

# Oddziaływanie drogowej płyty betonowej na podbudowę i podłoże w warunkach zmiennej temperatury dobowej

Piotr Mackiewicz, Antoni Szydło



Dr inż. Piotr Mackiewicz

Politechnika Wrocławska,  
Zakład Dróg i Lotnisk

piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl



Prof. dr hab. inż. Antoni Szydło

Politechnika Wrocławska,  
Zakład Dróg i Lotnisk

antoni.szydlo@pwr.edu.pl

Obszar Polski znajduje się w obszarze klimatu umiarkowanego o charakterze przejściowym pomiędzy klimatem morskim i lądowym. Na skutek zmiennych cyrkulacji oraz ścierania się wilgotnego morskiego powietrza z suchym euroazjatyckim powstają w konsekwencji znaczne wahania temperatury i ciśnienia w skali roku i doby. Na skutek zmian termicznych płyty betonowej w nawierzchni drogowej ulegają nagrzaniu i ochłodzeniu wielokrotnie w ciągu dnia. Powoduje to cykliczną zmianę kształtu płyty (rys. 1). W konsekwencji powstają zmienne naprężenia w górnej i dolnej części płyty (ściskające i rozciągające).

Pierwsze analizy naprężeń od tempe-

ratury w sztywnych nawierzchniach betonowych przeprowadził Westergaard [1]. Autor zwrócił uwagę na wolne sezonowe zmiany temperatury oraz szybkie zmiany termiczne, występujące w ciągu doby.

W dalszym etapie rozwoju nauki analizowano charakter rozkładu (liniowy lub nieliniowy) temperatury w płycie betonowej, wskazując na charakter nieliniowy [2], [3].

Mohamed i Hansen [4] również opracował model uwzględniający wpływ nieliniowego rozkładu temperatury. Stwierdzili oni m.in., że rzeczywisty rozkład temperatury wzdłuż głębokości płyty jest istotny w analizie wpływu zmiany temperatury, ale różnica temperatur pomiędzy górną i dolną powierzchniami płyty, jest podstawowym czynnikiem w analizie liniowego rozkładu temperatury.

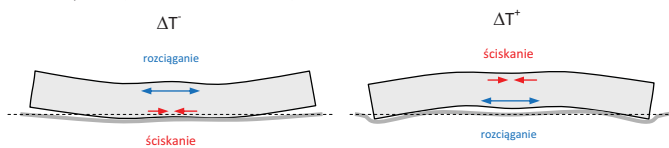
W niniejszym artykule dane do rozkładu temperatury przyjęto na podstawie pomiarów *in situ* na nawierzchni jednego z lotnisk w Polsce. Do obliczeń zastosowano pomiary dobowe z wybranego dnia lipca. W miesiącach letnich obserwuje się największe różnice temperatur pomiędzy górną i dolną powierzchnią płyty. Na rys. 2 pokazano zmianę temperatury dla różnych punktów pomiarowych w płycie betonowej oraz zaznaczono największe różnice temperatur, które wystąpiły w godzinach nocnych ( $\Delta T^- = -4.7^\circ\text{C}$ ) i południowych ( $\Delta T^+ = +7.4^\circ\text{C}$ ). W przypadkach incydentalnych można jednak spodziewać się więk-

szych wartości różnic temperatur. Problem różnych zmian temperatur w ciągu roku oraz ich oddziaływanie na nawierzchnie betonowe przedyskutowano w pracach: [5], [6]. Na rys. 3 pokazano rozkład temperatur na grubości płyty dla wybranych godzin. W godzinach przedpołudniowych i popołudniowych wyraźnie widać charakter nieliniowy rozkładu temperatury. Takie przebiegi uwzględniono w dalszym etapie przy opracowywaniu modelu nawierzchni betonowej.

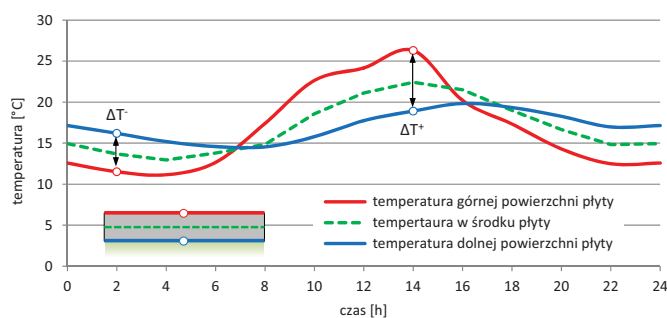
## Modelowanie nawierzchni betonowej w warunkach obciążeń termicznych

Modelowanie z wykorzystaniem elementów skończonych pozwala dość skutecznie symulować i badać zachowanie się nawierzchni sztywnych dla różnych parametrów. W ostatnich dekadach opracowano wiele modeli dedykowanych dla nawierzchni betonowych: ILLI-SLAB [7], JSLAB [8], WESLAYER [9] and ISLAB2000 [10]. Istotnym problemem jest odpowiednie przyjęcie warunków brzegowych (zamocowania i szczepności płyty betonowej z podłożem) oraz uwzględnienie wpływu grawitacji mającej istotny wpływ przy deformacji płyty betonowej. Pewne założenia i analizy zawarto w [11] analizując wpływ różnych właściwości materiału na zachowanie się nawierzchni. Wykazano, że zmniejszenie modułu sprężystości podłoża wywołuje zwiększenie kontaktu pomiędzy zginaną płytą i podbudową. Problematyka tarcia i kontaktu między warstwami nawierzchni uwzględnieniem obciążeń termicznych zajmował się także [12].

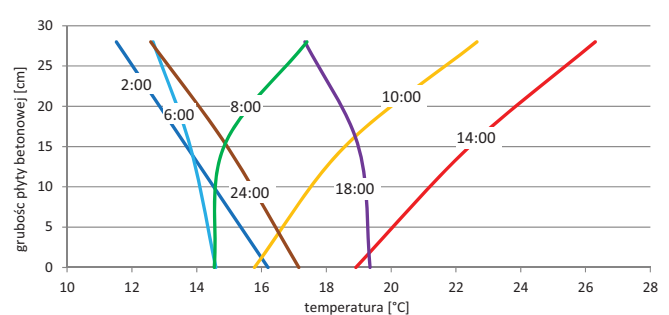
Pomimo znacznej liczby prac badawczych zgromadzonych w ciągu ostatnich lat w dziedzinie nawierzchni betonowych,



1. Wyginanie płyty betonowej w zależności od warunków termicznych



2. Zmiana temperatury dla różnych punktów pomiarowych w płycie betonowej



3. Rozkład temperatur na grubości dla wybranych godzin

ocena zachowania wpływu warunków środowiskowych na nawierzchnie wciąż powinna być analizowana, szczególnie jeśli dotyczy to zróżnicowanych warunków klimatycznych jakie występują w Polsce. Problem interakcji płyty betonowej – podłoża powinien być rozpoznany także w warunkach kiedy nie występuje obciążenie od pojazdów, a tylko samo oddziaływanie termiczne.

Niniejszy artykuł uwzględni wpływ ro-

dzaju dolnych warstw nawierzchni i podłoża na zachowanie się płyty betonowej w warunkach zmiennej temperatury. Autorzy kontynuują powszechne stosowanie Metody Elementów Skończonych z uwzględnieniem kontaktu, tarcia i grawitacji w celu lepszego analizowania zachowania się płyty od zmiany temperatury.

Przeanalizowano 12 typów różnych konstrukcji z uwzględnieniem różnej grubości płyty betonowej (0.25 m i 0.30 m),

różnych warstw podbudowy (z mieszanki niezwiązanej oraz z mieszanki związanej spoiwem) oraz różnych typów podłoża (G1 oraz G2/G3). W analizach przyjęto wymiary płyty betonowej: szerokość 4.5 m, długość 5 m. Schematy nawierzchni betonowej zamieszczono w tab. 1.

Obliczenia numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem programu Cosmos/m [13], [14] w tym termicznego modułu obliczeniowego HSTAR. W celu przeprowadzenia odpowiednich obliczeń z uwzględnieniem temperatury, przyjęto dodatkowe parametry dla płyty betonowej: przewodność cieplna 2.5 W/m°C, ciepło właściwe: 700 J/kg°C, współczynnik rozszerzalności cieplnej: 0.00001 m/(m°C), gęstość: 2400 kg/m<sup>3</sup>. W celu ustabilizowania przepływu ciepła w modelu i uzyskaniu pełnych, zamkniętych cykli, wystarczyło przeprowadzić obliczenia dla dwóch okresów dobowych. W obliczeniach uwzględniono przewodzenie ciepła pomiędzy górną i dolną powierzchnią płyty zgodnie z równaniem (1):

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

gdzie:

$T$  – temperatura [°C],

$t$  – czas [s],

$\rho$  – gęstość [kg/m<sup>3</sup>],

$C$  – ciepło właściwe [J/kg °C],

$Q$  – objętościowe natężenie generowanego ciepła [W/m<sup>3</sup>],

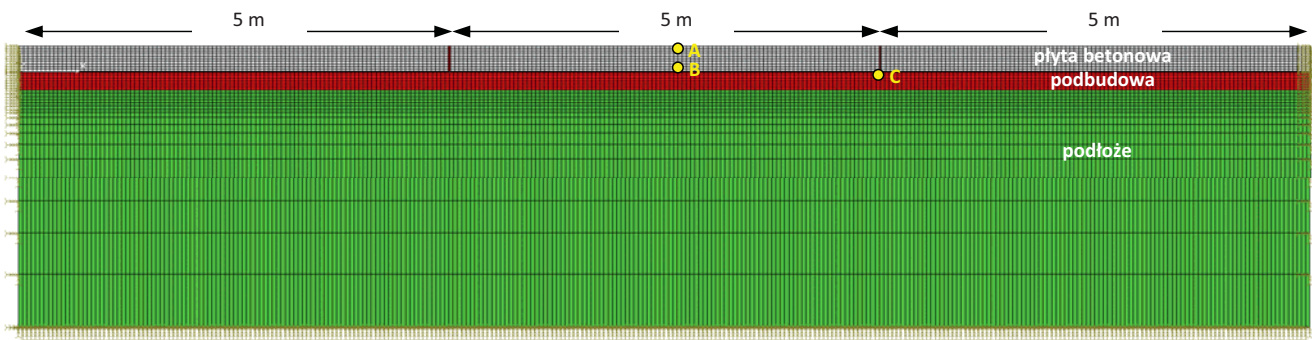
$k_x, k_y, k_z$  – przewodność cieplna [W/m °C],

Model nawierzchni betonowej z podziałem na elementy skończone pokazano na rys. 4. W zakresie modelu uwzględniono trzy płyty w celu szczegółowych analiz oddziaływania w obszarze ich styku krawędzi z podbudową. Analizowano głównie zmianę naprężeń na górnej i dolnej powierzchni płyty (punkty „A” i „B”) oraz przemieszczenia na podbudowie pod płytą betonową w obszarze styku płyt (punkt „C”).

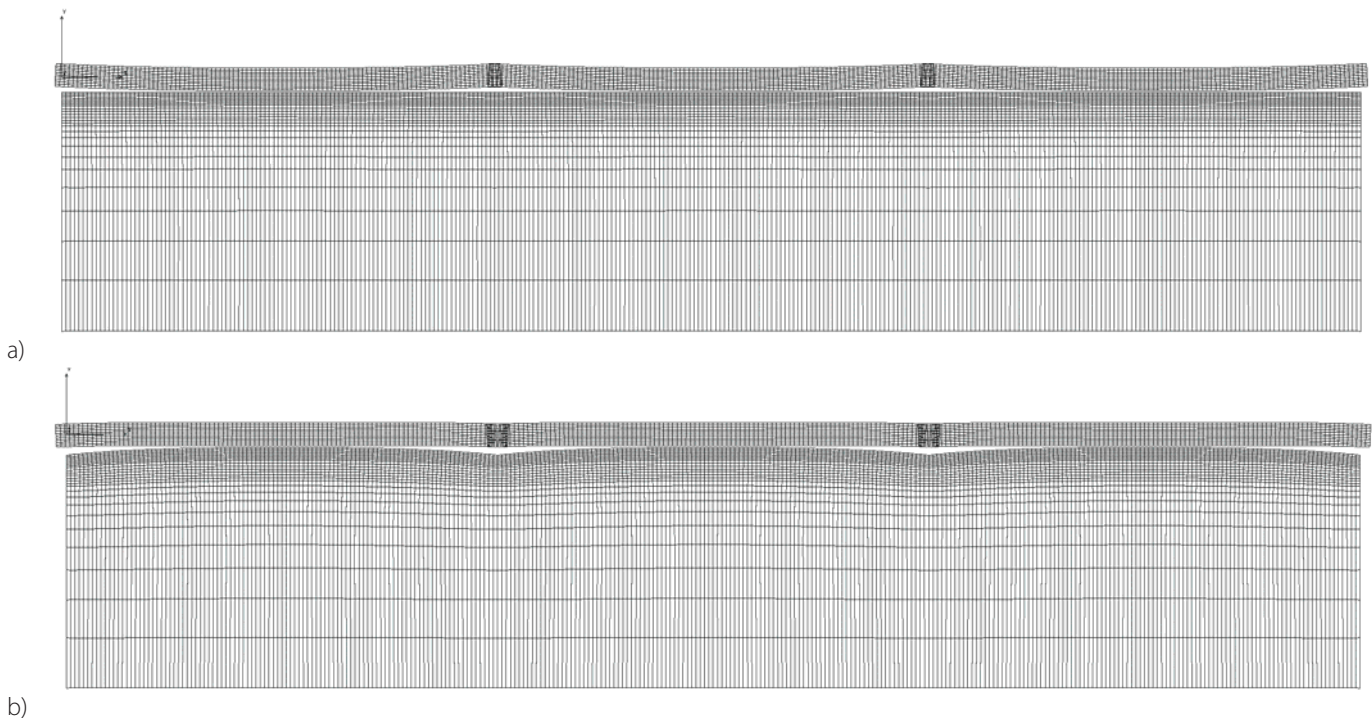
W modelu zapewniono możliwość swobodnego przemieszczania bocznego płyt betonowych modelując odpowiednie szczeliny dylatacyjne na brzegach. W modelu uwzględniono odpowiednie warunki brzegowe oraz współpracę płyty betonowej z podbudową. Tutaj zastosowano odpowiednie dwuwęzłowe elementy kontaktowe GAP. Uwzględniono oddziaływanie grawitacji, natomiast oddziaływanie termiczne uwzględniono stosując odpowiednie wartości temperatur (zgodne z badaniami) w wybranych węzłach płyty uzyskując odpowiednie wartości różni-

Tab. 1. Schematy analizowanych nawierzchni betonowej

ozn.	rodzaj warstwy	grubość [m]	moduł sztywności [MPa]	współczynnik Poissona [-]
S1-25	płyta betonowa 4.5x m5	0.25	35 000	0.20
	podbudowa: mieszanka związana spoiwem C8/10	0.20	10 000	0.30
	podłoże	2.50	120	0.35
S2-25	płyta betonowa 4.5x m5	0.25	35 000	0.20
	podbudowa: mieszanka związana spoiwem C8/10	0.20	10 000	0.30
	podłoże	2.50	50	0.35
S1-30	płyta betonowa 4.5x m5	0.30	35 000	0.20
	podbudowa: mieszanka związana spoiwem C8/10	0.20	10 000	0.30
	podłoże	2.50	120	0.35
S2-30	płyta betonowa 4.5x m5	0.30	35 000	0.20
	podbudowa: mieszanka związana spoiwem C8/10	0.20	10 000	0.30
	podłoże	2.50	50	0.35
BA1-25	płyta betonowa 4.5x m5	0.25	35 000	0.20
	podbudowa: beton asfaltowy	0.15	3 000	0.30
	podłoże	2.50	120	0.35
BA2-25	płyta betonowa 4.5x m5	0.25	35 000	0.20
	podbudowa: beton asfaltowy	0.15	3 000	0.30
	podłoże	2.50	50	0.35
BA1-30	płyta betonowa 4.5x m5	0.30	35 000	0.20
	podbudowa: beton asfaltowy	0.15	3 000	0.30
	podłoże	2.50	120	0.35
BA2-30	płyta betonowa 4.5x m5	0.30	35 000	0.20
	podbudowa: beton asfaltowy	0.15	3 000	0.30
	podłoże	2.50	50	0.35
K1-25	płyta betonowa 4.5x m5	0.25	35 000	0.20
	podbudowa: mieszanka niezwiązana	0.25	400	0.30
	podłoże	2.50	120	0.35
K2-25	płyta betonowa 4.5x m5	0.25	35 000	0.20
	podbudowa: mieszanka niezwiązana	0.25	400	0.30
	podłoże	2.50	50	0.35
K1-30	płyta betonowa 4.5x m5	0.30	35 000	0.20
	podbudowa: mieszanka niezwiązana	0.25	400	0.30
	podłoże	2.50	120	0.35
K2-30	płyta betonowa 4.5x m5	0.30	35 000	0.20
	podbudowa: mieszanka niezwiązana	0.25	400	0.30
	podłoże	2.50	50	0.35



4. Model MES nawierzchni betonowej z uwzględnieniem analizowanych miejsc



5. Przemieszczenia nawierzchni betonowej a) godzina 2:00, b) godzina 14:00, skala x 200

cy temperatur między górną i dolną powierzchnią płyty. W analizach czasowych zastosowano iteracyjną procedurę obliczeniową Newton - Raphsona.

#### Wyniki obliczeń MES

Na rys. 5a i 5b pokazano typową deformację nawierzchni w wyniku oddziaływania termicznego. Na rys. 5a widoczne są przemieszczenia dla temperatury o godzinie 2:00 kiedy to występuje największa ujemna różnica temperatur ( $\Delta T^- = -4.7^\circ\text{C}$ ), natomiast na rys. 5b pokazano przemieszczenia dla temperatury o godzinie 14:00 kiedy to występuje największa dodatnia różnica temperatur ( $\Delta T^+ = +7.4^\circ\text{C}$ ).

Warto zauważyć wyginanie się płyty w kierunku większych wartości temperatur. W przypadku wyginania się płyt dla dodatniej różnicy temperatur płyta (5b) wspiera krawężnikami na dolnych warstwach nawierzchni i pod wpływem ciężaru wywołuje przemieszczenia na górnej powierzchni podbudowy.

Na rys. 6 pokazano zmianę przemieszczeń pionowych  $u_y$  w ciągu doby na górnej powierzchni podbudowy (dla punktu „C” – zgodnie z ozn. na rys. 4), na rys. 6a dla konstrukcji z podbudową z betonu asfaltowego, na rys. 6b dla konstrukcji z podbudową z kruszywa oraz na rys. 6c dla konstrukcji z podbudową stabilizowaną cementem.

Zaprezentowane przemieszczenia są przemieszczeniami względnymi. Wyliczono je odejmując wartość początkowego ugięcia, które występuje o godzinie 2:00. Pominięto w ten sposób wpływ wstępnego obciążenia układu warstw wynikającego z ciężaru płyty i uwzględnionej w modelu grawitacji.

Warto zauważyć, że największe przemieszczenia pionowe obserwuje się w godzinach południowych, a w szczególności o godzinie 14:00 kiedy to występuje największa różnica dodatnia temperatury. Dla tej godziny przeprowadzono dalsze analizy przemieszczeń.

Niewątpliwie grubsza i o większej ma-

się płyta betonowa (0.30 m) wywołuje większe przemieszczenia niż płyta cieńsza o grubości 0.25 m. Dla podbudowy z betonu asfaltowego wpływ grubości płyty (z 0.30 m na 0.25 m) powoduje zmianę w przemieszczeniach o 10 % dla BA2 (podłoże 50 MPa), natomiast dla konstrukcji BA1 (podłoże 120 MPa), aż o około 32 %. W tym przypadku stosunkowo cienka, podatna warstwa podbudowy 0.15 m wykazuje znaczną wrażliwość na deformacje.

Natomiast dla podbudowy z kruszywa (grubość 0.25 m) jest mniejszy ten wpływ i wynosi odpowiednio 13 % (K1-podłoże 120 MPa) natomiast dla konstrukcji K2, na podłożu 50 MPa zaledwie 6 %. Spowodowane jest to najmniejszą różnicą między modułami tej podbudowy i podłoża. Dla słabego podłoża przy dużych przemieszczeniach widać małą wrażliwość zmiany grubości płyty na przemieszczenia.

Dla sztywnej podbudowy uzyskano najmniejsze przemieszczenia. Zmiana grubości płyty z 0.25 m na 0.30 m na sztywnej podbudowie (mieszanka C8/10) powo-

duje, taką samą względną zmianę przemieszeń zarówno dla słabego podłoża (50 MPa) (S2), jaki mocnego (120 MPa) (S1) i wynosi ona około 20 %.

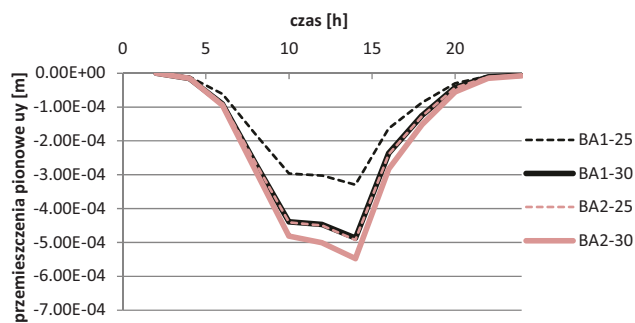
Zmiana rodzaju podłoża (ze 120 MPa na 50 MPa) na każdej typie podbudowy i dla danej grubości płyty, wywołuje zwiększenie przemieszczeń o około 30 %. Wyjątek stanowi konstrukcja z podbudową z betonu asfaltowego i z płytą 0.30 m (BA1-30 i BA2-30). W tym przypadku różnica w przemieszczeniach w zależności od zmiany podłoża wynosi tylko 11 %. Stosunkowo cienka podbudowa z betonu asfaltowego (0.15 m) nie jest w stanie ograniczyć przemieszczeń od ciężkiej płyty niezależnie od wartości modułów podłoża.

Niewątpliwie największe wartości przemieszczeń powstają na słabym podłożu 50 MPa dla podbudowy z kruszywa, która posiada najmniejszy moduł (400 MPa). Jednak warto zwrócić na fakt, że dla konstrukcji BA1-30 powstają większe przemieszczenia niż dla K1-30 (rys. 6). Na rys. 7 zestawiono przemieszczenia dla trzech typów podbudów, dla płyty o grubości 30 cm i podłożu o module 50 MPa. Dla podbudowy z betonu asfaltowego, która charakteryzuje się cechami lepkosprężystymi i jest podatna na trwałe deformacje, zarejestrowano wartość przemieszczenia całkowitego  $5.48e-4$  m. Zaś największe przemieszczenie wystąpiło dla konstrukcji z podbudową z kruszywa i płytą 0.30 m,  $6.06e-4$  m. Dla sztywnej podbudowy powstaje przemieszczenie prawie o połowę mniejsze.

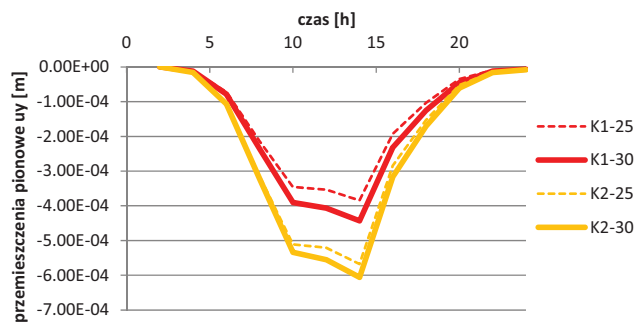
Warto zaznaczyć, że w niniejszym modelu analizowano układy sprężyste. Jednak w rzeczywistości można spodziewać się, dla podbudów podatnych, znacznych kumulacji przemieszczeń. Dobowe przemieszczenia od temperatury będą się sumować z przemieszczeniami wywołanymi oddziaływaniem pojazdów. W konsekwencji w takich niekorzystnych warunkach termicznych działających na płyty betonowe pojawią się pod szczelinami płyt obszary o ograniczonej nośności podbudowy. Nad tymi obszarami płyta zacznie pękać na krawędziach.

W przypadku podbudów z kruszywa przy przekroczeniu dopuszczalnego poziomu naprężeń mogą pojawić deformacje plastyczne, które także spowodują powstanie pustek pod krawędziami płyt. Temat materiałowych analiz nieliniowych będzie rozważany w dalszych publikacjach autorów.

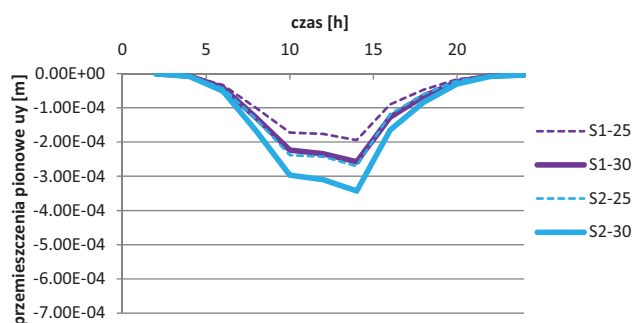
Im cięższa i grubsza płyta tym większe przemieszczenia i większa czasza oddziaływania na dolne warstwy konstrukcji. Wraz ze wzrostem wartości modułów podbudowy wartości przemieszczeń maleją. Jednak



a)

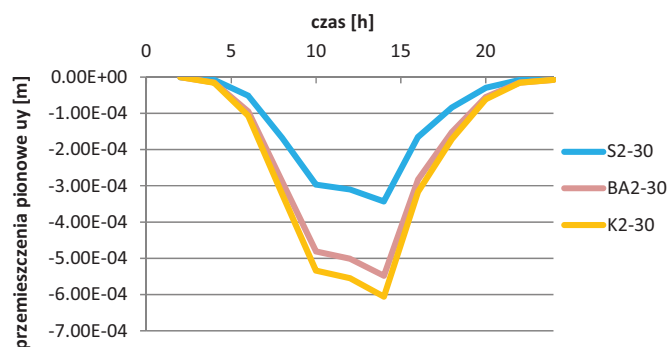


b)



c)

6. Zmiana przemieszczeń w ciągu doby na górnej powierzchni podbudowy (w punkcie „C”), a) - dla konstrukcji z podbudową z betonu asfaltowego, b) - dla konstrukcji z podbudową z kruszywa, c) - dla konstrukcji z podbudową stabilizowaną cementem. Oznaczenie typów konstrukcji zgodnie z tab. 1

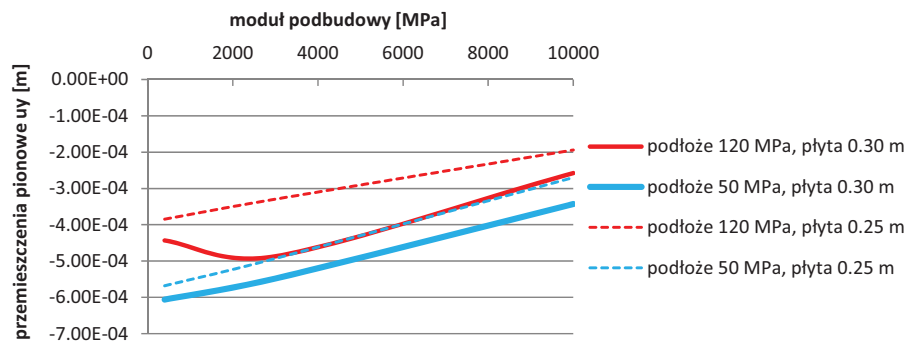


7. Zmiana przemieszczeń w ciągu doby dla trzech typów podbudów, dla płyty o grubości 30 cm i podłożu o module 50 MPa

w przypadku płyty 0.30 m zaobserwowano charakter nieliniowy. Na rys. 8 pokazano zmianę przemieszczeń znormalizowanych dla różnych grubości płyty, wartości modułów podbudowy oraz podłoża. Warto zaznaczyć, że występują tutaj także różne grubości podbudów, dlatego też obserwuje się z uwagi na cienką warstwę pod-

budowy z betonu asfaltowego wynoszącą 0.15 m i stosunkowo małą wartość modułu 3000 MPa, lokalne ekstremum.

Innym problemem związanym z oddziaływaniem temperatury jest powstawanie naprężeń rozciągających w płycie betonowej. Na rys. 9 pokazano dla konstrukcji S1-25 rozkład wartości naprężeń powstałych



8. Zmiana przemieszczeń dla różnych grubości płyty, wartości modułów podbudowy oraz podłoża

w wyniku oddziaływania termicznego na płytę betonową dla godziny 2:00 (9a) oraz 14:00 (9b). Dla tej konstrukcji uzyskano największe wartości naprężeń rozciągających. Warto zwrócić uwagę, że większe naprężenia powstają w płycie o mniejszej grubości dodatkowo bezpośrednio spoczywającej na sztywnej podbudowie i podłożu. W tym przypadku na podbudowie z mieszanki C8/10 o module 10 000 MPa i podłożu 120 MPa.

Na rys. 10 zaprezentowano zmianę naprężeń rozciągających  $s_x$  w płycie betonowej dla różnych grubości płyty, wartości modułów podbudowy oraz podłoża. Rys. 10a pokazuje wartości naprężeń w punkcie „A” o godzinie 2:00 natomiast 10b w punkcie „B” o godzinie 14:00, w której płyta wyginając się ku górze opiera się na

podbudowie. Dla tej godziny powstają największe wartości naprężeń rozciągających. Dla płyty poddanej oddziaływaniu ujemnej różnicy temperatur jaka występuje w godzinach nocnych występuje małe zróżnicowanie wartości naprężeń od modułów dolnych warstw i grubości płyty betonowej. Naprężenia oscylują w granicach 0.6 MPa. Jest to oczywiste z uwagi na jeden punkt podparcia płyty o podbudowę w tej sytuacji termicznej.

Warto zwrócić także uwagę (rys. 9b), że dla dodatniej różnicy temperatur, w obszarze podbudowy, w którym opiera się płyta betonowa powstają naprężenia ściskające około 1.2 MPa oraz rozciągające 0.8 MPa. Miejsce to jest niewątpliwie narażone (jak wskazano przy analizie przemieszczeń pionowych  $u_y$ ) na utratę nośności przy wielo-

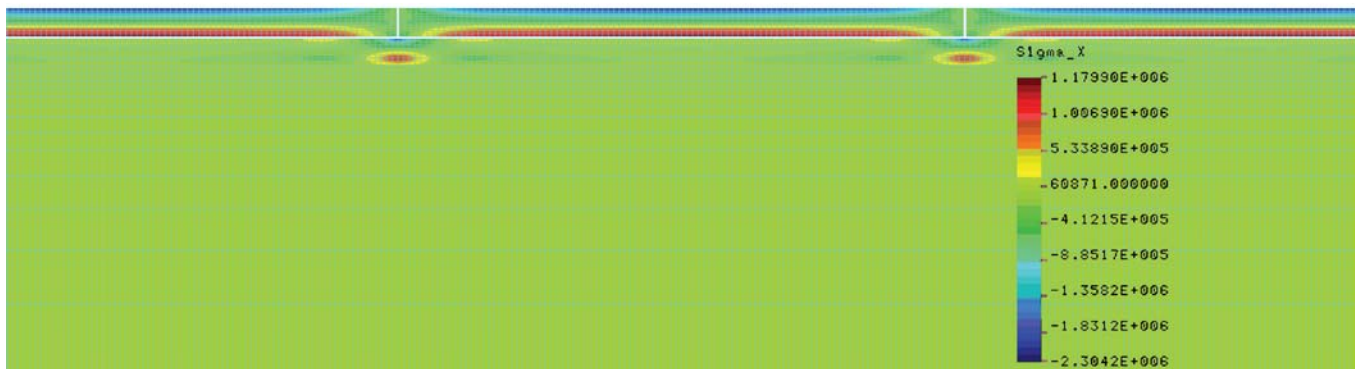
krotnych cyklicznych zmianach dobowych temperatury. Taką sytuację zaobserwowano także dla konstrukcji o podbudowie z betonu asfaltowego. W przypadku podbudowy z kruszywa nie występuje koncentracja naprężeń rozciągających w tym obszarze.

## Podsumowanie

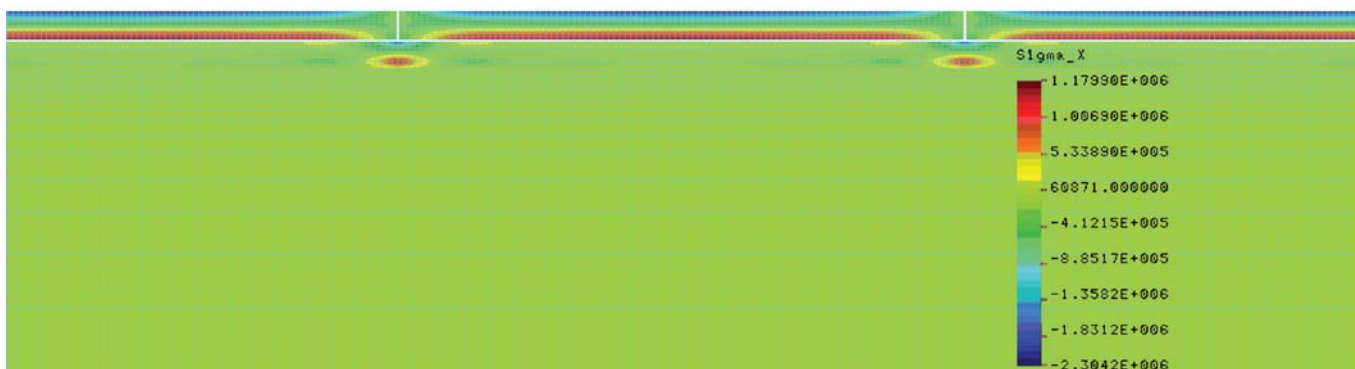
Metoda elementów skończonych jest przydatnym narzędziem, które może być wykorzystane do zbadania wpływu temperatury na naprężenia w płycie betonowej i jej oddziaływanie na dolne warstwy konstrukcji nawierzchni drogowej.

Mimo iż w niniejszym artykule uwzględniono sprężyste parametry materiałowe, analiza obciążenia termicznego przyjęta dla wybranego dnia lipca, pozwoliła wskazać słabe punkty konstrukcji nawierzchni jakie mogą pojawić się przy oddziaływaniu ujemnej, a przede wszystkim dodatniej różnicy temperatur między górną i dolną powierzchnią płyty.

Wyniki obliczeń w modelu pokazują, że w obszarze szczelin poprzecznych płyt betonowych na skutek cyklicznych oddziaływań płyty na podbudowę mogą pojawić się skumulowane przemieszczenia pionowe oraz naprężenia rozciągające prowadzące do destrukcji podbudowy w tym obszarze. W następstwie tego mogą powstawać pustki, w których może zalegać



a)



b)

9. Rozkład wartości naprężeń powstałych w wyniku oddziaływania termicznego na płytę betonową dla godziny 2:00 (9a) oraz 14:00 (9b) (dla konstrukcji S1-25)

woda gruntowa i opadowa dodatkowo ograniczająca nośność. Podczas oddziaływań pojazdów będzie dochodzić do pęknięcia płyt na krawędziach.

W artykule zwrócono uwagę, że stosowanie sztywnych podbudów prowadzi do powstawania większych naprężeń rozciągających w płycie niż dla podbudów podatnych. Z kolei w podbudowach podatnych o małym module sztywności i dodatkowo o małej grubości będą pojawiać się skumulowane przemieszczenia.

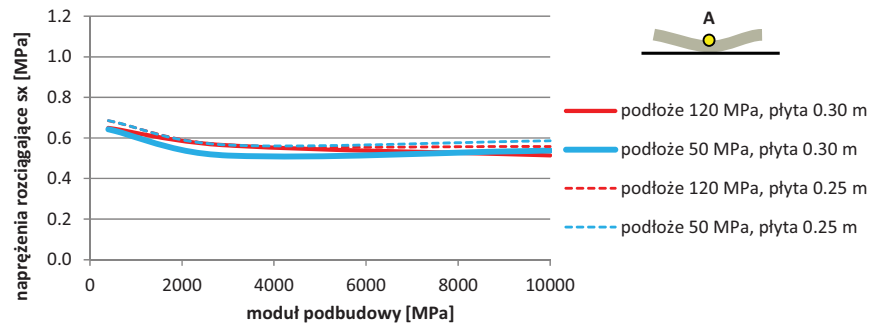
Z jednej strony stosowanie grubszych płyt betonowych pozwala na zmniejszenie termicznych naprężeń rozciągających, z drugiej jednak zwiększony ciężar płyty wywołuje większe deformacje w podbudowie. Istotne jest zatem zwrócenie uwagi na stosowanie grubych płyt na cienkich warstwach podatnych.

Niniejsze analizy przeprowadzono dla płyty o grubości 25 cm i 30 cm. Podatne na wpływy temperaturowe są płyty cieńsze. Pojawiające się rozciągające naprężenia mogą być wystarczające do zainicjowania lokalnych uszkodzeń w betonie. Szczególnie duże wartości naprężeń rozciągających mogą pojawiać się dla płyt dłuższych niż analizowano, powyżej 5 m.

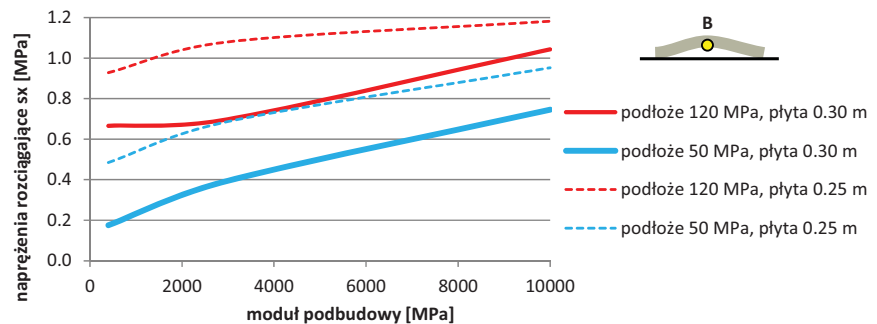
Autorzy w dalszych opracowaniach przeprowadzą analizy numeryczne z uwzględnieniem cech lepkosprężystych oraz plastycznych w wybranych podbudowach. Także tematem dalszych prac będzie analiza wpływu zmiennej szczepności pomiędzy płytą a podłożem oraz obciążenia pojazdów i ich niekorzystnej lokalizacji. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Westergaard H.M. (1927). Analysis of stresses in concrete due to variations of Temperature, Proceedings of the 6th Annual Meeting Highway Research Board, National Research Council, Vol. 6, pp 201-215.
- [2] Teller L.W., Sutherland E.C. (1935). The structure design of concrete pavements, part 2: observed effects of variations in temperature and moisture on the size, shape, and stress resistance of concrete pavement slabs. Public Roads, 16(9), 169-197.
- [3] Thomlinson L. (1940). "Temperature variations and consequent stresses produced by daily and seasonal temperature cycles in concrete slabs." Concrete Construction Engineering, 36(6).



a)



b)

10. Zmiana naprężeń rozciągających  $s_x$  w płycie betonowej dla różnych grubości płyty, wartości modułów podbudowy, a) godzina 2:00, b) godzina 14:00

- [4] Mohamed A.R., Hansen W. (1997). Effect of Nonlinear Temperature Gradient on Curling Stress in Concrete Pavements. Transportation Research Record, 1568, pp. 65 – 71.
- [5] Mackiewicz P. (2014). "Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements." Applied Thermal Engineering, 73 (2014), 1167-1174
- [6] Mackiewicz P., Szydło A. (2013). Wpływ temperatury na nośność betonowych nawierzchni lotniskowych. Przegląd Komunikacyjny 7/2013.
- [7] Tabatabai A.M., Barenberg E.J. (1978). "Finite-element analysis of jointed or cracked concrete pavements." Transportation Research Record., 671, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [8] Tayabji S.D., Colley B.T. (1986). Analysis of Jointed Concrete Pavements. Technical Report FHWA-RD-86-041, Federal Highway Administration, McLean, Virginia.
- [9] Chou Y.T. (1981). Structural Analysis Computer Programs for Rigid Multicomponent Pavement Structures with Discontinuities: WESLIQUID and WESLAYER. Technical Report GL-81-6. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- [10] Khazanovitch L., Yu H.T., Beckemeyer C. (2000). Application of ISLAB2000 for Forensic Studies. Proceeding of the 2nd International Symposium of 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design, and Research, Charleston, West Virginia, pp. 433-450.
- [11] Beegle D.J., and Sargand S.M. (1995). Three-Dimensional Finite Element Modeling of Rigid Pavement. Final Report No. ST/SS/95-002, Ohio Department of Transportation, Federal Highway Administration, Columbus, Ohio.
- [12] Zokaei-Ashtiani A., Carrasco C., Nazarian S. (2014). Finite element modeling of slab–foundation interaction on rigid pavement applications. Computers and Geotechnics 62, 118–127.
- [13] COSMOS/M. (1993). Advanced modules user guide, Santa Monica, CA.
- [14] Rusiński, E. (1994). Metoda elementów skończonych. System COSMOS/M, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa