy materiałowe warstw asfaltowych. Efektem jest uzyskanie mniejszych przemieszczeń i odkształceń dla większej prędkości obciążenia. Dla przyjętych prędkości obciążenia efekty dynamiczne są również nieznaczne.
- c) Również nieznaczne efekty dynamiczne (w porównaniu do wyników rozwiązania zadania statycznego) stwierdzono w przypadku obciążenia o stosunkowo wolno zmiennym położeniu na nawierzchni (z prędkościami $u = 5$ km/h i $u = 60$ km/h) i zmiennej wartości, tj, w przypadku ruchomego obciążenia pulsacyjnego.

Powyższe wnioski potwierdzają poprawność stosowania modeli statycznych w procesie projektowania (wymiarowania) nawierzchni drogowych podatnych przy typowych obciążeniach.

BIBLIOGRAFIA

1. Hopman P. C. The visco-elastic multilayer program VEROAD. HERON, 41 (1), 1996
2. Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych. GDDP – IBDiM, Warszawa 2001
3. Nagórska M.: On certain method of domain for finite element modeling of the layered elastic half-space in the static analysis of flexible pavement Archives of Civil Engineering, LVIII, 4, 2012.
4. Nagórski R., Błażejowski K., Nagórska M.: Studium właściwości mechanicznych konstrukcji nawierzchni drogowej podatnej z uwzględnieniem trwałości. Zagadnienia wybrane. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk, Warszawa 2014
5. Nagórski R., Nagórska M.: Weryfikacja modeli skończenie elementowych w analizie statycznej konstrukcji nawierzchni drogowych podatnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014
6. Piłat J., Radziszewski P.: Nawierzchnie asfaltowe. WKŁ, Wyd. II, Warszawa 2007
7. 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. z dn. 14 maja 1999 r.)

rectness of the results. Another aim is to examine the impact of dynamic effects on the deflections and key strains, with a comparison to the results of the static FEM analysis and results of computation from VEROAD program (using analytical methods). ABAQUS/Explicit program was used to determine key components of displacements and strains. A 3D FE model was applied. Studies included determination of the size of the domain modeled by finite elements and boundary conditions. Two pavement models were analysed and linear-elastic material properties were assumed. Visco-elastic properties of asphalt layers were taken into account by the use of dynamic stiffness modulus as elastic modulus. The experimental program for this study included two different load speeds corresponding to the traffic of heavy vehicles – the small speed 5 km/h and typical one 60 km/h. It has been proved that for assumed data the dynamic effects in comparison to static behavior of the pavement can be neglected.

Autorzy:

Tutka Paweł - Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej; al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, paweltutka90@gmail.com

Nagórski Roman - Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej; al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, r.nagorski@il.pw.edu.pl

SELECTED ASPECTS OF THE DYNAMICS OF A FLEXIBLE PAVEMENT. APPLICATION OF THE FEM USING THE ABAQUS PROGRAM

Abstract

The main purpose of the paper is to create a numerical model for pavement dynamic analysis, including its validation and analysis of the factors affecting the cor-