

# Wpływ temperatury na nośność betonowych nawierzchni lotniskowych

Piotr Mackiewicz, Antoni Szydło

*W pracy podano zmiany gradientu temperatury w płytach betonowych dla warunków krajowych w oparciu o dane meteorologiczne i własne pomiary rozkładu temperatur w nawierzchniach betonowych. Wykorzystując metodę elementów skończonych przeprowadzono obliczenia naprężeń termicznych w zależności od wymiarów płyt w planie i grubości. W efekcie przeprowadzonych studiów stwierdzono, że maksymalne naprężenia w płytach betonowych w polskich warunkach klimatycznych niezależnie od wymiarów płyt w planie i grubości oscylują wokół wartości 1 MPa.*



prof. dr hab. inż.  
Antoni Szydło  
Instytut Inżynierii Lądowej  
Politechniki Wrocławskiej,  
Katedra Dróg i Lotnisk  
antoni.szydlo@pwr.wroc.pl



dr inż. Piotr Mackiewicz  
Instytut Inżynierii Lądowej  
Politechniki Wrocławskiej,  
Katedra Dróg i Lotnisk  
piotr.mackiewicz@pwr.wroc.pl

Betonowe nawierzchnie lotniskowe pod wpływem temperatury ulegają deformacjom poziomym i pionowym. Wskutek skępowania bocznego płyt oraz ciężaru własnego powstają w nich naprężenia termiczne. Jak dotąd brak jest w kraju badań i studiów dotyczących gradientów termicznych tj. różnicy temperatur występujących na górnej i dolnej powierzchni płyty. W artykule przedstawiono analizę warunków klimatycznych występujących na obszarze Polski. Podano własne wyniki pomiarów rozkładu temperatur w nawierzchniach betonowych. Przedstawiono analizę naprężeń termicznych występujących w płytach betonowych w zależności od wymiarów płyt w planie oraz grubości. Przeprowadzone analizy mogą być pomocne przy projektowaniu nowych nawierzchni betonowych jak również ocenie nośności nawierzchni istniejących.

## Analiza warunków klimatycznych na obszarze kraju

Na terenie Polski panuje klimat umiarkowany o charakterze przejściowym pomiędzy klimatem morskim a lądowym. Wynikiem tego jest ścieranie się mas wilgotnego powietrza z Atlantyku z suchym powie-

trzem z głębi kontynentu euroazjatyckiego. W efekcie klimat w Polsce odznacza się dość znacznymi wahaniami temperatury i ciśnienia. W każdym miesiącu można wyodrębnić charakterystyczne wartości temperatury powietrza, które mają istotny wpływ na zachowanie się nawierzchni betonowych. W tab. 1 przedstawiono średnie miesięczne wartości temperatury powietrza w °C na wybranych stacjach w Polsce (1971-2000) dla różnych miesięcy w roku [3].

Ze względu na znacznie rozbudowaną cyrkulację atmosferyczną w Polsce obserwuje się znaczne zróżnicowania klimatyczne na terenie całego kraju w zależności od różnych okresów w roku. Reprezentatywne warunki termiczne panujące w danym miejscu możemy określić przede wszystkim na podstawie wartości średnich i ekstremalnych temperatur powietrza, a w przypadku potrzeby projektowania nawierzchni betonowych z wykorzystaniem amplitudy temperatury (dobowe, roczne).

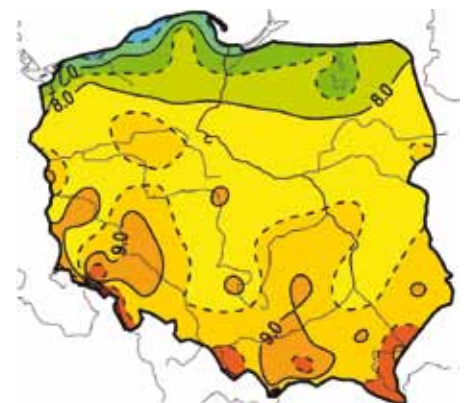
Na podstawie danych meteorologicznych opracowano rozkład zmian dobowych temperatur dla Polski. Na rys. 1 pokazano rozkład średniej dobowej amplitudy temperatury w skali całego roku z ostatniego trzydziestolecia [2, 3]. Obserwuje się wyraź-

ne zmniejszenie dobowych wahań temperatury powietrza w pobliżu Bałtyku 6-7°C. Na przeważającym obszarze Polski wahania dobowe wynoszą od 7°C do 9°C. Dobowe wahania temperatury rosną z kierunku północnego zachodu na południowy wschód i osiągają największe wartości (ponad 9°C) na południowym wschodzie kraju.

Analizując różne regiony kraju można stwierdzić, że największe zróżnicowanie układów dobowych temperatury występują na wybrzeżu oraz w obszarach górskich. Większą część Polski o stosunkowo niezmiennym rozkładzie (2-3°C) stanowi obszar centralny. Dlatego też do praktycznego projektowania nawierzchni potraktowano obszar kraju jako całość bez podziału na regiony. Uwzględniając wielkości powierzchni oddziaływania dobowych amplitud i różne miesiące w Polsce określono wahania dobowe dla całego obszaru kraju, w podziale na następujące pory roku:

- wiosna: 9,0°C,
- lato: 11,0°C,
- jesień: 7,0°C,
- zima: 5,5°C.

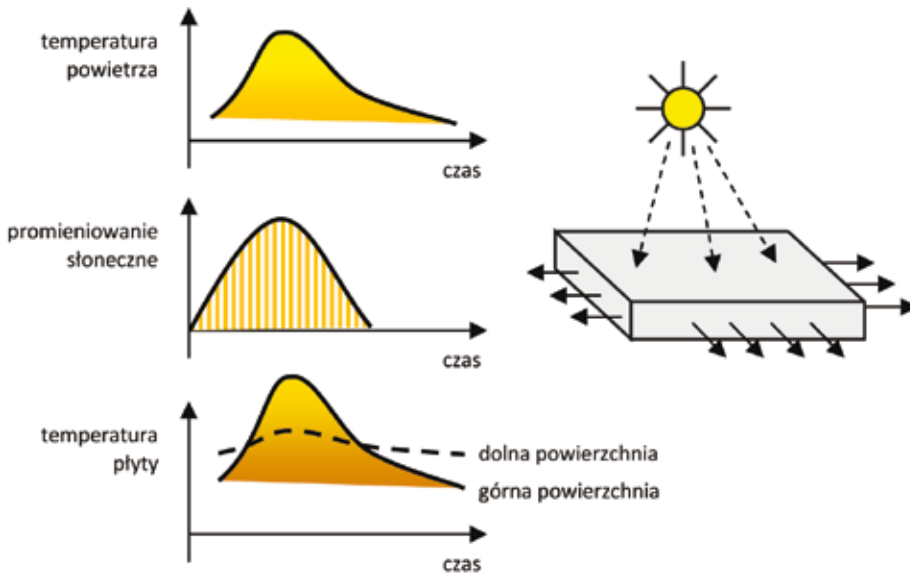
Zaproponowane wartości uwzględniają uśrednione amplitudy z wielolecia. Warto jednak zwrócić uwagę na możliwe okresowe odstępstwa od zaprezentowanych średnich wartości w ciągu doby. Mogą być one



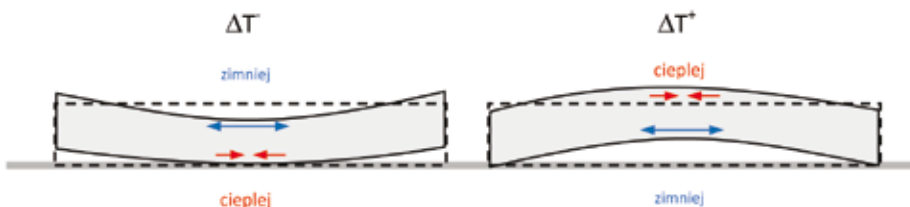
1. Dobowa amplituda temperatury powietrza w Polsce w skali całego roku [°C], [2, 3]

Tab. 1: Średnie miesięczne wartości temperatury powietrza w Polsce [°C], [3]

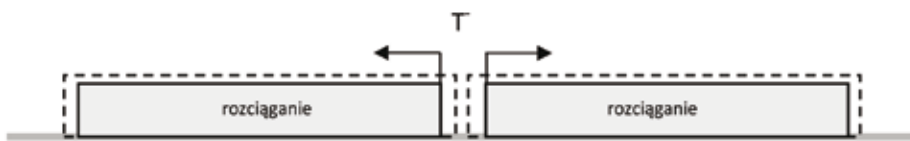
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	średnia roczna
-2.6	-1.9	1.6	6.4	12.0	15.1	17.1	16.0	12.6	7.6	2.4	-1.0	7.1



2. Oddziaływanie termiczne na płytę betonową



3. Wyginanie płyty betonowej w zależności od warunków termicznych



4. Deformacja płyty betonowej w przypadku równomiernego skurczu pod wpływem temperatury

spowodowane różnymi cyrkulacjami atmosferycznymi w Polsce. Cyrkulacje są zmienne i mimo iż utrzymują się kilka dni, mogą wpływać na zwiększenie wartości średnich dobowych wahań temperatur.

## Wpływ temperatury na nawierzchnię betonową

Zmiany temperatury powodują w swobodnej płycie betonowej zmianę jej objętości. Wraz z emisją promieniowania słonecznego zwiększa się temperatura powietrza, promieniowanie słoneczne oraz temperatura powierzchni płyty i jej dolnej części (rys. 2). Gdy działa ona równomiernie na całej grubości płyty, to wywołuje odkształcenie osiowe. W płycie swobodnej i nieważkiej rozpatrywane rozkłady temperatur nie wywołują stanów naprężeń.

Jednak dla płyt posiadających odpowiednie warunki zamocowania i podparcia oraz przy występowaniu tarcia o podłoże, ciężaru własnego, ograniczeniach sąsiednimi płytami, występują ograniczone możliwości znacznego odkształcenia, płyta odkształca

się wyginając dolną i górną powierzchnię. Pojawiają się naprężenia od temperatury. Jeżeli górna powierzchnia płyty ma wyższą temperaturę od dolnej, to płyta ma tendencję do wyginania się ku górze, ale wskutek ciężaru własnego oraz skrępowania największe naprężenia rozciągające powstają na dolnej powierzchni płyty. Jeżeli natomiast dolna powierzchnia płyty ma wyższą temperaturę od górnej, to płyta ma tendencję do odkształcania się ku dołowi i wtedy największe naprężenia wskutek ciężaru własnego pojawiają się na górnej powierzchni rys. 3.

Wpływ temperatury na powstawanie naprężeń w płycie betonowej ma charakter bardzo złożony. W przekroju poprzecznym płyty można przedstawić trzy charakterystyczne rozkłady naprężeń: jednolite-równomierne naprężenia osiowe, naprężenia powodujące wyginanie płyty (najczęściej rozkład liniowy), nieliniowe naprężenia wewnętrzne.

Naprężenia osiowe związane są z równomiernym rozszerzaniem (np. pod wpływem temperatury) i skurczem płyty. Równoważą ruch płyty ze względu na tarcie o podłoże.

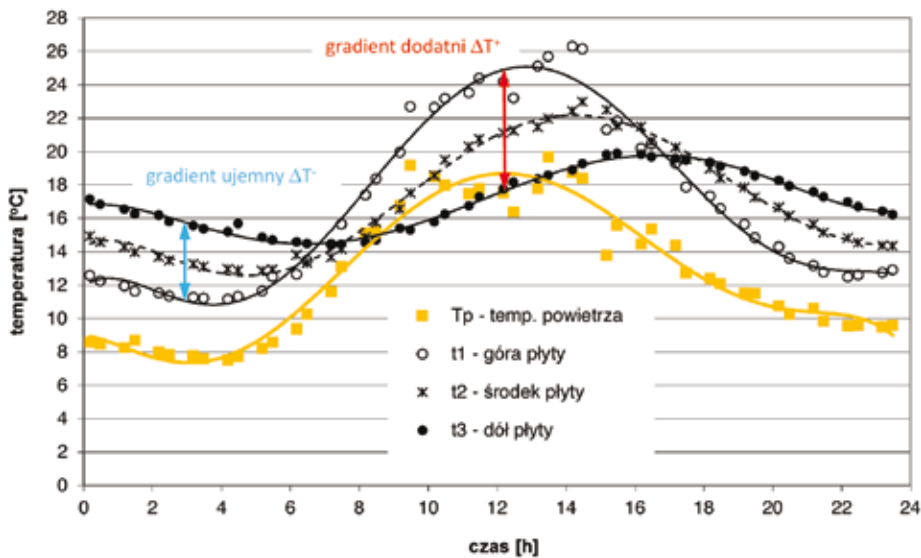
Jednak w przypadku nawierzchni betonowych ze szczelinami oraz dla nawierzchni „dojrzałych”, wartości tych naprężeń nie są duże. W nawierzchniach „młodych” te naprężenia rozciągające mogą zbliżyć się do wartości wytrzymałości. Naprężenia osiowe zależne są od rodzaju wybranego grubego kruszywa. Zazwyczaj wapienne kruszywa takie jak wapień i dolomit wywołują niski współczynnik rozszerzalności, natomiast kruszywa krzemionkowe, takie jak kwarc – wysoki. Naprężenia osiowe w betonie również zależą od warunków szczepności płyty z podłożem. Ekspansywne ruchy prowadzą do naprężeń ściskających, podczas skurczu ruchy prowadzą do naprężeń rozciągających. Na rys. 4 pokazano przykład deformacji płyt w wyniku działania równomiernego gradientu ujemnego.

Naprężenia wewnętrzne mimo iż mają charakter nieliniowy w całym przekroju płyty (zmiennie ściskanie i rozciąganie) nie powodują znacznego wygięcia profilu płyty. Związane są z hydratacją cementu.

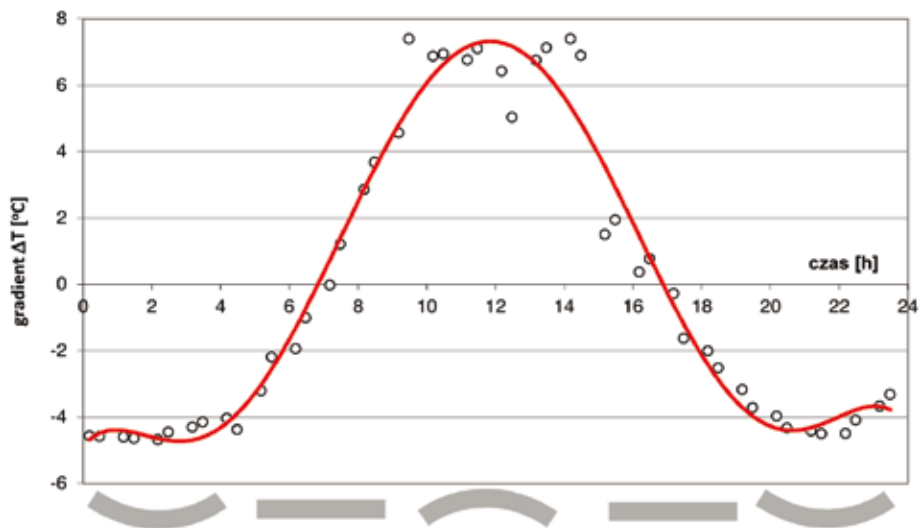
W praktyce w analizach eksploatacji nawierzchni uwzględnia się większe naprężenia, wyginające płytę, posiadające zmienne wartości w ciągu doby. W ciągu dnia temperatura górnej powierzchni nawierzchni wzrasta wraz ze wzrostem intensywności ogrzewania słonecznego; narastanie takie obserwuje się od wschodu słońca do popołudnia. Następnie zauważa się ochładzanie powierzchni jezdni, przy czym intensywniejsze ochładzanie występuje po zachodzie słońca. W nocy główną przyczyną zmian ciepłych konstrukcji nawierzchni jest oddawanie przez nią ciepła do powietrza. Minimalną temperaturę na powierzchni jezdni obserwuje się krótko przed wschodem słońca.

Na rys. 5 przedstawiono typową zmianę temperatury w nawierzchni betonowej w ciągu doby (płyta betonowa dyblowana 30cm). Otrzymano go na podstawie pomiarów temperatury na lotnisku w Łodzi w porze letniej w godzinach porannych oraz wieczornych (31.05.2006). Największa zmiana temperatury występuje w godzinach południowych oraz nocnych. Obserwuje się wtedy tzw. gradient dodatni i ujemny (różnica temperatury pomiędzy górną i dolną powierzchnią płyty betonowej). Na rys. 6 pokazano zmianę gradientu w ciągu doby w odniesieniu do kształtu deformowanej płyty betonowej.

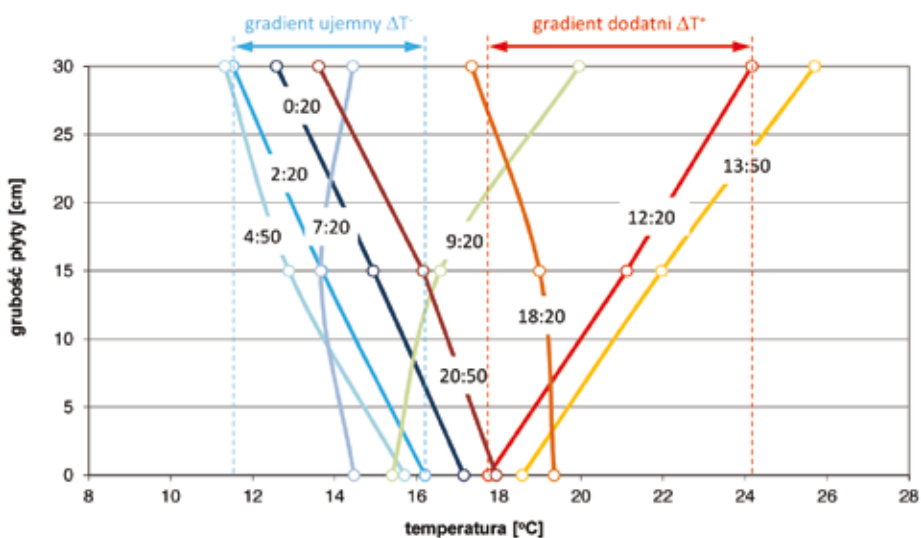
W godzinach rannych 5.00-8.00 oraz popołudniowych 16.00-19.00 można zaobserwować zmianę gradientu co do wartości, płyta nie ulega deformacjom, ale mogą w niej wystąpić jeszcze małe naprężenia osiowe z uwagi na pozostałą temperaturę w środku płyty. Na rys. 7 przedstawiono



5. Dobowa zmiana temperatury w różnych miejscach płyty betonowej



6. Przykładowa dobowa zmiana gradientu temperatury w płycie betonowej



7. Przykładowy rozkład temperatury na grubości płyty betonowej

zmianę temperatury na grubości płyty dla wybranych godzin w dobie wg własnych pomiarów. Widać, że w przypadku gdy tem-

peratura na górnej i dolnej powierzchni jest równa (około godziny 7), rozkład temperatury w płycie jest nieliniowy. W godzinach

poronnych w czasie zerowej różnicy temperatur pomiędzy górną i dolną powierzchnią w środku płyty temperatura jest mniejsza od tej na górnej lub dolnej powierzchni. W godzinach wieczornych w czasie zerowej różnicy temperatur pomiędzy górną i dolną powierzchnią płyty temperatura w środku płyty jest większa od tej na powierzchni (około godziny 17). Oznacza to, że w przypadku zerowej różnicy temperatur pomiędzy górną i dolną powierzchnią w płycie pojawiają się naprężenia termiczne. Jednak będą one znacznie mniejsze niż przy maksymalnych różnicach temperatur.

Uwzględniając zmienne oddziaływanie temperatury w ciągu doby na płytę betonową, przeanalizowano zależność wpływu zmiany dobowej temperatury powietrza na gradient dodatni (pojawiający się w godzinach południowych) oraz gradient ujemny (pojawiający się w godzinach nocnych). Dla tych zmiennych opracowano zależności funkcyjne (rys. 8, rys. 9).

Stwierdzono dobrą korelację dobowej zmiany temperatury powietrza i gradientu dodatniego. Opisano ją zależnością liniową (1):

$$\Delta T^+ = 0.4236 \cdot \Delta T_p + 4.8111 \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta T^+$  - gradient dodatni w ciągu doby [°C],  
 $\Delta T_p$  - dobowa zmiana temperatury powietrza [°C].

Wykorzystując tą zależność obliczono gradient dodatni na podstawie zmian dobowych temperatury powietrza dla różnych pór roku na podstawie średnich dobowych zmian temperatury powietrza z trzydziestu lat. Uzyskano następujące wartości gradientów dodatnich dla następujących pór roku:

- wiosna: 8.6°C,
- lato: 9.5°C,
- jesień: 7.8°C,
- zima: 7.1°C.

Stwierdzono mniejszy wpływ dobowej zmiany temperatury powietrza na gradient ujemny. Opisano ten wpływ zależnością (2):

$$\Delta T^- = 0.0668 \cdot \Delta T_p + 4.0626 \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta T^-$  - gradient ujemny w ciągu doby [°C],  
 $\Delta T_p$  - dobowa zmiana temperatury powietrza [°C].

Na podstawie tej zależności uzyskano następujące wartości gradientów ujemnych dla pór roku z trzydziestolecia:

- wiosna: -4.7°C,
- lato: -4.8°C,
- jesień: -4.5°C,
- zima: -4.4°C.

płyta betonowa: $E = 35\ 000\ \text{MPa}$ , ( $E_t = 23\ 000\ \text{MPa}$ ), $h = 30\ \text{cm}$	warstwa kontaktowa
warstwa podbudowy: $E = 10\ 000\ \text{MPa}$ , $h = 20\ \text{cm}$	
warstwa wzmacniająca: $E = 200\ \text{MPa}$ , $h = 25\ \text{cm}$	
podłoże: $E = 120\ \text{MPa}$	

## 10. Model nawierzchni betonowej

Analizując ekstremalne pory roku można uznać dla okresu letniego gradient dodatni o wartości  $10^\circ\text{C}$  oraz gradient ujemny o wartości  $-5^\circ\text{C}$ , jako reprezentatywny do analizy oddziaływania temperatury na płytę betonową.

## Numeryczna analiza deformacji płyty betonowej pod wpływem temperatury

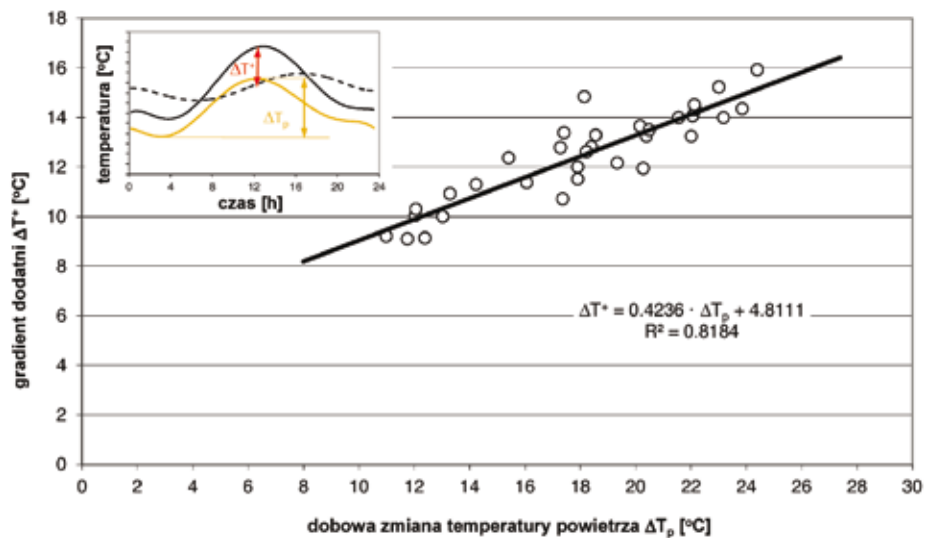
Model nawierzchni płyty betonowej opracowano z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Przyjęty model odpowiadał wybranej nawierzchni betonowej o następujących parametrach:

- płyta betonowa:  $E = 35\ 000\ \text{MPa}$  ( $E_t = 23\ 000\ \text{MPa}$ ),  $h = 30\ \text{cm}$ ,
- warstwa podbudowy:  $E = 10\ 000\ \text{MPa}$ ,  $h = 20\ \text{cm}$ ,
- warstwa wzmacniająca:  $E = 200\ \text{MPa}$ ,  $h = 25\ \text{cm}$ ,
- podłoże:  $E = 120\ \text{MPa}$ .

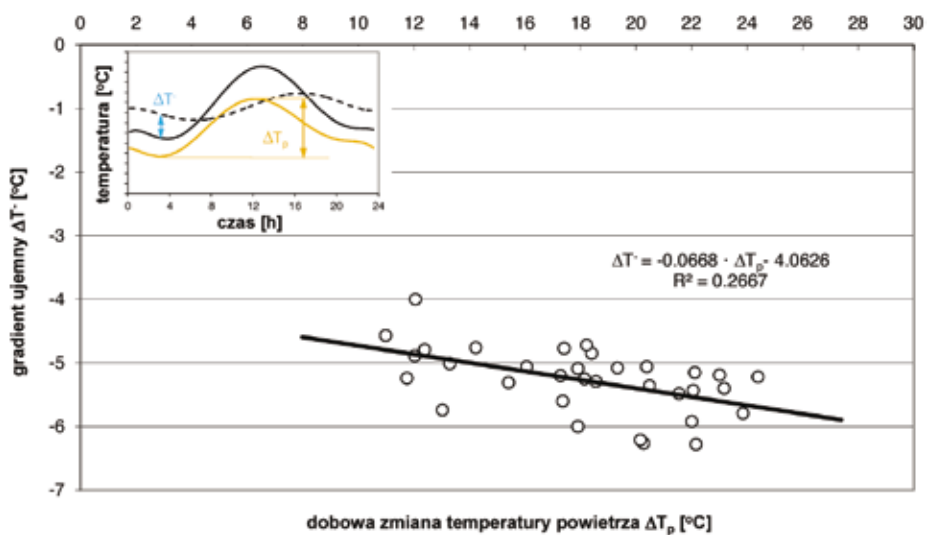
Model nawierzchni przedstawiono na rys. 10. Przyjęte parametry warstw nawierzchni zostały zweryfikowane w badaniach FWD na podstawie obliczeń odwrotnych (Szydło 1995).

W analizach obliczeniowych przyjęto model liniowo sprężysty. W postaci odpowiednich elementów kontaktowych uwzględniono oddziaływanie płyty betonowej na warstwę niżej leżącą.

W zakresie obliczeń przeanalizowano zmienną grubość płyty (20 cm – 30 cm), długość płyty (3.0 m – 7.0 m). Przeanalizowano naprężenia rozciągające w wyniku oddziały-



8. Dobowa zmiana temperatury powietrza w zależności od gradientu dodatniego

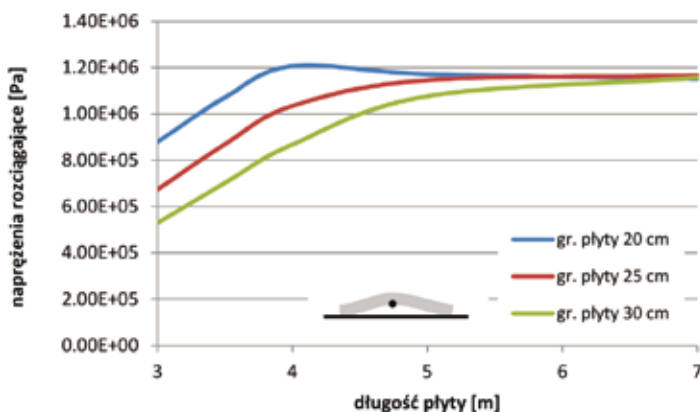


9. Dobowa zmiana temperatury powietrza w zależności od gradientu ujemnego

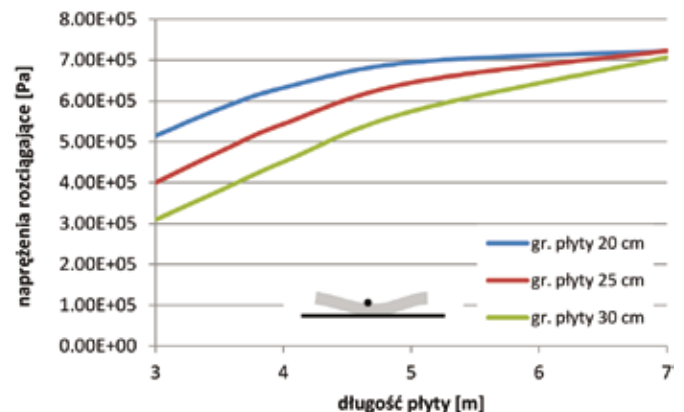
wania gradientu dodatniego  $10^\circ\text{C}$  i ujemnego  $-5^\circ\text{C}$ . Na rys. 11 pokazano przykładowe wyniki deformacji i rozkładu naprężeń dla gradientu dodatniego a na rys. 12 dla gradientu ujemnego.

W wyniku obliczeń stwierdzono, że wraz ze wzrostem długości płyty zwiększają się

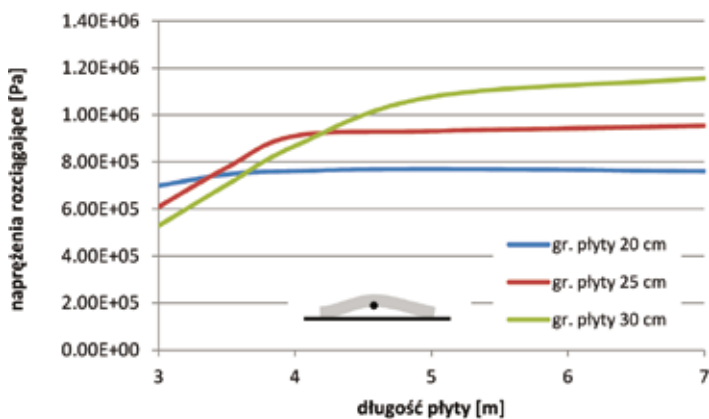
znacznie naprężenia nawet o 40%. Przy płytach o długościach większych niż 4 m, płyta zaczyna opierać się swoim środkiem na podłożu w wyniku własnego ciężaru. Wraz ze wzrostem długości naprężenia rozciągające zwiększają swoją wartość. Dotyczy to zarówno oddziaływania gradientu dodatnie-



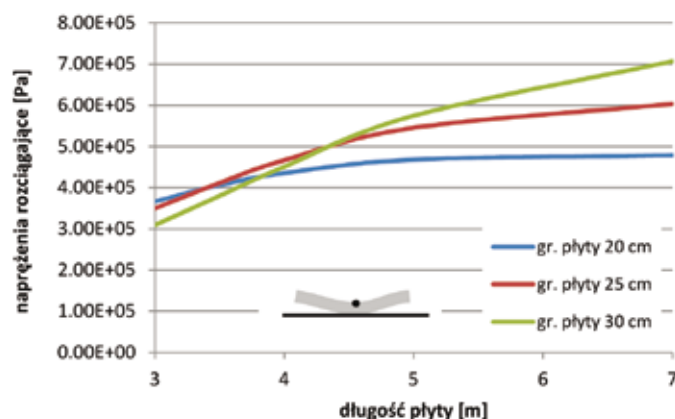
11. Wpływ długości i grubości płyty na naprężenia rozciągające dla gradientu dodatniego



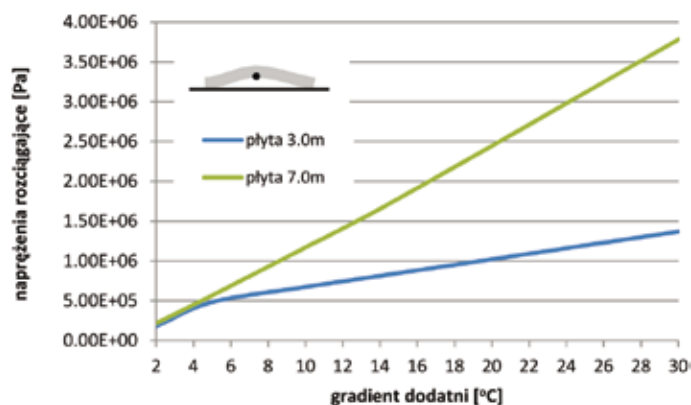
12. Wpływ długości i grubości płyty na naprężenia rozciągające dla gradientu ujemnego



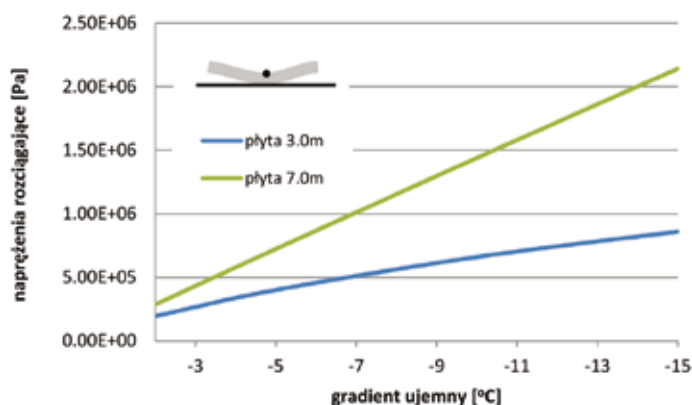
13. Wpływ długości i grubości płyty na naprężenia rozciągające dla dodatniego gradientu



14. Wpływ długości i grubości płyty na naprężenia rozciągające dla ujemnego gradientu



15. Wpływ dodatniego gradientu na naprężenia rozciągające dla płyty o grubości 25 cm i długościach 3.0 m i 7.0 m



16. Wpływ ujemnego gradientu na naprężenia rozciągające dla płyty o grubości 25 cm i długościach 3.0 m i 7.0 m

go i ujemnego. Stwierdzono, że ze wzrostem grubości płyty zmniejszają się naprężenia rozciągające w płycie (rys. 11, 12). W przypadku płyt o długościach większych od 5 m, wpływ grubości nie jest, aż tak znaczny jak dla płyt krótszych.

W wyniku oddziaływania termicznego na płytę betonową o różnej grubości obserwuje się zmienny rozkład temperatury na grubości. Dla płyt cieńszych gradient jest mniejszy, natomiast dla płyt grubszych – większy. W kolejnych obliczeniach przeanalizowano wpływ długości i grubości płyty na naprężenia rozciągające uwzględniając inny gradient dla danej grubości płyty (rys. 13, 14). Przyjęto następujące gradienty w zależności od grubości płyty:

- gradient dodatni 0.33°C/cm: 6.7°C (płyta gr. 20 cm), 8.4°C (płyta gr. 25 cm), 10°C (płyta gr. 30 cm),
- gradient ujemny 0.17°C/cm: -3.3°C (płyta gr. 20 cm), -4.2°C, (płyta gr. 25 cm), -5°C (płyta gr. 30 cm).

Z przedstawionych obliczeń wynika, że w płytach cieńszych i dłuższych od 4.5 m z powodu mniejszego gradientu powstają mniejsze naprężenia. Natomiast dla płyt krótkich 3.0 – 3.5 m obserwuje się sytuację odwrotną.

Gradient termiczny oddziałujący na płytę betonową ma istotny wpływ na wartości naprężeń w płycie betonowej. Na rys. 15 i 16 przedstawiono wyniki obliczeń dla zmiennego dodatniego i ujemnego pod dla płyty o grubości 25 cm i długościach 3.0 m i 7.0 m.

Z obliczeń wynika, że w przypadku płyt długich (7.0 m) oraz dodatniego o wartości 10°C powstają naprężenia ok. 1 MPa. Także dla dodatniego o wartościach 7°C zaobserwowano naprężenia również ok. 1 MPa. Dla płyt krótkich (3.0 m) dla powyższych wartości gradientów występują naprężenia mniejsze o około 50%.

## Podsumowanie

Temperatura działając na nawierzchnie betonowe powoduje zwiększenie naprężeń rozciągających w płytach. Wartości naprężeń zależą od wymiarów płyty w planie oraz grubości. Dla jednakowego gradientu temperatury (niezależnie od grubości płyty) w płytach o długościach większych od 5 m naprężenia nie zależą od grubości i praktycznie oscylują wokół wartości 1 MPa. Natomiast w płytach, dla których uzależnienia się gradient od grubości, naprężenia ter-

miczne w płytach grubszych są większe od naprężeń w płytach cieńszych, ale dla długości większych od 3,5 m. Wartości takich naprężeń również oscylują wokół wartości 1 MPa. Zaletą płyt grubych jest to, że mniej się odkształcają w płaszczyźnie pionowej i w związku z tym mniejsze w nich powstają naprężenia od obciążeń. Zagadnienia te będą analizowane w następnych publikacjach. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Szydło Antoni: „Statyczna identyfikacja parametrów modeli nawierzchni lotniskowych”, Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995.
- [2] Baranowski Dariusz: „Dobowe amplitudy temperatury powietrza w Polsce i ich zależność od typów cyrkulacji atmosferycznej (1971-1995)”. Słupskie Prace Geograficzne 2/2005.
- [3] <http://www.imgw.pl/klimat>