

MODELOWANIE NUMERYCZNE KONSTRUKCJI WARSTWOWYCH W ŚWIETLE BADAŃ LABORATORYJNYCH I BADAŃ IN SITU

MAREK BARTOSZEK¹⁾, LIDIA FEDOROWICZ²⁾, MARTA KADELA³⁾

¹⁾ Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych, e-mail: marek.bartoszek@polsl.pl

²⁾ Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, e-mail: lidia.fedorowicz@polsl.pl

³⁾ Katedra Geotechniki, e-mail: marta.kadela@polsl.pl

Streszczenie. Wykonano serię pomiarów *in situ* odkształceń na różnych głębokościach konstrukcji, pozyskując przy okazji profile temperatur w trzywarstwowej konstrukcji drogowej. Pomiary pozyskano na etapie budowy drogi dla dwóch warstw oraz po położeniu ostatniej trzeciej warstwy. Podjęto próbę oszacowania parametrów cieplnych warstw konstrukcji drogowej na podstawie pozyskanych pomiarów. Przeprowadzono serię analiz odwrotnych oraz symulacji bezpośrednich dla zbadania możliwości szacowania niektórych niewiadomych parametrów cieplnych warstw konstrukcji drogi. Wskazano problemy związane z wykorzystaniem pozyskanych danych pomiarowych do sformułowania oraz rozwiązaniem zadania odwrotnego.

1. WSTĘP

Jedną z podstawowych cech materiałów, decydujących o ich własnościach termoizolacyjnych, jest przewodność cieplna. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła zależy - ogólnie mówiąc - od struktury materiału, wilgotności, a dla pewnych materiałów także od kierunku przepływu strumienia cieplnego.

W projektowaniu inżynierskim drogowych konstrukcji warstwowych, bazującym na określeniu trwałości, nie ma potrzeby szczegółowej znajomości współczynników przewodzenia ciepła materiałów tworzących poszczególne warstwy. Dlatego też, zdaniem autorów, niewielka jest liczba pozycji w literaturze polskiej i zagranicznej [1,2,14,16] opisujących wyznaczenie parametrów cieplnych materiałów warstw drogi, jak i samych wartości tych parametrów. Podobnie jest w przypadku własności cieplnych podłoża gruntowego, niezbędnych do modelowania zjawisk cieplnych i termosprężystych układów konstrukcja-podłoże, np.: wymiany ciepła budynku z otoczeniem poprzez grunt.

Trudnym zadaniem jest samo wyznaczenie własności cieplnych materiałów o takiej strukturze jak grunt w stanie naturalnym. Dodatkowo zadanie utrudnia różnorodność gruntów ze względu na uziarnienie, stan gruntu czy wilgotność.

Przedmiotem wcześniejszych badań autorów były:

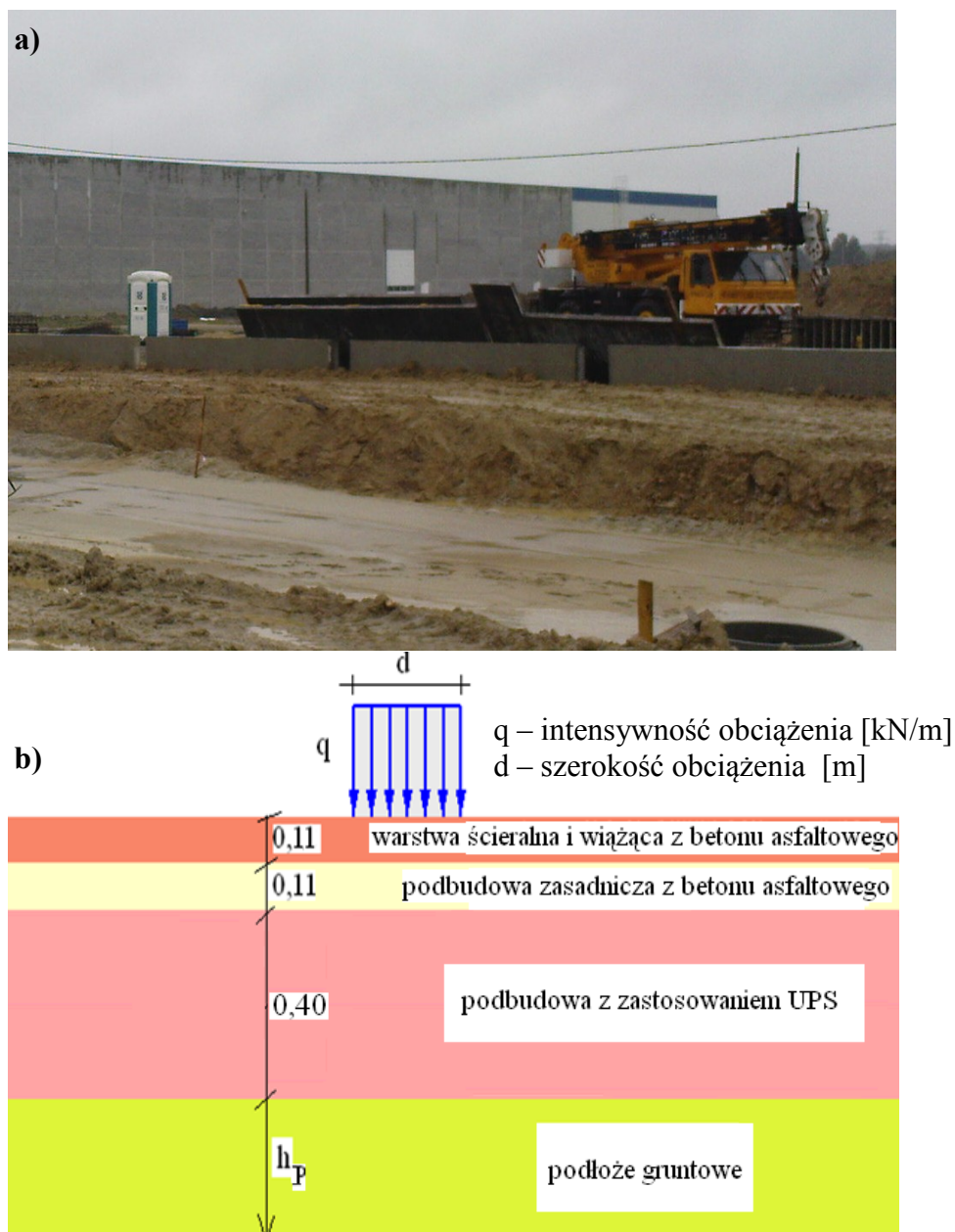
- analizy strat ciepła w budynku w wyniku kontaktu z podłożem gruntowym (wymiana ciepła zachodząca w narożu oraz przez podłogę wykonaną na płytowym, warstwowym fundamencie eksperymentalnym, posadowionym bezpośrednio na gruncie) [6],
- analizy termosprężyste warstwowej konstrukcji drogowej prowadzone w celu oszacowania zagrożenia wystąpieniem uszkodzeń termicznych [5].

Tworzą one pewną ścieżkę badań, wskazujące na „niszę” w dostępności danych materiałowych koniecznych do tego typu analiz.

W artykule przedstawiono próbę wykorzystania danych temperaturowych z monitoringu warstwowej konstrukcji drogowej [10] do oceny możliwości oszacowania nieznanymi parametrów cieplnych materiałów warstw konstrukcji drogowej, bez konieczności wykonania pomiarów laboratoryjnych.

2. POMIARY

2.1. Stanowisko pomiarowe– badania in-situ



Rys. 1. Fragment poligonu badawczego na drodze dojazdowej do hali logistycznej (a), przekrój przez konstrukcję (b)

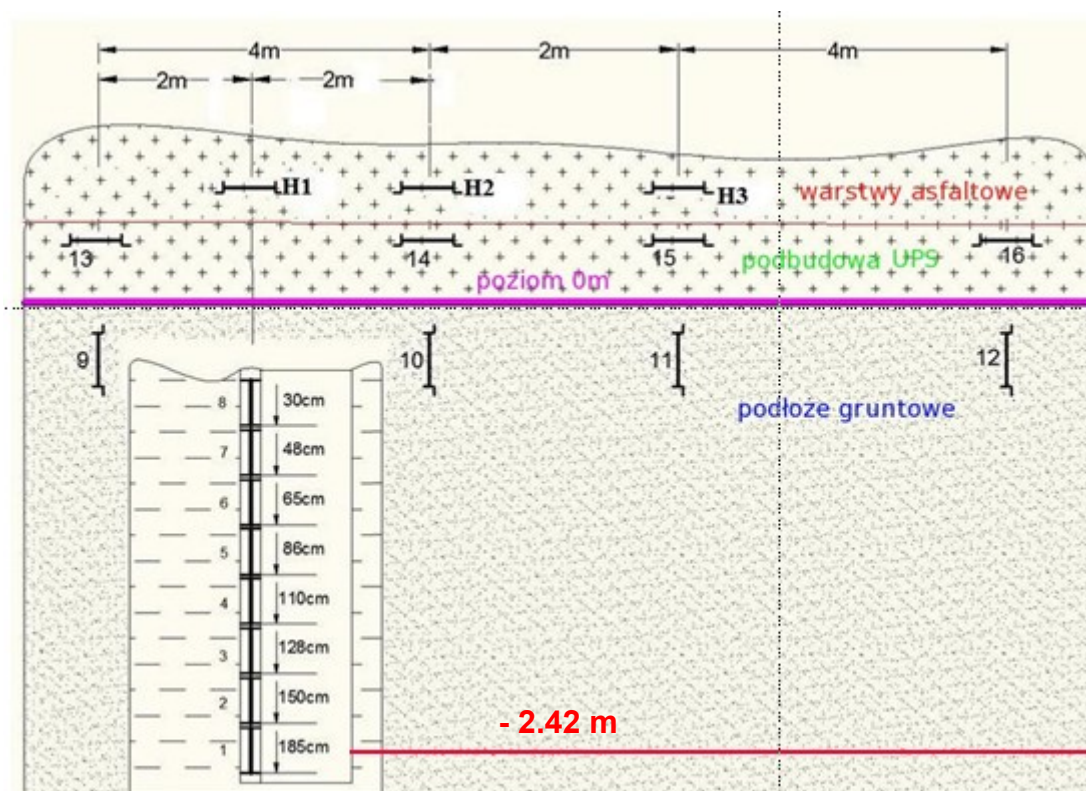
W 2011 r., w ramach pracy doktorskiej Marty Kadeli, został założony monitoring warstwowej konstrukcji drogowej na odcinku drogi dojazdowej do hal w obszarze centrum logistycznego w Bieruniu, koło Katowic (rys. 1). Podstawowym celem monitoringu jest rola „wspomagania” informacjami i korygowania modelu obliczeniowego układów konstrukcja drogowa – podłoże gruntowe [9,11,12]. W skład elementów stanowiska wchodzi (rys.2):

- 16 czujników strunowych, model 4200, założonych w gruncie i podbudowie,
- 3 czujniki strunowe wysokotemperaturowe, model 4200HT, założonych w spodzie warstw asfaltowych,
- baza pomiarowa [19].

Rys.3 przedstawia etapy zakładania monitoringu w poszczególnych warstwach konstrukcji drogowej. Czujniki zostały założone do ok. 2,0 m w głąb podłoża gruntowego (rys.2). Podłoże naturalne stanowią piaski średnie i drobne z nielicznymi wtrąceniami drobnych soczewek pyłów i glin. Poziom wód gruntowych znajduje się na 2,0 m i głębiej poniżej koryta drogi.

W warstwie podbudowy został wbudowany materiał z zastosowaniem ubocznych produktów spalania (UPS).

Czujniki do pomiaru odkształceń w gruncie i podbudowie zostały założone w sierpniu 2011 r., a czujniki do pomiaru odkształceń na spodzie warstw asfaltowych we wrześniu 2011 r. Dla pierwszego okresu uznaje się, że konstrukcja jest konstrukcją dwuwarstwową (warstwa podbudowy UPS – podłoże gruntowe), a dla drugiego trójwarstwową (warstwy asfaltowe – warstwa podbudowy UPS – podłoże gruntowe).



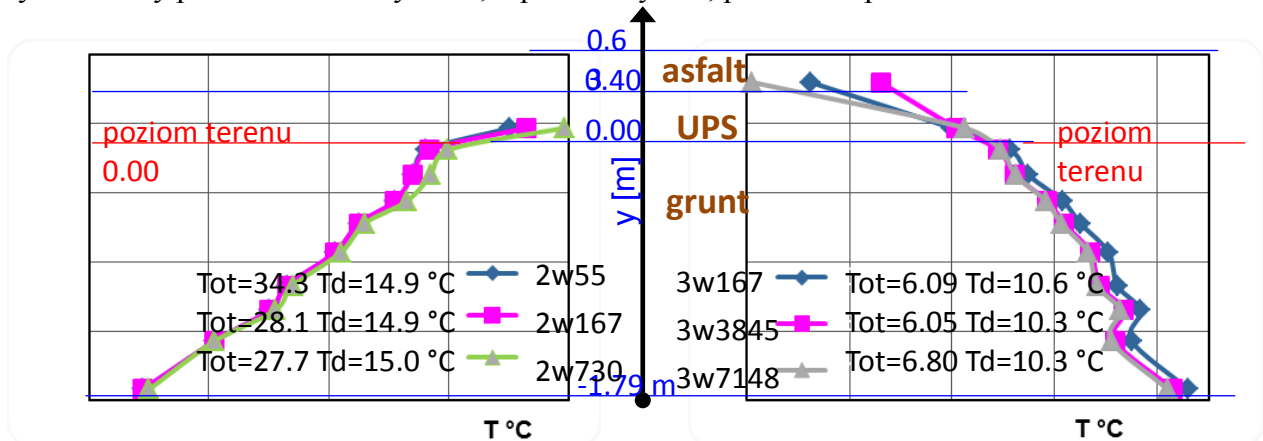
Rys.2. Rozmieszczenie czujników



Rys.3. Zakładanie czujników

2.2. Dane z pomiarów *in-situ*

W wyniku automatycznego pomiaru pozyskano dane temperaturowe w miejscu lokalizacji czujników oraz temperatury otoczenia T_o w 30 sekundowych interwałach. Do analizy wykorzystano dane otrzymane z pomiarów w okresie letnim, gdy konstrukcja składała się z dwóch warstw (2w), oraz w okresie jesiennym dla konstrukcji trójwarstwowej (3w). Na rys.4 zostały przedstawione wybrane, reprezentatywne, profile temperatur.

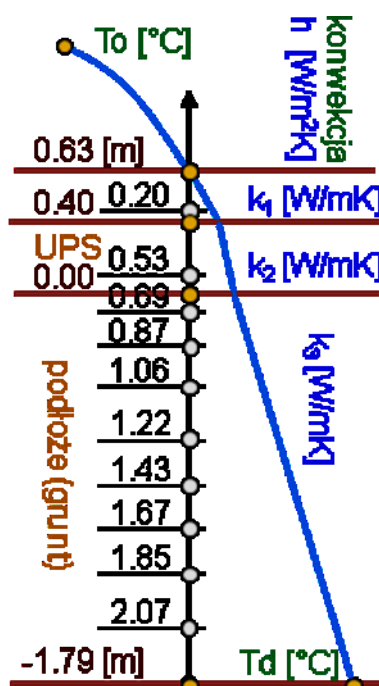


Rys.4. Wybrane profile temperatur dla dwu- (po lewej) i trójwarstwowej konstrukcji (po prawej), T_{ot} – zmierzona temperatura powietrza

3. MODEL NUMERYCZNY

Liniowy charakter konstrukcji zapewnia jednokierunkowy przepływ ciepła w płaszczyźnie pionowej, równoległej do osi drogi. Lokalizacja czujników pomiarowych w odległości 2,0 m od krawędzi drogi znacznie ogranicza poziome straty ciepła wynikające z ewentualnych różnic

przewodności cieplnej warstw konstrukcji drogowej i otaczającego ją gruntu. Z pomiarów *in situ* wynika, że wahania temperatury na większych głębokościach są minimalne. Były to przesłanki do zastosowania jednoosiowego modelu wymiany ciepła (rys.5).



Rys.5. Jednowymiarowy model wymiany ciepła

Model numeryczny utworzono, bazując na bilansach strumieni ciepła przepływającego przez poszczególne warstwy i ostatecznie oddawanego do otoczenia [17]. Temperatury wyznaczone są w punktach siatki umieszczonych na granicy warstw oraz w punktach pomiarowych (rys. 5). Rozważono dwa przypadki, gdy konstrukcja drogi składa się z dwóch warstw oraz trzech warstw odpowiednio do sytuacji *in situ*, opisanej w punkcie 2.1. Zastosowano konwekcyjny warunek wymiany ciepła z otoczeniem [18] na górnej powierzchni drogi, z uwzględnieniem zmierzonej w warunkach *in situ* temperatury otoczenia T_0 . Temperaturę mierzoną w najgłębiej położonym punkcie pomiarowym T_d przyjęto jako warunek brzegowy pierwszego rodzaju dla dolnego brzegu modelu.

Do określenia rozkładu pola temperatury w modelu numerycznym konieczna jest znajomość czterech parametrów cieplnych: przewodności cieplnych trzech warstw (k_1 , k_2 , k_3 – rys.5) oraz współczynnika konwekcji odpowiedzialnego za wymianę ciepła z otoczeniem h .

4. ANALIZY NUMERYCZNE

4.1. Zadanie odwrotne a zadanie bezpośrednie wymiany ciepła

Typowe zadanie inżynierskie polega na wyznaczeniu rozkładu pola temperatury $T(\mathbf{X})$ odpowiadającego zadanemu modelowi $\mathbf{X}(H, y_p, k_1, k_2, k_3, h, T_0, T_b)$: wymiarom geometrycznym, warunkom brzegowym oraz własnościom materiałowym. Tak więc temperatury otrzymuje się z rozwiązania zadania zwanego prostym lub bezpośrednim [13] jako skutek założonych parametrów modelu.

Rozważano przypadek, gdy nie wszystkie parametry modelu są znane, dysponuje się za to pomiarami rozkładu temperatur po głębokości U , równoważącymi brak danych w modelu.

W analizowanym zadaniu jako nieznanne traktowano własności cieplne warstw oraz współczynnik przejmowania ciepła $\mathbf{Y}(k_1, k_2, k_3, h)$. W celu określenia nieznanymi parametrów modelu \mathbf{Y} formułuje się zadanie doboru takich ich wartości, że otrzymane dla nich w zadaniu prostym temperatury $\mathbf{T}(\mathbf{Y})$ odpowiadają pomierzonym $\mathbf{T}(\mathbf{Y})=\mathbf{U}$. Zadanie poszukiwania niektórych nieznanymi przyczyn (parametrów modelu) $\mathbf{Y}(\mathbf{U})$ na podstawie znanych skutków (pomierzonych temperatur) \mathbf{U} nazywa się zadaniem odwrotnym [8,13].

Rozwiązanie zadania odwrotnego polega zwykle na doborze wartości niewiadomych parametrów, które zminimalizują przyjętą funkcję celu Δ [3,7,8,13,15]. W najprostszym przypadku przyjmuje się sumę kwadratów różnic temperatur pomiędzy profilami zmierzonym \mathbf{U} oraz otrzymanym dla szacowanych parametrów $\mathbf{T}(\mathbf{Y})$:

$$\Delta = \text{sum}\{\Delta\mathbf{T}^2\} \quad \text{gdzie:} \quad d\mathbf{T} = (\mathbf{T}(\mathbf{Y}) - \mathbf{U}) \quad (1)$$

Minimalizacja funkcji wymaga znalezienia miejsca zerowego jej pochodnej:

$$\frac{\partial\Delta}{\partial\mathbf{Y}} = 0 \Rightarrow \mathbf{Z}^T(\mathbf{T} - \mathbf{U}) = 0 \quad \text{gdzie:} \quad \mathbf{Z} = \frac{\partial\mathbf{T}}{\partial\mathbf{Y}}. \quad (2)$$

Wykorzystując rozwinięcie temperatur w szereg Taylora w kolejnym kroku iteracji (względem temperatur z poprzedniej iteracji) można zapisać rozwiązanie w postaci iteracyjnej:

$$\mathbf{T}_{i+1}(\mathbf{Y}_{i+1}) = \mathbf{T}_i(\mathbf{Y}_i) + \mathbf{Z}_i d\mathbf{Y}_i, \quad \text{gdzie:} \quad d\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_{i+1} - \mathbf{Y}_i. \quad (3)$$

Podstawienie poszczególnych zależności do pochodnej daje układ równań liniowych ze względu na kolejne przybliżenie poszukiwanych niewiadomych w następnej iteracji \mathbf{Y}_{i+1} , w zależności od przybliżeń uzyskanych z bieżącej iteracji, oraz pomiarów \mathbf{U} :

$$\mathbf{Z}_i^T \mathbf{Z}_i d\mathbf{Y} = \mathbf{Z}_i d\mathbf{T}, \quad \text{gdzie:} \quad d\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_{i+1} - \mathbf{Y}_i \quad \text{oraz} \quad d\mathbf{T} = \mathbf{T}_i(\mathbf{Y}_i) - \mathbf{U} \quad \text{oraz} \quad \mathbf{Z}_i = \frac{\partial\mathbf{T}_i}{\partial\mathbf{Y}_i} \quad (4)$$

Tak sformułowane zadanie odwrotne sprowadza się do iteracyjnego rozwiązania układu równań liniowych, którego współczynniki określane są na podstawie aktualnych oszacowań poszukiwanych parametrów \mathbf{Y}_i oraz odpowiadających im temperatur $\mathbf{T}_i(\mathbf{Y}_i)$, wyznaczonych w zadaniach bezpośrednich. Macierz \mathbf{Z}_i zawiera gradienty temperatur \mathbf{T}_i w punktach pomiarowych względem powodujących je przyrostów szacowanych parametrów \mathbf{Y}_i . Jest to tak zwana macierz wrażliwości zadania [13,15,17]. Zadanie rozwiązano metodą gradientową.

Zadania odwrotne, w przeciwieństwie do bezpośrednich, wykazują dużą wrażliwość na wszelkiego rodzaju błędy, szczególnie błędy pomiarowe oraz błędy (niedoskonałości) modelu w stosunku do warunków pomiarów. Błędy są powiększane w rozwiązaniu, powodując problemy z jakością i stabilnością rozwiązań, a czasem nawet uniemożliwiając uzyskanie rozwiązania, co czyni zadania odwrotne źle uwarunkowanymi [8]. Dodatkowe trudności może powodować zależność parametrów mających podobny wpływ na mierzone wielkości.

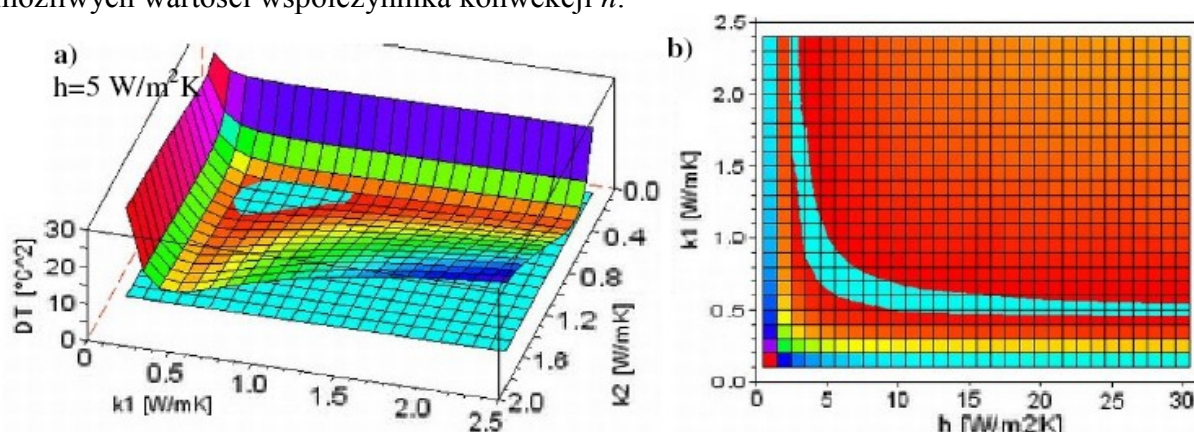
4.2. Sformułowanie zadania

W trójwarstwowym modelu niewiadome są potencjalnie cztery parametry: h, k_1, k_2, k_3 . Każdy z nich decyduje o wielkości przepływającego strumienia ciepła. W celu określenia stałego w poszczególnych warstwach strumienia ciepła przynajmniej jeden parametr musi być znany. Na potrzeby testów przyjęto, że znanym parametrem jest przewodność cieplna trzeciej warstwy (gruntu) k_3 .

Bazując na numerycznych symulacjach pomiarów – uzyskanych z rozwiązania zadania prostego z narzuconymi, losowymi błędami o zadanej maksymalnej amplitudzie – potwierdzono poprawność funkcjonowania modelu numerycznego. Stwierdzono również,

że nawet niewielkie błędy pomiarowe (rzędu $0,05^{\circ}\text{C}$) prowadzą do bardzo dużych błędów uzyskanego oszacowania poszukiwanych trzech wielkości, czyniąc uzyskane rozwiązanie bezwartościowym. Z doświadczenia w analizie zagadnień odwrotnych [4] wynika, że im więcej w zagadnieniach odwrotnych poszukiwanych niewiadomych, tym gorsze uwarunkowanie rozwiązywanego zadania oraz więcej możliwych zależności pomiędzy niewiadomymi.

Wykonano serię symulacji w celu określenia wpływu poszukiwanych niewiadomych na kształt funkcji celu $\Delta(k_1, k_2, h)$. Jasny, owalny obszar na rys.6.a ($h=5,0 \text{ W/m}^2\text{K}$) lokalizuje minimum funkcji celu dla zbliżonych wartości przewodności cieplnych obu warstw drogi: $k_1 \approx k_2 \approx 0,5 \text{ W/mK}$. Rys.6.b pokazuje, że dla $k_2=0,5 \text{ W/mK}$, w rzucie na powierzchnię k_1-h , obszar minimum Δ ma kształt wydłużonej i zagiętej rynny bez jednoznacznej lokalizacji minimum. To pogorszy zbieżność zadania: przykładowo dla $k_1=0,5 \text{ W/mK}$ jest cała gama możliwych wartości współczynnika konwekcji h .



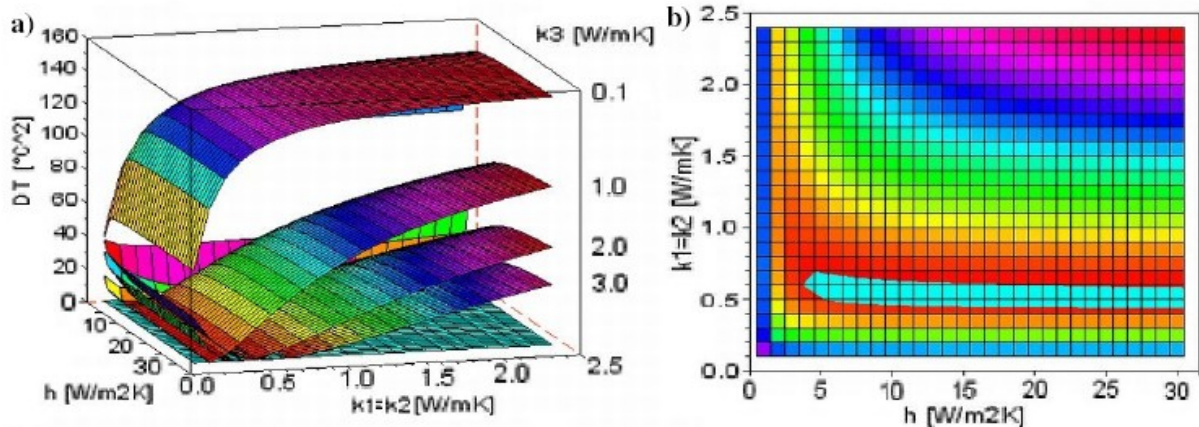
Rys.6 Obszary minimum funkcji celu $\Delta(k_1, k_2)$ po lewej oraz $\Delta(h, k_1)$ po prawej

Dla lepszego uwarunkowania zadania przyjęto jedną zastępczą przewodność cieplną $k=k_1=k_2$ dla dwóch górnych warstw konstrukcji. Daje ona taki sam opór cieplny zastępczej, podwójnej warstwy o grubości d_1+d_2 , jak dwóch warstw składowych z osobna:

$$\frac{d_1 + d_2}{k} = \frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2}. \quad (5)$$

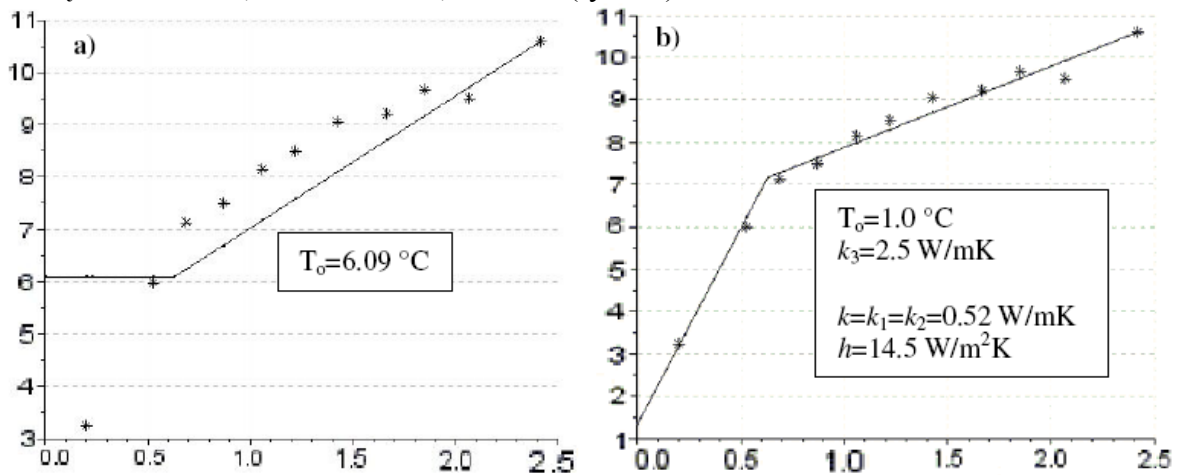
Model dwuwarstwowy ma jedną mniej przewodność cieplną niż model trójwarstwowy, jednakże w górnej jego warstwie pomiar temperatury wykonano tylko na jednej głębokości, a w trójwarstwowym są temperatury w dwóch punktach zastępczej warstwy (połączonych dwóch górnych warstw). Dwa punkty pomiarowe pozwalają na lepsze dopasowanie profili temperatur na tym odcinku niż pojedynczy punkt. Dlatego większość analiz poprowadzono na modelu trójwarstwowym z zastępczą przewodnością cieplną.

W tak uproszczonym modelu poszukiwano dwóch niewiadomych: zastępczej przewodności cieplnej k oraz współczynnika konwekcji h . Zbadano wpływ parametrów $k(=k_1=k_2)$ oraz h na kształt funkcji celu $\Delta(k, h)$ w zależności od przyjętego parametru k_3 , otrzymując powierzchnie jak na rys.7.a. Dla bardzo małych wartości współczynnika przewodności cieplnej gruntu $k_3 < 1,0 \text{ W/mK}$ funkcja celu nie ma minimum dla fizycznie uzasadnionych wartości parametrów k i h . Im większe k_3 , tym wartości szacowanych parametrów są bliższe oczekiwanym oraz wyraźniejszy obszar minimum, pozostający jednak w kształcie „wydłużonej rynny” (rys.7.b dla $k_3=2,5 \text{ W/mK}$).



Rys.7 Kształt funkcji celu $\Delta(k, h)$ z lewej oraz obszar minimum dla $k_3=2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$

Dla analizowanego, uproszczonego, modelu przeprowadzono serię analiz odwrotnych. Wykorzystano eksperymentalny profil 3w167 o temperaturze otoczenia $T_o=6,09 \text{ }^\circ\text{C}$ oraz temperaturze w najgłębiej położonym punkcie pomiarowym $T_d=10,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Pomimo przyjmowania różnych wartości k_3 , nie otrzymano zbieżnego, stabilnego rozwiązania. Porównanie profili temperatur pomierzonego i numerycznego na rys.8.a pokazuje, że przyjęta na podstawie pomiarów *in situ* wartość $T_o=6,09 \text{ }^\circ\text{C}$ jest zbyt wysoka i nie daje możliwości dopasowania profili. Im mniejsza od zmierzonej wartość T_o oraz większe k_3 , tym stabilniejsze rozwiązania. Najbliższe oczekiwanym wartości parametrów, dające zbieżne i stabilne rozwiązania to $T_o=1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ oraz $k_3=2,5 \text{ W/mK}$ (rys.8.b).



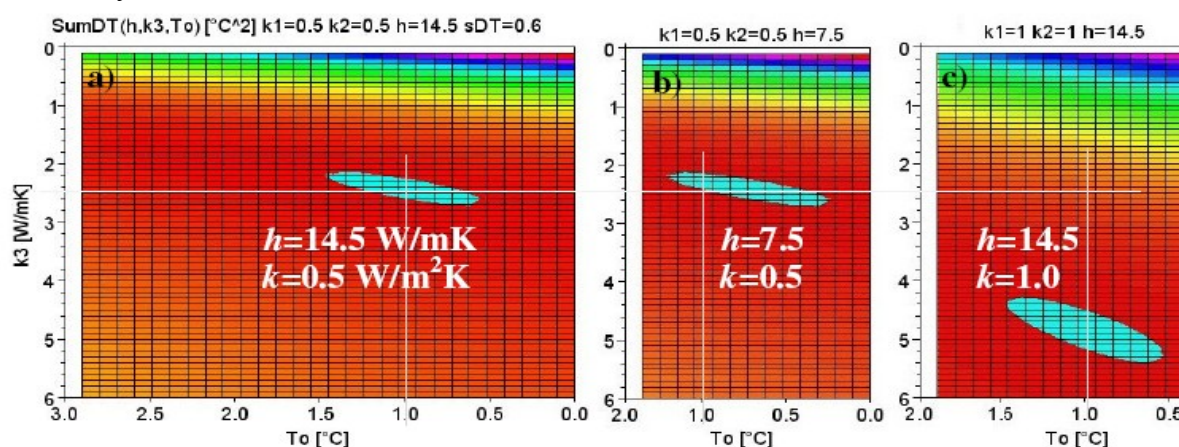
Rys.8 Zgodność profili temperatur dla różnych wartości T_o

Tak wysoka wartość współczynnika przewodności cieplnej k_3 odpowiada raczej litym skałom niż luźnemu czy sypkiemu gruntowi, nawet ze znaczną zawartością wilgoci. Zbadano więc w zadaniu prostym wpływ k_3 oraz współczynnika konwekcji h oraz T_o na funkcję celu $\Delta(k_3, T_o, h)$.

Jak widać na rys.9.a dla $k=0,52 \text{ W/mK}$ jest wyraźne minimum ze względu na k_3 i T_o . Wraz ze wzrostem $h \text{ W/m}^2\text{K}$ przesuwają się one poziomo w kierunku coraz mniejszych wartości T_o przy stałym $k_3 \approx 2,5 \text{ W/mK}$. To zależność wynikająca z warunku brzegowego konwekcji $q=h \cdot (T-T_o)$. Przyjęcie T_o nie ma bezpośredniego wpływu na uzyskiwane oszacowanie k , a jedynie na wartość h oraz stabilność rozwiązania.

Zwiększenie wartości zastępczej k powoduje proporcjonalne powiększenie k_3 odpowiadającego minimum funkcji celu ($k_3 \approx 4,8 \text{ W/mK}$ dla $k=1,0 \text{ W/mK}$). Bliższe

oczekiwanym oszacowanie k wymagałoby nieakceptowanie dużej k_3 , natomiast dla bardziej prawdopodobnych wartości $k_3 < 2,5$ W/m Knie uzyskuje się stabilnego rozwiązania. Zatem powyższe rozwiązanie ($k=0,52$ W/mK) jest najlepszym dla tego modelu i danych pomiarowych.



Rys.9 Minimum funkcji celu $\Delta(k_3, T_o, h)$ – wyróżniony obszar: $\Delta \leq 0.6$ K²

Porównanie wartości k_3 oraz odpowiadającej jej zastępczej wartości k – według lokalizacji minimum funkcji celu – pokazuje stałą proporcję $k_3/k \approx 4,8 \div 4,81$. Z rozwiązania zadania odwrotnego dla pomiaru 3w167 otrzymuje się $k_3/k=4,82$. W celu sprawdzenia czy wyznaczony stosunek jest charakterystyczny dla danego modelu, wykorzystano drugi reprezentatywny profil pomiarowy 3w3845, odpowiadający temperaturze zmierzonej w najgłębszym punkcie pomiarowym $T_d=10,3$ °C oraz temperaturze otoczenia $T_o=6,5$ °C. Przeprowadzono podobne analizy jak dla profilu 3w167, otrzymując podobne do poprzednich, zbieżne rozwiązanie – m.in. $k=0,5$ W/mK, dla $T_o=3,0$ °C (mniejsze od zmierzonej), przy minimalnej założonej wartości $k_3 \geq 1,4$ W/mK. Z analiz odwrotnych oraz lokalizacji minimum funkcji celu określono stały stosunek $k_3/k \approx 2,8 \div 2,83$. Taka proporcja jest bardziej pożądana z fizycznego punktu widzenia, jednak jest inna niż otrzymana dla 3w167. To oznacza brak oczekiwanej prawidłowości. Z punktu widzenia kształtu funkcji celu oba przypadki różnią się wyłącznie wartościami T_d i T_o , które – jak widać – mają bardzo duży wpływ na uzyskiwane rozwiązanie.

Tabela 1. Zestawienie wyników dla wybranych profili pomiarowych

ilość warstw	Nr pomiaru	T_d	T_{ot}	T_o	k_3	k	H	Δ	k_3/k
		°C	(zmierzona) °C	(w modelu) °C					
3	3w167	10,6	6,09	1,0	2,5	0,52	14,5	0,512	4,83
3	3w3845	10,3	6,5	3,0	3,0	1,06	12,1	0,463	2,82
3	3w3732	10,3	6,97	3,5	1,5	0,62	6,80	0,512	2,42
2	2w167	14,9	28,1	25	2,0	0,53	14,5	0,352	3,79
2	2w730	15,0	27,7	27	3,0	0,63	13,3	0,292	4,78
2	2w56	14,9	34,3	24	2,0	0,74	10,5	0,493	2,70

Podobne analizy przeprowadzono dla profili w modelu dwuwarstwowym. Wyniki z zadania odwrotnego oraz proporcje odpowiednich parametrów zestawiono w tabeli 1. Otrzymana w dwuwarstwowym modelu proporcja k_3/k_2 różni się dla poszczególnych

pomiarów. Podstawienie zależności $k_3/k_2=3,79$ z pomiaru 2w167 w modelu dwuwarstwowym do zadania odwrotnego z trzema warstwami nie daje stabilnego, zbieżnego rozwiązania.

5. WNIOSKI

Pozyskane *in situ* profile temperatur są cenną informacją o rozkładzie temperatury po głębokości konstrukcji drogowej, poszukiwaną w literaturze przedmiotu. Na podstawie wyników pomiarów zbudowano model numeryczny wymiany ciepła przez konstrukcję drogi, służący do symulacji samego zjawiska jak i do analiz odwrotnych, mających na celu zbadanie możliwości szacowania parametrów cieplnych materiałów warstw konstrukcji drogowej. Stanowi to próbę odpowiedzi na pytanie czy jest możliwe odtworzenie powyższych parametrów na podstawie posiadanych profili temperatury. Brak danych na temat przewodności cieplnej materiałów warstw, związany z uziarnieniem czy stanem gruntów, dużą różnorodnością stosowanych w podbudowach ubocznych produktów spalania oraz duży zakres zmienności współczynnika konwekcji w zależności od wilgotności, temperatury i prędkości wiatru powoduje, że większość tych parametrów nie została do tej pory dobrze określona.

W zadaniu odwrotnym można praktycznie poszukiwać jedynie dwóch niewiadomych. Pierwszą niewiadomą jest współczynnik konwekcji h , poszukiwany w zadaniu odwrotnym, ponieważ ze względu na dużą zmienność i silną zależność od warunków atmosferycznych, trudno o inżynierskie oszacowanie jego wartości. Drugą niewiadomą może być przewodność cieplna jednej z warstw, np. przewodność cieplna drugiej warstwy w modelu dwuwarstwowym lub zastępcza przewodność cieplna dla kilku warstw w modelu trójwarstwowym. Przewodność cieplna materiału przynajmniej jednej z warstw musi być przyjęta jako znana, gdyż decyduje ona o wielkości strumienia ciepła. Zdaniem autorów najlepszym wyborem jest przyjęcie przewodności cieplnej betonu asfaltowego k_1 , gdyż jest to najbardziej jednorodny i łatwy do zbadania w stanie naturalnym materiał [2,14].

Zmniejszenie liczby niewiadomych lub szacowanie w jednym zadaniu przewodności cieplnych dwóch warstw jednocześnie jest możliwe w przypadku wiarygodnego pomiaru oddawanego do otoczenia strumienia ciepła q_b i zastąpienie nim warunku brzegowego konwekcji. Jest to również celowe ze względu na fakt, iż zmierzone w eksperymencie wartości temperatury otoczenia T_o nie spełniają warunków zadania, ale muszą być określone w celu jego prawidłowego sformułowania. W powyższych analizach przyjmowano zatem wartość T_o najbliższą zmierzonej, która dawała stabilne wyniki.

Podsumowując, można stwierdzić, że badania laboratoryjne parametrów materiałowych są niezbędne do kalibracji modelu numerycznego i ewentualnych dalszych testów nowego – zbudowanego na powyższych wnioskach – zadania odwrotnego.

LITERATURA

1. Aliawdin P., Połczyński J.: Analysis of heat transfer in road pavement structures using methods of optimization. In: Selected papers – eds. M.J. Skibniewski, P. Vainiunas, E.K. Zavadskas..Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University Press “Technika”, 2007,p. 931 – 940.
2. Aliawdin P., Połczyński J.,Wygodzka A.: Parametry cieplne warstw konstrukcji drogowej. „Izolacje” 2009, nr 4, s. 873–880.
3. Alifanov O. M.: Inverse heattransferproblems. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1994.

4. Bartoszek M.: Odwrotne zagadnienia przewodnictwa ciepła oraz termografia jako narzędzia do nieniszczących badań materiałów budowlanych. Rozprawa doktorska. Gliwice: Pol. Śl.,Wydz. Bud., 2004.
5. Bartoszek M., Fedorowicz L., Fedorowicz J.: Ocena trwałości konstrukcji drogowej w numerycznym modelu termomechaniki. „Modelowanie Inżynierskie” 2011, nr 41, t. 10, s. 11-18.
6. Bartoszek M., Fedorowicz L., Kadela M.: Numerical evaluation of the material with low thermal conductivity applied in contact building-subsoil. In: Proceedings on CD of the 9th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings Bratislava: Slovakia Faculty of Civil Engineering STU Bratislava Slovak Society of Mechanics SAS, 2011.
7. Beck J. V., Blackwell B.: Inverse problems. In: W.J. Minkowycz, E.M. Sparrow, G.E. Schneider and R.H. Pletcher(eds), Handbook of Numerical Heat Transfer, Wiley, New York: Wiley, 1988.
8. Beck J. V., Blackwell B., Clair C. R.: Inverse heat conduction: Ill-posed problems. New York : Wiley, 1985.
9. Fedorowicz L., Fedorowicz J., Kadela M.: Problemy właściwej interpretacji wyników analiz układów konstrukcja-podłoże gruntowe. „Górnictwo i Geoinżynieria” 2011, z. 35/2, s. 209-216.
10. Fedorowicz L., Kadela M.: Monitoring system applied in road structure of UPS subbase layer. In: Proceedings on CD of the 9th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings. Bratislava, Slovakia Faculty of Civil Engineering STU Bratislava Slovak Society of Mechanics SAS, 2011.
11. Kadela M.: Problemy budowy wiarygodnego modelu konstrukcja drogowa – podłoże gruntowe. W: Monografia „Wybrane zagadnienia z dziedziny budownictwa” - pod red. Andrzeja Wawrzyńka. Gliwice: Wyd. Pol. Śl., 2009, s. 433-442.
12. Kadela M.: Rola modelu obliczeniowego układu konstrukcja warstwowa – podłoże w ocenie trwałości konstrukcji drogowej. W: Monografia „Badania i analizy wybranych zagadnień z dziedziny budownictwa” - pod red. Joanny Bzówki. Gliwice: Wyd. Pol. Śl., 2011, s. 79-86.
13. Kurpisz A., Nowak A. J.: Inverse thermal problems. In: International Series on Computational Engineering, Comp. Mech. Publications, Southampton, 1995.
14. Mieczkowski P.: Model fizyczny obliczania temperatury górnej warstwy nawierzchni asfaltowej. „Drogownictwo” 2001, nr 8, s. 230–235.
15. Özisik M. N., Orlande H. R. B.: Inverse heat transfer: fundamentals and application. Taylor & Francis, 2000.
16. Peck L., Jordan R., Koenig G.: SNTHERM-RT predictions of pavement temperature, U.S. Army Engineer Research and Development Center Cold Regios/Research and Engineering Laboratory (CRREL), 2002.
17. Szargut J. i in.: Modelowanie numeryczne pól temperatury. Warszawa: WNT, 1992.
18. Wiśniewski S., Wiśniewski T.S: Wymiana ciepła. Warszawa: WNT, 2000.
19. www.neostrain.pl

NUMERICAL MODELING OF LAYERED STRUCTURES WITH AID OF LABORATORY AND IN SITU TESTS

Summary. Good description of reality requires appropriate junction of theory, laboratory and in-situ experiments in the created numerical model. This paper describes efforts of utilisation of the experimental results to cover lack of thermal conductivities for layered structures having contact with ground and thus to solve problems with numerical model calibration. Thermal conductivity of the road structure layers and ground supporting engineering structures (both road and buildings) are not the main concern of the engineers and therefore appropriate laboratory test are not popular neither widely published. Authors have collected series of in-situ measurements of the temperature profiles on the experimental two- and three-layered road structure. Those measurements become basis for numerical efforts focused on possibility to utilise in-situ temperatures for thermal parameters evaluation in the inverse heat transfer analysis. Results, conclusions and suggestions arising from the tests are being presented here.