

MIROSLAW GRACZYK<sup>1)</sup>  
MARCIN GAJEWSKI<sup>2)</sup>  
RADOSLAW SZCZERBA<sup>3)</sup>

## STRUCTURAL ANALYSIS OF AIRFIELD CONCRETE PAVEMENT WITH DOWELED JOINTS TAKING INTO ACCOUNT CURLING OF SLABS

### ANALIZA STATYCZNA DYBLOWANEJ BETONOWEJ NAWIERZCHNI LOTNISKOWEJ Z UWZGLĘDNIENIEM ZJAWISKA CURLINGU<sup>4)</sup> PŁYT

**STRESZCZENIE.** W pracy przedstawiano tematykę analizy dybłowanej betonowej nawierzchni lotniskowej po wystąpieniu zjawiska curlingu płyt uwzględniając zachowania połączeń dybłowanych płyt betonowych. Zaprezentowano przykładowe rozwiązania konstrukcyjne tego typu nawierzchni oraz sposób osadzania dybli w płycie betonowej. W artykule przedstawiono powiązanie zjawiska curlingu, które powstaje na skutek nierównomiernego rozkładu temperatury w przekroju pionowym płyty betonowej. W wyniku tego zjawiska mogą niekiedy wystąpić pęknięcia w pobliżu krawędzi oraz naroży płyt. Autorzy przedstawili ponadto wyniki globalnej analizy statycznej nawierzchni lotniskowej w stanie ekstremalnego obciążenia po wystąpieniu zjawiska curlingu. Analizę przeprowadzono na przykładzie obciążenia od kół samolotu. W analizach połączenia dybłowanego dokonano sparametryzowania obliczeń ze względu na grubość płyty oraz średnicę dybli. Obliczenia metodą elementów skończonych zrealizowano z wykorzystaniem programu komputerowego ABAQUS/Standard.

**SŁOWA KLUCZOWE:** curling płyt, dybłowane nawierzchnie lotniskowe, modelowanie MES, nawierzchnie betonowe, projektowanie.

**ABSTRACT.** The subject of this paper is the structural analysis of a concrete airfield pavement with doweled joints after curling focusing on the doweled joints behaviour. The paper presents some examples of such pavement structures and dowel bar installation. Attention is paid to the effects of curling of slabs due to the temperature gradient across the slab thickness. It can result in the development of cracks at edges and corners of the slabs. A global structural analysis was carried out for a concrete airfield pavement exposed to extreme loading after curling. Aircraft wheel loading was considered in the analysis. The calculations of the doweled joints were parameterized based on the slab thickness and dowel diameter. The finite element method analysis was carried out using the ABAQUS/Standard software package.

**KEYWORDS:** concrete airfield pavements with doweled joints, curling of concrete slabs, designing, FEM modelling, PCC pavements.

DOI: 10.7409/rabdim.016.009

<sup>1)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mgraczyk@ibdim.edu.pl (✉)

<sup>2)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mgajewski@ibdim.edu.pl

<sup>3)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa; r.szczërba@il.pw.edu.pl

<sup>4)</sup> curling – charakterystyczne wygięcie się płyty nawierzchni spoczywającej na kolejnych warstwach konstrukcji pod wpływem nierównomiernego rozkładu temperatury w przekroju pionowym płyty

## 1. WSTĘP

Aktualnie coraz częściej stosowane są nawierzchnie betonowe, zarówno przy budowie dróg, jak i lotnisk. Dotychczas przeprowadzono oraz opisano wiele analiz numerycznych nawierzchni betonowych [1-6]. Powyższą problematykę ze szczególnym uwzględnieniem płyt dyblowanych i kotwionych podjęto także w pracach [7-14]. Dyble stosowane są w połączeniach płyt w podłużnym kierunku ruchu pojazdów i samolotów (Rys. 1). Natomiast w kierunku prostopadłym stosuje się kotwy. Zadaniem dybli w nawierzchni jest zapewnienie podłużnej współpracy płyt i transfer obciążeń oraz ugięć z jednej płyty na drugą. Kotwy zaś mają za zadanie zapewnić poprzeczną współpracę płyt. Dyble charakteryzują się większą od kotew średnicą ( $\phi = 19-50$  mm), a ich rozstaw także jest mniejszy niż w przypadku kotew ( $\phi = 12-16$  mm). Ponadto połączenie dyblami należy do znacznie „sztywniejszych” niż połączenie kotwami. Szczególna sytuacja zachodzi w przypadku płyt lotniskowych, na których odbywa się ruch samolotów w różnych kierunkach, ze szczególnym wyróżnieniem dwóch kierunków ruchu, które są w stosunku do siebie prostopadłe. W tym przypadku zachodzi konieczność dyblowania betonowej nawierzchni lotniskowej w dwóch kierunkach. Wówczas szczególnie ważny staje się właściwy dobór dybli, tzn. ich średnicy, długości i rozstawu, ponieważ w takiej sytuacji płyty połączone są na wszystkich krawędziach znacznie sztywniej niż na krawędziach podłużnych, gdzie stosuje się kotwy. Problem połączenia dyblami płyt w dwóch kierunkach jest tym większy, im cieńsze są płyty betonowe i zachodzi zjawisko curlingu. Polega ono na odkształcaniu się płyt betonowych pod wpływem występujących różnic temperatury między górą a spodem (spagiem) płyty. Ze względu na przedstawienie nowego spojrzenia praca stanowi wstęp do dalszych rozważań nad złożonym stanem współpracy układu dyblowanego nawierzchni betonowej z uwzględnieniem zjawiska curlingu.

## 1. INTRODUCTION

Portland cement concrete (PCC) is an increasingly popular option for construction of both road and airfield pavements. PCC pavements have been studied in a number of numerical analyses [1-6]. There are also studies focusing on the pavements with doweled and tied joints between slabs [7-14]. Dowels are inserted in the slabs connections in the direction of travel of vehicles and aircraft (Fig. 1). However in the direction perpendicular to traffic the tie bars are used. The function of dowels is to provide a longitudinal connection between the slabs to transfer loads and deflections. Connection in the transverse direction is provided by tie bars. The dowel bars are larger in diameter than the tie bars ( $\phi = 19-50$  mm as compared to  $\phi = 12-16$  mm) and, besides, they are more closely spaced. Moreover, dowels provide a much more rigid connection in comparison to tie bars. The airfield pavements are a particular case because the aircraft traffic moves in different directions with two prevailing directions oriented perpendicular to each other. As such, airfield pavements must be provided with dowels placed in two directions. With much more rigid connections between slabs along all the edges, as compared to longitudinal edges connected with tie bars, it is particularly important to appropriately specify the dowels, including the bar diameter, length and spacing. The importance of this issue yet increases with a decreasing slab thickness and probability of curling. Curling is the distortion of concrete slabs due to a temperature difference between the slab surface and bottom (underside). Offering a new view of the problem, this paper should be treated as an introduction to further studies of a complex structural system of curled concrete slabs.

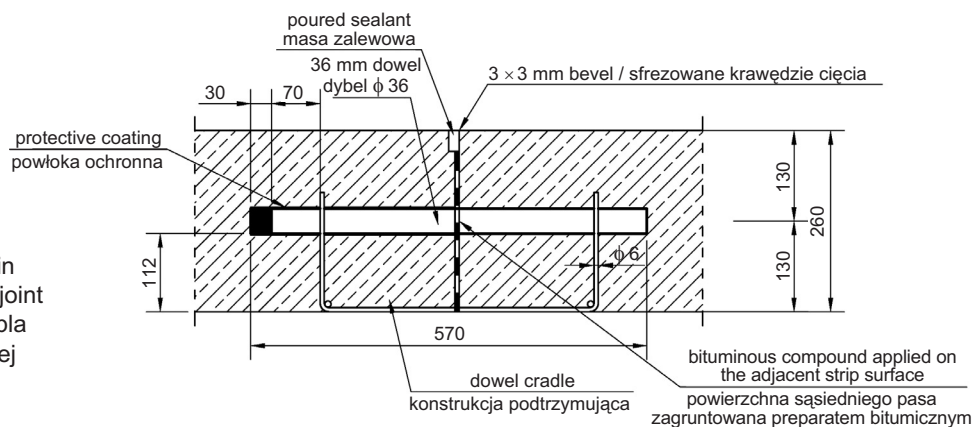


Fig. 1. Example of dowel positioning in the pavement across the contraction joint  
Rys. 1. Przykładowe usytuowanie dybla w nawierzchni w szczelinie skurczowej

## 2. PROJEKTOWANIE POŁĄCZENIA DYBLOWANEGO

W tradycyjnym, inżynierskim podejściu do obliczania połączenia szczelin dyblowanych lotniskowej nawierzchni betonowej stosuje się najczęściej praktykę opartą przede wszystkim na założeniu, że wytrzymałość betonu jest wielokrotnie niższa niż stali i że rozmiary oraz odległości między dyblami powinny być tak dobrane, aby dopuszczalne naprężenia w betonie nie zostały przekroczone. Na przykład maksymalne naprężenie w połączeniu między dyblem a betonem powinno być określone według empirycznego wzoru (1) zgodnie z ACI 1956 [15]:

$$f_b = \frac{(4-d)}{3} f'_c, \quad (1)$$

gdzie:

- $f_b$  – dopuszczalne naprężenia w połączeniu dybla i betonu [psi],
- $d$  – średnica dybla [cal],
- $f'_c$  – wytrzymałość gwarantowana na ściskanie betonu [psi].

Obecnie w obliczeniach inżynierskich połączeń dyblowych określa się rozstaw i średnicę dybli (Tabl. 1) [9, 13, 16-19]. Natomiast w obliczeniach rozstawu oraz średnicy dybli zapewniających współpracę pomiędzy sąsiednimi płytami stosuje się następujące założenia:

- proporcjonalna do ugięcia nośność sąsiednich dybli maleje wprost proporcjonalnie do odległości od dybla, w przekroju którego występuje maksymalne obciążenie,
- dyble oddalone więcej niż  $1,8l$  ( $l$  - promień względnej sztywności płyty betonowej) od dybla, w przekroju którego występuje maksymalne obciążenie, nie doświadczają ugięć,
- nośność połączenia dyblowanego zależy od wytrzymałości pojedynczego dybla i od liczby dybli współpracujących pod obciążeniem,
- wytrzymałość pojedynczego dybla jest odniesiona do wytrzymałości na ściskanie betonu w strefie połączenia dybla z płytą betonową,
- w przypadku obciążenia krawędzi płyty siłą pojedynczą (goleń główna jednokołowa) nośność połączenia dyblowanego jest równa iloczynowi oddziałującej siły i współczynnika nośności grupy dybli, będącego sumą współczynników nośności wszystkich dybli współpracujących pod obciążeniem, przy obciążeniu usytuowanym nad skrajnym dyblem,

## 2. DESIGN OF DOWELED JOINTS IN CONCRETE AIRFIELD PAVEMENTS

The traditional engineering approach to the design of doweled joints in concrete airfield pavements is based on the many times greater strength of steel (as compared to concrete), and on avoiding excessive stresses in concrete by appropriately specified sizes and spacing between the dowels. For example the maximum allowable bearing stress in the joint between a dowel and concrete should be determined by the following empirical equation (1) according to ACI 1956 [15]:

where:

- $f_b$  – the maximum allowable bearing stress between dowel and concrete [psi],
- $d$  – the dowel diameter [in.],
- $f'_c$  – the ultimate compressive strength of concrete [psi].

In the current engineering practice the designers specify dowel bar spacing and diameters (Table 1) [9, 13, 16-19]. In turn, the bar spacing and diameters which ensure the connection between the neighbouring slabs, are specified based on the following assumptions:

- the bearing capacity of neighbouring dowels decreases proportionally to the distance from the maximum loaded dowel,
- the deflection under load becomes zero for dowels spaced by more than  $1.8l$  (where  $l$  is the radius of relative stiffness) either side from the maximum loaded dowel,
- the bearing capacity of a doweled joint depends on the bearing capacity of a single dowel and the number of structurally combined dowels,
- the bearing capacity of a single dowel is related to the compressive strength of concrete at the dowel bar-concrete interface,
- for a single load applied at the slab edge (single-wheel main landing gear) the doweled joint bearing capacity equals the loading force multiplied by the bearing capacity factor of a group of dowels being the sum of the bearing capacity factors of all the structurally combined dowels with the load applied over the outermost dowel,

- przy obciążeniu krawędzi płyty dwiema siłami (goleń główna typu tandem) sumaryczny współczynnik nośności połączenia dyblowanego jest równy mniejszemu z dwóch współczynników nośności, obliczonych oddzielnie przy obciążeniach działających w obu punktach. Nośność jest równa iloczynowi oddziałującej pojedynczej siły i sumarycznego współczynnika nośności.

W stosowanych obecnie obliczeniach nie uwzględnia się sytuacji, w której zachodzi obciążenie kołami samolotu połączenia dyblowanego płyt betonowych przy jednoczesnym wystąpieniu zjawiska curlingu.

- with the slab edge loaded with two forces (tandem main) the total bearing capacity factor of a doweled joint equals the lower of the two factors calculated independently for the loads applied at the two points. The bearing capacity equals the single force multiplied by the total bearing capacity factor.

However, no calculations have been made for aircraft wheel load exerted on pavements with curled slabs with doweled joints.

Table 1. Dowel bars sizes and spacing depending on the thickness of top layer [17]

Tablica 1. Wymiary dybli i ich rozstaw w zależności od grubości jezdnej płyty betonowej [17]

Slab thickness [in.] Grubość płyty [cal]	Dowel bar diameter [in.] Średnica dybla [cal]	Dowel bar length [in.] Długość dybla [cal]	Dowel bars spacing [in.] Rozstaw dybli [cal]
Corps of Engineers / Korpus Inżynieryjny Armii Stanów Zjednoczonych			
< 8.0	$\frac{3}{4}$	16.0	12.0
8.0 - 11.0	1	16.0	12.0
12.0 - 15.0	$1\frac{1}{4}$	20.0	15.0
16.0 - 20.0	$1\frac{1}{2}$	20.0	18.0
21.0 - 25.0	2	24.0	18.0
> 25.0	3	30.0	18.0
Federal Aviation Administration / Amerykańska Federacja Lotnicza			
6.0 - 7.0	$\frac{3}{4}$	18.0	12.0
8.0 - 12.0	1	19.0	12.0
13.0 - 16.0	$1\frac{1}{4}$	20.0	15.0
17.0 - 20.0	$1\frac{1}{2}$	20.0	18.0
21.0 - 24.0	2	24.0	18.0

### 3. ZJAWISKO CURLINGU PŁYT NAWIERZCHNI BETONOWYCH

Odkształcalność płyt spowodowana oddziaływaniem temperatury jest dobrze znanym i opisanym w literaturze przedmiotu zjawiskiem zwanym „*curling and warping*” [16, 20-24]. Odkształcenia dotyczą głównie górnych płyt, w szczególności cienkich. W niżej leżących, grubych warstwach betonowych efekty oddziaływania zjawiska curlingu są znikome i nie wpływają istotnie na odkształcalność tych warstw. Zjawisko to jest oczywiście ograniczane przez zastosowanie dybli, jakkolwiek na połączeniu dybla i betonu występują wówczas złożone stany naprężeń i odkształceń, które sumują się z oddziaływaniem od obciążeń pochodzących od poruszających się goleni głównych samolotu.

### 3. CURLING OF CONCRETE PAVEMENTS

Deformation of slabs due to temperature is a well-known phenomenon called curling and warping in the literature [16, 20-24]. These deformations concern mainly the surface slabs, in particular the thinner ones. In the underlying, thick concrete layers curling is ignorable and does not significantly affect their strain behaviour. While reducing curling, installation of dowels across joints produces complex stress-strain states at the dowel bar-concrete interfaces, adding to the loads imposed by the mains of aircraft moving on the surface.

The slab deformations from curling are illustrated in Figs. 2-4 [24-26]. The bar diameter influences the dowel

Zjawisko odkształceń płyty (curlingu) zobrazowano na Rys. 2-4 [24-26]. Średnica dybla wpływa z jednej strony na jego sztywność, a z drugiej zmniejsza efektywny przekrój obciążanego betonu w płycie. Dodatkowo przy dużej średnicy dybla i małej jego odkształcalności, w proporcjonalnie cienkiej płycie może on oddziaływać na beton, powyżej oraz poniżej, w zależności od usytuowania obciążenia od goleni głównej samolotu, na zasadzie efektu „łomu”. W rezultacie prowadzi to do przekroczenia odkształceń i pęknięcia betonu. Taka sytuacja jest bardzo niekorzystna, gdy przy obciążeniu płyty przez goleń główną samolotu występuje jednocześnie zjawisko odkształcania płyt od temperatury. W trakcie odkształceń płyty na skutek temperatury (zjawisko curlingu) powstają strefy bez podparcia. Miejsca, w których występuje brak podparcia płyty są zależne od rozkładu temperatury. Są to krawędzie płyty i naroża (temperatura w spodzie jest wyższa niż na górze płyty) lub środek płyty (temperatura w spodzie jest niższa niż na górze płyty).

stiffness and reduces the effective loading area in the slab. Dowels of larger diameters and high stiffness installed in relatively thin slabs can also act on the concrete over and below the dowel location, depending on the main gear location (lever action). This leads to cracking caused by excessive strains. The situation becomes very disadvantageous when loading by the main gear is accompanied by deformation of the slabs due to temperature. Such deformation (curling) creates unsupported zones. Their locations depend on the distribution of temperature across the slab thickness. With the bottom temperature higher than the surface temperature the unsupported zones are the slab corners and edges, and with the bottom temperature lower than the surface temperature the middle portion of the slab is lifted up.

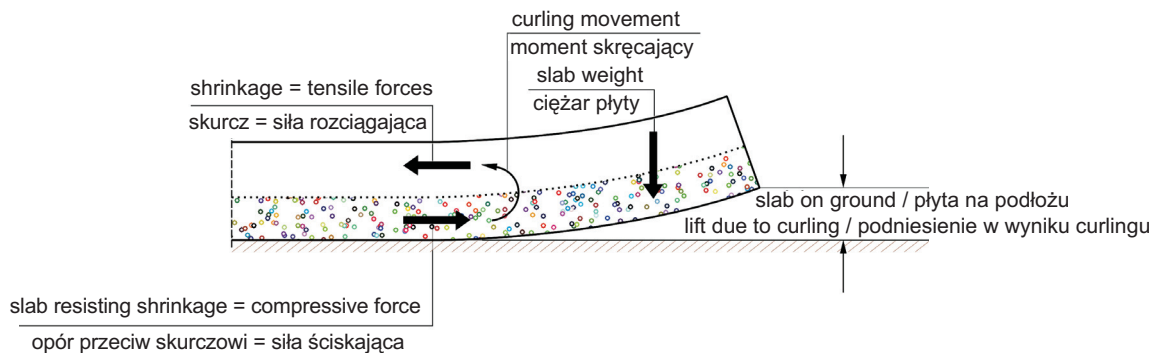


Fig. 2. Distortion of a slab due to curling. Illustration of the curling action and the resulting unsupported edge when the surface temperature is higher than the bottom temperature [24]

Rys. 2. Zjawisko odkształcenia temperaturowego płyt - curling. Zobrazowanie mechanizmu curlingu i wynikającego z niego braku podparcia na krawędzi płyty, gdy temperatura w spodzie jest wyższa niż na górze płyty [24]

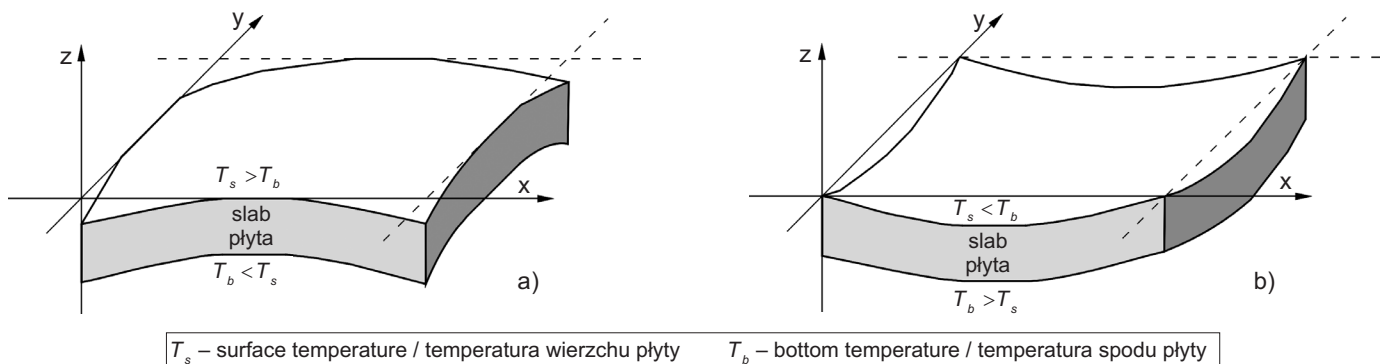


Fig. 3. Distortion of a slab due to curling: a) unsupported middle part of the slab when the bottom temperature is higher than at the surface temperature; b) unsupported corners and edges when the bottom temperature is higher than the surface temperature [25]

Rys. 3. Zjawisko odkształcenia temperaturowego płyt (curling): a) brak podparcia środka płyty, gdy temperatura w spodzie jest wyższa niż na górze płyty; b) brak podparcia naroży i krawędzi płyty, gdy temperatura w spodzie jest wyższa niż na górze płyty [25]

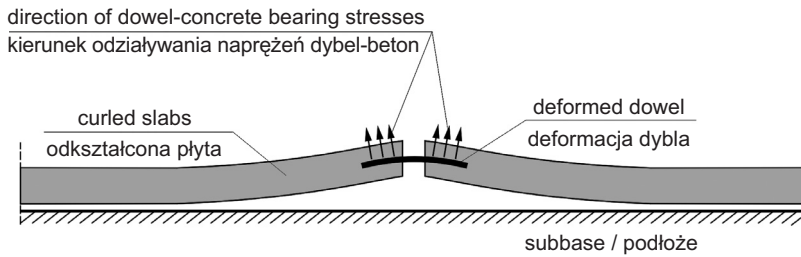


Fig. 4. Distortion of a slab due to curling in concrete pavements with doweled joints [26]

Rys. 4. Zjawisko odkształcenia temperaturowego płyt (curling) w nawierzchni z płyt betonowych połączonych dyblami [26]

Na Rys. 4 pokazano schemat oddziaływania efektu curlingu w dyblowanej nawierzchni betonowej. W momencie występowania tego zjawiska dyble o średnicy odpowiednio dopasowanej do grubości płyty ulegają nieznacznej deformacji, współpracując z płytami betonowymi bez powodowania ich uszkodzenia. Nie dochodzi wówczas do wyłamania betonu, tzn. nie zachodzi wzmacnianie sił oddziaływania dybli na beton poprzez efekt dźwigni. Natomiast przy niedopasowanej średnicy dybla do grubości płyty, tj. gdy dybel ma większą średnicę, może dochodzić do nadmiernych odkształceń w betonie, co w konsekwencji prowadzi do jego pęknięcia (Rys. 5).

Fig. 4 illustrates curling of slabs in concrete pavement with doweled joints. When curling starts, the dowel bars are only slightly deformed, and act jointly with the concrete slabs protecting them from damage, if their diameters are appropriate to the slab thickness. Without lever action increasing the bearing pressure of dowels bursting failure does not occur. Conversely, dowel bar whose diameters are oversized in relation to the slab thickness can generate excessive strains resulting in breaking of concrete (Fig. 5).

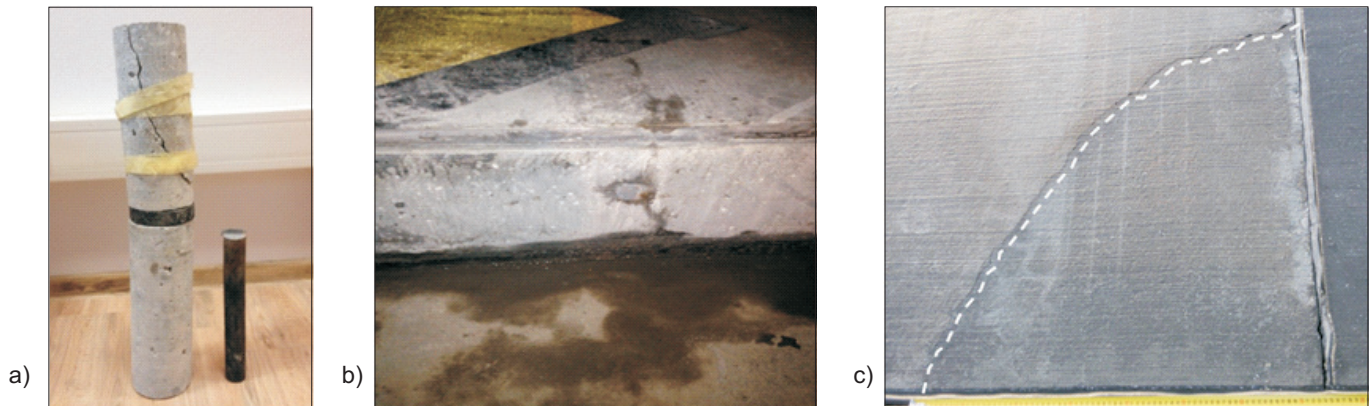


Fig. 5. Survey of damaged airport pavement: a) view of core drilled from the pavement structure with a part of dowel installed in the surface layer placed next to it, b) crack in concrete slab within dowel width, c) cracking of slab corner (marked with a dashed line)  
Rys. 5. Inwentaryzacja uszkodzonej nawierzchni lotniskowej: a) widok odwierconej próbki z konstrukcji nawierzchni w zestawieniu z częścią dybla instalowanego w górnej warstwie, b) pęknięcie płyty betonowej w przekroju dybla, c) pęknięcie naroża płyty (linią przerywaną podkreślono przebieg rysy ukośnej)

W tego typu konstrukcjach w trakcie eksploatacji można czasami zaobserwować ukośne spękania i zarysowania na powierzchni płyt betonowych w ich narożach. Spękania betonu powstają najczęściej w miejscach położenia dybli łączących sąsiednie płyty i propagują się ku wierzchniej ich stronie. Rysy pojawiają się w różnych odległościach wzdłuż krawędzi płyt, a nawet w środkach tych krawędzi. Warto nadmienić, że w rozważaniach przyjęto krytyczne oddziaływanie efektu curlingu prowadzące do pełnego braku podparcia naroży płyty betonowej.

Diagonal corner breaks and cracks in the slabs corners can be sometimes observed during the service life. The cracks are located most often at the positions of dowels connecting the neighbouring slabs and propagate in the bottom-up direction. They are distributed along the edges, even in the middle of the edge length. Note that the following analysis is based on the assumed critical effect of curling leading to completely unsupported corners.

## 4. SFORMUŁOWANIE ZADANIA DO OBLICZEŃ MES

### 4.1. ZAŁOŻENIA PRZYJĘTE DO OBLICZEŃ

W pracy analizie statyczno-wytrzymałościowej poddano nawierzchnię lotniskową w stanie awaryjnym, której wierzchnia warstwa składa się z kwadratowych płyt betonowych o wymiarach w rzucie poziomym:  $5000 \times 5000$  mm, połączonych ze sobą wzdłuż krawędzi dyblami stalowymi o długości 540 mm i przekroju kołowym (Rys. 6). Za rozstaw dybli przyjęto 300 mm. Łączniki znajdują się w płaszczyźnie środkowej płyt. Analizę sparametryzowano ze względu na grubość płyty betonowej oraz średnicę dybli stalowych. Przyjęto beton C 45/55 [1] i stal S 235 [2].

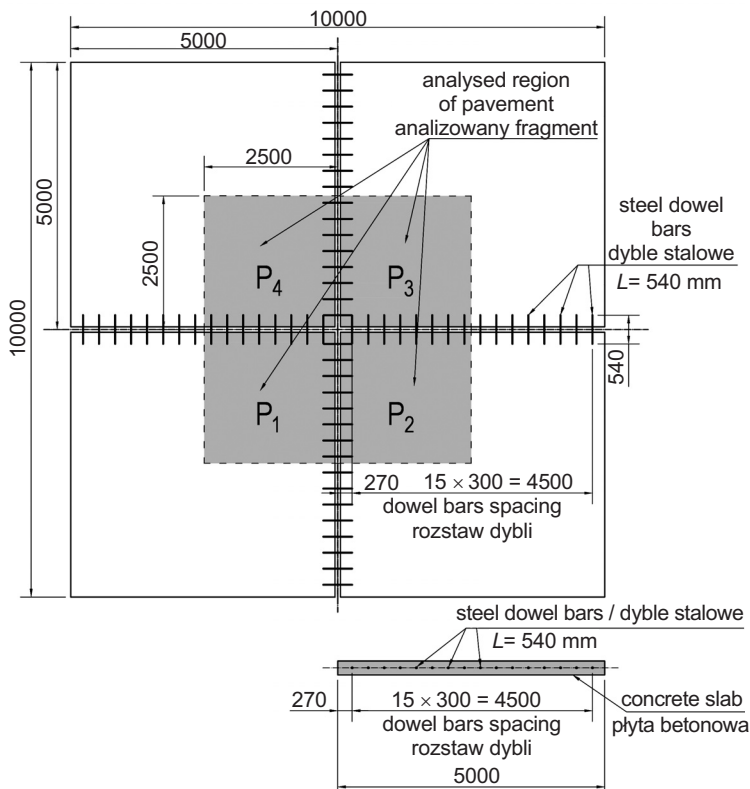


Fig. 6. Top layer of concrete airfield pavement; all dimensions are in mm, marked in grey is the analysed region of pavement  
Rys. 6. Konstrukcja wierzchniej warstwy nawierzchni lotniskowej; wymiary podano w mm, kolorem szarym zaznaczono analizowaną część konstrukcji nawierzchni lotniska

Za przyczynę awarii nawierzchni uznano zjawisko curlingu, które spowodowało uniesienie się naroży płyt. W związku z powyższym analizie poddano fragment nawierzchni

## 4. FORMULATION OF THE PROBLEM FOR FEM CALCULATIONS

### 4.1. INPUT ASSUMPTIONS

This study concerns an airfield pavement in failed condition, made up of  $5000 \times 5000$  mm concrete slabs, connected along the edges with 540 mm long steel dowels of a round cross-section (Fig. 6). The dowels are spaced at 300 mm intervals. The connecting devices are positioned in the midsurface of slabs. The analysis was parameterised for the slab thickness and for the dowel diameter. The assumed materials are C45/55 concrete [1] and S 235 steel [2].

The failure was attributed to the curling action resulting in curled up corners of the slabs. As such, the analysis was limited only to a representative part of pavement including four corners of the surface slabs ( $P_1, P_2, P_3, P_4$ ), as illustrated in Fig. 6. The corners were assumed to be unsupported from the bottom and fixed along the external edges (marked with a dashed line in Fig. 6). The remaining pavement layers were not considered. The analysed area of the slab corner has the size of  $2500 \times 2500$  mm in horizontal plane. The region was chosen to observe cracking which develops about half way along the slab edge.

Only loads imposed by moving aircrafts were considered in the analysis. The gear induced load was assumed to be uniformly distributed and the following parameters were adopted as input for the calculations:

- wheel load of Boeing 737-800 plane (two wheel gear):  $F = 172$  kN,
- equivalent contact area: square with  $a = 500$  mm side,
- equivalent contact pressure:

$$p = \frac{2 \cdot 172 \cdot 10^3}{500^2} = 1.37 \text{ MPa,}$$

- the dynamic effects of loading were not considered due to small velocities of aircraft.

### 4.2. SCOPE OF CALCULATION

FEM analyses of structures such as concrete slabs with doweled joints should include global the structure analysis and an analysis of dowel-concrete interaction. However, this study is limited to estimating the global behaviour of the structure (including stresses, strains and displacements of the analysed pavement region), taking

składający się jedynie z czterech naroży płyt wierzchnich ( $P_1, P_2, P_3, P_4$ ), co przedstawia Rys. 6. Do oceny zjawiska curlingu przyjęto brak podparcia naroży od spodu oraz ich utwierdzenie na krawędziach zewnętrznych (na Rys. 6 oznaczonych linią przerywaną). Pominięto pozostałe warstwy konstrukcji nawierzchni. Wybrany obszar naroża płyty w rzucie poziomym ma wymiary  $2500 \times 2500$  mm. Uzasadnieniem tak przyjętego obszaru naroży jest obserwacja rys powstałych w pobliżu środka krawędzi płyt.

Założono, że nawierzchnia jest obciążona jedynie ruchem przejeżdżających po niej samolotów. Obciążenie nawierzchni od goleni samolotu przyjęto jako równomiernie rozłożone i jest ono następujące:

- siła przypadająca na jedno koło w przypadku samolotu Boeing 737-800 (każda goleń ma dwa koła):  $F = 172$  kN,
- za powierzchnię nacisku przyjęto kwadrat o boku:  $a = 500$  mm,
- wartość równoważnego ciśnienia kontaktowego wynosi:

$$p = \frac{2 \cdot 172 \cdot 10^3}{500^2} = 1,37 \text{ MPa},$$

- pominięto efekty dynamiczne oddziaływania ze względu na małą prędkość poruszania się samolotu.

## 4.2. ZAKRES OBLICZEŃ

Obliczenia z zastosowaniem MES tego typu konstrukcji (płyt betonowych połączonych ze sobą poprzez dyblowanie) powinny uwzględniać analizę globalną konstrukcji oraz analizę połączenia dybli z płytą. W niniejszej pracy skupiono się jedynie na ocenie globalnego stanu wyężenia konstrukcji (określenie stanu naprężeń, odkształceń oraz przemieszczeń analizowanego fragmentu nawierzchni) z uwzględnieniem stanu zgięciowego oraz wyznaczeniu pionowych sił w dyblach łączących sąsiednie płyty betonowe. W związku z tym wykonano model MES czterech naroży płyt ( $P_1, P_2, P_3, P_4$ ). Model obciążono równomiernym ciśnieniem, według pkt. 4.1, zlokalizowanym w narożu płyty  $P_1$ .

Należy podkreślić, że tak stworzone modele nie opisują postępujących w nawierzchni uszkodzeń o charakterze degradacyjnym. Z pewnością z upływem czasu, kolejnych cykli obciążenia i cykli pogodowych (od połączenia między płytowego w głąb płyty) lokalnie wokół dybli będą postępować uszkodzenia, które przy kolejnych obciążeniach zmieniają rozkład sił wewnętrznych o charakterze lokalnym oraz globalnym na bardziej niekorzystny. W konsekwencji

into account the bending state and determination of the vertical forces induced in the dowels connecting the neighbouring slabs. Accordingly, the FEM model comprised the four corners of the slabs  $P_1, P_2, P_3, P_4$ . The model was loaded with uniformly distributed pressure in accordance with 4.1 above, applied at the corner of  $P_1$  slab.

To begin with, it is important to emphasize that the models built in this way do not represent the progressing pavement deterioration. There is no doubt that over time, under the effect of loading and weather factors, damage would develop around the dowels (progressing from the joint connection inward the slab), changing the distribution of internal forces of both local and global nature to less favourable. This will accelerate the airfield pavement deterioration process. Hence, the models are intended to be used for preliminary evaluation of existing pavements in terms of curling effects.

## 5. GLOBAL STRUCTURAL ANALYSIS

### 5.1. NUMERICAL MODEL

The finite elements used in the model were shell elements for slabs (flat in the analysed case) and beam elements for dowels. In the shell each node has six degrees of freedom (three displacements and three angles of rotation). Therefore, circumferential fixing of the four slab sections was implemented by adopting appropriate boundary condition, i.e. zero displacements and zero angles of rotation. The FEM model contains 28224 four-node shell elements defined by linear shape functions (S4R) and 608 two-node beam elements defined also by linear shape functions (B31). At the dowel positions the connections with slabs were implemented by adopting common nodes for the respective shell and beam elements. The FEM model is displayed in Fig. 7 presenting an overall view of the model and the slab  $P_1$ , showing uniform FEM grid (single element size is approximately  $30 \times 30$  mm).

Loading of such FEM model was implemented by adopting stress boundary conditions, i.e. by defining uniformly distributed pressure normal to the midsurface of the slab of the value determined in 4.1 and distributed over a surface of a square with a 500 mm long side. On the basis of the static scheme and preliminary calculations the worst case load application position was determined, as shown in Fig. 8a (square area of uniformly distributed load with two sides abutting the line along which doweled connections are provided between the slabs). Moreover, for the



przyspieszą proces niszczenia nawierzchni lotniskowej. Stworzone modele mają zatem na celu ocenę wstępną istniejącej nawierzchni uwzględniając zjawisko curlingu.

## 5. GLOBALNA ANALIZA KONSTRUKCJI

### 5.1. MODEL NUMERYCZNY

Model MES konstrukcji płyt wykonano jako powłokowy (w analizowanym przypadku płytowy), zaś dyble modelowano belkowymi elementami skończonymi. W powłoce w każdym węźle jest 6 stopni swobody (3 przemieszczenia i 3 kąty obrotu). W związku z tym, tworząc utwierdzenie na obwodzie czterech fragmentów płyt przyjęto przemieszczeniowe warunki brzegowe realizujące utwierdzenie, tj. założono, że wszystkie przemieszczenia i kąty obrotu są zerowe. Model MES składa się z 28224 czterowęzłowych elementów powłokowych o liniowych funkcjach kształtu (S4R) oraz z 608 dwuwęzłowych elementów belkowych, także o liniowych funkcjach kształtu (B31). W miejscu występowania dybli połączenie z płytami zrealizowano przyjmując wspólne węzły dla elementów powłokowych i belkowych. Wizualizację stworzonego modelu MES zamieszczono na Rys. 7, który przedstawia widok całego modelu oraz płyty  $P_1$  z widoczną równomierną siatką MES (wymiar jednego elementu to w przybliżeniu  $30 \times 30$  mm).

Obciążenie takiego modelu MES zrealizowano przez naprężeniowe warunki brzegowe, tj. zadając równomierne ciśnienie o kierunku działania prostopadłym do powierzchni środkowej płyty o wartości wyznaczonej w pkt. 4.1 i rozłożone na powierzchni kwadratu o wymiarze boku równym 500 mm. Biorąc pod uwagę schemat statyczny konstrukcji i przeprowadzone wstępne obliczenia ustalono, że najbardziej niekorzystne położenie obciążenia w analizowanej konstrukcji jest takie jak na Rys.8a (tj. kwadratowy obszar obciążenia równomiernego przylega dwoma bokami do linii, wzdłuż których zrealizowano połączenia między płytami w postaci dybli). Ponadto do obliczeń przyjęto, że płyty betonowe oraz dyble są wykonane z liniowo-sprężystego materiału izotropowego. Wartości parametrów materiałowych sprężystości przyjętych do obliczeń MES są następujące:

- beton C 45/55:  $E = 36$  GPa,  $\nu = 0,167$  [1],
- stal S 235:  $E = 210$  GPa,  $\nu = 0,3$  [2].

Fig. 8. The FEM model of the analysed structure (region marked in grey in Fig. 1): a) overall view of the structure showing the positions of dowels, b) slab  $P_1$  showing the finite element grid

Rys. 8. Model MES analizowanej konstrukcji (fragment zaznaczony kolorem szarym na Rys. 1): a) widok całej konstrukcji z jednoczesnym uwidocznieniem dybli, b) wizualizacja płyty  $P_1$  z widoczną siatką MES

purpose of calculations it is assumed that both slabs and dowels are made of an isotropic linear elastic material. The following values of elastic material parameters were used in the FEM calculations:

- C 45/55 concrete:  $E = 36$  GPa,  $\nu = 0.167$  [1],
- S 235 steel:  $E = 210$  GPa,  $\nu = 0.3$  [2].

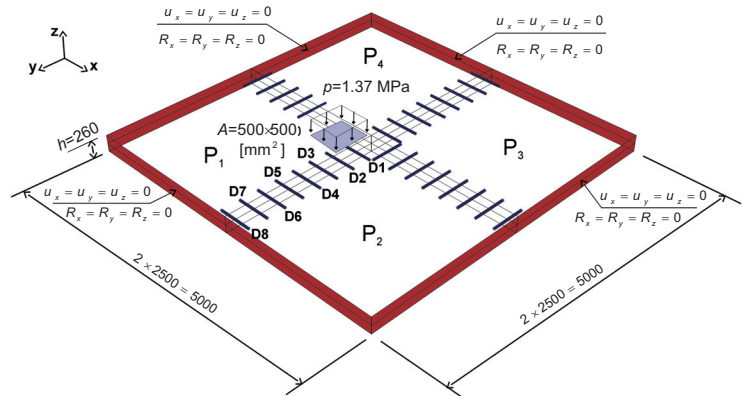
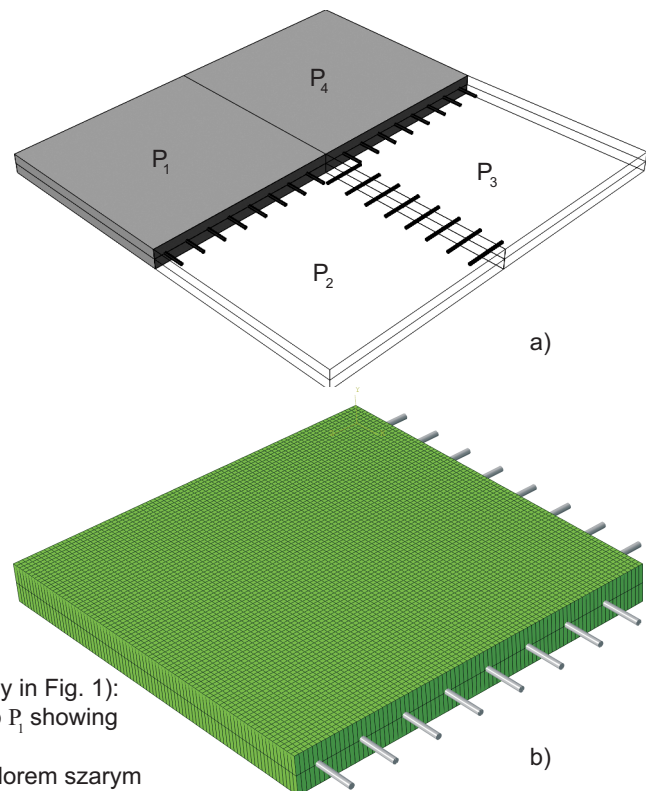


Fig. 7. Static scheme, support and loading conditions of the analysed structure, specified dimensions in mm and designations  
Rys. 7. Schemat statyczny, sposób podparcia i obciążenia analizowanej konstrukcji oraz charakterystyczne wymiary w mm i oznaczenia



## 5.2. WYNIKI OBLICZEŃ

### 5.2.1. Wyniki analizy parametrycznej

Obliczenia w pracy sparametryzowano ze względu na przyjętą grubość płyty betonowej oraz średnicę dybla stalowego. Pod uwagę wzięto następujące warianty konstrukcji:

- grubość płyty betonowej: 240, 260, 280, 300, 330, 360 i 400 mm,
- średnica dybla stalowego: 19,1 ( $\frac{3}{4}$  cala); 25,4 (cal); 30,0; 31,2 ( $1\frac{1}{4}$  cala); 33,0; 34,0; 35,0; 36,0; 38,0; 40,0 mm.

Pozostałe wymiary konstrukcji, obciążenie oraz parametry mechaniczne materiałów są stałe i zgodnie z pkt. 4.1.

W przypadku płyty betonowej w trakcie analizy odczytano maksymalne ugięcie płyty w punkcie, w którym stykają się naroża płyt (składowa przemieszczenia  $u_z$ , zgodnie z układem współrzędnych na Rys. 7) oraz maksymalne i minimalne wartości odkształceń głównych (odpowiednio  $LE_{\max}$  oraz  $LE_{\min}$ ). Za punkt odniesienia przyjęto, że odkształcenie zarysowania przy rozciąganiu betonu jest na poziomie 0,00035 (odkształcenie dopuszczalne). W analizie wyznaczono także maksymalną wartość pionowej siły poprzecznej w dyblu D1 (składowa  $V_z$  według Rys. 9). Ze względu na umieszczenie dybli w tulejach ochronnych i zastosowanie powłok poślizgowych [3] łączniki mają swobodę przemieszczenia wzdłuż swojej osi podłużnej  $u_{xi}$ . Wobec powyższego i przy pomijalnie małych wartościach pozostałych składowych obciążenia zastosowano poniższy, naprężeniowy warunek nośności (2), polegający na nieprzekroczeniu granicy plastyczności stali S 235 przez maksymalną wartość naprężenia zredukowanego Hubera-Misesa:

$$\sigma_{H-M}^{red} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}},$$

$$\sigma_{H-M}^{red} = \sqrt{3} \cdot \tau_{xz}^2 = \sqrt{3} \cdot \tau_{xz},$$

$$\frac{\sqrt{3} \cdot \tau_{xz}}{f_y} \leq 1.0.$$

$$\gamma_{M0}$$

gdzie zgodnie z [2] współczynnik częściowy  $\gamma_{M0} = 1,0$ .

W przypadku przekrojów kołowych maksymalne naprężenia styczne  $\tau_{xz}$  występują wzdłuż osi poziomej, przechodzącej przez środek ciężkości przekroju (dla współrzędnej  $z = 0$ ) i wynoszą:

$$\tau_{xz}^{\max} = \frac{4}{3} \cdot \frac{V_{z, \max}}{A},$$

## 5.2. RESULTS OF CALCULATIONS

### 5.2.1. Parametric analysis results

The calculations were parameterised based on the slab thickness and steel dowel diameter. The following design variants of the analysed structure were considered:

- concrete slab thickness: 240, 260, 280, 300, 330, 360 and 400 mm,
- steel dowel bar diameter: 19.1 ( $\frac{3}{4}$  in.), 25.4 (in.), 30.0, 31.2 ( $1\frac{1}{4}$  in.), 33.0, 34.0, 35.0, 36.0, 38.0, 40.0 mm.

The remaining structure dimensions, load and mechanical parameters of materials have constant values as given in 4.1 above.

In case of concrete slab the observed parameters were the maximum deflection of the slab at the point where the corners of the slabs meet (displacement component  $u_z$  in the system of coordinates in Fig. 7) and the maximum and minimum principal strains ( $LE_{\max}$  and  $LE_{\min}$  respectively). The adopted reference point is the cracking deformation at the tensile strain of 0.00035 (acceptable deformation). Also the maximum shear force induced in dowel D1 ( $V_z$  component according to Fig. 9) was determined. Free movement of dowels along their longitudinal axis  $u_{xi}$  is ensured by placing the dowels inside the tubes and coating them with a bond breaking agent [3]. In this situation, and with ignorable values of the remaining load components, the limit state criterion was set in terms of stress (2), that is the yield limit of S 235 steel must not be exceeded by the maximum value of the equivalent von Mises stress:

where, according to [2], the partial factor of safety is  $\gamma_{M0} = 1.0$ .

For circular cross-section the maximum shearing stresses  $\tau_{xz}$  occur along the horizontal axis, passing through the centre of gravity of the cross-section (for coordinate  $z = 0$ ) with the values calculated as follows:

gdzie:

$A$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego dybla,

$V_{z,max}$  – maksymalna wartość pionowej siły poprzecznej wzdłuż osi podłużnej pręta.

Odpowiednie wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono w Tabl. 2 i 3, a także na Rys. 10. Ponadto zaznaczono, które z rozważanych wariantów konstrukcji płyty betonowej nie spełniają przyjętych warunków nośności.

where:

$A$  – cross-sectional area of dowel,

$V_{z,max}$  – maximum value of shear force along the dowel longitudinal axis.


The respective results of numerical calculations are given in Tables 2-3 and also in Fig. 10. Moreover, variants of the slab design which fail to meet the adopted limit state criteria were identified.

Table 2. Parametric analysis results:  $LE_{max}$ ,  $LE_{min}$   
Tablica 2. Wyniki analizy parametrycznej:  $LE_{max}$ ,  $LE_{min}$


		$\frac{LE_{max}}{LE_{min}}$ [-]						
		Pavement slab thickness / Grubość płyty nawierzchni [mm]						
		240	260	280	300	330	360	400
Dowel bar diameter / Średnica dybla [mm]	19.1 ( $\frac{3}{4}$ in. / cala)	0.00028	0.00021	0.00016	0.00012	0.00009	0.00007	0.00006
		-0.00027	-0.00023	-0.00020	-0.00018	-0.00015	-0.00012	-0.00010
	25.4 (in. / cal)	0.00052	0.00040	0.00031	0.00024	0.00017	0.00012	0.00008
		-0.00025	-0.00022	-0.00019	-0.00017	-0.00014	-0.00012	-0.00010
	30.0	0.00067	0.00053	0.00043	0.00035	0.00025	0.00019	0.00013
		-0.00024	-0.00021	-0.00018	-0.00016	-0.00013	-0.00011	-0.00009
	31.2 ( $1\frac{1}{4}$ in. / cala)	0.00071	0.00057	0.00046	0.00038	0.00028	0.00021	0.00014
		-0.00023	-0.00020	-0.00018	-0.00016	-0.00013	-0.00011	-0.00009
	33.0	0.00074	0.00060	0.00049	0.00040	0.00030	0.00023	0.00016
		-0.00023	-0.00020	-0.00018	-0.00015	-0.00013	-0.00011	-0.00009
	34.0	0.00076	0.00062	0.00051	0.00042	0.00032	0.00024	0.00017
		-0.00023	-0.00020	-0.00017	-0.00015	-0.00013	-0.00011	-0.00009
	35.0	0.00078	0.00064	0.00052	0.00043	0.00033	0.00024	0.00018
		-0.00023	-0.00020	-0.00017	-0.00015	-0.00013	-0.00011	-0.00009
	36.0	0.00079	0.00065	0.00054	0.00045	0.00034	0.00027	0.00019
		-0.00023	-0.00019	-0.00017	-0.00015	-0.00013	-0.00011	-0.00009
	38.0	0.00082	0.00068	0.00057	0.00048	0.00037	0.00029	0.00021
		-0.00024	-0.00020	-0.00017	-0.00015	-0.00012	-0.00011	-0.00009
	40.0	0.00084	0.00070	0.00059	0.00049	0.00039	0.00031	0.00023
		-0.00024	-0.00020	-0.00017	-0.00015	-0.00012	-0.00010	-0.00009

Legend / Legenda

 Not exceeds the maximum allowable stresses (dowels) and strains (slab) / Dopuszczalne naprężenia w dyblach i odkształcenia w płycie nie są przekroczone

 Exceeds the maximum allowable strains of slab / Dopuszczalne odkształcenia w płycie są przekroczone<sup>\*)</sup>

 Exceeds the maximum allowable stresses of dowels / Dopuszczalne naprężenia w dyblach są przekroczone<sup>\*\*)</sup>

 Exceeds the maximum allowable stresses (dowels) and strains (slab) / Dopuszczalne naprężenia w dyblach i odkształcenia w płycie są przekroczone

<sup>\*)</sup> main criterion / kryterium główne, <sup>\*\*)</sup> supplementary criterion / kryterium dodatkowe

Table 3. Table 3. Parametric analysis results:  $u_z, V_{z1,max}$   
 Tablica 3. Wyniki analizy parametrycznej:  $u_z, V_{z1,max}$

		$\frac{u_z}{V_{z1,max}}$ [mm]						
		$\frac{u_z}{V_{z1,max}}$ [kN]						
		Pavement slab thickness / Grubość płyty nawierzchni [mm]						
		240	260	280	300	330	360	400
Dowel bar diameter / Średnica dybla [mm]	19.1 ( $\frac{3}{4}$ in. / cala)	2.74	2.21	1.81	1.51	1.17	0.93	0.70
		91.90	90.87	89.81	88.76	87.20	85.68	83.75
	25.4 (in. / cal)	2.49	2.02	1.67	1.40	1.10	0.88	0.67
		90.38	89.59	88.78	87.95	86.70	85.45	83.71
	30.0	2.34	1.90	1.57	1.32	1.04	0.83	0.64
		89.33	88.58	87.84	87.10	85.99	84.90	83.45
	31.2 ( $1\frac{1}{4}$ in. / cala)	2.30	1.86	1.54	1.54	1.01	0.82	0.63
		89.00	88.25	87.51	86.78	85.71	84.65	83.27
	33.0	2.27	1.84	1.52	1.27	1.00	0.80	0.62
		88.80	88.04	87.30	86.57	85.51	84.48	83.12
	34.0	2.25	1.82	1.50	1.26	0.99	0.79	0.61
		88.65	87.88	87.14	86.41	85.36	84.33	83.00
	35.0	2.23	1.81	1.49	1.25	0.98	0.79	0.61
		88.52	87.74	86.99	86.27	85.21	84.20	82.89
	36.0	2.21	1.79	1.47	1.23	0.97	0.78	0.60
		88.40	87.61	86.86	86.13	85.07	84.06	82.77
	38.0	2.19	1.76	1.45	1.21	0.95	0.76	0.59
		88.20	87.39	86.62	85.88	84.82	83.82	82.54
	40.0	2.16	1.74	1.43	1.19	0.93	0.75	0.58
		88.03	88.03	86.43	85.68	84.61	83.59	82.33

Legend / Legenda

As in Table 1 / Analogicznie jak w Tabl. 1.

Najmniejsze odkształcenia główne uzyskano w przypadku zastosowania dybli o średnicy 19,1 mm ( $\frac{3}{4}$  cala). Jednak w tej sytuacji otrzymano jednocześnie największe wartości ugięcia płyty betonowej oraz pionowych sił poprzecznych w dyblu D1. Wraz ze wzrostem grubości płyty betonowej wskazane wartości zmniejszają się (w przypadku minimalnych odkształceń głównych  $LE_{min}$  zmniejsza się ich wartość bezwzględna). Taką tendencję zauważa się w przypadku wszystkich rozpatrywanych średnic dybli. Dodatkowo można zaobserwować, że wraz ze wzrostem średnicy dybla zwiększają się odkształcenia główne (w przypadku minimalnych odkształceń głównych  $LE_{min}$  zmniejsza się ich wartość bezwzględna). Maleje natomiast ugięcie płyty oraz zmniejsza się wartość pionowej siły poprzecznej w dyblu D1. Spośród rozpatrywanych wariantów konstrukcji warstwy nawierzchni betonowej za najbardziej ekonomiczny (ze względu na wykorzystanie materiału) należy wskazać

The lowest principal strains were obtained for dowels of 19.1 mm ( $\frac{3}{4}$  in.) in diameter. Unfortunately, these lowest strain values were accompanied by the greatest slab deflections and the highest shear forces in D1 dowel. All these values decrease with the increasing slab thickness (noting that in the case of minimum principal stresses  $LE_{min}$  the absolute value is decreasing). This tendency is observed for all the considered dowel diameters. Moreover, it can be observed that with the increasing dowel diameter the principal strains increase (taking the absolute value in the case of minimum principal stresses  $LE_{min}$ ). However, the slab deflection is lower and the value of shear force in dowel D1 decreases. Among the considered variants of the concrete pavement structure the most cost-efficient design (taking into account the amounts of materials) is the one with a 330 mm thick slab and steel dowels of 33 mm in diameter. This variant is analysed from this point on.

zastosowanie płyty betonowej grubości 330 mm i dybli stalowych o średnicy 33 mm. W dalszej części artykułu ten wariant konstrukcji poddano szerszej analizie.

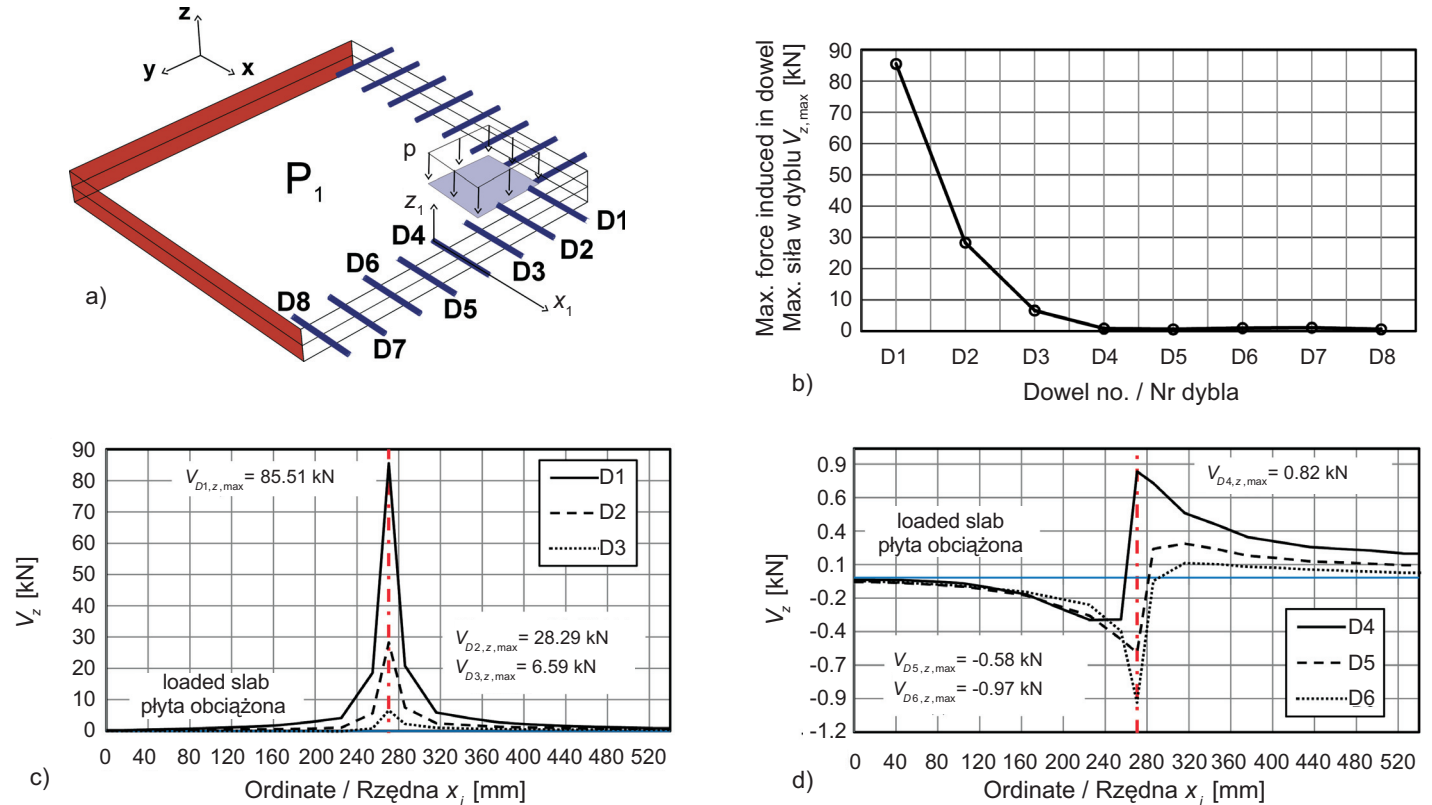


Fig. 9. Distribution of shear forces induced in dowels, slab thickness of 330 mm, 33 mm diameter of dowels a) designation of dowels connecting the neighbouring slabs, b) maximum forces in dowels D1-D8, c) distribution of forces in dowels D1-D3, d) distribution of forces in dowels D4-D6

Rys. 9. Rozkład pionowych sił poprzecznych w dyblach w przypadku płyty betonowej grubości 330 mm i średnicy dybli wynoszącej 33 mm: a) oznaczenia dybli łączących sąsiednie płyty, b) wartości maksymalnych sił w dyblach od D1 do D8, c) rozkład sił w dyblach od D1 do D3, d) rozkład sił w dyblach od D4 do D6

### 5.2.2. Prezentacja wyników wybranego rozwiązania płyty

Prezentacja wyników obliczeń numerycznych odnosi się do wariantu konstrukcji, który w analizie parametrycznej został wskazany jako najbardziej ekonomiczny. Rozważono płyty betonowe o grubości 330 mm, połączone ze sobą dyblami stalowymi o średnicy 33 mm. Przedstawione wyniki dotyczą stanu naprężeń, odkształceń oraz przemieszczeń powstałych jedynie w narożach betonowych ( $P_1, P_2, P_3, P_4$ ; obciążenie od goleni przyłożone jest do naroża  $P_1$ ). Wizualizacja wyników nie obejmuje dybli stalowych, które zostały „wyłączone” w trakcie procesu przetwarzania końcowego (*post-processingu*).

### 5.2.2. Presentation of results of the chosen slab design

The results of numerical calculations concern the structure variant which was identified as the most cost-effective in the preceding parametric analysis. Two 330 mm thick concrete slabs were considered, connected with steel dowels of 33 mm in diameter. The results presented below concern stresses, strains and displacements induced in the slab corners, only ( $P_1, P_2, P_3, P_4$ ; gear load is applied at the  $P_1$  corner). Graphical presentation of the results does not include the steel dowels which were excluded at the post-processing stage.

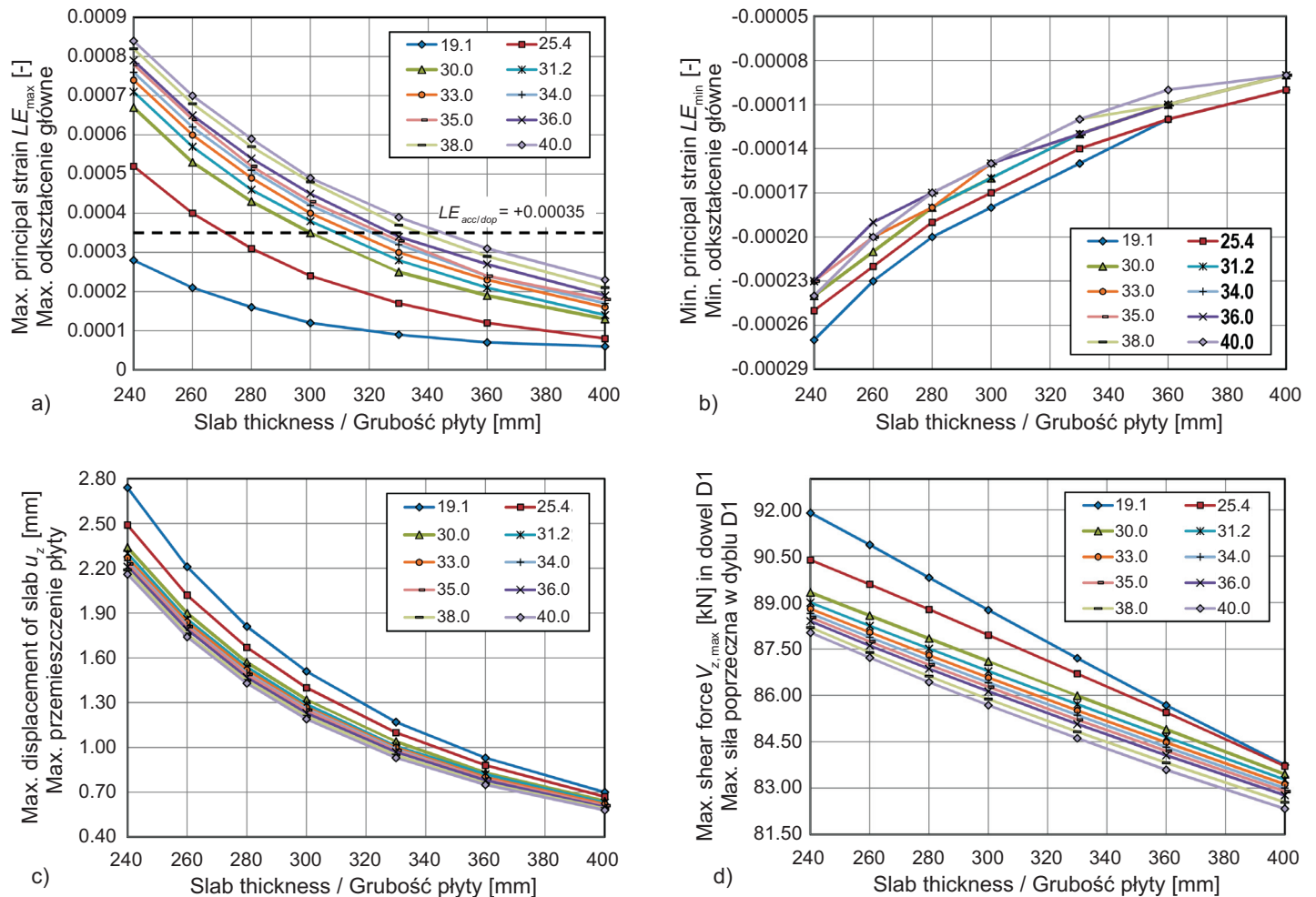


Fig. 10. Parametric analysis results depending on the dowel diameter in [mm]: a) maximum principal strain  $LE_{max}$ , b) minimum principal strain  $LE_{min}$ , c) displacement of slab  $u_z$ , d) maximum shear force  $V_{z,max}$  in dowel D1

Rys. 10. Wyniki analizy parametrycznej w zależności od średnicy dybla w [mm]: a) maksymalne odkształcenia główne  $LE_{max}$ , b) minimalne odkształcenia główne  $LE_{min}$ , c) przemieszczenie płyty  $u_z$ , d) maksymalna pionowa siła poprzeczna  $V_{z,max}$  w dyblu D1

Warstwiczne mapy przemieszczeń pionowych  $u_z$  przedstawiono na Rys. 11. Maksymalne przemieszczenie pionowe płyty  $P_1$  wynosi 1,0 mm i występuje w jej narożu. Natomiast rozkład maksymalnych  $LE_{max}$  i minimalnych  $LE_{min}$  odkształceń głównych w płytach betonowych zaprezentowano na Rys. 12. Maksymalna wartość odkształcenia głównego (rozciągającego) wynosi 0,00030 i występuje w miejscu połączenia płyty z dyblem D1. Warto podkreślić, że odkształcenie zarysowania przy rozciąganiu betonu jest na poziomie 0,00035 (wartość przyjmowana w praktyce inżynierskiej). Minimalna wartość głównego odkształcenia ściskającego osiąga -0,00013 (graniczne również na poziomie -0,00035). Odkształcenie ekstremalne występuje w narożu przy zewnętrznej krawędzi utwierdzonej, a dopuszczalne wartości odkształceń nie zostały przekroczone.

The contour maps of vertical displacements  $u_z$  are presented in Fig. 11. The maximum vertical displacement of  $P_1$  slab is 1.0 mm and occurs at its corner. The distribution of the maximum and minimum principal stresses ( $LE_{max}$  and  $LE_{min}$ ) in concrete slabs is presented in Fig. 12. The maximum principal strain (tensile) is 0.00030 and occurs at the concrete-D1 interface. Note that the tensile cracking strain is 0.00035 (value commonly adopted in the engineering practice). The minimum value of the principal compressive strain is -0.00013 (with the limit state value of -0.00035 – the same as for tensile principal strain). The extreme strain occurs at the corner at the outer, fixed edge, and the maximum allowable strains have not been exceeded.

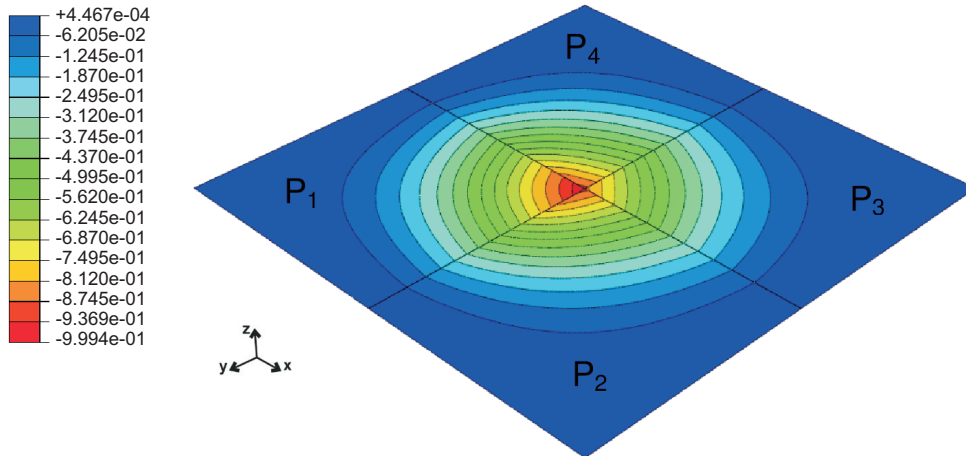


Fig. 11. Contour maps of vertical displacement  $u_z$  in the shell and beam model; all values are in [mm]

Rys. 11. Mapa warstwiczna przemieszczeń pionowych  $u_z$  w modelu powłokowo-bełkowym; wyniki podano w [mm]

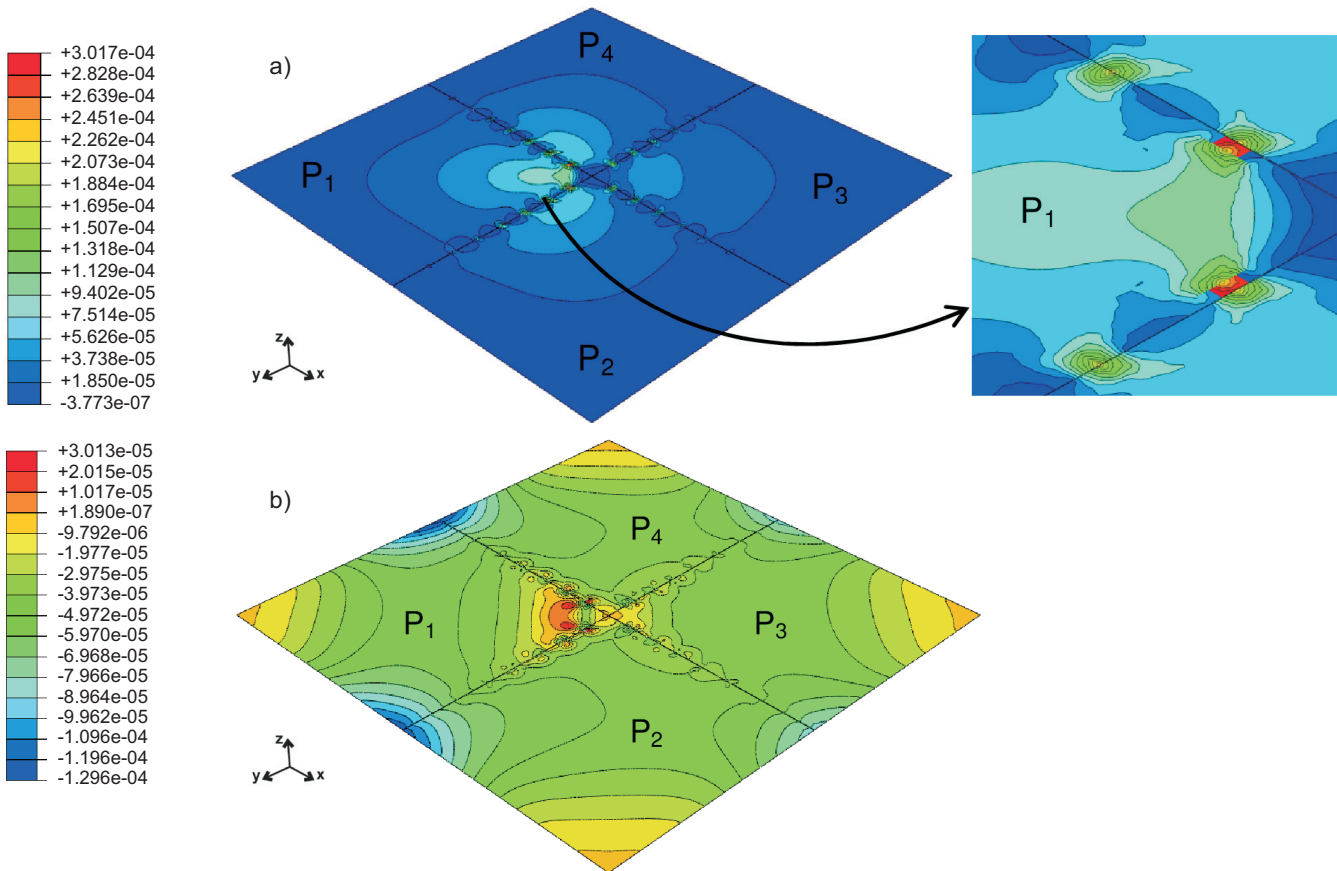


Fig. 12. Contour map of principal strains in slab  $P_1$  of the shell and beam model: a) maximum principal strain  $LE_{max}$  (tensile) [-],

b) minimum principal strain  $LE_{min}$  (compressive) [-]

Rys. 12. Mapa warstwiczna odkształceń głównych w płycie  $P_1$  modelu powłokowo-bełkowego: a) maksymalne odkształcenia główne  $LE_{max}$  (rozciągające) [-], b) minimalne odkształcenia główne  $LE_{min}$  (ściskające) [-]

W przypadku rozpatrywanego wariantu konstrukcji nawierzchni wyznaczono także rozkład pionowych sił poprzecznych  $V_z$  w dyblach od D1 do D8, wzdłuż lokalnej podłużnej osi  $x_i$  łączników. Za początek lokalnego układu współrzędnych przyjęto koniec pręta znajdujący się w obciążonej płycie  $P_1$  ( $x_i = 0$ ). Wykresy pionowych sił poprzecznych przedstawiono na Rys. 9. Największa pionowa siła poprzeczna  $V_z$  występuje w dyblu D1, w środku jego długości (na styku dwóch płyt), i osiąga wartość 85,51 kN. Siła ta jest wyraźnie większa od pozostałych ekstremalnych sił w dyblach od D2 do D8. Charakter rozkładu pionowych sił poprzecznych w dyblach D1, D2 i D3 (rozkład prawie symetryczny, siły są tego samego znaku względem płaszczyzny styku płyt) znacząco różni się od rozkładu sił w łącznikach D4, D5 i D6 (rozkład prawie antysymetryczny, ekstremalne siły są przeciwnego znaku względem płaszczyzny styku płyt). Wykresy sił w przypadku dybli D7 i D8 są zaburzone ze względu na bliskość krawędzi utwierdzonej płyty. Wartości pionowych sił poprzecznych w przypadku dybli D4, D5, D6, D7 i D8 można uznać z perspektywy inżynierskiej za znikome, jednakże ulegną one zmianie w przypadku najazdu na nie kół samolotu. Stan naprężenia w dyblach nie powoduje przekroczenia granicy plastyczności stali  $f_y = 235$  MPa.

## 6. PODSUMOWANIE

W pracy analizie statyczno-wytrzymałościowej poddano nawierzchnię betonowej płyty lotniskowej. Przedstawiono tematykę analizy dyblowanej betonowej nawierzchni lotniskowej po wystąpieniu zjawiska curlingu płyt z uwzględnieniem zachowania połączeń dyblowanych płyt betonowych. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu wystąpienia tego zjawiska. Takie założenie było podstawą do obliczania płyt betonowych, połączonych ze sobą za pomocą stalowych dybli i traktowania ich jako płyt wspornikowych utwierdzonych na krawędziach zewnętrznych. Podsumowując, z przeprowadzonych obliczeń numerycznych oraz analiz porównawczych wynikają następujące wnioski:

- przyjęcie modelu powłokowo-belkowego pozwoliło ocenić globalny stan wyężenia konstrukcji z dodatkowym uwzględnieniem stanu zgięciowego oraz wyznaczyć pionowe siły w dyblach łączących sąsiednie płyty betonowe,
- ekstremalne wartości naprężeń oraz odkształceń wystąpiły na styku płyt betonowych z dyblami stalowymi,
- maksymalne naprężenia główne pojawiły się w miejscu połączenia płyty z pierwszym dyblem D1, a minimalne naprężenia główne w narożu przy zewnętrznej krawędzi utwierdzonej,

In case of the analysed structure variant the distribution of shear forces  $V_z$  induced in dowels D1-D8 was determined along the local longitudinal  $x_i$  axis of the connecting devices. The origin of the local system of coordinates is set at the end of bar in the loaded slab  $P_1$  ( $x_i = 0$ ). The shear forces diagrams are presented in Fig. 9. The greatest shear force  $V_z$  of 85.51 kN was noted in dowel D1, at the middle of its length (at the joint between two slabs). It is noticeably greater from the remaining extreme forces in dowels D2-D8. The distribution pattern of shear forces in dowels D1, D2 and D3 (almost symmetrical with the forces having the same sign in relation to the joint plane), differs significantly from the force distribution in D4, D5 and D6 connecting devices where it is almost antisymmetric and the sign of extreme forces is opposite in relation to the joint plane. In the case of dowels D7 and D8 the force diagrams are disturbed by the close vicinity of the fixed edge of slab. The shear forces determined for dowels D4, D5, D6, D7 and D8 can be considered insignificant from the engineering perspective, yet they are subject to change when the dowels are loaded by the plane wheels. The strain state in dowels will not result in exceeding the yield point of steel of  $f_y = 235$  MPa.

## 6. SUMMARY

This paper reports the results of the static analysis of the strength of a concrete airfield pavement. The subject of analysis were curled slabs taking into account the behaviour of doweled joints. The calculations were carried out for the condition after curling. This assumption was necessary to calculate the slabs connected by steel dowels, and to treat them as cantilever slabs with fixed support along outer edges. Therefore, the results of numerical calculations and comparative analyses allow for the conclusion that:

- the adopted shell and beam model facilitated estimating the global stress-strain state of the structure, including the bending state and determining of the vertical forces induced in the dowels connecting the neighbouring concrete slabs,
- the extreme stresses and strains occur at the dowel-concrete interface,
- the principal stresses reached the maximum at the dowel-concrete interface of the first dowel D1 and the minimum – at the corner by the outer fixed edge,
- the subsequent stress and strain contour lines are skewed relative to the corner of the slab with the starting point at the dowel-concrete interface,



- kolejne warstwy naprężeń oraz odkształceń w płycie rozchodzą się ukośnie względem naroża płyty i mają swój początek w miejscach połączenia płyty z dyblami,
- wraz ze wzrostem grubości płyty betonowej odkształcenia główne, ugięcie płyty oraz siły w dyblu D1 zmniejszają się (w przypadku minimalnych odkształceń głównych  $LE_{\min}$  zmniejsza się ich wartość bezwzględna); taką tendencję zauważa się w przypadku wszystkich rozpatrywanych średnic dybli,
- wraz ze wzrostem średnicy dybla zwiększają się odkształcenia główne (w przypadku minimalnych odkształceń głównych  $LE_{\min}$  zmniejsza się ich wartość bezwzględna), maleje ugięcie płyty oraz spada wartość pionowej siły poprzecznej w dyblu D1,
- największa pionowa siła poprzeczna występuje w dyblu D1, w środku jego długości (na styku dwóch płyt), siła ta jest wyraźnie większa od pozostałych ekstremalnych sił w dyblach od D2 do D8,
- charakter rozkładu pionowych sił poprzecznych w dyblach D1, D2 i D3 (rozkład prawie symetryczny, siły są tego samego znaku) znacząco różni się od rozkładu sił w łącznikach D4, D5 i D6 (rozkład prawie antysymetryczny, ekstremalne siły są przeciwnego znaku),
- wykresy sił w przypadku dybli D7 i D8 są zaburzone ze względu na bliskość krawędzi utwierdzonej płyty,
- bardzo duża koncentracja naprężeń rozciągających wokół dybli ułożonych blisko obciążonego wierzchołka płyty (D1, D2) może być przyczyną powstawania rys i ich propagacji w tym miejscu,
- w przypadku dybli D4, D5 i D6, mimo przenoszenia znacznie mniejszej siły niż przez dyble D1, D2 i D3, charakter rozkładu pionowej siły poprzecznej w dyblach może powodować rysy i spękania w miejscach osadzenia tych dybli; rozkład sił jest prawie antysymetryczny, ekstremalne siły są przeciwnego znaku względem płaszczyzny styku płyt, co może powodować „efekt dźwigni”,
- przyjęte modele nie opisują postępujących w nawierzchni uszkodzeń o charakterze degradacyjnym; z pewnością z upływem czasu, kolejnych cykli obciążenia i kolejnych cykli pogodowych lokalnie wokół dybli (od połączenia międzypłytkowego w głąb płyty) postępować będą uszkodzenia, które przy kolejnych obciążeniach zmienią rozkład sił wewnętrznych o charakterze lokalnym i globalnym na bardziej niekorzystny, a w konsekwencji przyspieszą proces niszczenia nawierzchni lotniskowej.
- the principal strains, slab deflection and forces induced in D1 dowel decrease with the increasing slab thickness (noting that in the case of minimum principal stresses  $LE_{\min}$  the absolute value is meant); this tendency was observed for all the considered dowel diameters,
- with the increasing dowel diameter there is an increase of the principal stresses (taking the absolute value in the case of minimum principal stresses  $LE_{\min}$ ) accompanied with a lower deflection of the slab and smaller shear force in dowel D1,
- the greatest shear force was noted in dowel D1, at the middle of its length (at the joint between two slabs), and it is significantly greater than the remaining extreme forces in the dowels D2-D8,
- the distribution pattern of shear forces in dowels D1, D2 and D3 (almost symmetrical with the forces having the same sign in relation to the joint plane) is significantly different from the one in D4, D5 and D6 (the distribution is almost antisymmetric and the extreme forces have opposite sign),
- in case of dowels D7 and D8 the force diagrams are disturbed by the close vicinity of the fixed slab edge,
- a very high concentration of tensile stresses around the dowels located close to the loaded corner of the slab (D1, D2) can be responsible for the development and propagation of cracks at that place,
- while the forces transferred by dowels D4, D5 and D6 are much lower than in the case of dowels D1, D2 and D3, the shear force distribution pattern in the former dowels may result in development of cracks and breaks at their locations due to the lever action, resulting from almost antisymmetric distribution of forces and opposite sign of extreme forces (relative to the joint plane),
- the adopted models do not describe progressing deterioration of the analysed structure and it is sure that over time under the effect of loading and weather factors damage should develop around the dowels (progressing from the joint inward the slab), changing the distribution of internal forces of both local and global nature to less favourable ones, and thus accelerating the process of airfield pavement deterioration.

## 7. CONCLUSIONS

On the basis of analyses and calculations it can be observed that in designing parking aprons and taxiway concrete pavements with doweled joints it is needed to consider the situation of loading the doweled joints between curled slabs by aircraft wheels. Without taking this

## 7. WNIOSKI

Z analiz i obliczeń wynika, że w projektowaniu połączenia dyblowanego betonowej lotniskowej nawierzchni płaszczyzn manewrowych oraz postojowych należy uwzględnić także sytuację obciążenia kołami samolotu połączenia dyblowanego płyt betonowych przy jednoczesnym wystąpieniu zjawiska curlingu. W przypadku braku takiej analizy może to prowadzić do pojawienia spękań się we wczesnej fazie eksploatacji nawierzchni. Taka sytuacja może mieć miejsce zwłaszcza, gdy:

- 1) wystąpi zjawisko curlingu, szczególnie charakterystyczne w płytach cieńszych, związane z odkształcaniem się płyty betonowej na skutek oddziaływania temperatury. Najazd goleni samolotu może wówczas powodować przeciążenie płyty i w konsekwencji powstawanie rys, które propagują się od miejsc osadzenia dybli. Uszkodzenia wynikają z faktu osłabienia przekroju płyty przez dybel stalowy o bardzo dużej sztywności;
- 2) średnica dybla jest niedopasowana, co wywołuje zmniejszenie efektywnego przekroju płyty betonowej;
- 3) średnica dybla jest zbyt duża, a jego odkształcalność mała w odniesieniu do proporcjonalnie cenniejszej płyty, co powoduje oddziaływanie dybla na beton na zasadzie dźwigni i może prowadzić do powstania efektu „łomu”. Skutkuje to przekroczeniem odkształceń i pękaniem betonu.

Praca stanowi zatem oryginalny wkład w rozwój modelowania betonowych nawierzchni lotniskowych w szerszym kontekście konstrukcji płyt dyblowanych. W kolejnych rozważaniach autorów rozwijany będzie model opisu współpracy układu dyblowanego lotniskowej nawierzchni betonowej z uwzględnieniem temperatury i zjawiska curlingu w ramach teorii termo-sprężystości.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] 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
- [2] Mackiewicz P.: Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements. Applied Thermal Engineering, **73**, 1, 2014, 1167-1174
- [3] Szydło A., Mackiewicz P., Wardega R., Krawczyk B.: Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 2014

into account early cracking can occur. This is particularly probable in the following cases:

- 1) curling caused by temperature difference as typical of thinner slabs. In this case gear loading may result in excessive loading and cracks can develop and propagate from the dowel positions. The cause of damage in this case is reduction of the sectional strength of the slab by excessively stiff steel dowel;
- 2) the dowel diameter is incorrectly specified, reducing the effective cross-sectional area of the concrete slab;
- 3) the dowel is too big in diameter and too stiff in relation to the slab thickness, which can result in lever action of the dowel on the slab. This leads to breaking of the concrete caused by excessive strains.

This study makes an original contribution to modelling concrete airfield pavements by extending the scope with the issue of doweled joints between slabs. The next studies of the authors will focus on developing the model describing the behaviour of concrete pavement with doweled joint taking into account the effect of the temperature formulating the curling problem in frame of thermo-elasticity theory.

- [4] Guo E., Ricalde L., Kawa I.: FAA Finite element design procedure for rigid pavements. U.S. Department of Transportation, Washington, 2007
- [5] Nita P.: Betonowe nawierzchnie lotniskowe. Teoria i wymiarowanie konstrukcyjne. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa, 2005
- [6] Nita P.: Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2008
- [7] Mackiewicz P.: Finite-Element Analysis of Stress Concentration around Dowel Bars in Jointed Plain Concrete Pavement. Journal of Transportation Engineering, **141**, 6, 2015, 06015001-1 - 06016001-8

- [8] *Seruga A., Seruga T., Juliszewski L.*: Dyble w drogowych nawierzchniach betonowych. *Czasopismo Techniczne*, **108**, Zeszyt 18, 2-B, 2011, 113-134
- [9] *Dacko M., Marszałek J.*: Numeryczna analiza wpływu połączeń dyblowych na stan przemieszczeń i naprężeń w płytach lotniskowych. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, **53**, 8, 2004, 35-43
- [10] *Yu H.T., Smith K.D., Darter M.I., Kazanovich L.*: Performance of Concrete Pavements, Improving Pavement Performance, 111. Report No. FHWA-RD-95-111, Federal Highway Administration, 1998
- [11] Field evaluation of elliptical steel dowel performance. FHWA Project DTFH-61-03-C-00119. Final report. Iowa State University, Iowa, 2008
- [12] Design and evaluation of jointed plain concrete pavement with fiber reinforced polymer dowels. FHWA-HRT-06-106. US Department of Transportation Federal Highway Administration, 2009
- [13] *Labocha S.*: Modelowanie dybli w betonowych nawierzchniach metodą MES. *Magazyn Autostrady*, 12, 2013, 42-47
- [14] *Walker W.W., Holland J.A.*: Performance-based dowel design. *Concrete Construction*. Handley Wood, 2007, 1-8
- [15] *Huang Y.H.*: *Pavement Analysis and Design*. Pearson Education, Upper Saddle River, NJ, 2004
- [16] *Yoder E.J., Witczak M.W.*: *Principles of Pavement Design*. Wiley, New York, 1975
- [17] *Horonjeff R., McKelvey F.X., Sproule W.J., Young S.B.*: *Planning and design of airports*. McGraw-Hill, New York, 2010
- [18] *Szydło A.*: *Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego: teoria, wymiarowanie, realizacja*. Polski Cement, Kraków, 2004
- [19] *Wytyczne lotniskowe - projektowanie ukształtowania i obliczenie nawierzchni pól wzlotów stałych lotnisk wojskowych*. MON-DWLot, Poznań, 1972
- [20] *Westergaard H.M.*: Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis. *Public Roads*, 7, 2, 1926, 25-35
- [21] *Westergaard H.M.*: New formulas for stresses in concrete pavements of airfields. *American Society of Civil Engineers Transactions*, **113**, 2340, 1948, 425-444
- [22] *Nagórski R.*: *Mechanika nawierzchni drogowych w zarysie*. PWN, Warszawa, 2014
- [23] *Graczyk M.*: *Nośność konstrukcji nawierzchni wielowarstwowych w krajowych warunkach klimatycznych*. *Studia i materiały, IBDiM*, zeszyt 63, Warszawa, 2010
- [24] <http://www.mapei.com/US-EN/tech-talk-post.asp?IDPost=80> (30.02.2016)
- [25] <http://www.pavementinteractive.org/article/rigid-pavement-response/> (30.02.2016)
- [26] *Developing, and Delivering Highway Transportation Innovations*. Federal Highway Administration Research and Technology Coordinating. Publication Number: FHWA-04-122, 2005