Ocena wpływu wybranego wzmocnienia podłoża gruntowego na trwałość konstrukcji nawierzchni drogowej z uwzględnieniem kryteriów deformacji podłoża gruntowego

Piotr Mackiewicz

W artykule przeprowadzono analizy numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych w celu oceny wpływu wzmocnienia podłoża na trwałość nawierzchni drogowej. Do obliczeń wybrano nawierzchnię miejsc postojowych przeznaczoną dla ruchu pojazdów ciężarowych. Obliczenia przeprowadzono dla materiału podłoża gruntowego o właściwościach sprężystych i sprężysto-plastycznych. Ocenę trwałości przeprowadzono wykorzystując wybrane kryteria deformacji podłoża gruntowego. Stwierdzono istotny wpływ grubości wybranego wzmocnienia (stabilizacji) na trwałość nawierzchni oraz znaczną różnorodność wyników w zależności od zastosowanego kryterium. Stwierdzono, że zastosowanie modelu nieliniowego dla zadanych parametrów podłoża może pozwolić precyzyjniej dobrać wielkość wzmocnienia dla wymaganej kategorii ruchu.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

Dr inż.

wroc.pl

Piotr Mackiewicz Katedra Dróg i Lotnisk,

Politechnika Wrocławska

piotr.mackiewicz@pwr.

data zgłoszenia do redakcji: 16.10.2013

data akceptacji do druku: 13.01.2014



Wprowadzenie

Intensywny rozwój teorii sprężystości dla układów wielowarstwowych oraz szereg kompleksowych badań przeprowadzonych w latach siedemdziesiątych w USA i Europie Zachodniej nad parametrami materiałowymi materiałów drogowych i podłoża, pozwolił na opracowanie mechanistycznych metod projektowania nawierzchni. Niektóre są stosowane do dziś. Na podstawie znanych parametrów materiałowych metody pozwalają określać trwałość nawierzchni drogowych w zakładanym okresie eksploatacji. Do obliczeń najczęściej wymagana jest znajomość stałych sprężystych materiału (moduł sprężystości, współczynnik Poissona). Ocenę trwałości przeprowadza się z wykorzystaniem kryteriów. W niniejszym artykule przeprowadzono ocenę trwałości wybranej nawierzchni skupiając się na zmianie parametrów wzmacnianego podłoża gruntowego. W analizie przeprowadzono obliczenia dla sprężystych oraz sprężysto-plastycznych parametrów podłoża gruntowego. W ocenie nośności zastosowano cztery kryteria deformacji strukturalnej podłoża gruntowego (kolein strukturalnych) łączących zależność pomiędzy liczbą obciążeń i pionowym odkształceniem podłoża gruntowego [1] (1):

$$\varepsilon_p = k \cdot (1/N)'$$

gdzie:

 ε_p – odkształcenie pionowe na powierzchni podłoża gruntowego [-],

k, m – współczynniki eksperymentalne zależne od rodzaju kryterium (tab. 1.),

N – liczba dopuszczalnych obciążeń do wystąpienia krytycznej deformacji strukturalnej w nawierzchni. Model numeryczny konstrukcji nawierzchni

Analizie poddano wybraną konstrukcję nawierzchni zalecaną w [3] przeznaczoną dla miejsc postojowych pojazdów ciężarowych. Ten typ nawierzchni przeznaczony jest dla niskich kategorii ruchu, ale niektórzy projektanci wykorzystują ją także do znacznie obciążonych placów i dróg manewrowych bez wydzielania obszarów do parko-

Tabela 1. Wartości współczynników m i k stosowanych w analizowanych kryteriach deformacjistrukturalnej podłoża gruntowego.

(1)

Kryterium	k [-]	<i>m</i> [-]
Instytutu Asfaltowego (Chevron)	1.05e-02	0.223
Uniwersytetu w Nottingham i Mobil Design	2.16e-02	0.280
Francuskie	1.20e-02	0.222
Shell Pavement Design (niezawodność 95%)	1.80e-02	0.250

Tabela 2. Schemat analizowanej konstrukcji

Grubość [cm]	Nazwa warstwy	
8	Kostka betonowa	
3	Podsypka cementowo-piaskowa	
25	Podbudowa zasadnicza z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie	
∞	Podłoże G1	

Tabela 3. Parametry konstrukcji dla wariantu pierwszego (podłoże sprężyste)

Grubość [cm]	Parametry materiałowe	Nazwa warstwy
8+3	E = 250 MPa, v = 0.3	Kostka betonowa z podsypką
25	E = 400 MPa, v = 0.3	Podbudowa zasadnicza z kruszywa łam. stab. mech.
10 - 30	E = 300 MPa, v = 0.3	Grunt stabilizowany cementem
	E = 50 MPa, v = 0.35	Podłoże gruntowe G2
200	E = 35 MPa, v = 0.35	Podłoże gruntowe G3
	E = 25 MPa, v = 0.35	Podłoże gruntowe G4

Tabela 4. Parametry konstrukcji dla wariantu drugiego (podłoże sprężysto-plastyczne)

Grubość [cm]	Parametry materiałowe	Nazwa warstwy
8+3	E = 250 MPa, v = 0.3	Kostka betonowa z podsypką
25	E = 400 MPa, v = 0.3	Podbudowa zasadnicza z kruszywa łam. stab. mech.
10 - 30	E = 300 MPa, v = 0.3	Grunt stabilizowany cementem
200	$\begin{split} E &= 50 \text{ MPa}, \ \nu = 0.35, \ \varphi = 30, \ c = 3 \text{ kPa} \\ E &= 35 \text{ MPa}, \ \nu = 0.35, \ \varphi = 19, \ c = 15 \text{ kPa} \\ E &= 25 \text{ MPa}, \ \nu = 0.35, \ \varphi = 15, \ c = 10 \text{ kPa} \end{split}$	Podłoże gruntowe G2 Podłoże gruntowe G3 Podłoże gruntowe G4



Nawierzchnie, nasypy, podłoże





wania. Schemat analizowanej nawierzchni przedstawiono w tab. 2.

W celu weryfikacji trwałości tej nawierzchni, opracowano model numeryczny konstrukcji. W obliczeniach analizowano zachowanie się konstrukcji na trzech typach podłoża gruntowego: G2, G3, G4, wraz z wymaganym wzmocnieniem na podstawie [3]:

- dla G2 10 cm warstwy gruntu stabilizowanego cementem (1.5 MPa),
- dla G3 15 cm warstwy gruntu stabilizowanego cementem (2.5 MPa),
- dla G4 25 cm warstwy gruntu stabilizowanego cementem (2.5 MPa).

Dodatkowo w analizach oceniano wpływ zmiany grubości warstwy gruntu stabilizowanego cementem (stabilizacji) na trwałości nawierzchni na podstawie wybranych kryteriów deformacji strukturalnej podłoża gruntowego. Uwzględniono następujące grubości stabilizacji: 10, 15, 20, 25, 30 cm dla wszystkich wybranych typów podłoża.

Do obliczeń wykorzystano metodę elementów skończonych. Model zbudowano z wykorzystaniem objętościowych elementów trójwymiarowych, parametry materiałowe górnych warstw opisano materiałami sprężystymi, natomiast podłoże opisano zarówno parametrami sprężystymi (pierwszy wariant obliczeń) oraz sprężysto-plastycznymi (drugi wariant obliczeń). Obciażenie przyjęto jako model koła o nacisku 0.7 MPa odpowiadający obciążeniu osi 115 kN (57.5 kN na koło). W tab. 3 zestawiono analizowane parametry nawierzchni dla wariantu pierwszego, w tab. 4 dla drugiego. Parametry materiałowe warstw przyjęto w fazie eksploatacji na podstawie danych literaturowych [2, 3, 4, 5, 6, 7].

Na rys. 1 przedstawiono model obliczeniowy. Przyjęto następujące warunki brzegowe modelu: "sztywne" zamocowanie dolne, zamocowanie boczne – możliwość przemieszczeń w kierunku pionowym. Obliczenia

28







3. Wpływ grubości warstwy stabilizacji na trwałość nawierzchni dla kryterium Uniwersytetu w Nottingham



4. Wpływ grubości warstwy stabilizacji na trwałość nawierzchni dla kryterium Francuskiego

pozwoliły uzyskać rozkład odkształceń pionowych występujących w podłożu gruntowym (na spodzie warstwy stabilizacji).

Do opisu nieliniowych właściwości gruntu zastosowano model sprężysto-plastyczny Drucker-Pragera. Poza modułem sprężystości, opisują go: kąt tarcia wewnętrznego


5. Wpływ grubości warstwy stabilizacji na trwałość nawierzchni dla kryterium Shell'a



6. Wpływ grubości warstwy stabilizacji na wartości odkształceń dla podłoża G2



7. Wpływ grubości warstwy stabilizacji na wartości odkształceń dla podłoża G3

$$F = a \cdot I_1 + \sqrt{J_2} - b \tag{2}$$

gdzie:

 I_1 – pierwszy niezmiennik tensora naprężenia, J_2 – drugi niezmiennik dewiatora naprężenia, a, b – współczynniki zależne od parametrów materiałowych,

$$a = \frac{2 \cdot \sin \phi}{\sqrt{3} \cdot (3 - \sin \phi)}$$
$$b = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \phi}{\sqrt{3} \cdot (3 - \sin \phi)}$$

Analiza wyników obliczeń i trwałości nawierzchni

Przeprowadzono obliczenia dla trzech typów podłoża gruntowego ze zmienną grubością wzmocnienia oraz dla dwóch przypadków charakterystyki materiałowej podłoża (sprężysty i sprężysto-plastyczny). Na podstawie obliczonych wartości odkształceń pionowych w podłożu oraz wybranych kryteriów określono trwałości analizowanych konstrukcji. Na rys. 2, 3, 4, 5 pokazano zależności zmiany trwałości nawierzchni od grubości warstwy stabilizacji i typu wzmacnianego podłoża. Dodatkowo naniesiono kategorie ruchu odpowiadające danej liczbie osi obliczeniowych [3].

Z obliczeń wynika, że różne kryteria różnie klasyfikują analizowane konstrukcje pod względem trwałości. Największe zróżnicowanie wykazuje kryterium Francuskie oraz Shella. W zależności od rodzaju wielkości wzmocnienia i rodzaju podłoża, konstrukcje klasyfikują się od KR1 do KR4. W pozostałych dwóch kryteriach większość konstrukcji znajduje się w przedziale do KR2. Jedynie przy wzmocnieniach 25 cm – dochodzi do KR3. Warto zauważyć, że mimo iż różnice w trwałościach dla różnych modeli podłoża (sprężyste i sprężysto-plastyczne) sięgają kilkunastu procent, to różnice pomiędzy modelami dla tych samych konstrukcji pod względem kategorii ruchu nie są znaczne. Natomiast wpływ grubości stabilizacji dla danego typu podłoża jest istotny. Zwiększenie grubości nawet o 5 cm pozwala sklasyfikować konstrukcję o jedną kategorię ruchu wyżej. Najmniejsze różnice w tej interpretacji wykazuje ocena wg kryterium Instytutu Asfaltowego i Uniwersytetu w Nottingham. Zmiana dopiero o 10 cm może powodować zmianę o jedną kategorię ruchu. Nie są to zmiany liniowe względem grubości wzmocnienia.

Warto jeszcze przyjrzeć się wartościom odkształceń. Na rys. 6, 7, 8 pokazano wartości obliczonych odkształceń dla modelu podłoża sprężysto-plastycznego w zależ-

przegląd komunikacyjny

Nawierzchnie, nasypy, podłoże



8. Wpływ grubości warstwy stabilizacji na wartości odkształceń dla podłoża G4

ności od grubości wzmocnienia stabilizacją oraz typu podłoża. Można zauważyć, że przebieg ich nie jest liniowy w zależności od grubości stabilizacji. Zdecydowanie większe wartości odkształceń występują dla podłoża G4 (szczególnie dla małych grubości stabilizacji). Obserwuje się udział odkształceń plastycznych dla podłoża G4 o wartości 13% - przy grubości stabilizacji 10 cm.

Na rys. 9, 10, 11 pokazano rozkład odkształceń pionowych dla typowych grubości wzmocnienia stabilizacją [3] G2 - 10 cm 1.5 MPa, G3 - 15 cm 2.5 MPa, G4 - 25 cm 2.5 MPa. Można stwierdzić, że proponowane typowe grubości wzmocnienia stabilizacja G2 - 10 cm i G3 - 15 cm są optymalne dla kategorii ruchu KR1. Dla wzmocnienia G4 - 25 cm, uzyskuje się już kategorię KR2 (dla wszystkich analizowanych kryteriów) rys. 2 - 5. W przypadku potrzeby uzyskania wyższych kategorii ruchu dla wybranych konstrukcji, należy zastosować grubsze wartości wzmocnienia lub zastosować inny schemat konstrukcji np. z podbudową pomocniczą.

Podsumowanie

Zaprezentowana analiza numeryczna pozwoliła dokonać oceny wpływu grubości stabilizacji na trwałość nawierzchni i zaklasyfikować obliczane nawierzchnie do kategorii ruchu. Przeprowadzone obliczenia wskazują, że kryteria mogą być rozbieżne pod względem wartości osi obliczeniowych odzwierciedlających trwałość nawierzchni. Proponowane wzmocnienia wg [3] klasyfikują analizowaną konstrukcję do kategorii KR1 (wzmacniane G2 – 10 cm i G3 – 15 cm) oraz do KR2 w przypadku wzmacniana G4 – 25 cm stabilizacji.

Zauważono, że zwiększenie grubości warstwy wzmacniającej podłoże o 5 cm pozwala sklasyfikować konstrukcję o jedną kategorię ruchu wyżej – dotyczy to kryterium Francuskiego i Shell'a. Najmniejsze różnice uzyskuje się wg kryterium Instytutu Asfaltowego i Uniwersytetu w Nottingham. Zarówno model sprężysty podłoża jaki sprężysto-plastyczny podobnie klasyfikuje analizowane konstrukcje pod względem kategorii ruchu.

W artykule poddano analizie tylko ocenę na podstawie odkształceń strukturalnych w podłożu, należy pamiętać, że o nośności całej konstrukcji mogą w niektórych przypadkach decydować inne parametry. Zaleca się, aby przy trudniejszych i zróżnicowanych warunkach gruntowych na głębokości (zmienny stopień zagęszczenia, stopień plastyczności, wilgotność itd.) warto w szczegółowych analizach uwzględniać charakter nieliniowy podłoża stosując model sprężysto-plastyczny, który uwzględnia dodatkowe parametry gruntu. Kumulacja obciążeń powtarzalnych z uwzględnieniem trwałych odkształceń plastycznych może stanowić dalszy etap prac badawczych w analizie powstawania deformacji strukturalnych podłoża. ◀

Materiały źródłowe

- Bejarano, M.O. Subgrade Soil Evaluation for the Design of Airport Flexible Pavements, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1999.
- [2] Craig R. F.: Soil mechanics. Sixth edition, Spon press, Taylor&Francis Group, London and New York, 1997
- [3] Dz.U. nr 43 poz. 430. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, 1999
- [4] Kasahara, A., Matsuno S. Estimation of Apparent Elastic Modulus of Concrete Block Layer. Proc. 3rd Int. Conf. On CBP. Tokyo, 1988
- [5] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych, GDDKiA, Warszawa, 2012 (wersja 11.03.2013)
- [6] The Asphalt Institute. Thickness design –Aasphalt Pavements for Highways and Streets, MS-1, 1981
- [7] Wiłun Z. Zarys geotechniki. WKŁ, 2013
- [8] Zienkiewicz O. C. and Taylor R. L. Finite Element Method: Volume 2, Fifth Edition, 2000



9. Rozkład odkształceń w nawierzchni dla wzmocnienia stabilizacją 10 cm dla podłoża G2



10. Rozkład odkształceń w nawierzchni dla wzmocnienia stabilizacją 15 cm dla podłoża G3



11. Rozkład odkształceń w nawierzchni dla wzmocnienia stabilizacją 25 cm dla podłoża G4