

BADANIA NAUKOWE W INSTYTUCIE DRÓG I MOSTÓW

SCIENTIFIC RESEARCH OF THE
INSTITUTE OF ROADS AND BRIDGES

Praca zbiorowa pod redakcją
Piotra Olszewskiego

Wydział Inżynierii Lądowej
Politechniki Warszawskiej



Monografia jubileuszowa
Instytutu Dróg i Mostów

ISBN 978-83-8156-018-4

Warszawa 2019
Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej

MES W PROJEKTOWANIU KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI BETONOWYCH

*Artur ZBICIAK, Mirosław GRACZYK, Kazimierz JÓZEPIAK,
Rafał MICHALCZYK, Karol BRZEZIŃSKI*

1. Wstęp

W nawierzchni betonowej szczególnie ważna jest – w aspekcie trwałości określanej jako możliwość przeniesienia dużej liczby obciążeń od pojazdów ciężarowych – grubość płyty betonowej. Im grubsza warstwa betonu tym więcej obciążeń może przenieść konstrukcja nawierzchni sztywnej. Biorąc pod uwagę wzrastające obciążenia kół pojazdów, tj. obciążenie 57,5 kN i ciśnienie w oponie 0,85 MPa, oraz ogólny wzrost natężenia ruchu a także występujące przeciążenia pojazdów, należy szukać rozwiązania konstrukcji nawierzchni, która jest zdolna przenieść takie oddziaływania z uwzględnieniem warunków klimatycznych występujących w Polsce. Co ważne, zmienność klimatyczna w Polsce ma duży wpływ na warunki pracy całej konstrukcji nawierzchni i jej trwałość, ze szczególnym oddziaływaniem, zarówno na górne warstwy jezdne, jak i na grunt podłoża nawierzchni dróg.

Wpływ na pracę nawierzchni mają następujące czynniki klimatyczne [5]:

- typ klimatu,
- temperatura powietrza i temperatura nawierzchni,
- liczba przejść temperatury powietrza i temperatury nawierzchni przez 0°C,
- ilość opadów atmosferycznych i wilgotność konstrukcji nawierzchni i podłoża gruntowego,
- głębokość przemarzania gruntu,
- nasłonecznienie (teren wilgotny zalesiony, teren otwarty suchy).

Istotą zachowania nawierzchni betonowej pod obciążeniem jest przeniesienie naprężeń i odkształceń od poruszających się kół pojazdów, głównie przez płytę betonową, czyli górną warstwę jezdnią nawierzchni. Natomiast obciążenia warstw dolnych konstrukcji nawierzchni i podłoża gruntowego są rozkładane na dużą powierzchnię, co oznacza mniejszą agresywność obciążenia dla niżej leżących warstw [1, 8, 9, 14].

Przy wymiarowaniu konstrukcji nawierzchni betonowej bardzo ważnym aspektem jest dokładność wykonywanych obliczeń z uwzględnieniem punktów położenia obciążeń na płycie betonowej [12]. W nowoczesnym projektowaniu nawierzchni betonowych doskonale sprawdzają się modele i systemy bazujące na metodzie elementów skończonych (MES) [20]. Metody te pozwalają na szybkie uzyskiwanie wyników przy wariantowaniu wymiarów płyt betonowych i zmiennym położeniu obciążenia na powierzchni płyty; dają również możliwość łatwego określenia układu krytycznego do wymiarowania konstrukcji nawierzchni. Należy podkreślić, że świadome wykorzystanie szerokiego spektrum możliwości zaawansowanego oprogramowania MES wymaga dobrej znajomości zagadnień mechaniki, metod numerycznych i programowania. Wiele współczesnych systemów MES (np. Abaqus, Ansys, Comsol i in.) umożliwia użytkownikowi zaprogramowanie własnych algorytmów oraz skryptów automatyzujących proces obliczeniowy i pozwalających na szybsze prowadzenie procesu optymalizacji grubości warstw nawierzchni drogowej. Niniejsza praca powstała z wykorzystaniem tego typu narzędzi.

2. Obliczenia MES naprężeń w płycie betonowej

Niniejszy rozdział monografii przedstawia metodykę wyznaczania stanu naprężeń w płycie nawierzchni betonowej oraz dotychczas niepublikowane wyniki najnowszych analiz prowadzonych w autorskim zespole badawczym w zakresie wymiarowania nawierzchni sztywnych. Prezentowana metodyka, w nieco zmodyfikowanej formie, może być również wykorzystania do szacowania naprężeń w płytach betonowych nawierzchni lotniskowych [6, 13].

Przedmiotem nowych analiz jest wpływ przyjętego ciśnienia kontaktowego (między kołem a nawierzchnią) na naprężenia w płycie betonowej. Trwałość nawierzchni wyraża się zwykle liczbą osi równoważnych, jakie może przenieść konstrukcja przed wystąpieniem stanu krytycznego (np. spękań). Obciążenie osią równoważną w nawierzchniach betonowych przyjmuje się zwykle jako 115 kN. Sama wartość siły nie opisuje jednak dostatecznie obciążenia kołem pojazdu. W zależności od tego na jakiej powierzchni rozkłada się ciśnienie od koła, i jaką ma wartość, maksymalne naprężenia w płycie betonowej mogą się różnić. Tego typu analizy mają istotny wpływ na ciągle doskonalenie metodyki projektowej. Ich prowadzenie jest uzasadnione zmieniającymi się uwarunkowa-

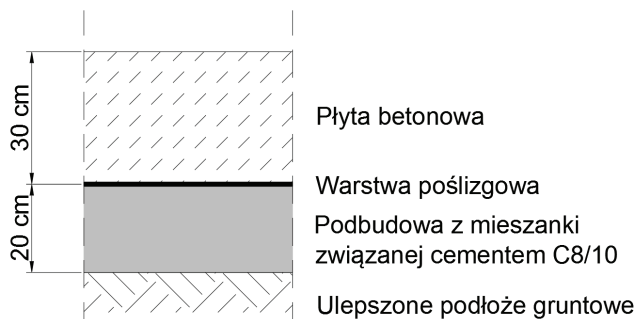
niami eksploatacji nawierzchni drogowych. Przykładem jest stosowanie coraz większego ciśnienia w oponach pojazdów ciężarowych. Z punktu widzenia przewoźnika taki zabieg jest korzystny, gdyż zmniejsza opór toczenia, a tym samym zużycie paliwa [7, 15]. Z drugiej strony, może generować dodatkowe koszty dla zarządcy infrastruktury, związane z przyspieszoną degradacją nawierzchni.

2.1. Założenia analizy

Na potrzeby niniejszych obliczeń założono, że analizowana konstrukcja nawierzchni będzie zbudowana z płyt betonowych o wymiarach w planie 500×400 cm i grubości 30 cm, posadowionych na odpowiednio przygotowanym podłożu i podbudowie. Parametry materiałowe górnych warstw konstrukcji projektowanej nawierzchni, przyjęte zgodnie z katalogiem typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych [17], przedstawiono w tab. 2.1. Założono liniowo-sprężysty model materiału wszystkich warstw. Analizowaną konstrukcję nawierzchni, na ulepszonym podłożu gruntowym, ilustruje rys. 2.1.

Tablica 2.1. Przyjęte do analizy MES parametry materiałowe warstw konstrukcji nawierzchni na ulepszonym podłożu gruntowym

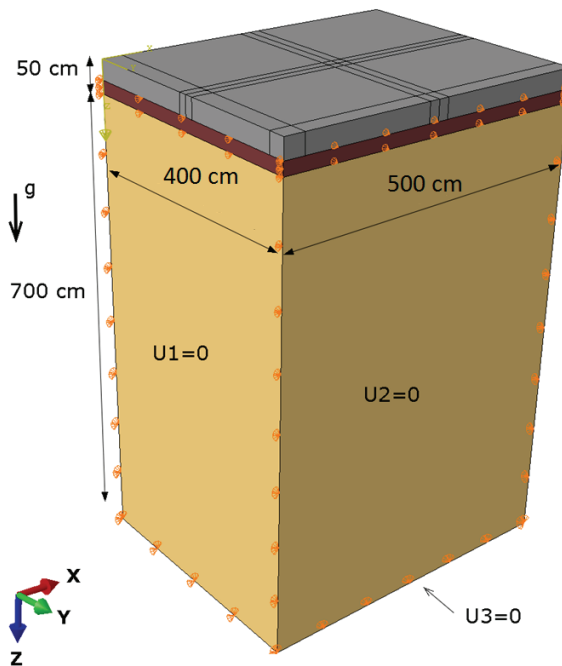
Warstwa nawierzchni	Moduł Younga	Wsp. Poissona	Wsp. rozszerz. cieplnej	Gęstość objętościowa
Płyta betonowa obc. siłą	35000 MPa	0,16		2400 kg/m ³
Płyta betonowa obc. temperaturą	26000 MPa	0,20	12,0×10 ⁻⁶ 1/K	2400 kg/m ³
Podbudowa z mieszanki związanej cementem C8/10	3000 MPa	0,30		2200 kg/m ³
Ulepszone podłoże gruntowe	120 MPa	0,25		2000 kg/m ³



Rysunek 2.1. Przyjęta do obliczeń konstrukcja nawierzchni na ulepszonym podłożu gruntowym

2.2 Model MES

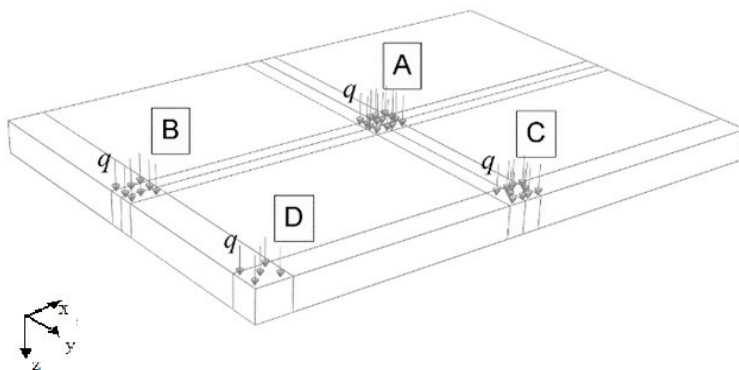
Obliczenia stanu naprężenia w płycie betonowej przeprowadzono z wykorzystaniem komercyjnego oprogramowania MES Abaqus [2]. Geometrię modelu przedstawiono na rys. 2.2. W przypadku warstw podbudowy oraz podłoża gruntowego zastosowano warunki brzegowe symetrii odbierając możliwość przemieszczeń w kierunku prostopadłym do danej pionowej powierzchni warstwy. Warstwy te zostały połączone ze sobą na stałe (nie modelowano kontaktu między tymi warstwami). Płyta betonowa nie została podparta w żaden sposób. Z pozostałą częścią modelu została połączona warunkami kontaktu między dolną powierzchnią płyty, a górną powierzchnią podbudowy. Zastosowano sformułowanie kontaktu umożliwiające odrywanie się płyty od podbudowy, co jest zgodne z realnym zachowaniem płyty betonowej w tego typu nawierzchniach.



Rysunek 2.2. Geometria i warunki brzegowe modelu MES analizowanej nawierzchni

Płyta, poddana działaniu ciężaru własnego, została obciążona w czterech miejscach, w których obciążenie wywołuje największe przemieszczenia i naprężenia; została również poddana działaniu gradientu temperatury. Takie podejście pozwoliło na sformułowanie 5 schematów obciążeniowych każdej konstrukcji nawierzchni. Miejsca przykładania obciążenia zostały przedstawione na rys. 2.3. Warianty obciążenia przedstawiono w tabeli 2.2. Obliczenia wykonywano w dwóch krokach. W pierwszym kroku analizy wyznaczano stan naprężeń pier-

wotnych w konstrukcji przy jednoczesnym zachowaniu zerowych wartości przemieszczeń. W drugim kroku przykładano obciążenie ciśnieniem bądź temperaturą. Naprężenia związane z działaniem ciężaru własnego zostały zatem zdefiniowane jako warunki początkowe, w związku z czym obciążenie ciężarem własnym nie wywołało przemieszczeń konstrukcji – a jedynie naprężenia pionowe. Jest to metodyka rutynowo stosowana w analizach zagadnień geotechnicznych. Przyjęto wartość przyspieszenia grawitacyjnego $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.



Rysunek 2.3. Miejsca przykładania obciążenia kołem do płyty betonowej

Tablica 2.2. Warianty obciążenia konstrukcji nawierzchni

Wariant obciążenia	Opis
I	grawitacja + obciążenie ciśnieniem q w punkcie A
II	grawitacja + obciążenie ciśnieniem q w punkcie B
III	grawitacja + obciążenie ciśnieniem q w punkcie C
IV	grawitacja + obciążenie ciśnieniem q w punkcie D
V	grawitacja + obciążenie gradientem temperatury ΔT

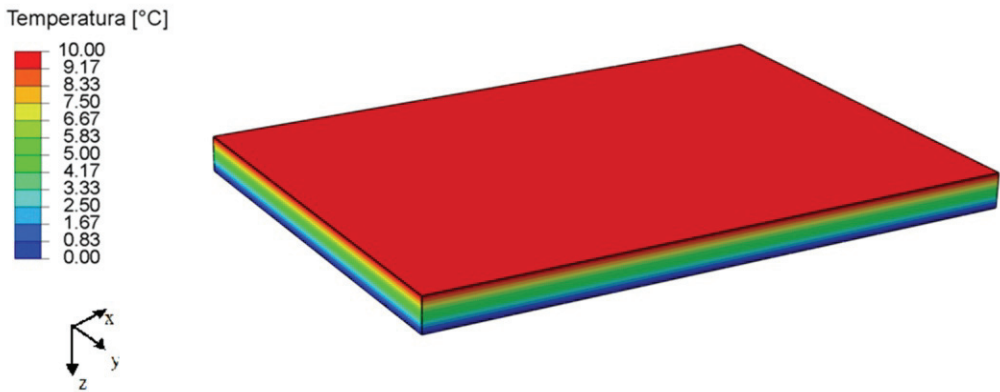
Obciążenie od koła przykładano w sposób uproszczony – rozłożone na powierzchni prostokąta o wymiarach zależnych od przyjętego ciśnienia kontaktowego. Założono obciążenie osią równoważną 115 kN, co daje wymiary:

- 305,00×221,79 mm w przypadku ciśnienia 850 kPa,
- 305,00×290,04 mm w przypadku ciśnienia 650 kPa.

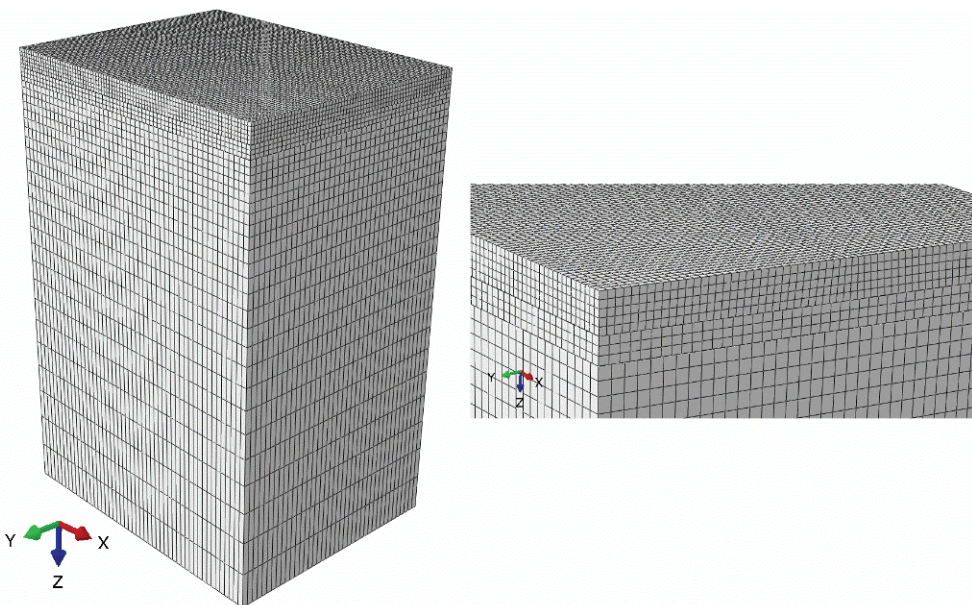
Gradient temperatury $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ [10, 16] przykładano przy założeniu liniowej zmiany temperatury po grubości płyty betonowej. Wykres warstwiczny założonego rozkładu temperatury przedstawia rys. 2.4.

Płytę betonową podzielono na 28 220 elementów skończonych bryłowych, 20-węzłowych z parabolicznymi funkcjami kształtu oraz z całkowaniem zredu-

kowanym (8 punktów całkowania). Zastosowanie tego typu elementów pozwoliło na osiągnięcie zbieżności rozwiązania w naprężeniach. Cały model składał się z 87 670 elementów skończonych. Siatkę MES modelu nowej nawierzchni przedstawiono na rys. 2.5.



Rysunek 2.4. Wykres warstwowy temperatury założony w wariancie obciążenia temperaturą



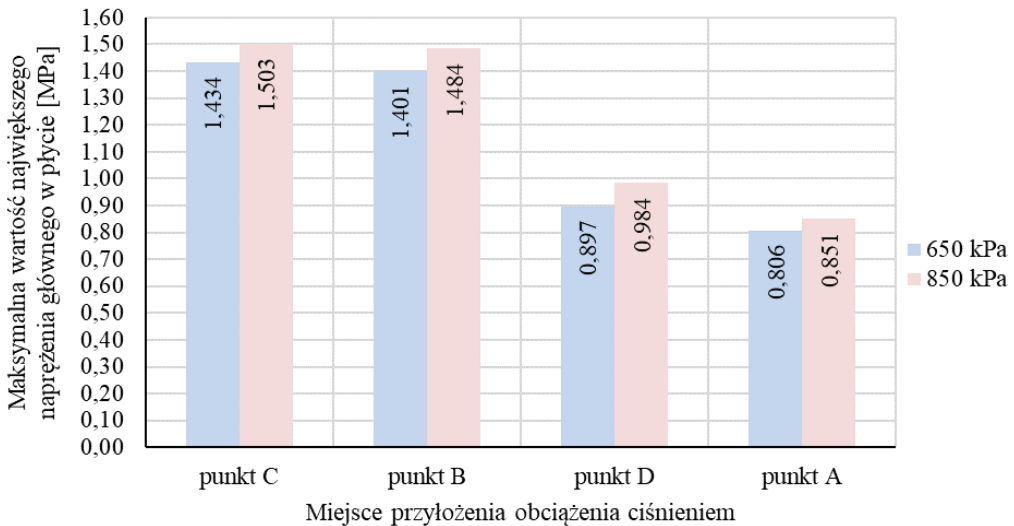
Rysunek 2.5. Siatka MES modelu nawierzchni

Obliczenia wykonano z wykorzystaniem skryptu w języku Python, który współpracował z programem Abaqus. Umożliwiło to parametryzację modelu oraz przeprowadzenie automatycznie dodatkowych operacji na wynikach, takich jak superpozycja wykresów warstwowych naprężeń czy poszukiwanie maksymalnych wartości naprężeń. W projekcie często zachodzi potrzeba oszacowa-

nia naprężeń w płytach o różnych szerokościach, z uwagi na możliwe różnice w liczbie pasów ruchu a tym samym sposobie ułożenia płyt.

2.3. Wyniki

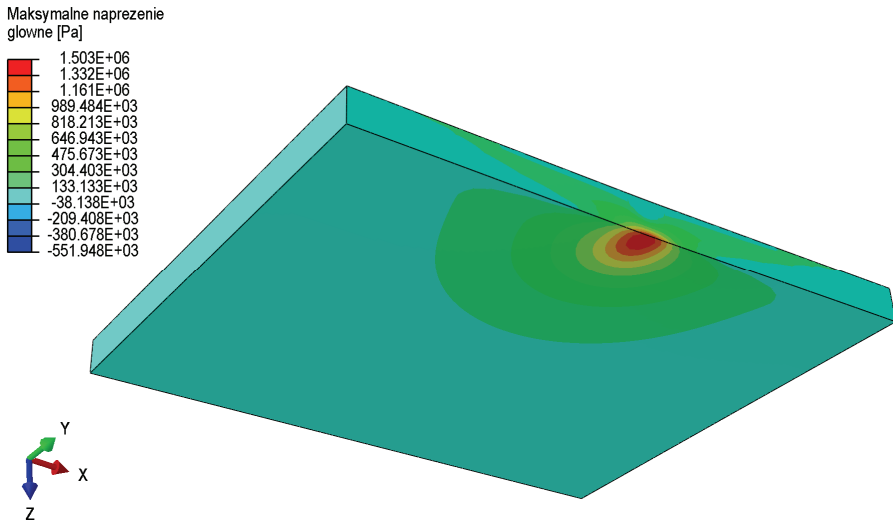
Na rys. 2.6 przedstawiono porównanie wartości największego naprężenia głównego przy założeniu dwóch skrajnych ciśnień oraz stałej wartości obciążenia osi 115 kN. Największe naprężenie główne jest niezmiennikiem, który stanowi dobrą miarę naprężeń w niezbrojonych konstrukcjach betonowych, w których szczególnie ważne jest określenie maksymalnych naprężeń rozciągających. Widoczne jest zwiększenie naprężeń wraz ze zwiększeniem ciśnienia. Maksymalne wartości naprężeń od obciążenia ciśnieniem występują przy obciążeniu na powierzchni C.



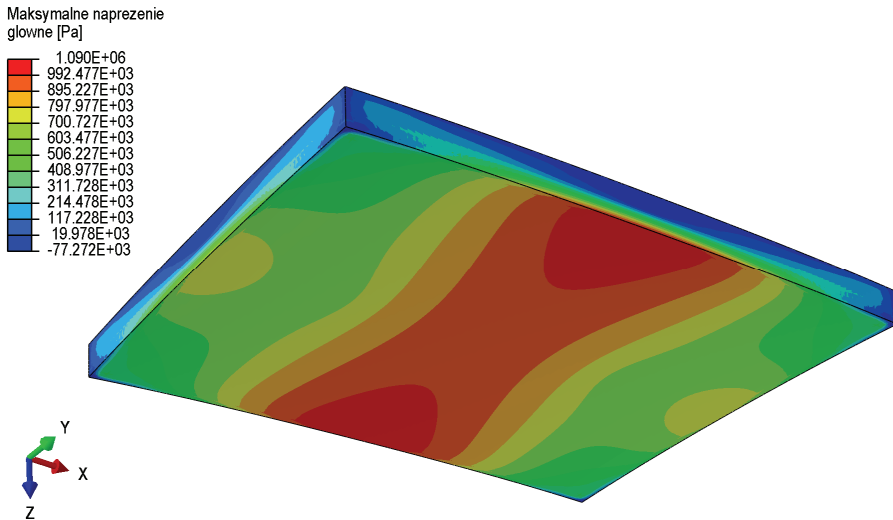
Rysunek 2.6. Porównanie maksymalnych wartości największego naprężenia głównego przy założeniu różnych wartości ciśnienia przy stałym obciążeniu 115 kN/oś

Na rys. 2.7 oraz rys. 2.8 przedstawiano przykładowe wykresy warstwiczne największego naprężenia głównego w płycie betonowej przy obciążeniu ciśnieniem na powierzchni C oraz gradientem temperatury. Na rys. 2.9 zilustrowano również superpozycję naprężeń od obciążenia ciśnieniem oraz od temperatury. Rysunek 2.10 przedstawia wykres warstwiczny zmiennej *COPEN* na dolnej powierzchni płyty betonowej. Wielkość ta, dostępna w programie Abaqus, związana jest ze sformułowaniem kontaktu, określa stopień separacji (bądź przenikania) pomiędzy powierzchniami kontaktowymi. Jak widać pod wpływem obciążenia gradientem temperatury, występuje odrywanie płyty od podbudowy w cen-

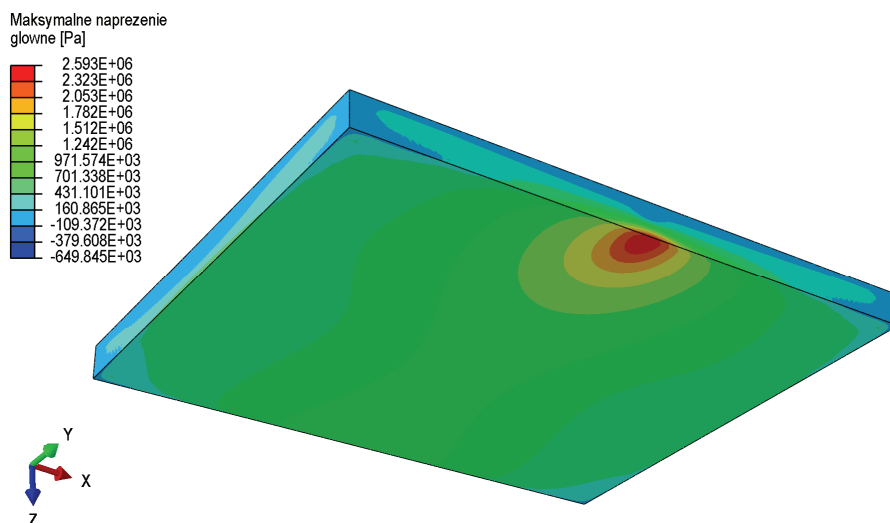
tralnym punkcie co jest spodziewanym efektem. Minimalne wartości ujemne widoczne na rys. 2.10 wynikają z numerycznego sformułowania kontaktu, są o rząd wielkości mniejsze od poziomów separacji i nie wpływają na zachowanie się konstrukcji w założonym modelu.



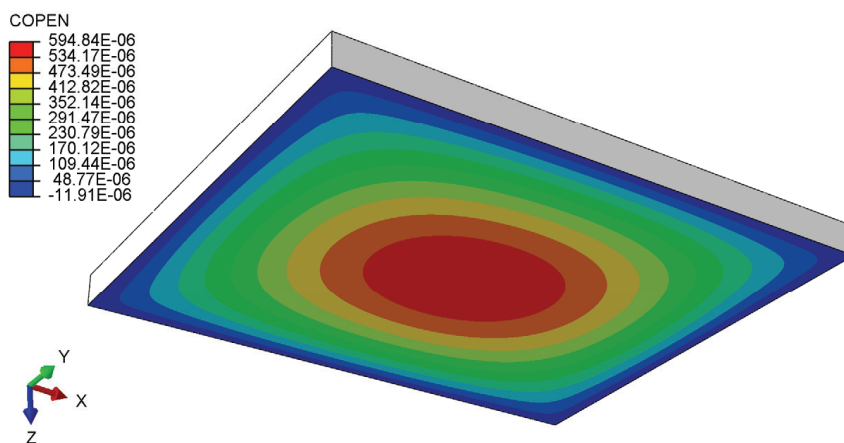
Rysunek 2.7. Wykres warstwiczny największego napężenia głównego w płycie o wymiarach 400×500×30 cm pod wpływem obciążenia ciśnieniem na powierzchni C



Rysunek 2.8. Wykres warstwiczny największego napężenia głównego w płycie o wymiarach 400×500×30 cm pod wpływem obciążenia gradientem temperatury

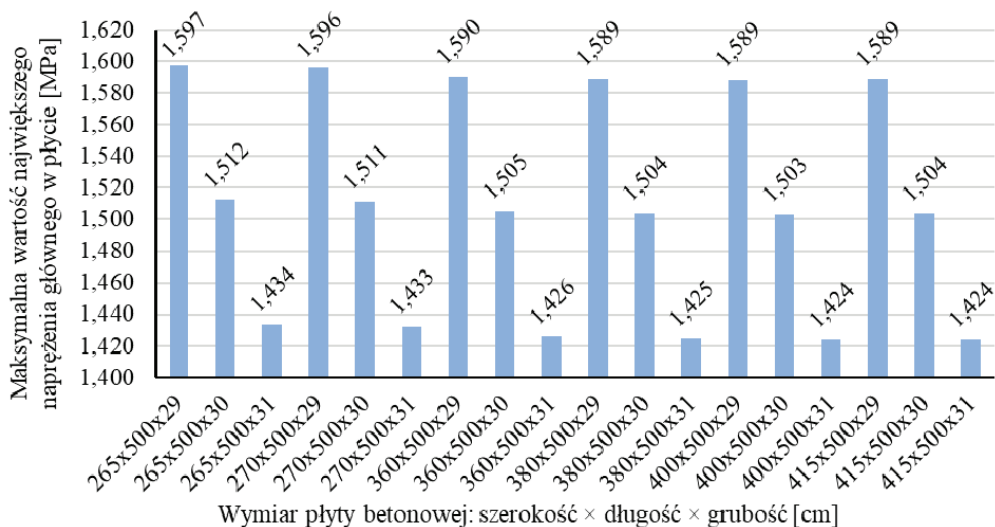


Rysunek 2.9. Wykres warstwiczny największego naprężenia głównego w płycie o wymiarach 400×500×30 cm powstały w wyniku superpozycji wykresów od obciążenia ciśnieniem w punkcie C oraz gradientem temperatury



Rysunek 2.10. Wykres warstwiczny zmiennej określającej stopień separacji pomiędzy powierzchniami wchodzącymi w skład sformułowania kontaktu

Wykonano także dodatkowe obliczenia, obrazujące wpływ wymiarów płyty na maksymalne naprężenia w płycie. Zastosowano płyty o szerokości od 2,65 m do 4,15 m oraz grubości od 29 do 31 cm. Na rys. 2.11 zestawiono maksymalne wartości największego naprężenia głównego w płycie pod wpływem obciążenia ciśnieniem $q = 850$ kPa na powierzchni C przy założeniu różnych wymiarów w planie oraz różnych grubości płyt.



Rysunek 2.11. Zestawienie maksymalnych wartości największego naprężenia głównego w płycie pod wpływem obciążenia ciśnieniem $q = 850$ kPa na powierzchni C, przy założeniu różnych geometrii płyty

3. Obliczenia MES wytyżenia dybli

Dyble stosowane w nawierzchniach sztywnych zapewniają właściwą współpracę płyt betonowych (Load Transfer Efficiency – LTE), jednocześnie umożliwiając swobodne rozszerzanie lub kurczenie płyt wywołane zmianami temperatury i wilgotności. Poprzez podparcie krawędzi płyt, zapewniają przenoszenie oraz równomierne rozłożenie obciążeń, co zmniejsza intensywność naprężeń i ugięć, a tym samym ogranicza akumulację uszkodzeń. Zmniejszają również niezależne ruchy pionowe (względne ugięcia) płyt po każdej stronie szczeliny dylatacyjnej, co wpływa na komfort użytkowania nawierzchni [3].

Tradycyjnym rozwiązaniem, stosowanym w projektowaniu nowych nawierzchni, jest zastosowanie gładkich, okrągłych prętów stalowych w osłonie polimerowej, rozmieszczonych równomiernie wzdłuż szczeliny dylatacyjnej wg wytycznej zawartej w katalogu [17]. Wszystkie obliczenia w katalogu zostały wykonane dla jednego typu i rozstawu dybli.

W projektowaniu oraz ocenie nawierzchni sztywnych możliwe jest postawienie wielu pytań dotyczących zastosowania dybli. Poniżej zaprezentowano kilka przykładowych zagadnień badawczych:

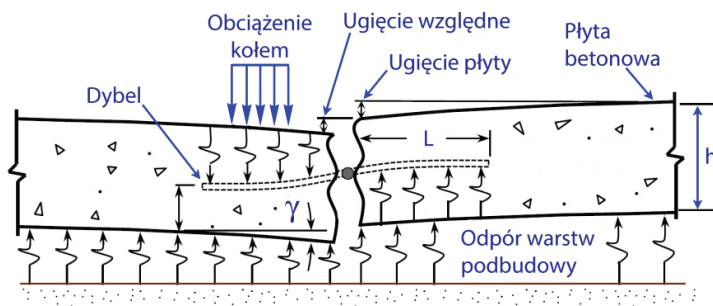
- Dobór rozmiaru dybli. Zwiększanie średnicy nie zawsze jest sposobem na poprawę bezpieczeństwa [10]. Świadczą o tym awarie płyt, w których zastosowano zbyt duże dyble w stosunku do grubości płyty, co powodowało pękanie betonu. Poza tym koszty jednostkowe dybla zwykle gwałtownie rosną

wraz z rozmiarem, dlatego ważne jest stosowanie elementów o wielkości nie większej niż to konieczne. Rozmiar każdorazowo powinien być dobrany tak, aby spełniać warunki naprężeń ściskających w betonie pod dyblem.

- Wiele opracowań wskazuje, że dyble umieszczone poza głównymi śladami kół przenoszą mniejsze obciążenia. Wynika stąd, że bardziej efektywną redukcję naprężeń i ugięć nawierzchni można osiągnąć poprzez zmienne rozłożenie dybli. Powyższą obserwację można wykorzystać do opracowania nierównomiernych rozkładów dybli wzdłuż szczeliny dylatacyjnej, które charakteryzują się nieznacznie zmniejszonym odstępem na ścieżkach kół i zwiększonym rozstawem w miejscach, które są z dala od śladów kół.
- Dalszą poprawę efektywności można osiągnąć poprzez zastosowanie dybli o kształtach innych niż kołowy (np. eliptycznych), wykonanych z materiałów kompozytowych lub wydrążonych w środku dla zmniejszenia wagi.
- Ocena trwałości nawierzchni w przypadku odchyłek wbudowania dybli. Nie zawsze ułożenie dybli na etapie wykonawstwa odpowiada położeniu idealnemu przewidzianemu dokumentacją projektową. Kluczowe jest określenie, czy imperfekcje nie będą oddziaływać na konstrukcję nawierzchni w sposób obniżający jej trwałość i współpracę płyt. Zachodzi wtedy konieczność określenia dopuszczalnych odchyłek, oceny wpływu ich przekroczenia na trwałość nawierzchni oraz ew. technologii naprawy.

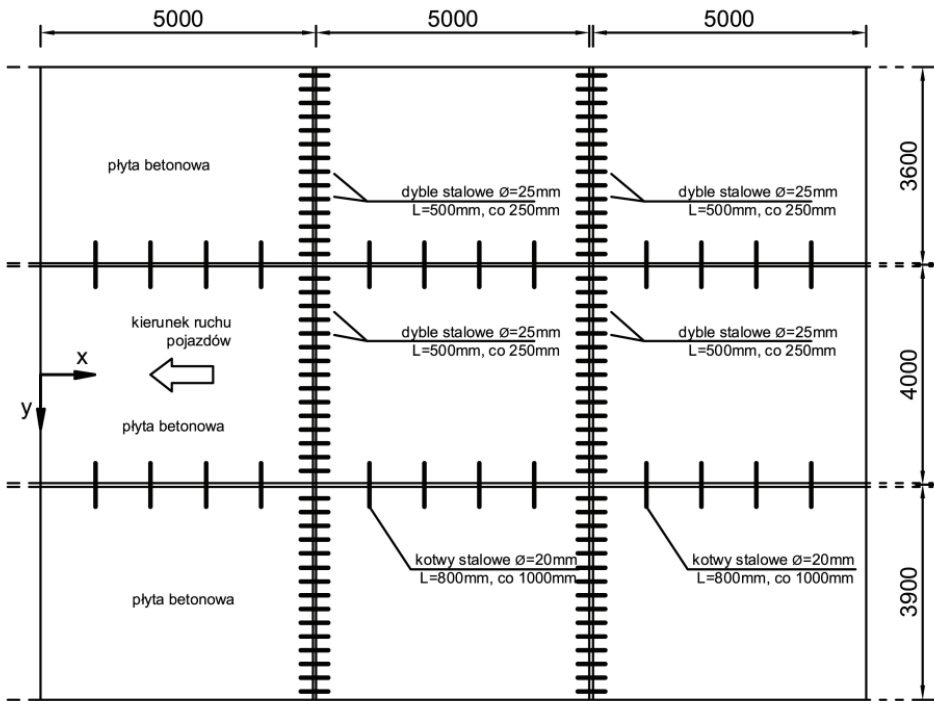
Omówienie każdego z zasygnalizowanych tematów badawczych wykracza poza ramy tej publikacji. Szczegółowe analizy i oceny skutków związanych z każdą z wyżej wymienionych modyfikacji projektu dybli można znaleźć w obszernej literaturze dotyczącej nawierzchni sztywnych.

Ocena każdego indywidualnego rozwiązania wymaga odwzorowania współpracy dybli, płyt i warstw podbudowy (por. rys. 3.1). Taką możliwość daje modelowanie w ramach mechaniki ciał stałych i dysponowanie odpowiednim narzędziem obliczeniowym. Metodykę prowadzenia takich obliczeń, wypracowaną przez autorów, przedstawiono poniżej na przykładzie typowego zadania.



Rysunek 3.1. Przekrój poprzeczny przez płyty nawierzchni ze schematycznym pokazaniem odkształceń dybla

Jako przykład, wykorzystano projekt nawierzchni, która składa się z połączonych ze sobą dyblami i kotwami płyt betonowych o stałej długości 5000 mm oraz szerokości od 3600 mm do 4000 mm, w zależności od układu pasów ruchu i pasa awaryjnego (por. rys. 3.2).



Rysunek 3.2. Konstrukcja betonowej nawierzchni drogowej, wymiary podano w [mm]

Dłuższe krawędzie płyt połączone są ze sobą kotwami o średnicy $\phi = 20$ mm i długości $L = 800$ mm w rozstawie co 1000 mm. Krótsze krawędzie płyt (w kierunku ruchu samochodowego) połączone są ze sobą dyblami o średnicy $\phi = 25$ mm i długości $L = 500$ mm. Rozstaw dybli łączących płyty pasów ruchu wynosi 250 mm. Właściwości materiałowe łączników stalowych przyjęto zgodnie z Katalogiem typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych [17]. Dyble będą wykonane ze stali S 235, natomiast kotwy ze stali żebrowanej klasy B 500. Łączniki znajdują się w płaszczyźnie środkowej płyt.

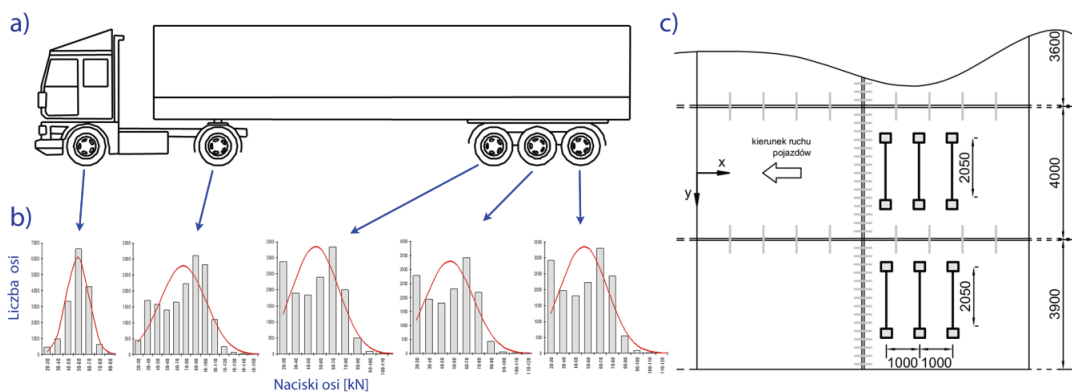
Głównym celem analiz było wyznaczenie w konstrukcji nawierzchni stanu przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia wywołanego przez następujące obciążenia:

- Obciążenie pojazdami samochodowymi wyposażonymi w oś wielokrotną o kołach pojedynczych, z obciążeniem dopuszczalnym osi pojedynczej równym 100 kN.

- Obciążenia termiczne – dodatni gradient. Na podstawie analiz danych temperaturowych powietrza w Polsce oraz pomiarów w nawierzchniach betonowych [11], przyjęto różnicę temperatur pomiędzy powierzchnią górną i dolną płyty dla płyt o grubości 25 do 32 cm równą 10°C . Gradient temperatury $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ przykładano przy założeniu liniowej zmiany temperatury po grubości płyty betonowej.
- Obciążenia termiczne – ujemny gradient. Przyjęto różnicę temperatur pomiędzy powierzchnią górną i dolną płyty dla płyt o grubości 25 do 32 cm równą $-4,8^{\circ}\text{C}$. Gradient temperatury $\Delta T = -4,8^{\circ}\text{C}$ przykładano przy założeniu liniowej zmiany temperatury po grubości płyty betonowej.
- Każdorazowo uwzględniano ciężar własny warstw.

W celu określenia rzeczywistego oddziaływania różnych sylwetek pojazdów na nawierzchnię i dyble, konieczne było zbudowanie modelu obliczeniowego nawierzchni drogowej obciążonego w sposób najdokładniej odzwierciedlający konfigurację osi i wymiary ogumienia. Na osi kierowanej, napędowej oraz ciągnionej każdego analizowanego typu pojazdu, występuje charakterystyczne dla niej ogumienie, założone na podstawie [17]. Rozstaw kół przyjęto równy 2,05 m.

Przeprowadzone w opracowaniu [18] analizy wykazują na dużą agresywność osi potrójnej stosowanej w naczepach ciągników siodłowych. Stwierdzono również, że osie wielokrotne pojazdów nie powinny być rozkładane na poszczególne osie składowe z uwagi na wielkości wywoływanych przez nie odkształceń i naprężeń w nawierzchniach drogowych, a zatem wielkość szkodliwego oddziaływania pojazdów nie zależy tylko od liczby osi i ich nacisku, ale również od ich konfiguracji. Mając to na uwadze wybrano do analizy sylwetkę pojazdu przedstawioną na rys. 3.3a, obciążając nawierzchnię osią potrójną w sposób pokazany na rys. 3.3c.

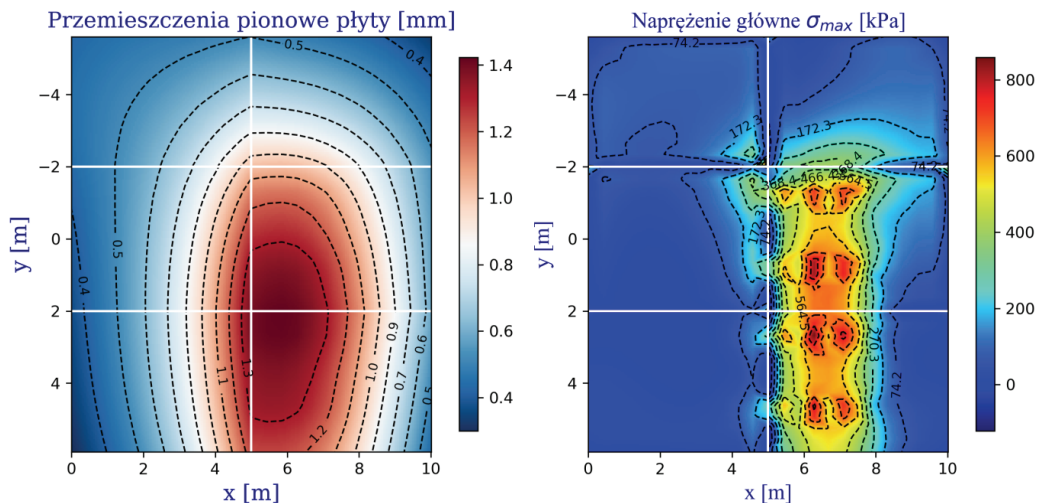


Rysunek 3.3. Sylwetka wybranego samochodu ciężarowego (a), częstość występowania nacisków na poszczególne osie (b), miejsca przyłożenia obciążenia na powierzchni płyt (c)

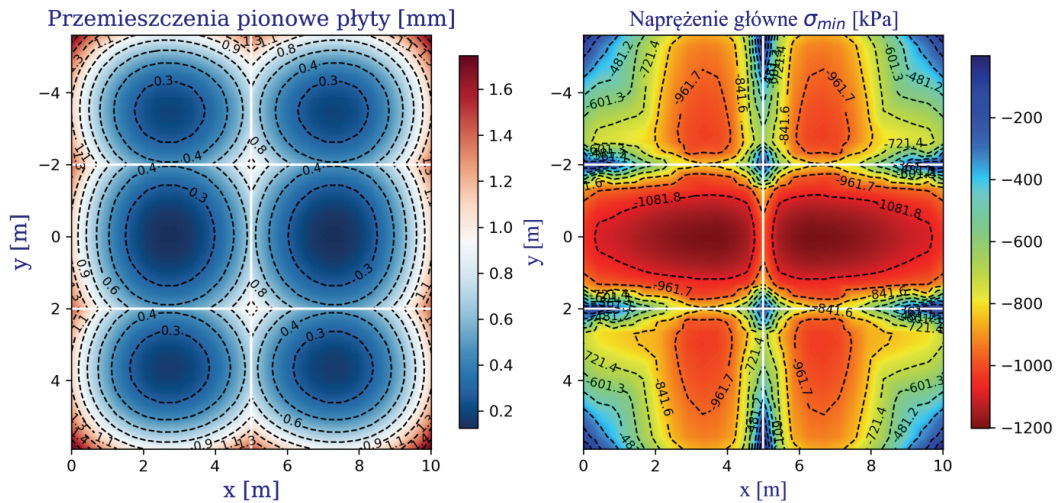
Trójwymiarowe modele MES obejmowały układ płyt betonowych (rys. 3.2) oraz warstwy podbudowy poniżej. Analizę statyczną konstrukcji przeprowadzono przy założeniu modelu materiału liniowo-sprężystego. Dyble oraz kotwy modelowano belkowymi elementami skończonymi. Na węzły elementów belkowych oraz sąsiednich elementów bryłowych nałożono więzy, co zapewnia współpracę w kierunkach y i z . Pozostawiono jednocześnie swobodę przesuwu wzdłuż dybla. Obliczenia komputerowe obejmowały określenie stanu naprężeń, odkształceń oraz przemieszczeń analizowanego fragmentu nawierzchni przy uwzględnieniu opisanych powyżej obciążeń.

Na rys. 3.4 i rys. 3.5 zamieszczono wybrane wykresy warstwicowe przemieszczeń oraz naprężeń uzyskane z obliczeń zdefiniowanego wcześniej układu oraz obciążenia płyt. Wykresy zostały przedstawione w postaci map warstwicowych wraz z podaną za każdym razem skalą. Na rys. 3.6 pokazano siły poprzeczne przenoszone przez dyble. Ze względu na liniowość modelu możliwe jest zastosowanie zasady superpozycji i wyliczenie przemieszczeń, naprężeń oraz sił od działających jednocześnie obciążeń mechanicznych i termicznych.

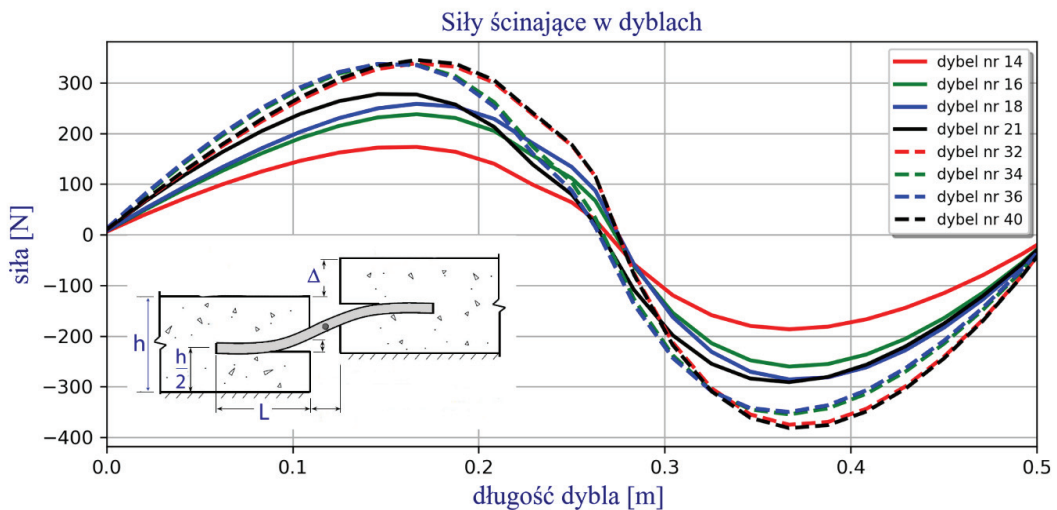
Wyniki wskazują, że oprócz nacisków kół najbardziej niekorzystny jest przypadek obciążenia dodatnim gradientem temperatury. Odkształcona pod wpływem efektu rozszerzalności termicznej płyta jest jednocześnie obciążana ciężarem własnym, co powoduje znaczne zginanie i powstanie naprężeń rozciągających w dolnych warstwach płyty. Połączenie efektu *curlingu* (paczenia się płyt w wyniku działania temperatury) oraz obciążenia pasa skutkuje maksymalnymi wartościami ugięcia i naprężeń.



Rysunek 3.4. Przemieszczenie pionowe konstrukcji nawierzchni pod wpływem obciążenia na płytach (po lewej) oraz maksymalne naprężenie główne w dolnych warstwach płyty betonowej (po prawej)



Rysunek 3.5. Przemieszczenie pionowe konstrukcji nawierzchni pod wpływem dodatniego gradientu temperatury oraz ciężaru własnego (po lewej) oraz minimalne naprężenie główne w górnych warstwach płyty betonowej (po prawej)



Rysunek 3.6. Wykres sił poprzecznych w wybranych dyblach łączących płyty, przypadek obciążenia kołami pojazdu

4. Podsumowanie

Niniejszy rozdział monografii jest wynikiem współpracy w zakresie badań naukowych, ekspertyz technicznych i projektów konstrukcji nawierzchni drogowych i lotniskowych realizowanych od wielu lat w zespole pracowników Instytutu

Dróg i Mostów WIL PW oraz Instytutu Badawczego Dróg i Mostów (IBDiM) w Warszawie. Dzięki wprowadzeniu obliczeń MES do wymiarowania nawierzchni betonowej udaje się łatwo optymalizować układ konstrukcyjny, zarówno w odniesieniu do nowych nawierzchni, jak i w technologii *whitetopping*.

Zastosowanie metodyki obliczeniowej zaprezentowanej w niniejszej pracy, znalazło wyraz w wielu wykonanych projektach. W ostatnich latach, zespół autorów opracowania, wykonał wymiarowanie konstrukcji nawierzchni betonowych na następujących odcinkach dróg krajowych i autostrad:

- droga ekspresowa S17 Garwolin – Kurów na odcinku Gończyce (koniec obwodnicy) – granica województwa mazowieckiego i lubelskiego od ok. km 62+200 do ok. km 75+212 dł. ok. 13,012 km;
- droga ekspresowa S17 Garwolin – Kurów na odcinku Garwolin (koniec obwodnicy) – Gończyce (koniec obwodnicy) od ok. km 49+973 do ok. km 62+200 dł. ok. 12,227 km;
- droga ekspresowa S17 na odcinku Kołbiel (koniec obwodnicy) – Garwolin (początek obwodnicy) od ok. km 27+900 do ok. km 40+915 dł. ok. 13,015 km;
- autostrada A-1 Tuszyn-Belchatów od km 335+937,65 do km 351+800,00 o dł. ok. 15,863 km;
- autostrada A-1 węzeł Belchatów – węzeł Kamieński o dł. ok. 25 km (wymiarowanie w trakcie realizacji).

Zagadnienia projektowania konstrukcji nawierzchni sztywnych, modelowania konstytutywnych własności betonu i podłoża gruntowego a także optymalizacji układu warstw nośnych są również przedmiotem wspólnych prac naukowych zespołu badawczego [6, 19] oraz rozpraw doktorskich.

Bibliografia

- [1] Das A.: Analysis of pavement structures. CRC Press, Boca Raton 2015.
- [2] Dassault Systèmes, Abaqus Analysis User's Guide v. 6.16, 2016.
- [3] Glinicki M.A.: Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 2019.
- [4] Gorbunow-Posadow M.I.: Obliczanie konstrukcji na podłożu sprężystym. Wydawnictwo „Budownictwo i Architektura”, Warszawa 1956.
- [5] Graczyk M.: Nośność konstrukcji nawierzchni wielowarstwowych w krajowych warunkach klimatycznych, S Studia i Materiały, Zeszyt 63, IBDiM, Warszawa 2010.
- [6] Graczyk M., Zbiciak A., Józefiak K.: Design of airport pavements with use of analytical methods and FEM. Roads and Bridges – Drogi i Mosty, 14, 2, 2015, 101–115.
- [7] Grzesikiewicz W., Zbiciak A., Graczyk M., Michalczyk R.: Modelowanie zagadnienia przyczepności koła ogumionego do nawierzchni drogowej. Ibidem.

- [8] Kim M.O., Bordelon A.C., Lee N.K.: Early-age crack widths of thin fiber reinforced concrete overlays subjected to temperature gradients. *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd., 148, 2017, 492–503.
- [9] Lewinowski A.: *Wymiarowanie konstrukcji jezdni drogowych z betonu cementowego*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1982.
- [10] Mackiewicz P.: Analysis of stresses in concrete pavement under a dowel according to its diameter and load transfer efficiency. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42, 11, 2015, 845–853.
- [11] Mackiewicz P.: Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements. *Applied Thermal Engineering*. Elsevier Ltd., 73, 1, 2014, 1167–1174.
- [12] Nejman T.: *Badania stanu naprężenia*, Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej. Budownictwo., Warszawa 1964.
- [13] Nita P.: *Betonowe nawierzchnie lotniskowe: teoria i wymiarowanie konstrukcyjne*. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2005.
- [14] Papagiannakis A.T., Masad E.A.: *Pavement Design and Materials*, Wiley, 2008.
- [15] Prochowski L.: *Mechanika ruchu*. Wyd. 2 rozszerzone, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
- [16] Sybilski D. (red.): *Katalog Przebudów i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych*. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2013.
- [17] Szydło A. (red.): *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych*. Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Warszawa 2014.
- [18] Szydło A.: *Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego: teoria, wymiarowanie, realizacja*. Polski Cement sp. z o. o., Kraków 2004.
- [19] Zbiciak A., Graczyk M., Józefiak K., Brzeziński K., Michalczyk R.: Assessment of the impact of a concrete slab geometrical parameters on the distribution of stresses in the road pavement structure. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, 2019 (w druku).
- [20] Zienkiewicz O.C.: Taylor R. L.: *The Finite Element Method*. The 5th ed. Butterworth-Heinemann, Oxford 2000.

Abstract

In various methods of pavement design developed in the Department of Theoretical Mechanics and Pavement Modelling (IDiM, WIL PW) co-operating with the Road and Bridge Research Institute (IBDiM), the stress and strain state in the structural elements caused by a vehicle axle load or temperature gradient have to be determined. In this chapter some illustrative applications of the numerical analysis using the finite element method (FEM) in the process of concrete pavements' design are presented. First, the procedure of the stress state calculation in a concrete plate is described based on typical design inputs. Special attention is paid to the influence of the tire's pressure on maximum principal stress in the concrete plate. While the equivalent load per axle is generally assumed to be equal 115 kN, the pressure in tires can vary between 650 and 850 kPa. The numerical analysis shows an increase in the values of the maximum principal stress with the increase of the pressure. Secondly, an illustrative calculation of shear forces and stress state in dowels used to provide desired load transfer efficiency in jointed plain concrete pavements is presented.