MODELOWANIE INŻYNIERSKIE ISSN 1896-771X
41, s. 11-18, Gliwice 2011

OCENA TRWAŁOŚCI KONSTRUKCJI DROGOWEJ W NUMERYCZNYM MODELU TERMOMECHANIKI

MAREK BARTOSZEK[*], LIDIA FEDOROWICZ[**], JAN FEDOROWICZ[*]

[*]*Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska*
[**]*Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, Politechnika Śląska*
e-mail: marek.bartoszek@polsl.pl, lidia.fedorowicz@polsl.pl, jan.fedorowicz@polsl.pl

Streszczenie. Przedmiotem rozważań była budowa i weryfikacja przydatności numerycznego modelu do symulowania sprzężonych zjawisk cieplno-mechanicznych zachodzących w konstrukcji drogi pod wpływem temperatury. Badano możliwość odtworzenia warunków powstania uszkodzeń termicznych nawierzchni drogowej oraz rozwarstwień wynikających z działania skrajnie niskich temperatur. Dostępne w literaturze pomiary temperatury in situ oraz analiza wrażliwości pozwoliły na ustalenie warunków brzegowych oraz oszacowanie wpływu brakujących parametrów cieplnych.

1. WPROWADZENIE – PODEJŚCIE MECHANISTYCZNE W ANALIZACH KONSTRUKCJI DROGOWYCH

Analizy konstrukcji drogowych bazują zarówno na elementach mechaniki, która umożliwia tworzenie modeli obliczeniowych, jak i na rezultatach eksperymentów zawartych w kryteriach trwałości zmęczeniowej, wykorzystywanych w analizie.

Podejście powyższe stanowi podstawową cechę powszechnie obecnie stosowanych metod mechanistycznych [1,3,4,5], które dopuszczają w prowadzonych analizach wykorzystanie dowolnie rozbudowanych, numerycznych modeli obliczeniowych. Zatem trwałość zmęczeniowa konstrukcji oceniana może być na podstawie stanów naprężenia i odkształcenia wyznaczanych w rozbudowanym układzie konstrukcja drogowa-podłoże gruntowe, przy przyjęciu odpowiednich parametrów materiałowych warstw konstrukcji i gruntu.

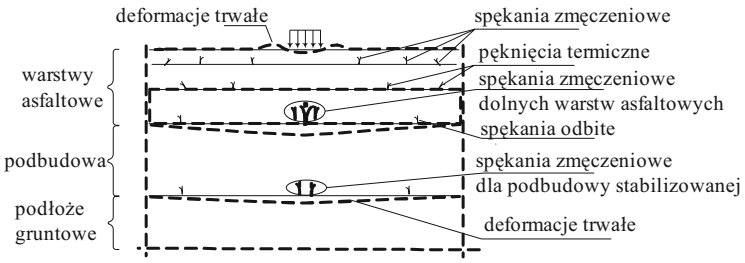
Rzeczywiste warunki pracy konstrukcji drogowej, wynikające z przenoszonych obciążeń mechanicznych oraz doznanych wpływów atmosferycznych, uwidaczniają się w stanie in situ (rys. 1) i są obserwowane na powierzchni m.in. w postaci:

- trwałych deformacji powierzchni,
- spękań zmęczeniowych powierzchni, oraz
- pęknięć (przełomów) wywołanych wpływami termicznymi.

Powyższy opis jest oczywiście bardzo ogólny, a sposób ujęcia ekstremalnych, zmiennych warunków klimatycznych, wpływających na stany użytkowalności i nośności konstrukcji drogowej jest w procesach obliczeniowych słabo wyeksponowany.

Poniżej przedstawiono próbę zbudowania wiarygodnego, zintegrowanego modelu konstrukcji drogowej współpracującej z podłożem gruntowym, symulującego numerycznie zachowanie rzeczywistej konstrukcji poddanej dużym spadkom temperatury.

Głównym efektem takiego zjawiska w stanie in situ mogą być zarówno poprzeczne (prostopadłe do osi drogi) pęknięcia nawierzchni, rozbudowujące się w sieć zarysowań, jak i pęknięcia wewnętrzne, mogące łączyć się z lokalnymi rozwarstwieniami powstałymi w konstrukcji.



Rys. 1. Typy zniszczeń opisywane w literaturze, pojawiające się w przekroju poprzecznym konstrukcji drogowej

2. KONSTRUKCJA DROGOWA OBCIĄŻONA WPŁYWEM TEMPERATURY

Obserwacja uszkodzeń termicznych pojawiających się na powierzchni skłania do rozważenia warunków, jakim poddawane są górne warstwy konstrukcji zbudowane z mieszanek mineralno-asfaltowych. W przypadku ostrego ochłodzenia warstwa powierzchniowa podlega skurczowi. Wzajemne, międzywarstwowe połączenia z ich ograniczoną odkształcalnością postaciową prowadzą do powstawania naprężeń rozciągających. Przekroczenie wartości dopuszczalnych naprężeń rozciągających określonych dla materiału warstw mineralno-asfaltowych skutkuje powstawaniem zarysowań.

Układ powstałych rys oraz odległości między nimi jest wynikiem różnych czynników:

- warunków klimatycznych regionu,
- okresu użytkowania konstrukcji,
- rodzaju oraz grubości warstw bitumicznych,
- sprężysto-lepkich właściwości spoiwa zastosowanego w mieszance mineralno-asfaltowej, oraz
- rodzaju podłoża gruntowego.

Oprócz powyższych czynników należy wziąć także pod uwagę periodycznie zachodzące zmiany naprężeń i odkształceń w warstwach powierzchniowych, wynikające z dobowych wahań temperatury. Ogólnie, cykliczna zmienność temperatur skutkuje rysami termicznymi o charakterze zmęczeniowym. W praktyce inżynierskiej dla uproszczenia zakłada się pewną temperaturę ekwiwalentną, wspólną dla wszystkich warstw asfaltowych, a także ekwiwalentne temperatury dla poszczególnych pór roku. Sprawą istotną jest jednak umiejętność określania najbardziej prawdopodobnego rozkładu temperatur w przekroju konstrukcji drogowej, a to z uwagi wpływu temperatury na wartości modułów sztywności, wartość współczynnika Poissona oraz trwałość zmęczeniową warstw asfaltowych [6,7].

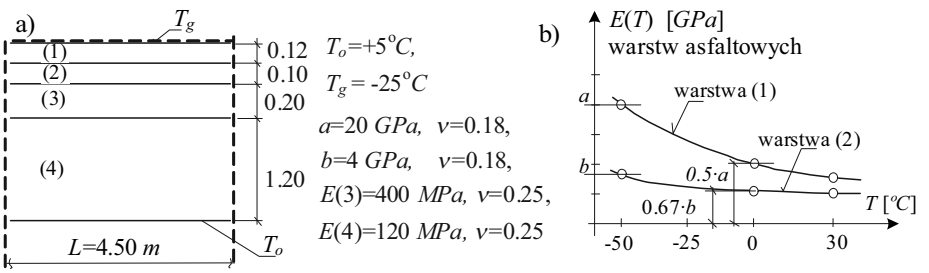
Przedstawiane poniżej zagadnienie brzegowe zostało rozwiązane wielokrotnie (z zastosowaniem pakietu *Ansys*) jako bezpośrednio sprzęgnięte zadanie termomechaniki rozważone w stanie ustalonym – rys. 2 i kolejne.

Rozpatrzono uproszczony (typowy dla obliczeń statycznych) przekrój poprzeczny konstrukcji drogowej współpracującej z warstwą podłoża gruntowego, tworzący model

obliczeniowy w płaskim stanie odkształcenia (2D) o związkach konstytutywnych liniowej sprężystości.

Rys. 2a pokazuje schemat warstw (o określonych grubościach t_i) układu konstrukcja drogowa-podłoże gruntowe. Wprowadzono następujące oznaczenia warstw:

- warstwa mineralno-asfaltowa (ścieralna, wiążąca i nośna) o grubości t_1=0.12 m,
- warstwa pomocnicza (z bitumem), t_2=0.10 m,
- podbudowa (mineralna, zagęszczona), t_3=0.20 m, oraz
- podłoże gruntowe, t_4=1.2 m.



Rys. 2a,b. Dane wejściowe do modelu

Na rys. 2 przyjęto oznaczania T_o i T_g – warunki brzegowe, E – moduły Younga, ν – współczynniki Poissona. Rys. 2b przedstawia zależność modułów $E(T)$ warstw bitumicznych od temperatury [6].

3. WYBRANE BADANIA NUMERYCZNE. WNIOSKI

Zadaniem przeprowadzonych symulacji numerycznych była próba odpowiedzi na następujące pytania:

- czy numeryczny model konstrukcji warstwowej na podłożu gruntowym może odtworzyć zjawiska opisane na początku rozdziału 2, prowadzące do degradacji konstrukcji,
- jaka jest wrażliwość uzyskiwanych rozwiązań na wprowadzane parametry modelu,
- jak sformułować warunki brzegowe zadania, aby otrzymywany stan naprężenia i odkształcenia można było uznać za ilościowy opis badanego problemu.

W zadaniu bazowym był analizowany wpływ temperatury na stany naprężenia $\{\sigma\}$ i odkształcenia $\{\varepsilon\}$ tworzące się w konstrukcji drogowej (z rys. 2). Problem ten był rozważany numerycznie jako sprzężone zadanie termosprężystości w stanie ustalonym [2].

Analizy przeprowadzono, przyjmując:

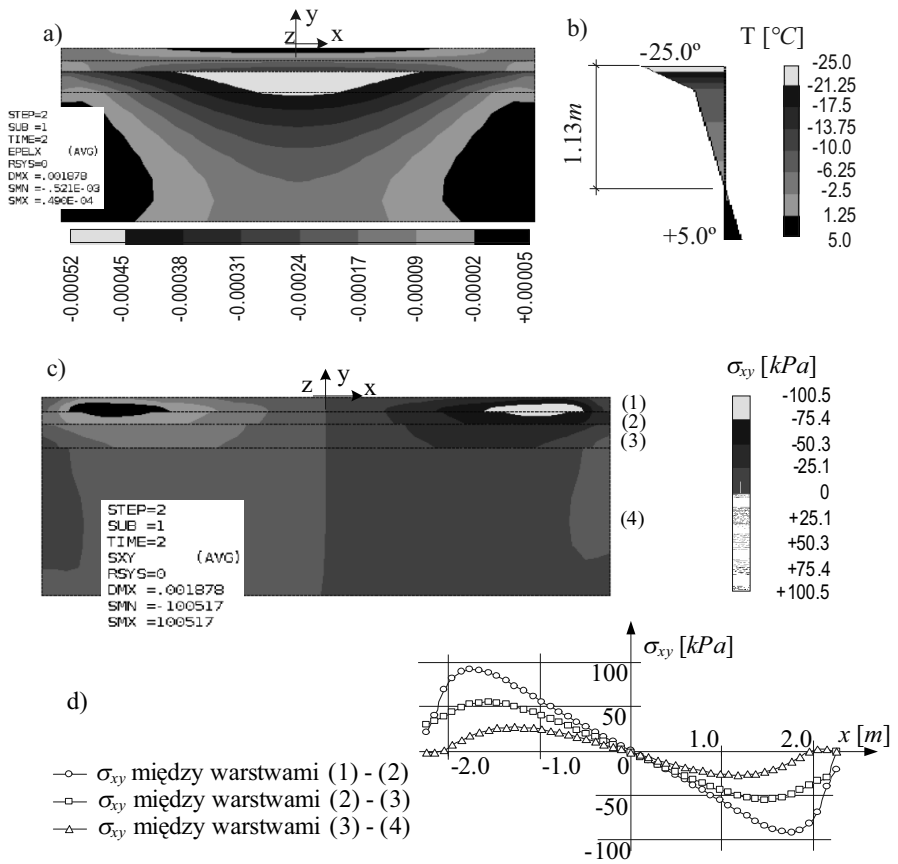
- nieodkształcony początkowy stan badanego układu
- jednokierunkowy przepływ ciepła.

Wprowadzone stałe – niezależne od temperatury – właściwości termiczne materiałów warstw (przewodności cieplne k oraz współczynniki rozszerzalności termicznej α) wynoszą:
$k_{asf}=k(1)=k(2)=0.2[W/m\cdot K]$, $k_{min}=k(3)=k(4)=1.4[W/m\cdot K]$,
$\alpha_{asf}=\alpha(1)=\alpha(2)=2.5\ 10^{-5}[1/K]$, $\alpha_{min}=\alpha(3)=\alpha(4)=1.0\ 10^{-5}[1/K]$.

Istotnym problemem przy budowie modelu numerycznego jest dostępność danych materiałowych, szczególnie własności cieplnych dla warstw mineralnych i podłoża. Nieznane parametry oszacowano zatem, odtwarzając podane w literaturze profile temperatury

pomierzone in situ w warunkach zimowych [6], kontrolując jednocześnie uzyskany stan naprężeń i odkształceń.

Dla przyjętych wartości parametrów wykonano symulacje dla skrajnych warunków zimowych $+5°C \div -25°C$, uzyskując profil temperatury jak na rys. 3. Szacowane parametry dobrano tak, aby głębokość strefy przemarzania ustalić na głębokości ok. 1.2 m.



Rys. 3. Wyniki analiz numerycznych a) sprężyste odkształcenia ε_{xx}, b) rozkład temperatury, c) d) naprężenia ścinające σ_{xy} między warstwami

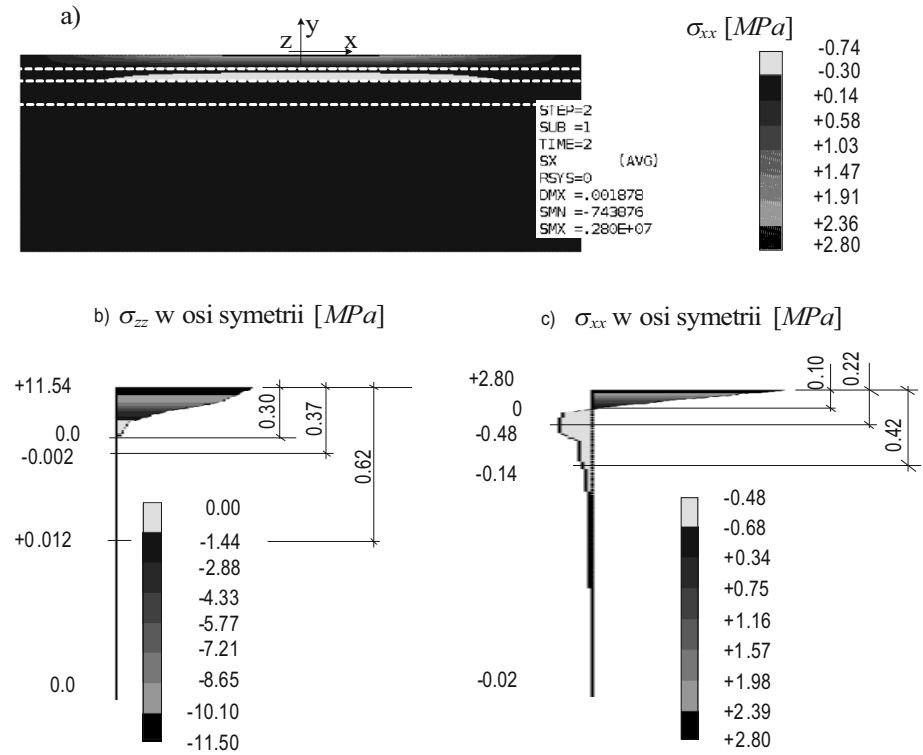
Wprowadzone warunki początkowe oraz warunki brzegowe były następujące:

- T_o=5°C, początkowo stała dla całego obszaru modelu, oraz ustalona na brzegu dolnym,
- warunki brzegowe dla statyki:
- brzegi pionowe – bez więzów,
- brzeg dolny – podpory poziome przesuwne (z wyjątkiem osi symetrii).

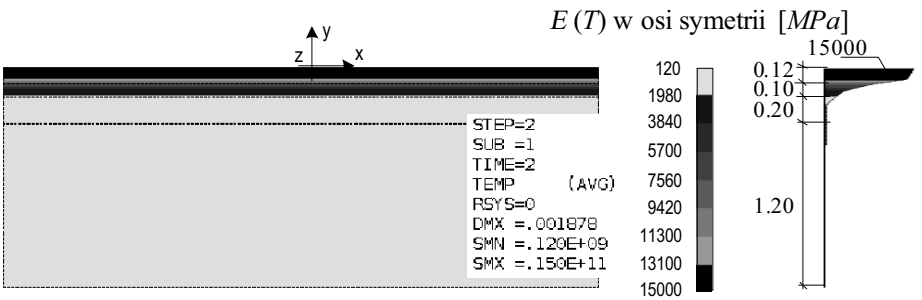
Przedstawiane zadanie bazowe (rys. 3 i 4) miało udzielić odpowiedzi na pytanie, czy stan wywołany przez temperaturę w modelu numerycznym jest zgodny z pewnymi zjawiskami możliwymi do zaobserwowania w stanie in situ:

degradacją (ściślej rozwarstwieniem) materiału na styku warstw, co można wiązać ze ścinaniem (rys. 3c,d),

deformacją (prowadzącą do możliwych zniszczeń nawierzchni), obserwowaną w przekroju poprzecznym drogi (rys. 4a).



Rys. 4. Numerycznie określony stan naprężenia; a) w przekroju poprzecznym, b,c) w kierunku osi drogi



Rys. 5 Zmiany modułu E w zależności od temperatury

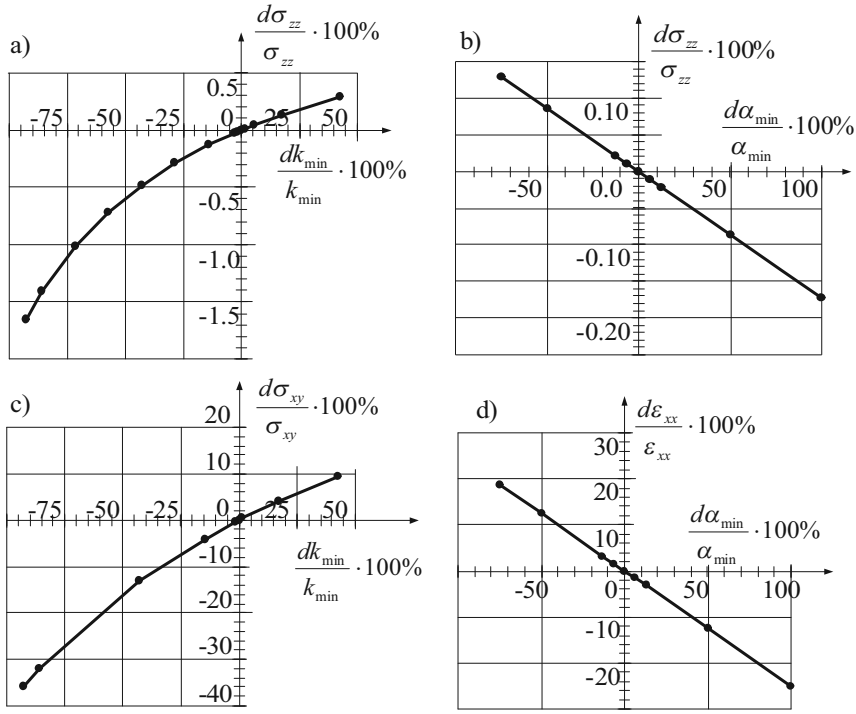
Kolejny rysunek (rys. 5) zawiera ważną dla inżyniera informację, pokazując zmianę modułu $E=E(T)$ w konstrukcji drogowej z rzeczywistym rozkładem temperatury T; gdzie początkowe wartości modułu E zgodne są z rys. 2.

Wprowadzony sprężysty opis zachowania konstrukcji może być traktowany jedynie jako aproksymacja stanu rzeczywistego, niemniej stan wygenerowany w numerycznym modelu można uznać za zgodny z obserwacjami in situ.

Głównym efektem wyjątkowo dużego spadku temperatury są poprzeczne pęknięcia nawierzchni drogowej, czego dobrym przybliżeniem są duże naprężenia σ_{zz}=11.5*MPa* w kierunku osi drogi (rys. 4b). Naprężenia o lokalnych wartościach σ_{xx}=2.8*MPa* mogą również prowadzić do powstawania charakterystycznej sieci spękań nawierzchni (rys. 4a,c).

Poniżej przedstawiono przeprowadzone testy wrażliwości – wpływu modyfikacji właściwości termicznych materiałów na stan naprężenia i odkształcenia górnych warstw konstrukcji – rys. 6. Były kolejno badane:

- wrażliwość warstw mineralno-asfaltowych na zmiany ilorazu przewodności cieplnych (k_{min}/k_{asf}=1.4/0.2=7)
- wrażliwość tych samych warstw na zmiany współczynnika przejmowania ciepła ($\alpha_{min}/\alpha_{asf}$=1.0/2.5=0.4)



Rys. 6. Analiza wrażliwości σ_{xx} i σ_{xy} na zmianę k_{min} (a,c) oraz σ_{zz} i ε_{xx} na zmianę α_{min} (b,d)

Widzimy, że wraz ze wzrostem przewodności cieplnej rosną wartości naprężeń, co wynika z rosnących gradientów temperatur na grubości warstw asfaltowych. Naprężenia decydujące o charakterystycznych poprzecznych pęknięciach nawierzchni nie zmieniają się jednak w sposób znaczący w dużym zakresie wartości k.

Naprężenia oceniane w przekroju poprzecznym pozostają stabilne w inżynierskim zakresie wartości k (k_{min}=1.1÷1.4, k_{min}/k_{asf}=5.7÷7). Wzrost współczynnika rozszerzalności liniowej powoduje efekt spadku naprężeń i odkształceń.

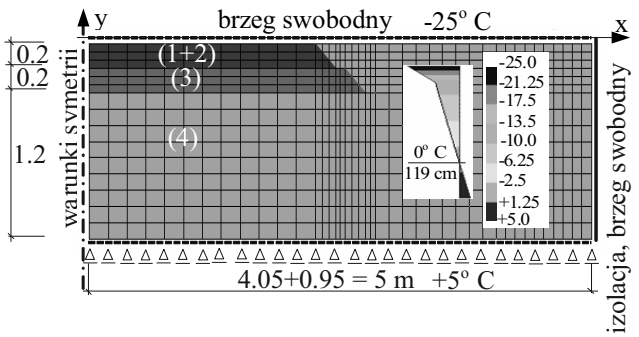
4. UKŁAD O ROZBUDOWANEJ GEOMETRII PRZEKROJU. PODSUMOWANIE

Aby mówić w przypadku konkretnej analizy o adekwatnym opisie rzeczywistości w utworzonym modelu zachodzić powinno odpowiednie połączenie zależności teoretycznych oraz wyników badań eksperymentalnych lub obserwacji in situ.

Dotychczas omówiono podstawowe zasady stosowane przy budowie i specyfikacji numerycznego modelu obliczeniowego układu konstrukcja warstwowa – podłoże gruntowe.

Obecnie rozważy się model układu o możliwie rozbudowanej geometrii, badając wpływ wprowadzanych zmian na wyniki analiz rys. 7 i 8.

Analizy przeprowadzone dla układu z rys. 7 prowadzą do podobnego jak uprzednio (przy geometrii uproszczonej) oszacowaniu przewodności cieplnej – tablica załączona do rysunku.



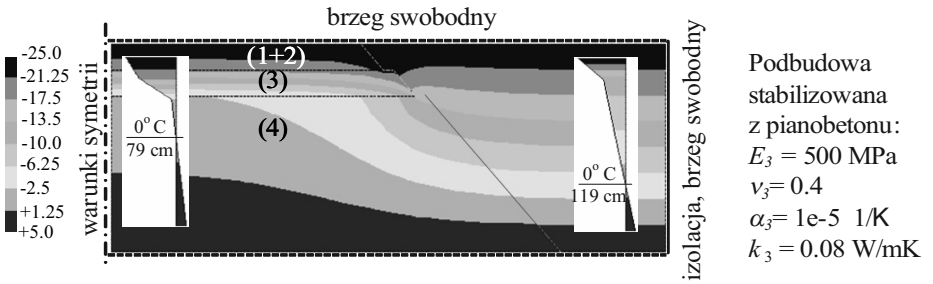
$\alpha_{min}/\alpha_{asf}$=0.4:
α_{min} = 1e-5 1/K
k_{asf} = 0.2 W/mK
k_{min} = 1.14 W/mK
czyli: k_{min}/k_{asf}=5.7

	$\frac{k_{min}}{k_{asf}}$	k [W/mK]	0 °C y [m]	σ_Z [MPa]	σ_X [MPa]	τ_{XY} [kPa]
Prosta geometria	6	1.2	-117	11.52	2.63	88.4
	7	1.4	-113	11.54	2.80	92.2
Zaawansowany	5.7	1.14	-119	11.57	3.66	74.1
Stabilizowana podbudowa	(0.4) 5.7	(0.08) 1.14	-79	11.53	2.45	88.8

$E = E(T)$:
$E_1^{(-50\,°C)}$ = 20 GPa
$E_1^{(0°C)}$ = 10 GPa
E_3 = 400 MPa
E_4 = 120 MPa
ν_{asf} = 0.18
ν_{min} = 0.25

Rys. 7. Wyniki analizy numerycznej konstrukcji drogowej o pełnym kontakcie z gruntem

Interesująco wypadła natomiast próba zmiany materiału w strefie podbudowy. Wprowadzono podbudowę stabilizowaną o przykładowych parametrach pianobetonu BPG50 o podanych na rys. 8 parametrach. Otrzymane rezultaty pokazują możliwość ochrony strefy przemarzania, ograniczając konieczność stosowania zabiegów mrozochronnych.



Rys. 8. Konstrukcja drogowa o pełnym kontakcie z gruntem o podbudowie stabilizowanej z pianobetonu BPG50

Obliczenia numeryczne wykonano w ACK CYFRONET, Kraków, w ramach grantu MNiSW/SGI3700/PŚląska/053/2010 oraz MNiSW/SGI3700/PŚląska/056/2010

LITERATURA

1. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, 1993.
2. ANSYS Inc., 2.6. Structural-Thermal Analysis, ANSYS 11 Documentation.
3. Klabińska M., Piłat J., Radziszewski P.: Technologia materiałów i nawierzchni drogowych. Warszawa : Ofic. Wyd. Pol. Warsz., 2004.
4. Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Warszawa : Inst. Bad. Dróg i Mostów, 2001.
5. PN-ISO 2394 Ogólne zasady niezawodności konstrukcji budowlanych.
6. Pszczoła M.: Spękania niskotemperaturowe warstw asfaltowych nawierzchni. „Drogi i Mosty" 2006, nr 3, s.43-80.
7. Ząbczyk K., Pierzchała K.: Mapy termiczne sieci drogowej. SIGNALKO Ltd, www.signalko.pl

NUMERICAL EVALUATION OF ROAD STRUCTURES DURABILITY USING THERMOMECHANICAL MODEL

Summary: Construction and verification of the coupled thermomechanical model of road structure was the main purpose of this paper. Numerical model was utilized to simulate structures behavior under extreme winter conditions. Our intention was to recreate real conditions leading to thermal damage of the road. Thermal in situ measurements and sensitivity analyses were necessary to establish boundary conditions of the model and to evaluate some unknown thermal properties.