

Practical evaluation of the influence of the position of dowels in expansion joints on the risk of failure of Portland cement concrete pavements

Praktyczna ocena wpływu położenia dybli w szczelinach dylatacyjnych na ryzyko powstania zniszczeń nawierzchni z betonu cementowego

Abstract: Cement concrete pavements are mainly implemented in Poland using unreinforced, dowelled and tied pavement technology. The task of dowels in transverse expansion joints is to ensure proper transfer of loads between slabs and to allow free operation of slabs caused, among other things, by changes in thermal load. Recently, a significant problem has been observed in evaluating and resolving the issue of improperly placed dowels in expansion joints. So far, the assessment has consisted of categorising their location into three groups and taking relevant action based on contractual provisions (leading to financial deductions) rather than verified engineering knowledge. The consequence of these actions is that the development of this technology in the express road network has been significantly halted. Contractors, given the choice between asphalt or cement concrete technology, choose the former – among others for the abovementioned reasons. This paper presents a proposal for assessing the position of dowels in expansion joints based on the use of a superposition of four types of deviations from the ideal dowel position (defined in the equivalent diameter algorithm d_{eq}) in conjunction with the usual condition of permissible compressive stresses under the dowel, which is used for dowel dimensioning. The proposal presented here was used to evaluate the position of dowels in about a hundred expansion joints in five expressway pavements. Promising results have been achieved to estimate the risk of failure of concrete slabs over their service life.

Keywords: dowels, equivalent diameter, Portland cement concrete pavement, stress in concrete slab.

Streszczenie: Nawierzchnie z betonu cementowego realizowane są w Polsce głównie w technologii nawierzchni niezbrojonej, dyblowanej i kotwionej. Zadaniem dybli w poprzecznych szczelinach dylatacyjnych jest zapewnienie prawidłowego przenoszenia obciążeń między płytami oraz umożliwienie swobodnej pracy płyt wywołanej m.in. zmianami obciążenia termicznego. W ostatnim czasie zaobserwowano istotny problem związany z oceną i rozwiązaniem zagadnienia nieprawidłowego położenia dybli w szczelinach dylatacyjnych. Dotychczas ocena polegała na zakwalifikowaniu ich położenia do trzech grup i podjęciu na tej podstawie czynności w oparciu o zapisy kontraktowe (prowadzące do potrąceń finansowych), nie zaś o zweryfikowaną wiedzę inżynierską. Konsekwencją tych działań jest znaczne wstrzymanie rozwoju tej technologii w sieci dróg szybkiego ruchu. Firmy wykonawcze, mając możliwość wyboru technologii asfaltowej lub betonu cementowego, wybierają tę pierwszą – m.in. z uwagi na powyższe. W artykule przedstawiono propozycję oceny położenia dybli w szczelinach dylatacyjnych, bazującą na wykorzystaniu superpozycji czterech rodzajów odchyżeń od idealnego położenia dybla (określonych w algorytmie średnicy ekwiwalentnej d_{eq}) w powiązaniu ze zwyczajowo stosowanym do wymiarowania dybli warunkiem dopuszczalnych naprężeń ściskających pod dyblem. Przedstawioną propozycję wykorzystano do oceny położenia dybli w około stu szczelinach dylatacyjnych w pięciu nawierzchniach dróg ekspresowych. Osiągnięto obiecujące wyniki, pozwalające na szacowanie ryzyka awarii płyt betonowych w okresie eksploatacji.

Słowa kluczowe: dyble, naprężenia w płycie betonowej, nawierzchnia z betonu cementowego, średnica ekwiwalentna.

¹⁾ Gdańsk University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, 11/12 Gabriela Narutowicza St., 80-233 Gdańsk, Poland; PORR S.A., 237 Wólczyńska St., 01-919 Warsaw, Poland; maksymilian.lazarowicz@porr.pl (✉)

²⁾ Gdańsk University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, 11/12 Gabriela Narutowicza St., 80-233 Gdańsk, Poland; piotr.jaskula@pg.edu.pl

1. INTRODUCTION

1.1. LITERATURE REVIEW

A characteristic feature of unreinforced, dowelled and tied cement concrete pavements is that the pavement is divided by transverse and longitudinal expansion joints, resulting in a series of interconnected slabs [1-5], in order to avoid the formation of randomly localised shrinkage cracks. The use of dowels increases the ability to transfer loads between a slab subject to loads and a slab not subject to loads during vehicle traffic, while allowing free horizontal slab movement due to temperature changes [4, 6, 7]. If dowels are not used, the transmission of forces takes place only through friction, with the participation of aggregate grains [3, 8], where the Load Transfer Efficiency *LTE* ratio of such slabs within the range 20-60% [9]. These values indicate very little load transfer between the slabs. However, the use of dowels increases this value even above 90%, which is considered a very good result [10]. One of the basic parameters for dowels to work properly in an expansion joint is their position, described by five deviation quantities – vertical displacement d_z , horizontal displacement d_y , spacing x_o , horizontal rotation m_h and vertical rotation m_v [11].

A deviation from the ideal vertical position results in a change of stress states in a concrete slab. Calculations using the finite element method show higher stresses in the slab under load for dowels embedded shallowly [9]. On the other hand, dowels embedded too deeply generate an increase in stress in a slab that is not subject to a load and reduce the efficiency of load transfer between slabs, expressed by the aforementioned *LTE* ratio between the slabs [9]. However, field study report [10] indicates that the *LTE* ratio maintains a value above 90% provided that the minimum dowel lagging is 5 cm. Other analytical and practical studies [12] have shown that positioning the dowels too close to the surface results in the emergence of significant tensile stresses that cause longitudinal cracks. Additionally, the same studies [12] indicate that the risk of pavement cracking increases for dowels positioned farther from longitudinal expansion joints and too shallowly set. This phenomenon has been linked to, among other things, slab curling, excessive slab restraint resulting

1. WPROWADZENIE

1.1. PRZEGLĄD LITERATURY

Cechą charakterystyczną nawierzchni z betonu cementowego wykonanych w technologii niezbrojonej, dyblowanej i kotwionej jest podzielenie nawierzchni poprzecznymi i podłużnymi szczelinami dylatacyjnymi, co skutkuje utworzeniem szeregu połączonych ze sobą płyt [1-5], celem uniknięcia powstawania przypadkowo zlokalizowanych spękań skurczowych. Zastosowanie dybli zwiększa zdolność przekazywania obciążeń między płytą obciążoną i nieobciążoną podczas ruchu pojazdów, przy jednoczesnym umożliwieniu swobodnych poziomych ruchów płyt, wynikających ze zmian temperatury [4, 6, 7]. W przypadku niezastosowania dybli przenoszenie sił odbywa się wyłącznie poprzez tarcie, z udziałem ziaren kruszywa [3, 8], co zapewnia wartość wskaźnika współpracy *LTE* (ang. *Load Transfer Efficiency*) takich płyt w przedziale 20-60% [9]. Wartości te oznaczają bardzo mały transfer obciążenia między płytami. Natomiast zastosowanie dybli zwiększa tę wartość nawet powyżej 90%, co uważa się za wynik bardzo dobry [10]. Jednym z podstawowych parametrów dybli, dzięki którym mogą prawidłowo pracować w szczelinie dylatacyjnej, jest ich położenie, które opisywane jest przez pięć wielkości odchylenia – przesunięcie pionowe d_z , przesunięcie poziome d_y , rozstaw x_o , obrót poziomy m_h oraz obrót pionowy m_v [11].

Odchylenie od idealnego położenia w pionie skutkuje zmianą stanów naprężeń w płycie betonowej. Obliczenia wykorzystujące metodę elementów skończonych wykazują wyższe naprężenia w płycie obciążonej w przypadku dybli osadzonych płytko [9]. Z kolei dyble osadzone zbyt głęboko generują wzrost naprężeń w płycie nieobciążonej i redukują sprawność przenoszenia obciążeń między płytami, wyrażoną wspomnianym wskaźnikiem współpracy płyt *LTE* [9]. Raport z badań terenowych [10] wskazuje natomiast, że wskaźnik *LTE* utrzymuje wartość powyżej 90% pod warunkiem, że minimalna otulina dybla wynosi 5 cm. Inne badania analityczno-praktyczne [12] dowiodły, że położenie dybli zbyt blisko powierzchni skutkuje pojawieniem się znaczących naprężeń rozciągających, które wywołują podłużne pęknięcia. Dodatkowo te same badania [12] wskazują, że ryzyko pojawienia się pęknięcia nawierzchni wzrasta w przypadku dybli znajdujących się dalej od dylatacji podłużnych i osadzonych zbyt płytko. Zjawisko to powiązane jest z m.in. z paczeniem się płyt, zbyt dużym skrępowaniem płyt wynikającym

from intolerable friction between dowels and concrete, as well as a high thermal gradient or thermal expansion coefficient of cement concrete [13, 14].

Horizontal dowel displacement results in a non-uniform length of dowel support in the connected slabs, and this in turn affects the loss of load-bearing capacity of the slabs [15]. Numerical calculations indicate a loss of *LTE* of up to 30%, the development of slab faulting, and an increase in compressive stresses, even leading to concrete spalling [9]. Field studies conducted by Khazanovich and Hoegh [10] confirm that the horizontal sliding out of a dowel from the expansion joint leads to a decrease in interaction and to slab faulting. However, it should be noted that the evaluation of this dowel position parameter should be considered in two ways, i.e., separately for dowels located within and outside the vehicle wheel impact zone [15]. In contrast to the first case, dowels outside the vehicle wheel impact zone generate a low risk of the emergence of the aforementioned phenomena.

Too high values of vertical and horizontal dowel rotation lead to degradation of pavement performance in a different manner [7]. Computational analyses [10, 16] indicate that rotations limit the freedom of horizontal movement of slabs due to thermal factors, leading to an increase in tensile stresses in the slabs and around the dowels and – in the worst case – to concrete spalling. The consequence is the formation of a gap between the dowel and the concrete, affecting the loss of load transfer capability and a decrease in the *LTE* ratio [10, 17]. This conclusion was confirmed by laboratory pull-out tests of dowels from concrete slabs [18], during which an increase in pull-out force was observed as the rotation of the dowel increased. In contrast, laboratory and computational studies [10] indicate an increase in the tendency for slabs to fault with an increase in dowel rotation.

In turn, with increasing dowel spacing, the normal and shear stresses in the pavement increase [19]. Computational analysis reports [20] indicate that a twofold increase in spacing is accompanied by a 20% increase in normal stresses and 10% increase in shear stresses. In practice, however, the appearance of such increased spacing is highly unlikely, due to the applied technology of inserting dowels with a dowel inserter or using prefabricated baskets.

z nadmiernego tarcia między dyblami a betonem, a także wysokim gradientem termicznym czy współczynnikiem rozszerzalności cieplnej betonu cementowego [13, 14].

Przesunięcie poziome dybla skutkuje niejednorodną długością podparcia dybla w połączonych płytach, a to z kolei wpływa na utratę nośności płyt [15]. Obliczenia numeryczne wskazują na utratę wskaźnika *LTE* do 30%, rozwój procesu klawiszowania płyt oraz wzrost naprężeń ściskających, prowadzących nawet do wykruszenia się betonu [9]. Badania terenowe przeprowadzone przez Khazanovicha i Hoegha [10] potwierdzają, że wysunięcie poziome dybla ze szczeliny prowadzi do spadku współpracy oraz klawiszowania płyt. Należy jednak zauważyć, że ocenę tego parametru położenia dybla należy rozpatrywać dwójako, tj. oddzielnie dla dybli położonych w strefie oddziaływania koła pojazdu i poza nią [15]. W przeciwieństwie do pierwszego przypadku, dyble poza strefą oddziaływania koła pojazdu generują niskie ryzyko wystąpienia wyżej wymienionych zjawisk.

Zbyt wysokie wartości obrotów pionowych i poziomych dybla prowadzą do różnorodnej degradacji parametrów nawierzchni [7]. Analizy obliczeniowe [10, 16] wskazują, że obroty ograniczają swobodę poziomych ruchów płyt spowodowanych czynnikami termicznymi, prowadząc do wzrostu naprężeń rozciągających w płytach oraz wokół dybli, a w najgorszym przypadku – do wykruszenia się betonu. Konsekwencją jest utworzenie się luzu pomiędzy dyblem i betonem, wpływające na utratę zdolności przekazywania obciążeń i spadek wskaźnika *LTE* [10, 17]. Wniosek ten potwierdziły laboratoryjne badania wrywania (*pull-out*) dybli z płyt betonowych [18], podczas których zaobserwowano wzrost siły wrywającej wraz ze wzrostem obrotu dybla. Z kolei badania laboratoryjno-obliczeniowe [10] wskazują na wzrost skłonności do klawiszowania płyt wraz ze wzrostem obrotów dybli.

Z kolei ze wzrostem rozstawu dybli rosną naprężenia normalne oraz styczne w nawierzchni [19]. Raporty z analiz obliczeniowych [20] wskazują, że dwukrotnemu zwiększeniu rozstawu towarzyszy wzrost naprężeń normalnych o 20% oraz naprężeń stycznych o 10%. W praktyce jednak pojawienie się aż tak zwiększonego rozstawu jest bardzo mało prawdopodobne, ze względu na technologię wbudowania dybli dyblarką lub z zastosowaniem koszyków prefabrykowanych.

1.2. CURRENT METHODOLOGY FOR ASSESSING DOWEL POSITION

The methodology used in Poland for assessing the position of dowels in an expansion joint is based on assigning the position of dowels to one of three groups – *accepted without deductions*, *accepted with deductions* or *not accepted* [11]. Boundary performance deviations allowing dowels to be qualified into one of these groups are shown in Table 1.

Table 1. Evaluation of dowel alignment in cement concrete pavements in Poland [11]
Tablica 1. Ocena położenia dybli w nawierzchniach z betonu cementowego w Polsce [11]

Types of deviations Rodzaje odchyłek	Accepted without deductions Odbiór bez potrąceń	Accepted with deductions Odbiór z potrąceniami	Not accepted Nie do odbioru
Vertical displacement [mm] Przesunięcie pionowe	≤ 20	21-40	> 40
Horizontal displacement [mm] Przesunięcie poziome	≤ 50	51-100	> 100
Spacing [mm] Rozstaw	≤ 50	51-75	> 75
Horizontal or vertical rotation [mm] Obrót poziomy lub pionowy	≤ 14	15-40	> 40

Dowels in the *accepted without deductions* group are considered to have been built correctly. On the other hand, those qualified to *accepted with deductions* group are subject to a calculation of a financial deduction applicable to the contractor in accordance with the national instruction DP-T 14 [11]. A significant problem is posed by *Not accepted* dowels, where there is no formal procedure for the investor to accept the dowels and, consequently, to accept the completed pavement. However, due to the magnitude of the problem and its occurrence in numerous projects, an agreement was elaborated [21] between contractors and the Directorate General for National Roads and Motorways, consisting of warranty extensions and financial security for potential repairs. It is worth noting that this procedure covers the entire scope of concrete pavement made as part of the implementation of the project, even if only one parameter of the dowel position qualifies it as *not accepted*.

A previously used method for assessing the impact of misplaced dowels on pavement performance was an American procedure based on the *Joint Score* parameter [22]. It assumes an indication of the probability (low or high) of slab blockage based on the aggregate value of the weighting factors assigned to individual ranges of

1.2. OBECNIE STOSOWANA METODOLOGIA OCENY POŁOŻENIA DYBLA

Stosowana w Polsce metodologia oceny położenia dybli w szczelinie dylatacyjnej opiera się na przyporządkowaniu położenia dybli do jednej z trzech grup – *do odbioru bez potrąceń*, *do odbioru z potrąceniami* lub *nie do odbioru* [11]. Graniczne odchyłki wykonawcze, pozwalające zakwalifikować dyble do jednej z tych grup przedstawiono w Tabl. 1.

Dyble znajdujące się w grupie *do odbioru bez potrąceń* uznawane są za wbudowane prawidłowo. Z kolei te zakwalifikowane jako *do odbioru z potrąceniami* są przedmiotem naliczenia potrącenia finansowego firmie wykonawczej zgodnie z krajową instrukcją DP-T 14 [11]. Istotnym problemem są dyble *nie do odbioru*, w których przypadku nie istnieje formalna procedura odbioru przez inwestora dybli, a co za tym idzie – odbioru wykonanej nawierzchni. Z uwagi jednak na skalę problemu i występowanie go na licznych inwestycjach wypracowano porozumienie [21] między firmami wykonawczymi a GDDKiA, polegające na wydłużeniach gwarancyjnych i zabezpieczeniu finansowym na poczet potencjalnych napraw. Warto zauważyć, że procedura ta obejmuje cały zakres nawierzchni betonowej wykonanej w ramach realizacji inwestycji, nawet jeśli tylko jeden parametr położenia dybla kwalifikuje go jako *nie do odbioru*.

Wcześniej stosowaną metodą oceny wpływu nieprawidłowego położenia dybli na pracę nawierzchni była amerykańska procedura oparta na parametrze *Joint Score* [22]. Zakłada ona wskazanie prawdopodobieństwa (niskiego lub wysokiego) wystąpienia blokady płyt na podstawie sumarycznej wartości wskaźników wagowych przypisanych poszczególnym zakresom obrotu ukośnego (jako

diagonal rotation (being a resultant of vertical and horizontal rotation), compared to a limit value [22]. However, due to the fact that this methodology only takes into account dowel rotations, while slab blockage is caused even by rotations demonstrated by dowels from the *accepted without* and *with deductions* groups [23], currently this algorithm is practically not used for the purpose of assessing the impact of misplaced dowels in the expansion joint.

1.3. OBJECTIVE

The purpose of this article is to present an alternative method for evaluating the misplacement of dowels in an expansion joint and to assess the impact of misplacement of dowels on the risk of damage of cement concrete pavements. The proposed method covers a much broader group of dowel position parameters than just rotations, making it possible to resolve a larger number of cases occurring on the network of roads made with dowelled pavement technology using cement concrete.

2. PROPOSED METHODOLOGY FOR ASSESSING THE IMPACT OF DOWEL POSITION ON THE RISK OF PAVEMENT DAMAGE

2.1. EQUIVALENT DIAMETER CONCEPT AND RELATED CALCULATIONS

The method for evaluating the effect of improper dowel position in the expansion joint on the performance of concrete slabs is based on an algorithm for determining the equivalent dowel diameter [24]. The algorithm was developed based on extensive field studies conducted on a network of US roads. It assumes a reduction in the nominal dowel diameter depending on the magnitude of engineering errors in terms of elevation, displacement relative to the expansion joint, as well as horizontal and vertical rotation of all dowels in the expansion joint. Thus, the value of the equivalent diameter d_{eq} , representing the position of the dowels in the analysed joint, is calculated according to formula (1):

$$d_{eq} = d_0 \cdot r_{emb} \cdot r_{cc} \cdot r_{vt} \cdot r_{ht}, \quad (1)$$

where:

d_0 – nominal dowel diameter [mm],

r_{emb} – correction factor due to dowel support error,

r_{cc} – correction factor due to elevation error,

wypadkowej pionowego i poziomego obrotu), porównanej do wartości granicznej [22]. Z uwagi jednak na fakt, że metodologia ta uwzględnia jedynie obroty dybla, zaś blokadę płyt powodują nawet dyble o obrotach z grupy *do odbioru bez* i *z potrąceniami* [23], obecnie algorytm ten praktycznie nie jest stosowany do oceny wpływu nieprawidłowego położenia dybli w szczelinie dylatacyjnej.

1.3. CEL

Celem artykułu jest przedstawienie alternatywnej metody oceny nieprawidłowego położenia dybli w szczelinie dylatacyjnej oraz oceny wpływu nieprawidłowego położenia dybli na ryzyko powstania zniszczeń w nawierzchni z betonu cementowego. Proponowana metoda obejmuje znacznie szerszą grupę parametrów położenia dybli niż tylko obroty, dzięki czemu pozwala rozstrzygnąć większą ilość przypadków zachodzących na sieci dróg wykonanych w technologii nawierzchni dyblowanych z betonu cementowego.

2. PROPONOWANA METODOLOGIA OCENY WPŁYWU POŁOŻENIA DYBLA NA RYZYKO POWSTANIA ZNISZCZEŃ NAWIERZCHNI

2.1. KONCEPCJA ŚREDNICY EKWIWALENTNEJ I POWIĄZANE Z NIĄ OBLICZENIA

Metoda oceny wpływu niewłaściwego położenia dybla w szczelinie dylatacyjnej na pracę płyt betonowych opiera się na algorytmie wyznaczenia ekwiwalentnej średnicy dybla [24]. Algorytm ten opracowano na podstawie szeroko zakrojonych badań terenowych prowadzonych na sieci amerykańskich dróg. Zakłada on pomniejszenie nominalnej średnicy dybla zależnie od wielkości błędów wykonawczych w zakresie położenia wysokościowego, przesunięcia względem szczeliny dylatacyjnej oraz obrotu poziomego i pionowego wszystkich dybli w szczelinie dylatacyjnej. W ten sposób uzyskiwana jest wartość średnicy ekwiwalentnej d_{eq} , reprezentująca położenie dybli w analizowanej szczelinie, którą oblicza się według wzoru (1):

$$d_{eq} = d_0 \cdot r_{emb} \cdot r_{cc} \cdot r_{vt} \cdot r_{ht}, \quad (1)$$

gdzie:

d_0 – średnica nominalna dybla [mm],

r_{emb} – współczynnik korekcyjny z uwagi na błąd podparcia dybla,

r_{vt} – correction factor due to vertical rotation error,

r_{ht} – correction factor due to horizontal rotation error.

Determination of each of the correction factors resulting from the measured values of the position of dowels in the expansion joint involves the use of empirical formulas. Since the predominant method of embedding dowels into cement concrete pavements in the US is the use of prefabricated steel basket, the method does not take into account changes in the spacing between successive dowels [25].

The algorithm for determining r_{emb} for dowels with a length of L_d is shown below:

- Calculation of dowel support length in a slab [in]:

$$L_{embi} = 0.5 \cdot L_d - |d_{yi}|, \quad (2)$$

where:

d_{yi} – The value of dowel extension from the expansion joint [in].

- Calculation of the r_{embi} value of the i -th dowel:

$$r_{embi} = \begin{cases} 0, & \text{if } L_{embi} \leq 2.0 \\ -0.01 \cdot L_{embi}^2 + 0.167 \cdot L_{embi} + 0.324, & \text{if } 2.0 < L_{embi} < 6.9 \\ 1, & \text{if } L_{embi} \geq 6.9 \end{cases} \quad (3)$$

- Calculation of r_{embwp} value for three dowels within the footprint of the right wheel:

$$r_{embwp} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{embi}}{3}, \quad (4)$$

where:

r_{embwp} – correction factor due to support error for three dowels within the footprint of the right wheel.

- Calculation of r_{emb} value for the entire expansion joint:

$$r_{embjt} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{embi}}{n}, \quad (5)$$

$$r_{emb} = \frac{r_{embjt} + r_{embwp}}{2}, \quad (6)$$

where:

r_{embjt} – average correction factor due to a faulty performance for all dowels in the expansion joint.

Equation (3) shows that if the dowel support length is ≤ 50 mm (≤ 2.0 in), the equivalent diameter takes the value of 0 mm. This means that for such a short support length, there is no load transfer between slabs through dowels.

r_{cc} – współczynnik korekcyjny z uwagi na błąd położenia wysokościowego,

r_{vt} – współczynnik korekcyjny z uwagi na błąd obrotu pionowego,

r_{ht} – współczynnik korekcyjny z uwagi na błąd obrotu poziomego.

Wyznaczenie każdego ze współczynników korekcyjnych na podstawie pomierzonych wartości położenia dybli w szczelinie dylatacyjnej polega na wykorzystaniu wzorów empirycznych. Z uwagi na fakt, że przeważającą metodą wbudowania dybli w nawierzchnie z betonu cementowego w USA jest zastosowanie prefabrykowanych stojaków, metoda nie uwzględnia zmian w odległościach między kolejnymi dyblami [25].

Algorytm wyznaczania r_{emb} dla dybli o długości L_d przedstawiono poniżej:

- Obliczenie długości podparcia dybla w płycie [cal]:

$$L_{embi} = 0,5 \cdot L_d - |d_{yi}|, \quad (2)$$

gdzie:

d_{yi} – wartość wysunięcia dybla ze szczeliny dylatacyjnej [cal].

- Obliczenie wartości r_{embi} i -tego dybla:

$$r_{embi} = \begin{cases} 0, & \text{gdy } L_{embi} \leq 2,0 \\ -0,01 \cdot L_{embi}^2 + 0,167 \cdot L_{embi} + 0,324, & \text{gdy } 2,0 < L_{embi} < 6,9 \\ 1, & \text{gdy } L_{embi} \geq 6,9 \end{cases} \quad (3)$$

- Obliczenie wartości r_{embwp} dla trzech dybli w obrębie śladu prawego koła:

$$r_{embwp} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{embi}}{3}, \quad (4)$$

gdzie:

r_{embwp} – współczynnik korekcyjny z uwagi na błąd podparcia dla trzech dybli w obrębie śladu prawego koła.

- Obliczenie wartości r_{emb} dla całej szczeliny dylatacyjnej:

$$r_{embjt} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{embi}}{n}, \quad (5)$$

$$r_{emb} = \frac{r_{embjt} + r_{embwp}}{2}, \quad (6)$$

gdzie:

r_{embjt} – średni współczynnik korekcyjny z uwagi na błąd wykonawczy dla wszystkich dybli w szczelinie dylatacyjnej.

In contrast, support lengths of ≥ 172.5 mm (≥ 6.9 in) are assumed to be sufficient to ensure proper force transfer between slabs.

The algorithm for determining r_{cc} for dowels embedded in a concrete slab with a height of h [in] is shown below.

- Calculation of lagging CC_i over the i -th dowel and reference lagging CC_{ref} [in]:

$$CC_i = \frac{h}{2} - \frac{d_0}{2} - \left| \frac{h}{2} - d_{zi} \right|, \quad (7)$$

$$CC_{ref} = \begin{cases} \min \left\{ \frac{h}{2} - \frac{d_0}{2} - 0.5; 3.5 \cdot d_0 \right\}, & \text{if } h \leq 12 \\ n \left\{ \frac{h}{2} - \frac{d_0}{2} - 1.0; 3.5 \cdot d_0 \right\}, & \text{if } h > 12. \end{cases} \quad (8)$$

- Calculation of the r_{cci} value of the i -th dowel:

$$r_{cci} = 1 - [-153.3 \cdot CC_{ref}^2 + 2503 \cdot CC_{ref} + 153 \cdot CC_i^2 - 2503 \cdot CC_i] / 9628. \quad (9)$$

- Calculation of r_{embwp} value for three dowels within the footprint of the right wheel:

$$r_{ccwp} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{cci}}{3}. \quad (10)$$

- Calculation of r_{emb} value for the expansion gap:

$$r_{ccjt} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{cci}}{n}, \quad (11)$$

$$r_{cc} = \frac{r_{ccjt} + r_{ccwp}}{2}. \quad (12)$$

It is noted that the algorithm does not distinguish between the position of the dowel below and above the centre of the slab, plus the smaller of the distances between the dowel and the bottom or surface of the slab is assumed for further calculations. However, the interaction of the pavement varies depending on the position of the dowels either closer to the surface or to the underside of the slabs [26], which was ignored in the presented method.

The algorithm for determining r_{vt} is presented below.

- Calculation of AT , MT and the standard deviation of the sample $StDT$ for the entire n -fold dowelled slot:

$$AT = \frac{\sum_{i=1}^n m_{vi}}{n}, \quad (13)$$

Z równania (3) wynika, że jeżeli długość podparcia dybla wynosi ≤ 50 mm ($\leq 2,0$ in), to średnica ekwiwalentna przyjmuje wartość 0 mm. Oznacza to, że dla tak krótkiej długości podparcia nie występuje zjawisko przenoszenia obciążenia między płytami poprzez dyble. Natomiast przyjmuje się, że długości podparcia $\geq 172,5$ mm ($\geq 6,9$ in) jest wystarczająca do zapewnienia prawidłowego transferu sił między płytami.

Algorytm wyznaczania r_{cc} dla dybli wbudowanych w płytę betonową o wysokości h [cal] przedstawiono poniżej.

- Obliczenie otuliny CC_i nad i -tym dyblem oraz referencyjnej otuliny CC_{ref} [cal]:

$$CC_i = \frac{h}{2} - \frac{d_0}{2} - \left| \frac{h}{2} - d_{zi} \right|, \quad (7)$$

$$CC_{ref} = \begin{cases} \min \left\{ \frac{h}{2} - \frac{d_0}{2} - 0,5; 3,5 \cdot d_0 \right\}, & \text{gdy } h \leq 12 \\ n \left\{ \frac{h}{2} - \frac{d_0}{2} - 1,0; 3,5 \cdot d_0 \right\}, & \text{gdy } h > 12. \end{cases} \quad (8)$$

- Obliczenie wartości r_{cci} i -tego dybla:

$$r_{cci} = 1 - [-153,3 \cdot CC_{ref}^2 + 2503 \cdot CC_{ref} + 153 \cdot CC_i^2 - 2503 \cdot CC_i] / 9628. \quad (9)$$

- Obliczenie wartości r_{embwp} dla trzech dybli w obrębie śladu prawego koła:

$$r_{ccwp} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{cci}}{3}. \quad (10)$$

- Obliczenie wartości r_{emb} dla szczeliny dylatacyjnej:

$$r_{ccjt} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{cci}}{n}, \quad (11)$$

$$r_{cc} = \frac{r_{ccjt} + r_{ccwp}}{2}. \quad (12)$$

Zauważono, że algorytm nie rozróżnia położenia dybla poniżej i powyżej środka płyty, a do dalszych obliczeń przyjmowana jest mniejsza z odległości między dyblem a spodem lub powierzchnią płyty. Praca nawierzchni jest jednak różna w zależności od położenia dybli bliżej powierzchni lub spodu płyt [26], co zostało pominięte w przedstawionej metodzie.

Algorytm wyznaczania r_{vt} przedstawiono poniżej.

- Obliczenie wartości AT , MT oraz odchylenia standardowego próbki $StDT$ dla całej n -krotnie dyblowanej szczeliny:

$$MT = |AT|, \quad (14)$$

$$StDT = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_{vi} - AT)^2}{n-1}}. \quad (15)$$

- Calculation of WPT value for one of the three dowels within the footprint of the right wheel:

$$WPT = \max\{|m_{v1}|; |m_{v1+1}|; |m_{v1+2}|\}. \quad (16)$$

- Calculation of joint stiffness $JStiff$ with measured dowel arrangement in the joint:

$$JStiff = JStiff_0 - 0.20623 \cdot MT + - 0.61796 \cdot StDT - 0.86861 \cdot WPT, \quad (17)$$

where:

$JStiff_0$ – predicted joint stiffness at the ideal dowel position.
For dowel diameter of $\phi = 25$ mm, $JStiff_0 = 6.537$.

- Calculation of the slab interaction ratio LTE for the entire gap:

$$LTE = \frac{100\%}{1 + 1.2 \cdot JStiff^{-0.849}}. \quad (18)$$

- Determination of r_{vt} value for the expansion joint:

$$r_{vt} = \frac{0.0103}{d_0} \cdot e^{0.0852 \cdot LTE}. \quad (19)$$

Based on the formula (19), it was calculated that for the ideal position of dowels with a diameter of $\phi = 25$ mm, the value of the LTE ratio is 80.4%, which is lower than that determining the excellent interaction between the slabs (90%), but satisfactory in terms of national guidelines (80%). For dowels with a diameter of $\phi = 32$ mm based on the formula (19), the value of the LTE ratio is 86.4%.

The algorithm for determining r_{hs} is analogous to that for r_{vt} with the exception that the measured values of the horizontal rotation of the dowels should be substituted into formulas (13-19).

In order to test which correction factor is most sensitive to faulty performance, calculations were made assuming that all dowels have the same value for a given parameter, starting with a value of 0 mm and increasing by 1 mm with each iteration. A concrete slab 280 mm thick and dowels 500 mm long and 25 mm in diameter were adopted. In addition, it was noted that the methods for calculating the correction factors for both types of rotation

$$AT = \frac{\sum_{i=1}^n m_{vi}}{n}, \quad (13)$$

$$MT = |AT|, \quad (14)$$

$$StDT = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_{vi} - AT)^2}{n-1}}. \quad (15)$$

- Obliczenie wartości WPT dla jednego z trzech dybli w obrębie śladu prawego koła:

$$WPT = \max\{|m_{v1}|; |m_{v1+1}|; |m_{v1+2}|\}. \quad (16)$$

- Obliczenie sztywności szczeliny $JStiff$ przy pomierzonym układzie dybli w szczelinie:

$$JStiff = JStiff_0 - 0.20623 \cdot MT + - 0.61796 \cdot StDT - 0.86861 \cdot WPT, \quad (17)$$

gdzie:

$JStiff_0$ – przewidywana sztywność szczeliny przy idealnym położeniu dybli. Dla dybla o średnicy $\phi = 25$ mm, $JStiff_0 = 6.537$.

- Obliczenie wskaźnika współpracy płyt LTE dla całej szczeliny:

$$LTE = \frac{100\%}{1 + 1.2 \cdot JStiff^{-0.849}}. \quad (18)$$

- Wyznaczenie wartości r_{vt} dla szczeliny dylatacyjnej:

$$r_{vt} = \frac{0,0103}{d_0} \cdot e^{0.0852 \cdot LTE}. \quad (19)$$

Na podstawie wzoru (19) obliczono, że dla idealnego położenia dybli o średnicy $\phi = 25$ mm wartość wskaźnika LTE wynosi 80,4%, co jest wartością niższą od tej określającej znakomitą współpracę płyt (90%), lecz zadowalającą w zakresie krajowych wytycznych (80%). Dla dybli o średnicy $\phi = 32$ mm na podstawie wzoru (19) wartość wskaźnika LTE wynosi 86,4%.

Algorytm wyznaczający r_{hs} jest analogiczny jak dla r_{vt} z zastrzeżeniem, że należy podstawić pomierzone wartości obrotów poziomych dybli do wzorów (13-19).

W celu zbadania, który współczynnik korekcyjny jest najczulszy na błąd wykonawczy, przeprowadzono obliczenia przy założeniu, że wszystkie dyble posiadają tę samą wartość danego parametru, poczynając od wartości 0 mm i zwiększając ją z każdą iteracją o 1 mm. Przyjęto płytę betonową o grubości 280 mm oraz dyble o długości 500 mm

allow the influence of rotations taking place in one direction (uniform), as well as dowel rotations alternating in two directions (non-uniform) to be studied. To confirm this, calculations were carried out assuming equal rotation values pointing in the same direction and alternating, i.e. if the i -th dowel has a rotation value of X , then dowel $i + 1$ has a value of $-X$. The results of the calculations are shown in Fig. 1.

i średnicy 25 mm. Dodatkowo zauważono, że metody obliczania współczynników korekcyjnych dla obu rodzajów obrotów pozwalają na zbadanie wpływu obrotów skierowanych w jednym kierunku (jednorodnych), jak i obrotów dybli na przemian w dwóch kierunkach (niejednorodnych). Aby to potwierdzić, przeprowadzono obliczenia przy założeniu równych wartości obrotu skierowanych w tym samym kierunku oraz naprzemiennie, tj. jeżeli i -ty dybel ma wartość obrotu X , to dybel $i + 1$ ma wartość $-X$. Wyniki obliczeń przedstawiono na Rys. 1.

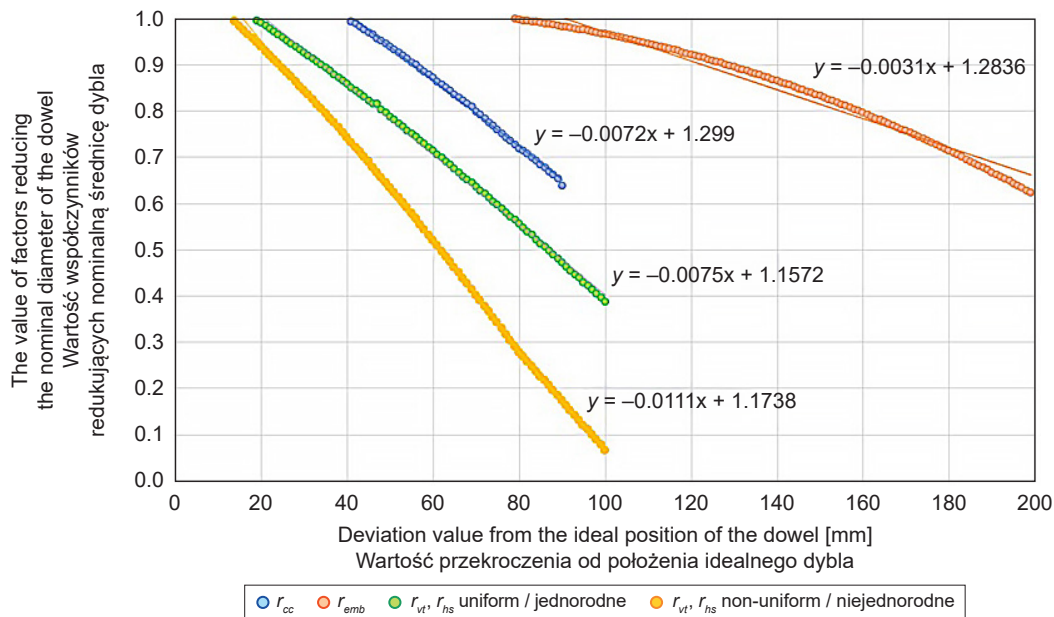


Fig. 1. Correction factors vs. the dowel deviation value from its ideal position in the expansion joint
Rys. 1. Zmiana wartości współczynników korekcyjnych w zależności od wartości przekroczenia dybla od jego idealnego położenia w szczelinie dylatacyjnej

It can be seen from the data shown in Fig. 1 that the parameter that is most sensitive to faulty performance is the rotation (r_{vt} and r_{hs}), followed by the elevation r_{cc} , and finally the horizontal displacement r_{emb} of the dowel relative to the expansion joint. The limits for the incorrect position of the dowels relative to the ideal state – for which the correction factors take values less than 1.000 – are 18 mm for rotation, 40 mm for height position, and 78 mm for horizontal displacement. In addition, it was noted that for values smaller than those shown, the correction factors take a value greater than 1.000, as indicated by the formulas used. According to the authors, a value equal to 1.000 should be taken in such cases, so as not to lead to a situation in which properly embedded dowels would increase the nominal diameter of the d_0 .

Z danych przedstawionych na Rys. 1 wynika, że najbardziej wrażliwym parametrem na błąd wykonawczy są obroty (r_{vt} i r_{hs}), następnie położenie wysokościowe r_{cc} , a na końcu przesunięcie poziome r_{emb} dybla względem szczeliny dylatacyjnej. Wartościami granicznymi dla nieprawidłowego położenia dybli względem stanu idealnego – dla których wartości współczynników korekcyjnych przyjmują wartości mniejsze niż 1,000 – jest 18 mm dla obrotów, 40 mm dla położenia wysokościowego oraz 78 mm dla przesunięcia poziomego. Dodatkowo zauważono, że dla wartości mniejszych niż przedstawione współczynniki korekcyjne przyjmują wartość większą niż 1,000, co wynika z zastosowanych wzorów. Zdaniem autorów w takich przypadkach należy przyjmować wartość równą 1,000, aby nie doprowadzać do sytuacji, w której prawidłowo wbudowane dyble zwiększałyby nominalną średnicę d_0 .

It is worth noting that the limit value of the elevation is the same for both the correction factor and the Polish *not accepted* range. However, for rotation and horizontal displacement, the limits of the correction factors are in the range *accepted with deductions*.

Calculations show that the safe value of rotations for which the nominal dowel diameter does not become reduced is ± 18 mm for uniform rotations and ± 13 mm for non-uniform rotations. At the same time, it can be seen from Fig. 1 that non-uniform rotations are much more likely to increase the risk of improper expansion joint operation, since the correction factors are reduced much more quickly than those for uniform rotations.

2.2. CONDITION OF MAXIMUM COMPRESSIVE STRESS IN CONCRETE UNDER A DOWEL

Dimensioning of dowels in cement concrete pavements involves checking the condition of maximum compressive stress in the concrete under the dowel and comparing it with the permissible value. It is assumed that the dowel is in an ideal geometric position in the expansion joint, and that the dowel's diameter, spacing, and Young's modulus influence the fulfilment of the above condition.

The procedure begins with calculating the radius of relative stiffness of the slab l . This parameter is very important because it determines the inflection points of the concrete slab deflection function [27]. According to Westergard's analysis [24], these points are located at a distance of $1.8 \cdot l$ from the point of force application. This determines the range and number of dowels working under load in such a way that a dowel directly under pressure has a load factor $\eta = 1$, while the neighbouring dowels demonstrate a proportionally smaller value as the distance from the acting force increases. Individual load factors η_i should be summed to determine the number of dowels interacting under load.

Knowing the number of interacting dowels for the case of calculating stresses at the edge of the concrete slab, it is necessary to determine the maximum force transmitted by the dowel to the adjacent slab P_t :

$$P_t = \frac{P \cdot \alpha}{\sum_{i=1}^n \eta_i}, \quad (20)$$

Warto zauważyć, że wartość graniczna położenia wysokościowego jest jednakowa dla współczynnika korekcyjnego, jak i polskiego przedziału *nie do odbioru*. Natomiast dla obrotów oraz przesunięcia poziomego wartości graniczne współczynników korekcyjnych zawierają się w przedziale *do odbioru z potrąceniami*.

Z obliczeń wynika, że bezpieczną wartością obrotów, dla których nie następuje jeszcze redukcja nominalnej średnicy dybla, jest wartość ± 18 mm dla obrotów jednolitych oraz ± 13 mm dla obrotów niejednolitych. Jednocześnie z Rys. 1 wynika, że obroty niejednolite dużo bardziej zwiększają ryzyko nieprawidłowej pracy szczeliny dylatacyjnej, ponieważ współczynniki korekcyjne dużo szybciej ulegają redukcji niż te dla obrotów jednolitych.

2.2. WARUNEK MAKSYMALNYCH NAPRĘŻEŃ ŚCISKAJĄCYCH W BETONIE POD DYBLEM

Wymiarowanie dybli w nawierzchniach z betonu cementowego polega na sprawdzeniu warunku maksymalnych naprężeń ściskających w betonie pod dyblem i porównaniu ich z wartością dopuszczalną. Zakłada się, że dybel znajduje się w idealnym położeniu geometrycznym w szczelinie dylatacyjnej, a na spełnienie powyższego warunku wpływa średnica, rozstaw oraz moduł Young'a dybla.

Procedurę rozpoczynają obliczenia promienia względnej sztywności płyty l . Parametr ten jest bardzo istotny, ponieważ wyznacza punkty przegięcia funkcji ugięcia płyty betonowej [27]. Zgodnie z analizą Westergarda [24] punkty te znajdują się w odległości $1,8 \cdot l$ od miejsca przyłożenia siły. W ten sposób określony zostaje zakres i liczba dybli pracujących pod obciążeniem w taki sposób, że dybel znajdujący się bezpośrednio pod naciskiem uzyskuje współczynnik obciążenia $\eta = 1$, natomiast sąsiednie dyble proporcjonalnie mniejszą wartość wraz ze wzrostem odległości od działającej siły. Znając poszczególne współczynniki obciążenia η_i należy je zsumować w celu wyznaczenia liczby dybli współpracujących pod obciążeniem.

Znając liczbę współpracujących dybli dla przypadku obliczenia naprężeń na krawędzi płyty betonowej, należy wyznaczyć maksymalną siłę przenoszoną przed dybel na sąsiednią płytę P_t :

$$P_t = \frac{P \cdot \alpha}{\sum_{i=1}^n \eta_i}, \quad (20)$$

where:

P – force caused by the pressure of the vehicle wheel [N],

α – coefficient of shear load transferred by dowels.

The shear load transferred by dowels depends on a number of parameters, such as geometry of the dowels, their spacing, slab thickness, or stiffness of the layers under the concrete slab, as well as on the initial conditions, i.e. thermal load, and magnitude of the cyclic load. Based on studies [28] the load transfer coefficient α is 0.4-0.5, while Polish recommendations [27] report a value of 0.5.

Then, using the formulas for a flexural beam on a one-parameter elastic foundation derived by Timoshenko [24], the deflection of a single dowel is determined y_0 :

$$y_0 = \frac{P_l \cdot (2 + \beta \cdot z)}{4 \cdot \beta^3 \cdot E_d \cdot I_d}, \quad (21)$$

where:

β – coefficient of relative stiffness of the dowel [1/mm],

z – joint opening [mm],

E_d – Young's modulus of the dowel material [MPa],

I_d – moment of inertia of the dowel section [mm⁴].

The coefficient of relative stiffness of the dowel β is determined by the formula:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K \cdot d}{4 \cdot E_d \cdot I_d}}, \quad (22)$$

where:

K – dowel support modulus [MPa/mm]; value in the range 83-415 MPa/mm [5],

d – dowel diameter [mm].

Compressive stress in concrete under the dowel σ_d [MPa] is expressed by the formula:

$$\sigma_d = K \cdot y_0. \quad (23)$$

Permissible bearing at the connection point of dowel and concrete f_b [MPa] is defined as:

$$f_b = \frac{4 - \phi}{3} \cdot f_c, \quad (24)$$

where:

f_c – guaranteed strength of concrete [MPa],

ϕ – rod/dowel diameter [in].

gdzie:

P – siła wywołana naciskiem koła pojazdu [N],

α – współczynnik przenoszenia obciążenia ścinającego przez dyble.

Obciążenie ścinające przenoszone przez dyble jest zależne od szeregu parametrów, takich jak geometria dybli, ich rozstaw, grubość płyty czy sztywność warstw pod płytą betonową, jak również od warunków początkowych, tj. obciążenia termicznego oraz wielkości cyklicznego obciążenia. Na podstawie badań [28] współczynnik przenoszenia obciążenia α wynosi 0,4-0,5, natomiast polskie zalecenia [27] podają wartość 0,5.

Następnie, korzystając ze wzorów dla belki zginanej na podłożu sprężystym jednoparametrowym wyprowadzonych przez Timoshenkę [24], wyznacza się ugięcie pojedynczego dybla y_0 :

$$y_0 = \frac{P_l \cdot (2 + \beta \cdot z)}{4 \cdot \beta^3 \cdot E_d \cdot I_d}, \quad (21)$$

gdzie:

β – współczynnik względnej sztywności dybla [1/mm],

z – rozwarcie szczeliny [mm],

E_d – moduł Younga materiału, z którego wykonano dybel [MPa],

I_d – moment bezwładności przekroju dybla [mm⁴].

Współczynnik względnej sztywności dybla β określa wzór:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K \cdot d}{4 \cdot E_d \cdot I_d}}, \quad (22)$$

gdzie:

K – moduł podparcia dybla [MPa/mm]; wartość w zakresie 83-415 MPa/mm [5],

d – średnica dybla [mm].

Naprężenia ściskające w betonie pod dyblem σ_d [MPa] wyraża wzór:

$$\sigma_d = K \cdot y_0. \quad (23)$$

Naprężenia dopuszczalne w połączeniu dybla z betonem f_b [MPa] określa się jako:

$$f_b = \frac{4 - \phi}{3} \cdot f_c, \quad (24)$$

gdzie:

f_c – wytrzymałość gwarantowana betonu [MPa],

ϕ – średnica pręta/dybla [cal].

Based on the above formula, the most commonly used dowel diameter in Poland, i.e. 1 in, achieves the compressive strength of concrete used on KR 5-7 roads as specified by class C 35/45 [29].

The final step is to compare the compressive stresses in the concrete under the dowel σ_d to the permissible bearing stresses at the connection point of dowel and concrete f_b :

$$\sigma_d \leq f_b. \quad (25)$$

When designing a road pavement structure, failure to meet the above condition will result in an increase in the dowel diameter or a decrease in the spacing between dowels.

2.3. PROPOSAL TO EVALUATE THE EFFECT OF DOWEL POSITION ON THE DAMAGE USING EQUIVALENT DIAMETER AND COMPRESSIVE STRESS UNDER THE DOWEL

The use of the equivalent diameter method d_{eq} makes it possible to partially estimate the effect of improper dowel position on the performance of cement concrete pavement. The reduced diameter value alone only gives an idea of the scale of the problem. However, using the calculated equivalent diameter d_{eq} to calculate the compressive stresses under the dowel σ_d and comparing the results with the permissible value f_b for the nominal diameter would provide a tool to assess the risk of damage to the concrete pavement over its service life. The procedure ignores fatigue issues [29] and tensile stresses resulting from, for example, thermal load [30, 31], but its primary purpose is to help contractors and supervisors with accepting cement concrete pavements with improperly embedded dowels, and not concrete slab dimensioning [32]. The scope of application of this method is much broader than the *Joint Score* determination procedure discussed in the paper [22], and in Poland, discussed in the paper [23], as it takes into account four of the five parameters of dowel position in the expansion joint, i.e., vertical displacement, horizontal displacement and rotation (compared to rotation alone, the basis for the *Joint Score*). Thus, the potential of the proposed tool for engineers to assess the problem of misplaced dowels in an expansion joint is much broader.

Checking the condition of permissible compressive stresses under the dowel allows to determine whether there is a risk of damage. Since there are two possible outcomes of this inequality – the fulfilment or non-fulfilment of the

Podstawiając do powyższego wzoru najczęściej stosowaną średnicę dybla w Polsce, tj. 1 in, osiąga się stosowaną na drogach KR 5-7 wytrzymałość na ściskanie betonu określoną klasą C 35/45 [29].

Ostatnim krokiem jest porównanie naprężeń ściskających w betonie pod dyblem σ_d do dopuszczalnych naprężeń w połączeniu dybla z betonem f_b :

$$\sigma_d \leq f_b. \quad (25)$$

Przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni drogowej, niespełnienie powyższego warunku skutkuje zwiększeniem średnicy dybla lub zmniejszeniem rozstawu między dyblami.

2.3. PROPOZYCJA OCENY WPŁYWU POŁOŻENIA DYBLI NA ZNISZCZENIE WYKORZYSTUJĄCA ŚREDNICĘ EKWIWALENTNĄ ORAZ NAPRĘŻENIA ŚCISKAJĄCE POD DYBLEM

Zastosowanie metody średnicy ekwiwalentnej d_{eq} pozwala częściowo oszacować wpływ nieprawidłowego położenia dybla na pracę nawierzchni z betonu cementowego. Sama wartość zredukowanej średnicy daje jedynie pogładową informację o skali problemu. Jednakże stosując obliczoną średnicę ekwiwalentną d_{eq} do obliczenia naprężeń ściskających pod dyblem σ_d i porównując uzyskane wyniki z wartością dopuszczalną f_b dla średnicy nominalnej, uzyskano by narzędzie pozwalające na ocenę ryzyka powstania zniszczeń w nawierzchni betonowej w okresie eksploatacji. Procedura pomija kwestie zmęczeniowe [29] oraz naprężenia rozciągające wynikające chociażby z obciążenia termicznego [30, 31], lecz jej podstawowym przeznaczeniem jest ułatwienie wykonawcom robót oraz nadzorom odbioru nawierzchni z betonu cementowego o niewłaściwie wbudowanych dyblach, nie zaś wymiarowanie płyt betonowych [32]. Zakres stosowania tej metody jest znacznie szerszy niż procedury wyznaczania *Joint Score*, omówionej w pracy [22] i w Polsce w pracy [23], ponieważ uwzględnia cztery z pięciu parametrów położenia dybli w szczelinie dylatacyjnej, tj. przesunięcie pionowe, poziome oraz obroty (w porównaniu z samymi obrotami, będącymi podstawą oceny *Joint Score*). Zatem potencjał proponowanego narzędzia dla inżynierów do oceny problemu niewłaściwego położenia dybli w szczelinie dylatacyjnej jest znacznie szerszy.

Sprawdzenie warunku dopuszczalnych naprężeń ściskających pod dyblem pozwala stwierdzić, czy istnieje ryzyko wystąpienia zniszczeń. Jako że istnieje dwa możliwe

condition – two solutions can be assumed. In the case of an analysis in which the condition is met and the compressive stresses under the dowel do not exceed the permissible value, it is assumed that improper installation of dowels is associated with a low risk of potential damage of the slabs, and in further steps the condition of the analysed joint should be monitored.

The second possible case is an analysis in which the condition is not met and the stresses σ_d are greater than the permissible f_b . In this case, the risk of damage to the slabs should be considered high and corrective measures should be undertaken to prevent damage and repair work during the pavement lifecycle.

To demonstrate the potential of the proposed methodology, Chapter 3 presents two field cases subjected to the presented analysis.

3. FIELD CASE ANALYSIS TOGETHER WITH EVALUATION OF DOWEL POSITION

3.1. CHARACTERISTICS OF THE PAVEMENT IN THE ANALYSED POSITIONS

In order to determine the suitability of the presented method for evaluating the effect of dowel position in the joint on the risk of damage to cement concrete pavement, two field cases (position A and B) along a selected expressway in Poland with slip-formed, dowelled, and anchored cement concrete pavement were considered. The cases were selected so that the values of the parameters describing the position of the dowels in the expansion joint would qualify them for the *not accepted* group according to the DPT-14 instruction [11]. It was therefore possible to assess the risk of damage of the analysed plates and propose the next corrective steps: further observation or implementation of a repair program.

Longitudinal expansion joints of the analysed two-lane road with an additional emergency lane were made at a spacing of 2.2 m + 3.9 m + 3.9 m, as seen from the emergency lane, and transverse expansion joints were made every 5.0 m. According to the design, the dowel spacing amounted to 0.25 m, and the anchors were positioned every 1.0 m. Dowels located within the footprint of the right wheel were numbered 3, 4 and 5 (Fig. 2). The layout of pavement construction layers is shown in Table 2.

rezultaty tej nierówności – spełnienie lub niespełnienie warunku – można założyć dwa rozwiązania. W przypadku analizy, w której warunek jest spełniony i naprężenia ściskające pod dyblem nie przekraczają wartości dopuszczalnej, przyjmuje się, że nieprawidłowe wbudowanie dybli wiąże się z niskim ryzykiem potencjalnego zniszczenia płyt i w dalszych krokach należy monitorować stan analizowanej szczeliny.

Drugi możliwy przypadek to analiza, w której warunek nie jest spełniony i naprężenia σ_d są większe od dopuszczalnych f_b . W tym wypadku należy uznać ryzyko zniszczenia płyt za wysokie i przedsięwziąć działania naprawcze, aby zapobiec zniszczeniom i robotom remontowym w okresie eksploatacji nawierzchni.

Aby zaprezentować potencjał zaproponowanej metodologii, w Rozdziale 3 przedstawiono dwa przypadki terenowe, które poddano przedstawionej analizie.

3. ANALIZA PRZYPADKÓW TERENOWYCH WRAZ Z OCENĄ POŁOŻENIA DYBLA

3.1. CHARAKTERYSTYKA NAWIERZCHNI W ANALIZOWANYCH LOKALIZACJACH

W celu określenia przydatności zaprezentowanej metody oceny wpływu położenia dybla w szczelinach na ryzyko powstania zniszczeń nawierzchni z betonu cementowego rozpatrzono dwa przypadki terenowe (lokalizacja A i B) w ciągu wybranej drogi ekspresowej w Polsce z nawierzchnią z betonu cementowego, wykonaną w technologii ślizgowej, dyblowanej i kotwionej. Przypadki wybrano tak, aby wartości parametrów opisujących położenie dybli w szczelinie dylatacyjnej kwalifikowały je do grupy *nie do odbioru* wg instrukcji DPT-14 [11]. Możliwa była zatem ocena ryzyka zniszczenia analizowanych płyt oraz zaproponowanie kolejnych kroków naprawczych: dalszych obserwacji lub wdrożenia programu naprawczego.

Szczeliny dylatacyjne podłużne analizowanej drogi dwupasowej z pasem awaryjnego postoju wykonano w rozstawie 2,2 m + 3,9 m + 3,9 m, patrząc od pasa awaryjnego, a poprzeczne – co 5,0 m. Zgodnie z projektem rozstaw dybli wynosił 0,25 m, a kotew 1,0 m. Dyble znajdujące się w obrębie śladu prawego koła oznaczono numerami 3, 4 i 5 (Rys. 2). Układ warstw konstrukcji nawierzchni przedstawiono w Tabl. 2. Parametry warstw nawierzchni,

The parameters of the pavement layers, i.e. Young's modulus and Poisson's ratio, as well as a design axle load of 115 kN and a contact pressure between the wheel and the pavement of 0.7 MPa, were assumed based on national technical regulations [33].

tj. moduł sprężystości Younga i współczynnik Poissona, jak również obciążenie osią obliczeniową 115 kN i ciśnienie kontaktowe między kołem a nawierzchnią wynoszące 0,7 MPa przyjęto na podstawie krajowych przepisów technicznych [33].

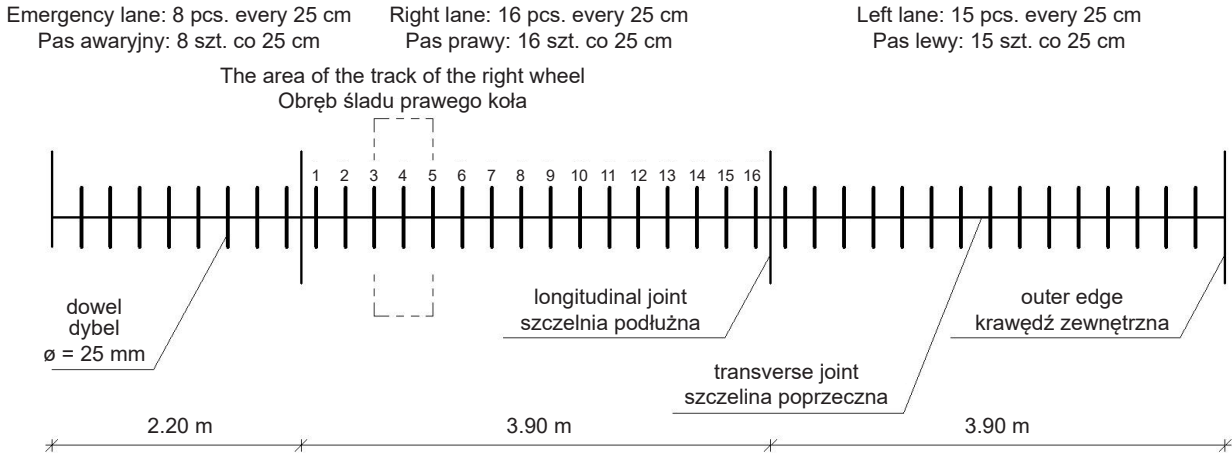


Fig. 2. Diagram of the location of dowels on the road under consideration
Rys. 2. Schemat położenia dybli na rozpatrywanej drodze

Table 2. Pavement structure in locations A and B
Tablica 2. Konstrukcja nawierzchni w lokalizacjach A i B

Pavement layer Warstwa nawierzchni	Material Materiał	Thickness [cm] Grubość	Modulus [MPa] Moduł	Poisson's ratio [-] Współczynnik Poissona
Surface course Nawierzchniowa	C 35/45 cement concrete Beton cementowy C 35/45	28	35.000	0.16
Slip layer Poślizgowa	Geotextile with a density of 450-550 g/cm ² Geowłóknina o gęstości 450-550 g/cm ²	0.2	–	–
Base course Podbudowa zasadnicza	C 8/10 cement bound mixture Mieszanka związana cementem C 8/10	20	3.000	0.3
Sub-base Podbudowa pomocnicza	C 5/6 cement bound mixture Mieszanka związana cementem C 5/6	15	2.000	0.3
Capping layer Warstwa wzmacniająca	Unbound mixture CBR > 35% Mieszanka niezwiązana o CBR > 35%	20	200	0.3
Subgrade Podłoże gruntowe	G1 Subgrade Podłoże G1	50	80	0.35

Based on the collected data, the radius of relative stiffness of the slab $l = 461.4$ mm was calculated using guidelines based on the experience of the United States Army Corps of Engineers [34]. The number of working dowels in the expansion joint of the pavement under consideration was then estimated. A diagram presenting the determination of this quantity is shown in Fig. 3. A maximum value of 415 MPa/mm was taken as the support modulus of the dowel K to check the most unfavourable design case.

Na podstawie zgromadzonych danych obliczono promień względnej sztywności płyty $l = 461,4$ mm, stosując wytyczne oparte na doświadczeniach Korpusu Inżynierskiego Armii Stanów Zjednoczonych [34]. Następnie oszacowano ilość pracujących dybli w szczelinie dylatacyjnej rozpatrywanej nawierzchni. Schemat wyznaczenia tej wielkości przedstawiono na Rys. 3. Za moduł podparcia dybla K przyjęto maksymalną wartość 415 MPa/mm w celu sprawdzenia najbardziej niekorzystnego przypadku obliczeniowego.

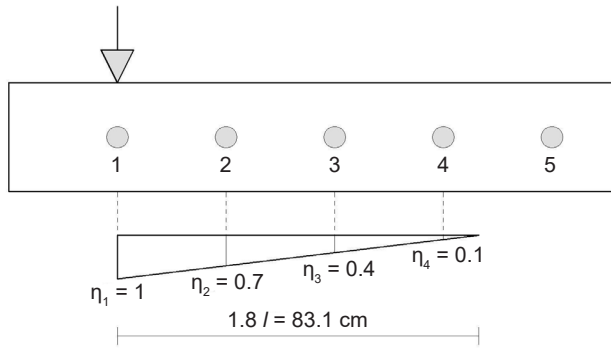


Fig. 3. Diagram for determining the number of working dowels on the road under consideration

Rys 3. Schemat wyznaczenia ilości pracujących dybli na rozpatrywanej drodze

3.2. CASE NO. 1

The case in question concerns one of the lanes at Location A. The dowel position tests were carried out with the MiT-Scan2-BT device, according to PORR S.A. archival data. The measurement is based on sending a weak magnetic signal by the measuring device, which induces an eddy current inside the steel dowel when it comes into contact with it. These currents generate instantaneous magnetic reflection signals, which, measured through receivers, are subject to further calculations, and the result is accurate information about the position of dowels in the expansion joint. The measurements started from the emergency lane, moving toward the separation lane. No damage was found on the analysed concrete slabs. The results showing the position of dowels in the expansion joint are shown in Table 3.

Based on the measurements of the dowel locations, the equivalent diameter d_{eq} was determined for the expansion joint at location A. Then, for the obtained value of the equivalent diameter, the maximum compressive stress under the dowel σ_d was calculated and compared with the permissible value f_b . The results of the calculations are shown in Table 4.

In the analysed expansion joint, there are fourteen dowels described by five parameters, which gives 70 values to consider. In 30 cases out of 70 (42.9%), the value belongs to the group of *accepted without deductions*, in 35 cases out of 70 (50%) the value belongs to the group of *accepted with deductions*, while in 5 cases out of 70 (7.1%) the value qualifies for the group of *not accepted*.

It is worth noting that within the footprint of the right wheel, only one dowel significantly overruns its vertical position,

3.2. PRZYPADK NR 1

Rozpatrywany przypadek dotyczy jednego z pasów ruchu w lokalizacji A. Badania położenia dybli przeprowadzono urządzeniem MiT-Scan2-BT, wg danych archiwalnych firmy PORR S.A. Pomiar opiera się na wysyłaniu przez urządzenie pomiarowe słabego sygnału magnetycznego, który w momencie kontaktu ze stalowym dyblem indukuje prąd wirowy w jego wnętrzu. Prądy te generują chwilowe sygnały odbicia magnetycznego, które zmierzone poprzez odbiorniki podlegają dalszym obliczeniom, a rezultatem jest dokładna informacja o położeniu dybli w szczelinie dylatacyjnej. Pomiar rozpoczął się od pasa awaryjnego, przemieszczając się w kierunku pasa rozdziału. Na analizowanych płytach betonowych nie stwierdzono zniszczeń. Wyniki położenia dybli w szczelinie dylatacyjnej przedstawiono w Tabl. 3.

Table 3. Alignment of dowels in the expansion joint at location A
Tablica 3. Położenie dybli w szczelinie w lokalizacji A

Nr dybla Dowel no.	x_o [mm]	d_z [mm]	d_y [mm]	m_h [mm]	m_v [mm]
1	239	15	64	17	-8
2	249	21	57	44	2
3	265	27	55	23	4
4	244	32	68	25	15
5	248	43	73	23	-16
6	223	30	61	15	10
7	233	25	49	12	11
8	221	19	76	8	23
9	218	18	70	15	25
10	245	22	65	14	42
11	261	16	62	15	48
12	253	9	54	21	27
13	261	23	75	42	14
14	264	25	72	28	12
Number of dowels to be accepted Ilość dybli do odbioru	14	5	1	3	7
Number of dowels to be accepted with deductions Ilość dybli do odbioru z potrąceniami	0	8	13	9	5
Number of not acceptable dowels Ilość dybli nie do odbioru	0	1	0	2	2

while the rotation does not reach significant values. Therefore, the compressive stresses under the dowel σ_d do not exceed the permissible bearing stresses f_b , which qualifies it as a low risk group in terms of concrete slab damage.

Table 4. Results of calculations of equivalent diameter and compressive stress under the dowel in the expansion joint at location A
Tablica 4. Wyniki obliczeń średnicy ekwiwalentnej d_{eq} i naprężeń ściskających pod dyblem σ_d w szczelinie dylatacyjnej w lokalizacji A

Parameter Parametr	Value Wartość
r_{emb} – due to dowel support error r_{emb} – z uwagi na błąd podparcia dybla	1.000
r_{cc} – due to elevation error r_{cc} – z uwagi na błąd położenia wysokościowego	1.000
r_{vt} – due to vertical rotation error r_{vt} – z uwagi na błąd obrotu pionowego	0.923
r_{ht} – due to horizontal rotation error r_{ht} – z uwagi na błąd obrotu poziomego	0.958
d_{eq} – equivalent diameter [mm] d_{eq} – średnica ekwiwalentna	22.11
Number of working dowels Liczba pracujących dybli	2.2
Maximum force transmitted in front of the dowel to the adjacent panel P_t [N] Maksymalna siła przenoszona przed dybel na sąsiednią płytę P_t	13.068
Moment of inertia of the dowel cross-section with equivalent diameter I_{deg} [mm ⁴] Moment bezwładności przekroju dybla o średnicy ekwiwalentnej I_{deg}	11730.7
Coefficient of relative stiffness of the dowel β [1/mm] Współczynnik względnej sztywności dybla β	0.031
Deflection of a single dowel y_0 [mm] Ugięcie pojedynczego dybla y_0	0.094
Compressive stress under dowel σ_d [MPa] Naprężenia ściskające pod dyblem σ_d	39.02
Permissible bearing stresses f_b [MPa] Naprężenia dopuszczalne f_b	45.00

3.3. CASE NO. 2

The case under consideration concerns one of the lanes at Location B. Semicircular cracks in the concrete slab at the expansion joint were found there. Failures occur in the footprint of the left and right wheels, but their course varies. The width of the cracks varies from 0.6 mm to 0.8 mm. Due to the inability to take a core sample, it cannot be determined whether the crack runs across the full thickness of the slab. Fig. 4 shows a top view of the cracked slabs.

Na podstawie pomiarów położenia dybli wyznaczono średnicę ekwiwalentną d_{eq} dla szczeliny dylatacyjnej w lokalizacji A. Następnie dla uzyskanej wartości średnicy ekwiwalentnej obliczono maksymalne naprężenia ściskające pod dyblem σ_d i porównano je z wartością dopuszczalną f_b . Wyniki obliczeń przedstawiono w Tabl. 4.

W analizowanej szczelinie dylatacyjnej znajduje się czternaście dybli opisanych pięcioma parametrami, co daje 70 wartości do rozpatrzenia. W 30 przypadkach z 70 (42,9%) wartość należy do grupy *odbiór bez potrąceń*, w 35 przypadkach z 70 (50%) wartość należy do grupy *odbiór z potrąceniami*, zaś w 5 przypadkach z 70 (7,1%) wartość kwalifikuje się do grupy *nie do odbioru*.

Warto zauważyć, że w obrębie śladu prawego koła tylko jeden dybel ma znaczne przekroczenie położenia pionowego, natomiast obroty nie osiągają znaczących wartości. Dlatego naprężenia ściskające pod dyblem σ_d nie przekraczają naprężeń dopuszczalnych f_b , co kwalifikuje go do niskiej grupy ryzyka wystąpienia zniszczenia płyt betonowych.

3.3. PRZYPADK NR 2

Rozpatrywany przypadek dotyczy jednego z pasów ruchu w lokalizacji B. Stwierdzono tam półkoliste pęknięcia płyty betonowej przy dylatacji. Uszkodzenia występują w śladzie lewego i prawego koła, ale ich przebieg jest różnorodny. Szerokość pęknięć jest zmienna w przedziale od 0,6 mm do 0,8 mm. Z uwagi na brak możliwości pobrania próbki rdzeniowej nie można stwierdzić, czy pęknięcie obejmuje pełną grubość płyty. Na Rys. 4 przedstawiono widok z góry spękanych płyt.

Badania położenia dybli przeprowadzono urządzeniem MiT-Scan2-BT na pasie, w którym stwierdzono występowanie pęknięć. Wyniki położenia dybli w szczelinie dylatacyjnej przedstawiono w Tabl. 5.

Dane wskazują, że dyble pograżono za głęboko i znajdują się one poniżej środka wysokości przekroju płyty. Natomiast stwierdzone ekstremalne obroty poziome, tj. wartości 56 mm i 154 mm (ślad prawego koła) oraz -178 mm, 98 mm i -55 mm (ślad lewego koła) występują dokładnie w miejscu pęknięć. Niejednorodne obroty są szczególnie niebezpieczne dla pracy płyt betonowych [26]. Zatem można założyć, że uszkodzenie ma związek z wystąpieniem obrotów poziomych.

Dowel position tests were conducted with the MiT-Scan2-BT device along the lane where the cracks were found. The results showing the position of dowels in the expansion joint are shown in Table 5.

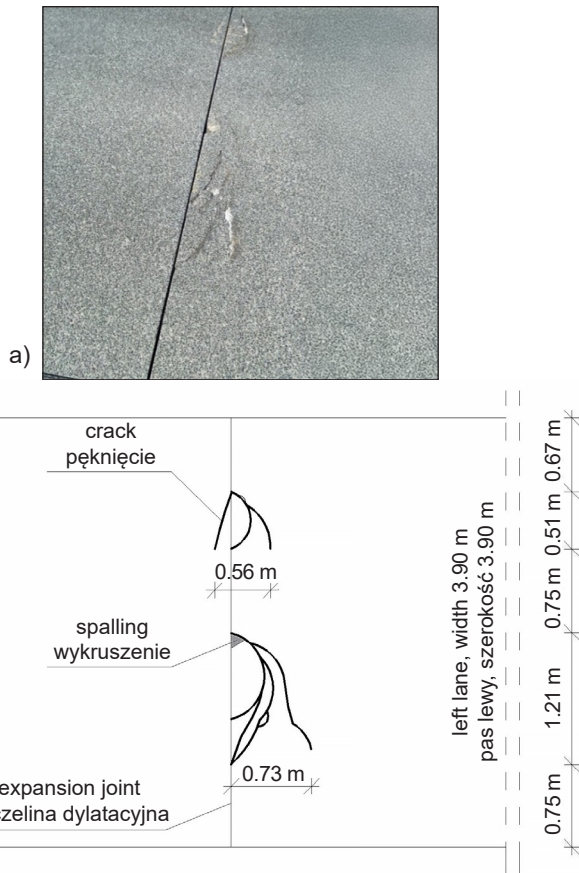


Fig. 4. Top view of the case in question (a) and the damage diagram (b)

Rys. 4. Widok z góry omawianego przypadku (a) oraz schemat zniszczeń (b)

The data shows that the dowels were plunged too deep and are below the centre of the height of the slab cross-section. On the other hand, the extreme horizontal rotations found, i.e. in the values of 56 mm and 154 mm (right wheel footprint) and of -178 mm, 98 mm and -55 mm (left wheel footprint), occur exactly at the site of the cracks. Heterogeneous rotations are particularly dangerous for the operation of concrete slabs [26]. Therefore, it can be assumed that the damage is related to the occurrence of horizontal rotation.

Based on the measurements of the dowel locations, the equivalent diameter d_{eq} was determined for the expansion joint at location B. Then, for the obtained value of the equivalent diameter, the maximum compressive stress

Table 5. Location of dowels in the crack at location B
Tablica 5. Położenie dybli w szczelinie w lokalizacji B

Nr dybla Dowel no.	x_o [mm]	d_z [mm]	d_y [mm]	m_h [mm]	m_v [mm]
1	246	18	-25	0	4
2	255	20	-23	1	2
3	262	20	-38	-19	-2
4	239	18	-31	-13	-3
5	241	22	-31	56	-3
6	245	22	12	-1	4
7	259	29	-14	2	-4
8	260	17	13	154	-5
9	247	21	-11	1	3
10	249	16	-4	11	-2
11	248	25	-15	14	-5
12	254	13	-13	-178	0
13	243	24	-6	98	-2
14	236	13	22	-55	2
Number of dowels to be accepted Ilość dybli do odbioru	14	8	14	8	14
Number of dowels to be accepted with deductions Ilość dybli do odbioru z potrąceniami	0	6	0	1	0
Number of not acceptable dowels Ilość dybli nie do odbioru	0	0	0	5	0

Na podstawie pomiarów położenia dybli wyznaczono średnicę ekwiwalentną d_{eq} dla szczeliny dylatacyjnej w lokalizacji B. Następnie dla uzyskanej wartości średnicy ekwiwalentnej obliczono maksymalne naprężenia ściskające pod dyblem σ_d i porównano je z wartością dopuszczalną f_b . Wyniki obliczeń przedstawiono w Tabl. 6.

W analizowanej szczelinie dylatacyjnej znajduje się czternaście dybli opisanych pięcioma parametrami, co daje 70 wartości do rozpatrzenia. W 58 przypadkach z 70 (82.9%) wartość należy do grupy *odbiór bez potrąceń*, w 7 przypadkach z 70 (10%) do grupy *odbiór z potrąceniami*, zaś w 5 przypadkach z 70 (7.1%) – do grupy *nie do odbioru*.

under the dowel σ_d was calculated and compared with the permissible value f_b . The results of the calculations are shown in Table 6.

In the analysed expansion joint, there are fourteen dowels described by five parameters, which gives 70 values to consider. In 58 cases out of 70 (82.9%), the value belongs to the group of *accepted without deductions*, in 7 cases out of 70 (10%) to the group of *accepted with deductions*, while in 5 cases out of 70 (7.1%) to the group of *not accepted*.

It is worth noting that within the footprint of the right wheel, one dowel significantly overruns the rotation range, which is the most unfavourable situation according to the earlier analysis. In addition, significant overruns of horizontal rotation range in the rest of the joint contributed to the fact that the compressive stresses under the dowel σ_d exceeded the permissible stresses f_b , which qualifies the crack for the high risk group of concrete slab failure – which indeed occurred in this case.

4. CONCLUSIONS

Based on the analysis, the following conclusions were made:

- The method of calculating the equivalent diameter d_{eq} allows analysing the impact of dowel position parameters in the expansion joint (i.e., vertical displacement, horizontal displacement, and horizontal and vertical rotation) as a superposition of four types of deviations from the ideal position.
- Incorrect positions of dowels in the right wheel path (location B) are much more dangerous than incorrect positions of dowels located outside the zone most heavily loaded by traffic (location A).
- The proposed assessment of dowel position in the joint is a much more practical approach to the problem of misplaced dowels than the assessment provided in the acceptance manual currently in use in Poland, which exclusively classifies dowels into three groups without analysing the impact of their position on the potential performance of concrete slabs.
- Relating the calculated equivalent diameter d_{eq} to the compressive stress condition allows the development of a method for assessing the effect of dowel position on the risk of potential slab damage over its lifecycle.

Table 6. Results of calculations of equivalent diameter and compressive stress under the dowel in the expansion joint at location B

Tablica 6. Wyniki obliczeń średnicy ekwiwalentnej d_{eq} i naprężeń ściskających pod dyblem σ_d w szczelinie dylatacyjnej w lokalizacji B

Parameter Parametr	Value Wartość
r_{emb} – due to dowel support error r_{emb} – z uwagi na błąd podparcia dybla	1.000
r_{cc} – due to elevation error r_{cc} – z uwagi na błąd położenia wysokościowego	1.000
r_{vt} – due to vertical rotation error r_{vt} – z uwagi na błąd obrotu pionowego	1.000
r_{ht} – due to horizontal rotation error r_{ht} – z uwagi na błąd obrotu poziomego	0.481
d_{eq} – equivalent diameter [mm] d_{eq} – średnica ekwiwalentna	12.03
Number of working dowels Liczba pracujących dybli	2.2
Maximum force transmitted in front of the dowel to the adjacent panel P_t [N] Maksymalna siła przenoszona przed dybel na sąsiednią płytę P_t	13 068
Moment of inertia of the dowel cross-section with equivalent diameter I_{deq} [mm ⁴] Moment bezwładności przekroju dybla o średnicy ekwiwalentnej I_{deq}	1 028.9
Coefficient of relative stiffness of the dowel β [1/mm] Współczynnik względnej sztywności dybla β	0.049
Deflection of a single dowel y_0 [mm] Ugięcie pojedynczego dybla y_0	0.282
Compressive stress under dowel σ_d [MPa] Naprężenia ściskające pod dyblem σ_d	116.98
Permissible bearing stresses f_b [MPa] Naprężenia dopuszczalne f_b	45.00

Warto zauważyć, że w obrębie śladu prawego koła jeden dybel wykazuje znaczne przekroczenie obrotu, co zgodnie z wcześniejszą analizą jest najbardziej niekorzystną sytuacją. Dodatkowo znaczne przekroczenia obrotów poziomych w pozostałej części szczeliny przyczyniły się do tego, że naprężenia ściskające pod dyblem σ_d przekroczyły naprężenia dopuszczalne f_b , co kwalifikuje szczelinę do wysokiej grupy ryzyka wystąpienia zniszczenia płyt betonowych – w tym wypadku miało to miejsce.

- Due to the low complexity of the calculations, the presented procedure may prove to be a valuable tool for road managers when deciding what to do next with road sections where inaccuracies in dowel positions have been found.
- The authors performed a series of tests and calculations using the proposed procedure for about a hundred cases of expansion joints, over the range of five expressway pavements, with promising results. However, in order to better calibrate the proposed procedure, it would be necessary to apply it to other cases of improper dowel position and to compare the results obtained with the condition of cement concrete pavements in service.

ACKNOWLEDGEMENTS

The proposal for assessing the position of dowels included in the article is the result of work as part of the first author's doctoral thesis at the Industrial Doctoral School of the Gdańsk University of Technology.

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] *Szydło A.*: Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego: teoria, wymiarowanie, realizacja. Polski Cement, Kraków, 2004
- [2] *Griffiths G., Thom N.*: Concrete Pavement Design Guidance Notes. Taylor & Francis, Londyn, 2007
- [3] *Huang Y.H.*: Pavement analysis and design. Pearson, Upper Saddle River, 2004
- [4] *Delatte N.J.*: Concrete pavement design, construction, and performance. CRC Press, Boca Raton, 2014
- [5] *Glinicki M.A.*: Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2019
- [6] Federal Aviation Administration: Airport Pavement Design and Evaluation, 2021, www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentnumber/150_5320-6, available: 08.10.2024
- [7] *Khazanovich L.*: Dowel and Tie Bars in Concrete Pavement Joints: Theory and Practice, 2011, www.academia.edu/32476025/Dowel_and_Tie_Bars_in_Concrete_Pavement_Joints_Theory_and_Practice_2nd_International_Conference_on_Best_Practices_for_Concrete_Pavements, available: 01.06.2024
- [8] *Maitra S.R., Reddy K.S., Ramachandra L.S.*: Load transfer characteristics of dowel bar system in jointed concrete pavement. Journal of Transportation Engineering, **135**, 11, 2009, 813-821, DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000065

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano następujące wnioski:

- Metoda obliczenia średnicy ekwiwalentnej d_{eq} pozwala na analizę wpływu parametrów położenia dybli w szczelinie dylatacyjnej (tj. przesunięcia pionowego, poziomego oraz obrotów poziomych i pionowych) jako superpozycję czterech rodzajów odchyień od idealnego położenia.
- Nieprawidłowe położenie dybli w śladzie prawego koła (lokalizacja B) jest dużo bardziej niebezpieczne niż niepoprawnie ułożone dyble znajdujące się poza strefą najbardziej obciążoną ruchem (lokalizacja A).
- Proponowana ocena położenia dybla w szczelinie jest dużo praktyczniejszym podejściem do problemu nieprawidłowego położenia dybli niż ocena zamieszczona w instrukcji odbiorowej obecnie stosowanej w Polsce, która wyłącznie klasyfikuje dyble do trzech grup bez analizy wpływu ich położenia na potencjalną pracę płyt betonowych.
- Powiązanie obliczonej średnicy ekwiwalentnej d_{eq} z warunkiem naprężeń ściskających pozwala na wypracowanie metody oceny wpływu położenia dybli na ryzyko potencjalnych zniszczeń płyt w okresie eksploatacji.
- Ze względu na niewielki stopień skomplikowania obliczeń przedstawiona procedura może okazać się wartościowym narzędziem dla zarządców dróg przy podejmowaniu decyzji co do dalszych działań z odcinkami dróg, na których stwierdzono niedokładności w położeniu dybli.
- Autorzy wykonali serię badań i obliczeń, wykorzystując zaproponowaną procedurę dla około stu przypadków szczelin dylatacyjnych, w zakresie pięciu nawierzchni dróg ekspresowych, osiągając obiecujące wyniki. Jednakże w celu lepszego skalibrowania zaproponowanej procedury należałoby ją zastosować w innych przypadkach nieprawidłowego położenia dybli i zestawić uzyskane wyniki ze stanem nawierzchni z betonu cementowego w eksploatacji.

INFORMACJE DODATKOWE

Zaproponowana w artykule koncepcja oceny położenia dybli jest wynikiem przeprowadzonych badań w ramach pracy doktorskiej pierwszego autora w Szkole Doktor- skiej Wdrożeniowej Politechniki Gdańskiej.

- [9] *Singh A., Chandrappa A.K.*: Effect of Uniform Vertical and Longitudinal Dowel Misalignment in Jointed Plain Concrete Pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **16**, 2023, 1047-1058, DOI: 10.1007/s42947-022-00178-7
- [10] *Khazanovich L., Hoegh K.*: Guidelines for Dowel Alignment in Concrete Pavements, Appendix A: Review of literature and other relevant information. Transportation Research Board, Minneapolis, 2009, onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_637appendixa.pdf, available: 01.06.2024
- [11] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad: Instrukcja DP-T 14 Ocena jakości na drogach krajowych, Część I – Roboty drogowe. Warszawa, 2020, <https://www.gov.pl/web/gddkia/instrukcje>, dostęp: 02.03.2024
- [12] *Seo Y., Kim S.M.*: Longitudinal cracking at transverse joints caused by dowel bars in Jointed Concrete Pavements. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **17**, 2, 2013, 395-402, DOI: 10.1007/s12205-013-2047-5
- [13] *Grosek J., Zuzulova A., Brezina I.*: Effectiveness of dowels in concrete pavement. *Materials*, **12**, 10, 2019, 1669, DOI: 10.3390/MA12101669
- [14] *Graczyk M., Gajewski M., Szczerba R.*: Analiza statyczna dyblowanej betonowej nawierzchni lotniskowej z uwzględnieniem zjawiska curlingu płyt. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **15**, 2, 2016, 137–155. DOI: 10.7409/rabdim.016.009
- [15] *Khazanovic L., Hoegh K., Snyder M.B.*: NCHRP Report 637: Guidelines for Dowel Alignment in Concrete Pavements. The National Academies Press, Washington, 2009, DOI: 10.17226/14249
- [16] *Yaqoob S., Silfwerbrand J., Balieu R.G.R.*: A Parametric Study Investigating the Dowel Bar Load Transfer Efficiency in Jointed Plain Concrete Pavement Using a Finite Element Model. *Buildings*, **14**, 4, 2024, 1039, DOI: 10.3390/buildings14041039
- [17] *Hu C., Ma J., Yu Y., Luo Y.*: Optimal design on dowel length for cement concrete pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **9**, 6, 2016, 414-423, DOI: 10.1016/j.ijprt.2016.10.003
- [18] *Saxena P., Gotlif A., Khazanovich L.*: Guidelines for Dowel Alignment in Concrete Pavements, Appendix D – Finite element analysis, Transportation Research Board, Minneapolis 2009, onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_637appendixd.pdf, available: 12.02.2024
- [19] *Al-Humeidawi B.H., Mandal P.*: Evaluation of performance and design of GFRP dowels in jointed plain concrete pavement – part 1: Experimental investigation. *International Journal of Pavement Engineering*, **15**, 5, 2014, 449-459, DOI: 10.1080/10298436.2013.824081
- [20] *Daćko M., Brodzik R.*: Selection of parameters of dowelling connections in concrete airport pavement. *Archives of Civil Engineering*, **58**, 1, 2012, 115-130, DOI: 10.2478/v.10169-012-0007-y
- [21] *Bukowski L.*: Podsumowanie i rekomendacje prac grupy roboczej powołanej do wypracowania dalszego postępowania w sprawie nieprawidłowo wbudowanych dybli, 2022
- [22] American Concrete Pavement Association: Dowel Bar Alignment and Location, 2018, www.acpa.org/wp-content/uploads/2020/07/18-11-15-ACPA-Dowel-Alignment-Guide-Spec.pdf, available: 06.02.2024
- [23] *Łazarowicz M.*: Opłacalność wykonywania nawierzchni betonowych w świetle kar za nieprawidłowe położenie dybli i kotew. *Magazyn Autostrady*, **6**, 2021, 46-49
- [24] *Snyder M.B.*: Guide to Dowel Load Transfer Systems for Jointed Concrete Roadway Pavements, National Concrete Pavement Technology Center, Ames, 2011, cdn-wordpress.webspec.cloud/intrans.iastate.edu/uploads/2018/08/Dowel-load-guide.pdf, available: 04.04.2024
- [25] *Voigt G.F., Ferrebee E.*: Best Practices for Jointed Concrete Pavements: Dowel Basket Anchoring Methods. Federal Highway Administration, Washington, 2016, www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif16021.pdf, available: 03.03.2024
- [26] *Łazarowicz M., Krzemiński J., Jaskuła P.*: Ocena wpływu wybranych parametrów materiałowych i technologicznych dybli na zachowanie nawierzchni z betonu cementowego. *Inżynieria i Budownictwo*, **79**, 11-12, 2023, 594-598, DOI: 10.5604/01.3001.0054.1357
- [27] *Szydło A., Mackiewicz P., Wardęga R., Krawczyk B.*: Aktualizacja katalogu typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych – Etap II. Raport serii SPR 24/2012. Politechnika Wrocławska, Wrocław, 2012, www.archiwum.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/p/prace-naukowo-badawcze-w-trakcie_3434/KTKNS_Etap%20II_15-low%20v09.04.2013.pdf, dostęp 11.11.2023
- [28] *Tabatabaie-Raissi A.M.*: Structural Analysis of Concrete Pavement Joints, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1978
- [29] *Mackiewicz P., Szydło A.*: The analysis of stress concentration around dowel bars in concrete pavement. *Magazine of Concrete Research*, **72**, 2, 2020, 97-107, DOI: 10.1680/jmacr.18.00057
- [30] *Mackiewicz P.*: Finite-element analysis of stress concentration around dowel bars in jointed plain concrete pavement. *Journal of Transportation Engineering*, **141**, 6, 2015, 1-8, DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000768
- [31] *Panchmatia P., Glinicki M.A., Olek J.*: Wpływ składu mieszanki na właściwości termiczne betonu oraz parametry funkcjonalne nawierzchni sztywnych. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **13**, 3, 2014, 235–260, DOI: 10.7409/rabdim.014.016

- [32] *Ryś D., Jaskuła P., Jaczewski M., Pszczoła M.*: Wdrożenie i ocena metody M-EPDG do analizy trwałości polskich typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i sztywnych. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **18**, 4, 2019, 283–302, DOI: 10.7409/rabdim.019.019
- [33] *Szydło A., Mackiewicz P., Wardęga R., Krawczyk B.*: Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 2014
- [34] *Barker W.R., Alexander D.R.*: Determining the Effective Modulus of Subgrade Reaction for Design of Rigid Airfield Pavements Having Base Layers. U.S. Army Engineer Research and Development Center, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, 2012, erdc-library.erdc.dren.mil/server/api/core/bitstreams/81b728f8-89b0-4ef8-e053-411ac80adeb3/content, available: 04.03.2024