

mgr. inż. Maksymilian Łazarowicz
Politechnika Gdańska, PORR S.A.

dr hab. inż. Piotr Jaskuła
Politechnika Gdańska

Eksperymentalna analiza przyczepności dybla w zależności od położenia i zastosowania smarowania

Experimental analysis of dowel adhesion as a function of the position and the lubrication application

Streszczenie

Nawierzchnie z betonu cementowego wykonane w technologii dyblowanej i kotwionej są podzielone szczelinami poprzecznymi i podłużnymi, tworząc szereg połączonych ze sobą płyt w celu uniknięcia powstawaniu przypadkowo zlokalizowanych spękań skurczowych. Dyble zwiększają możliwości przenoszenia obciążenia ruchu pojazdów, określanego miarą współpracy płyt, a także nie mogą zakłócić płytom swobodnego ruchu spowodowanego obciążeniem termicznym. Prawidłowa praca dybli uzależniona jest od sposobu ich osadzenia, materiału z jakiego zostały wykonane i geometrii: długości, średnicy czy kształtu przekroju. Ogólnie trwałość nawierzchni z betonu cementowego uzależniona jest od szeregu czynników materiałowych, technologicznych, wykonawczych i utrzymaniowych.

Z każdym rokiem kultura wykonania nawierzchni z betonu cementowego jest coraz wyższa, a oddane w przeciągu ostatnich lat odcinki dróg, będące w okresie gwarancyjnym, są uważnie monitorowane przez zarządców dróg oraz firmy wykonawcze. Nieustannie poszukiwane są rozwiązania mające na celu poprawienie trwałości konstrukcji nawierzchni drogowej i długotrwałe utrzymanie komfortu podróżnych, mierzone równością oraz szorstkością nawierzchni.

W pracy przedstawiono wyniki studiów literatury oraz własnych badań laboratoryjnych, dotyczących wpływu smarowania dybla przed jego wbudowaniem na dalszą trwałość płyt betonowych. Jednym z podstawowych obciążeń, działających w szczelinach dylatacyjnych są poziome siły, wywołane ruchami płyt na skutek temperatury. Swobodna praca płyt w kierunku poziomym możliwa jest wtedy, gdy płyty nie napotykają oporów w szczelinach, co ma bezpośredni związek z powierzchnią i właściwym położeniem dybli. Badaniem, umożliwiającym symulację tego zjawiska jest pomiar wytrzymałości na wyrywanie metodą pull-out, która pozwala określić maksymalną osiowo przyłożoną do dybla siłę potrzebną do pokonania sił tarcia między dyblem, a betonem. Im mniejsza wartość ta siła przyjmuje, tym większą swobodę mają

plyty w trakcie eksploatacji. W pracy przedstawiono wyniki badań pull-out dla dybli smarowanych i niesmarowanych przed wbudowaniem w próbkę betonową, a także sprawdzono zmianę tej siły w zależności od wartości obrotu dybli.

Abstract

Jointed Plain Portland Cement Concrete Pavements are divided by transverse and longitudinal joints, forming a series of interconnected slabs to avoid the formation of randomly localized shrinkage cracks. Dowels increase the ability to carry the load of vehicle traffic, determined by the Load Transfer Efficiency, and must not interfere with the free movement of the slabs caused by thermal loading. The correct operation of dowels depends on the way they are embedded, the material they are made of and their geometry: length, diameter or cross-sectional shape. In general, the durability of cement concrete pavements depends on a number of material, technological, execution and maintenance factors.

With each passing year, the culture of cement concrete pavement construction is getting better and better, and the road sections that have been executed in the last few years, are being closely monitored by road authorities and contractors. Solutions are constantly being sought to improve the durability of road pavement construction and to maintain the comfort of travelers over the long term, as measured by the roughness of the pavement.

This paper presents the results of a literature study and our own laboratory tests on the effect of lubricating the dowel before it is embedded on the subsequent durability of concrete slabs. One of the main loads acting in expansion joints are horizontal forces, caused by the movement of slabs due to temperature. Free operation of slabs in the horizontal direction is possible when the slabs do not encounter resistance in the joints, which is directly related to the surface and proper position of dowels. A test to simulate this phenomenon is to measure pull-out strength using the pull-out method, which makes it possible to determine the maximum axially applied force to the dowel required to overcome the frictional forces between the dowel and the concrete. The smaller the value this force takes, the more freedom the slabs have during operation. This paper presents the results of pull-out tests for lubricated and unlubricated dowels before embedding them into a concrete specimen, and also checks the change in this force as a function of the dowel's rotation value.

1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych zadań nawierzchni z betonu cementowego w technologii dyblowanej i kotwionej jest przeniesienie obciążeń od ruchu pojazdów, termicznych oraz reologicznych występujących zaraz po wykonaniu [1]. Cykliczne obciążenie płyt betonowych osią obliczeniową sprawia, że najsłabszym miejscem nawierzchni jest szczelina dylatacyjna będąca celowo stworzoną nieciągłością, której zadaniem jest uchronienie nawierzchni od wystąpienia samoistnych spękań skurczowych w początkowym okresie dojrzewania betonu [2]. Oznacza to, że następuje nierównomierne obciążanie płyt betonowych tj. sytuacja w której płyta jest poddawana naciskowi od kół pojazdów, a sąsiednia nie. Wbudowane zawczasu w szczelinę dylatacyjną dyble mają za zadanie zwiększenie transferu obciążenia między płytą obciążoną, a płytami nieobciążonymi zwiększając w ten sposób żywotność nawierzchni [3].

Z kolei obciążenie termiczne wpływa na zmiany objętościowe płyt betonowych, ponieważ na skutek różnic temperatury między dolną i górną powierzchnią nawierzchni, następuje zjawisko curlingu, czyli odkształcania się płyt [4]. Gdy temperatura górnej powierzchni jest wyższa niż dolnej, płyta wygina się wypukle. Na górnej powierzchni następuje koncentracja naprężeń rozciągających, natomiast na spodzie ściskających. Z kolei gdy temperatura górnej powierzchni jest niższa niż dolnej, płyta wygina się wklęsle, a układ powstałych naprężeń jest odwrotna niż opisano wcześniej. Dodatkowo dobowe różnice temperatur wpływają na poziome ruchy płyt betonowych spowodowane rozszerzaniem się i kurczeniem materiału. Dlatego bardzo istotnym jest zapewnienie płytom swobody ruchu by nie następował wzrost naprężeń rozciągających powodujących zniszczenie betonu po przekroczeniu jego granicznej wytrzymałości [5]. Swoboda poziomych ruchów płyt betonowych uzależniona jest od kilku czynników do których należy zaliczyć m.in. połączenie płyty betonowej z podbudową, położenie dybli w szczelinie dylatacyjnej, czy adhezję między dyblem i betonem. Na szczególną uwagę zasługuje ostatni parametr, ograniczenie przyczepności dybla do betonu powoduje, że przenosi on obciążenie pionowe między płytami, lecz nie stanowi on obszaru kumulacji sił poziomych oraz naprężeń. Dotychczas stosowanym w kraju rozwiązaniem było powleczenie dybli cienką warstwą polimeru zmniejszającego przyczepność dybla do betonu [6]. Natomiast dodatkowym zabiegiem stosowanym powszechnie przy budowie nawierzchni z betonu cementowego w technologii dyblowanej i kotwionej w USA jest smarowanie dybli przed ich wbudowaniem. Zabieg ten ma na celu jeszcze znacznie większą redukcję adhezji między dyblem i betonem umożliwiając w ten sposób zmniejszenie sił w płytach, czego konsekwencją jest ograniczenie naprężeń w betonie. Amerykańskie wytyczne [7] dla niektórych regionów podają graniczną wartość dopuszczalnych naprężeń podczas próby pull-out na poziomie 0,3 MPa. Z kolei dla innych stanów maksymalna dopuszczalna siła wyrywająca określana na poziomie 15,2 kN.

Smarowania dybli przed wbudowaniem nie stosowano dotąd w Polsce i budzi polemikę wśród praktyków. Badaniem mogącym zasymulować użyteczność tego zabiegu technologicznego jest pomiar pull-out zgodnie z ISO 1040-1 pkt 7.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest określenie wpływu obrotu dybli na wartość siły wyrywającej dybla podczas badania pull-out mającego na celu symulację poziomych ruchów płyt betonowych w trakcie eksploatacji wywołanych obciążeniem termicznym. Dodatkowo

zbadano wpływ zabiegu technologicznego, jakim jest smarowanie dybli przed wbudowaniem, na wartość siły wrywającej i porównanie uzyskanych wyników z wielkościami otrzymanymi z badań dybli niesmarowanych.

3. Badania laboratoryjne

3.1 Procedura badawcza

Oznaczenie wytrzymałości na wrywanie dybla przeprowadzono na tzw. próbce krótkiej, czyli takiej dla której długość odcinka przyczepności wynosi od trzech do pięciu średnic. Wybór ten pozwala na przyjęcie koniecznych uproszczeń polegających na tym, że w trakcie pomiaru zmiany odkształceń w osi pręta są liniowe, natomiast naprężenia przyczepności mają wartość stałą [8], co odpowiada z kolei gładkiej powierzchni dybli.

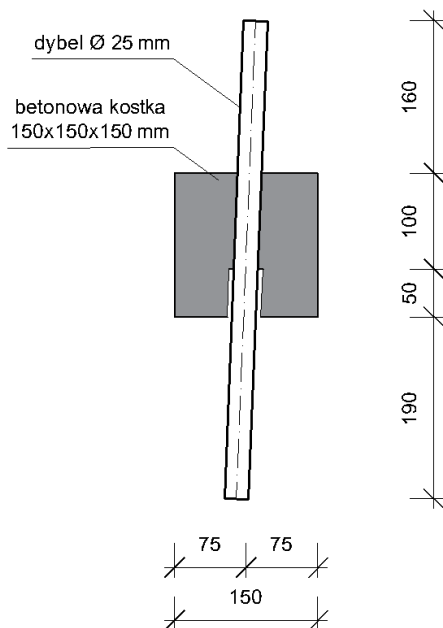
Procedurę badawczą przeprowadzono w oparciu o zapisy normy ISO 1040-1 pkt 7 oraz rozszerzono ją o metodykę badań opisaną w [9]. Metoda pomiaru polega na umieszczeniu dybla w sześciennym próbkę betonowej w taki sposób, by odcinek przyczepności wynosił czterokrotność średnicy dybla. Po co najmniej dwudziestoośmiodniowym okresie pielęgnacji betonu, próbkę umieszcza się w maszynie wytrzymałościowej w taki sposób, aby wolny koniec pręta został zamocowany trwale. Natomiast betonowy sześcian umieszczony jest w specjalnie w tym celu wykonanej stalowej klatce, do której przyłożona jest pionowa siła powodująca ruch ku górze. W ten sposób następuje zjawisko wrywania dybla z betonowej próbki. Przyrost naprężenia przekazywanego przez maszynę na próbkę powinien być stały i wynosić od 10 do 20 MPa/min. Jednakże prędkość przyrostu siły określono z myślą o prętach żebrowanych, które w kontakcie z betonem generują dużo większą siłę przyczepności w porównaniu z prętami gładkimi. Dlatego do badań przyjęto prędkość przyrostu przemieszczenia równe 1 mm/min zgodnie z zaleceniami z [10].

W związku z tym, że celem doświadczenia jest określenie wpływu obrotu dybla na wartość wytrzymałości na wrywanie, pomiar przeprowadzono dla obrotów o wartości. Położeniem referencyjnym, do którego porównywano uzyskane wartości sił, było to równoległe do podstawy i prostopadłe do działającej siły. Wartości obrotów dobrano tak, aby odwzorowywały progowe wartości klasyfikacyjne dybli zgodnie z krajowymi dokumentami technicznymi [11], a także zwiększono je by zbadać potencjalną zależność między obrotem i wytrzymałością na wrywanie. Wartości obrotów pionowych, wyrażonych jako odchylenie między końcami pełnowymiarowego dybla, wynosiły dla badania wytrzymałości na ścinanie:

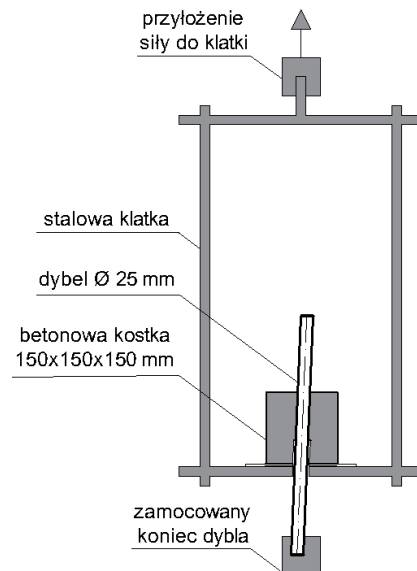
- 0 mm, co odpowiada kątowi 0° i jest określana jako położenie idealne,
- 20 mm, co odpowiada kątowi $2,3^\circ$ i jest określana zgodnie z [11] jako graniczna wartość między grupą „do odbioru bez potrąceń” i „do odbioru z potrąceniami”,
- 40 mm, co odpowiada kątowi $4,6^\circ$ i jest określana zgodnie z [11] jako graniczna wartość między grupą „do odbioru z potrąceniami” i „nie do odbioru”,
- 60 mm, co odpowiada kątowi $6,9^\circ$,

Schemat zestawu badawczego przedstawiono na rysunku 1. Schemat jest tożsamy dla badania przy osiowym położeniu dybla

Próbka do badania wyrywania



Schemat stanowiska badawczego



Rys. 1. Widok próbki oraz schemat zestawu badawczego przy określeniu wytrzymałości na wyrywanie dybla dla obrotu pionowego równego 0 - 80 mm.

W celu określenia potencjalnej zależności między wytrzymałością na wyrywanie a obrotem dybla zdecydowano, że jedyną mierzoną wartością będzie maksymalna siła wyciągająca. Badanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej marki ZWICK/ROELL Z400 na Politechnice Gdańskiej. Badanie prowadzono do uzyskania maksymalnej siły wyciągającej dybel z próbki i kontynuowano je do osiągnięcia wysuwu dybla do wartości 20 mm, ponieważ zauważono, że przy tej wartości siły wyciągająca zaczyna maleć.

3.2 Przygotowanie próbek do badań

Badania przeprowadzono na dyblach stalowych powleczonych warstwą polietylenu w dwóch wariantach tj. dyble posmarowane przed wykonaniem próbki oraz nieposmarowane. Do badań zastosowano dyble o średnicy 25 mm ze stali, której w drodze badań laboratoryjnych określono granicę plastyczności jako 342 MPa oraz wytrzymałość na rozciąganie jako 480 MPa. Olej, którym posmarowano dyble zgodnie z zaleceniami AASHTO T 253-02, to SAE 30.

Długość badanych dybli wynosiła 500 mm i umieszczono je w sześciennych próbkach o wymiarach 150x150x150 mm betonowych w taki sposób, że odcinek kontaktu dybla z betonem wynosił czterokrotność średnicy dybla tj. 100 mm. W celu odizolowania pozostałej długości dybla od betonu, zastosowano ochronną gąbkę, którą usunięto po stwardnieniu betonu. Beton zastosowany do wykonania obiektów badawczych był klasy C35/45, co odpowiada wymaganiom stawianym płytom betonowym dla obciążenia ruchu KR7 [12]. Długości wystających końców dybla z próbki wynosiła 19 cm od strony późniejszego mocowania oraz 16 cm. W próbkach nie użyto spiralnego zbrojenia poprzecznego, którego zadaniem jest dodatkowe skrępowanie dybla oraz zmniejszenie prawdopodobieństwa rozłupania betonu,

ponieważ celem tego badania jest możliwie najwierniejsze odtworzenie warunków pracy dybla w płycie betonowej, w której jak wiadomo ten element nie występuje.

Formy oraz przygotowane do badań obiekty przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Forma oraz obiekt badawczy do wykonania oznaczenia wytrzymałości na wrywanie - z lewej forma, z prawej obiekt przygotowany do badań.

Oznaczenie siły wrywającej dla każdej wartości obrotu oraz dla każdego wariantu badawczego, zostało przeprowadzone na trzech próbkach.

3.3 Wyniki badań

Po wykonaniu pomiarów dokonano inspekcji obiektów badań. Próbkki betonowe nie wykazały pęknięć lub zarysowań, a dyble nie uległy deformacji w trakcie pomiaru. Obserwacja ta dotyczyła zarówno dybli posmarowanych przed betonowaniem, jak i tych nieposmarowanych. Stan próbek po badaniu wytrzymałości na wrywanie przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Próbkki po badaniu wytrzymałości na wrywanie.

Średnie maksymalne siły wrywające oraz towarzyszące im wysuwy dybli stalowych w osłonie z polietylenu przedstawiono w tabelach 1-2 oraz rysunku 4. Oczekiwane zmiany procentowe w ocenianych parametrach przedstawiono w zakresach dodatnich, a nieoczekiwane w zakresach ujemnych.

Tab. 1. Maksymalne siły wrywające dla dybli stalowych smarowanych i niesmarowanych.

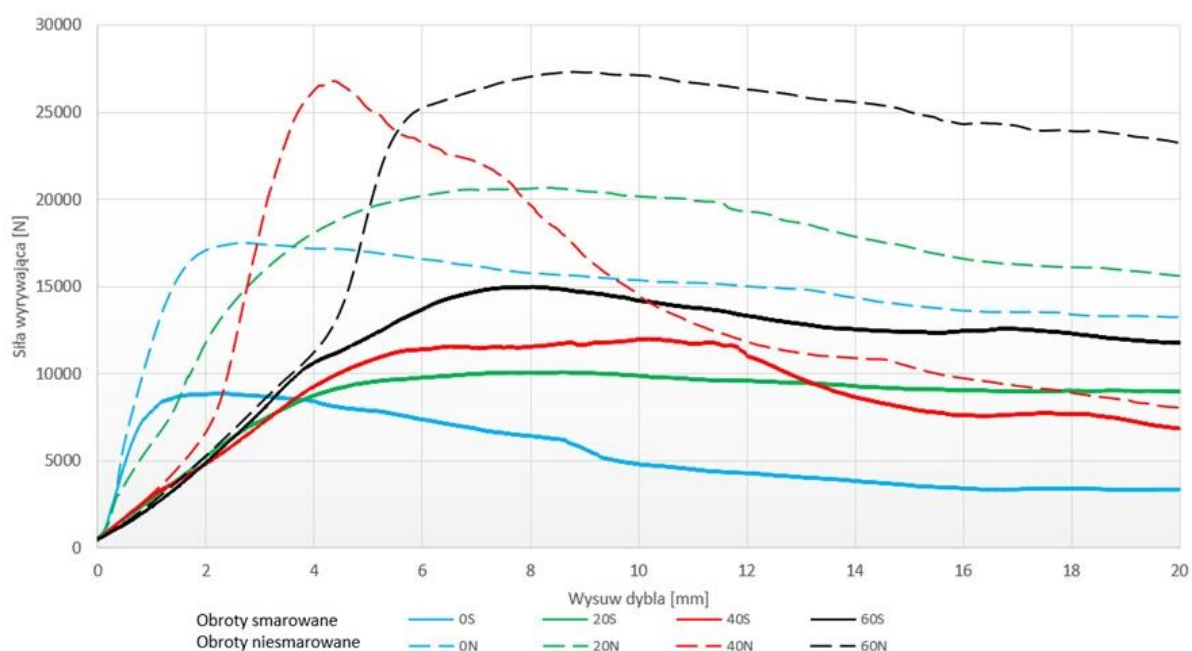
L.p.	Wartość obrotu [mm]	Maksymalna siła wrywającej [N]		Spadek siły wrywającej dla dybli smarowanych [%]
		niesmarowane	smarowane	
1	0	17 517,3	8 869,9	49,4
2	20	20 678,5	10 078,6	51,3
3	40	26 799,4	11 993,1	55,2
4	60	27 323,7	14 980,6	45,2

Na podstawie analizy wyników (tab. 1) maksymalnej siły wrywającej w przypadku dybli smarowanych widać jednoznaczną redukcję siły w zakresie od 45 do 55%. Zauważono też, że obrót dybla istotnie zwiększa siłę wrywającą wraz ze wzrostem obrotu dybla. Można też zaobserwować, że pomimo wzrostu siły w przypadku dybli obroconych nasmarowanie redukuje wzrost siły do poziomu dybla niesmarowanego bez obrotu. Oznacza to, że smarowanie dybli jest w stanie zrekompensować wpływ złego położenia dybla, jego odchylenia od położenia idealnego na wielkość siły wrywającej. Jest to istotna informacja, że zabieg smarowania dybli pozwala na ograniczenie negatywnych skutków wynikających z błędu wykonawczego jakim jest wbudowanie dybli w niewłaściwym położeniu.

Tab. 2. Wysuw przy maksymalnych siłach wrywających dla dybli stalowych smarowanych i niesmarowanych.

L.p.	Wartość obrotu [mm]	Wysuw [mm]		Zmiana wysuwu dla dybli smarowanych [%]
		niesmarowane	smarowane	
1	0	2,33	2,68	13,1
2	20	8,34	8,57	2,8
3	40	4,36	5,85	34
4	60	8,79	8,04	-8,5

Na podstawie analizy wyników (tab. 2) wysuwu przy maksymalnej sile wrywającej zauważono, że zmiany są mało istotne wynoszące $\pm 10\%$. Nie zaobserwowano jednoznacznej zależności na wielkość wysuwu dybla smarowanego i niesmarowanego. Jedynie w przypadku obrotu dybla o wartość 40 mm zaobserwowano większą zmianę wysuwu równą 34%.



Rys. 4. Zestawienie siły wrywającej w czasie badania wytrzymałości na wrywanie dybli stalowych niesmarowanych i smarowanych.

Na podstawie uzyskanych wyników badań obliczono energię potrzebną do osiągnięcia maksymalnej siły wrywającej dyble z próbki betonowej. Rezultaty przedstawiono w tabeli 3. Z rysunku 4 i zestawienia w tabeli 3 można zauważyć, że zarejestrowano istotny spadek energii potrzebnej do osiągnięcia maksymalnej siły wrywającej dybel po posmarowaniu, w zakresie od 32 do 51%. Będzie to miało pozytywny wpływ na generowanie naprężeń termicznych w płycie. Zmniejszenie oporów swobodnego ruchu poziomego płyty zmniejsza naprężenia w płycie.

Tab. 3. Wartości energii do osiągnięcia maksymalnej siły wrywającej dybel.

L.p.	Wartość obrotu [mm]	Energia [J] dybli nieposmarowanych		Zmiana energii dla dybli smarowanych [%]
		niesmarowane	smarowane	
1	0	33,06	16,06	51,4
2	20	130,26	64,71	50,3
3	40	50,88	34,34	32,5
4	60	133,63	74,69	44,1

4. Podsumowanie

Wyniki badań pull-out, czyli wrywania dybli z próbki betonowej w przypadku dybli stalowych w osłonie z polietylenu wykazały wzrost maksymalnej siły wrywającej oraz towarzyszącemu jej wysuwowi elementu wraz ze wzrostem kąta obrotu dybla. Zauważono również, że energia potrzebna do osiągnięcia maksymalnej siły wrywającej rośnie wraz ze wzrostem kąta obrotu dybla, choć dla dybli posmarowanych osiąga niższe wartości dla tych samych obrotów niż dla tych nieposmarowanych.

Smarowanie dybla w każdym przypadku obrotu lub braku obrotu dybla zmniejsza wielkość maksymalnej siły do wyrwania oraz energii potrzebnej do osiągnięcia maksymalnej siły o 50%.

Zauważone zmiany wartości wysuwu dybla, sił wrywających oraz towarzyszącej im energii, świadczą o ich związku z obrotem dybla. Badania wykazały, że w praktyce obrót dybla będzie zmniejszał swobodę pracy płyt betonowych prowadząc do ewentualnych zablokowania szczelin, których następstwem jest powstanie zarysowań, pęknięć lub zniszczeń betonu. Testy wykazały również, że skutecznym sposobem ograniczenia skutków obrotu dybli na trwałość płyt, jest ich posmarowanie przed wbudowaniem.

6. Literatura

- [1] M. A. Glinicki, Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2019
- [2] A. Szydło, Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego: teoria, wymiarowanie, realizacja, Polski Cement, Kraków, 2004
- [3] G. Griffiths i N. Thom, Concrete Pavement Design Guidance notes, Taylor & Francis, Londyn, 2007
- [4] M. Graczyk, M. Gajewski i R. Szczerba, Analiza statyczna dyblowanej betonowej nawierzchni lotniskowej z uwzględnieniem zjawiska curlingu płyt, Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 15, 2016
- [5] A. Singh i A.K. Chandrappa, Effect of Uniform Vertical and Longitudinal Dowel Misalignment in Jointed Plain Concrete Pavement, International Journal of Pavement Research and Technology, 328, 2023
- [6] M. Łazarowicz, J. Krzemiński i P. Jaskuła, Ocena wpływu wybranych parametrów materiałowych i technologicznych dybli na zachowanie nawierzchni z betonu cementowego, Inżynieria i Budownictwo, 79, 2023
- [7] M.B. Snyder, Guide to dowel load transfer systems for jointed concrete roadway pavements, Report Date, 2011
- [8] M. Burdziński, M. Niedostatkiwicz, Badania doświadczalne przyczepności, Builder, 6, 2020
- [9] M. Burdziński, M. Niedostatkiwicz, Analiza doświadczalna wpływu średnicy pręta na przyczepność w teście pull-out, Materiały Budowlane, 1, 2022
- [10] L. Khazanovich, K. Hoegh, M. Snyder, NCHRP Report 637: Guidelines for Dowel Alignment in Concrete Pavements, Transportation Research Board, 2009
- [11] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Instrukcja DP-T 14 Ocena jakości na drogach krajowych. Część I – Roboty drogowe, Warszawa, 2020
- [12] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych, Wrocław, 2014