



ANTONI SZYDŁO

Politechnika Wroclawska
antoni.szydlo@pwr.edu.pl



PIOTR MACKIEWICZ

Politechnika Wroclawska
piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl

Nawierzchnie betonowe w Polsce – doświadczenia przy projektowaniu i eksploatacji

Do końca lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku rozwój technologii nawierzchni drogowych w Polsce koncentrował się głównie na nawierzchniach asfaltowych. Nawierzchnie betonowe realizowane były sporadycznie na małych odcinkach i powierzchniach, głównie na lotniskach, placach postojowych oraz drogach zakładowych.

Zainteresowanie nawierzchniami betonowymi wzrosło dopiero, gdy w połowie lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku zaobserwowano nagminne zjawisko powstawania kolein w nawierzchniach asfaltowych. Liczba publikacji i podręcz-

ników w Polsce z zakresu nawierzchni betonowych nie jest imponująca. W 1935 roku powstały pierwsze „Wytyczne budowy nawierzchni betonowych” opracowane w Drogowym Instytucie Badawczym w Warszawie. Pierwszy podręcznik z nawierzchni betonowych autorstwa E. Bratro pt. „Betonowe nawierzchnie drogowe” został wydany przez Związek Polskich Fabryk Portland Cementu w 1939 roku. W dalszym etapie pojawiły się podręczniki dotyczące nawierzchni lotniskowych zawierające wybrane elementy projektowania i wykonawstwa nawierzchni betonowych: Z. Łopatek „Projektowanie konstrukcji nawierzchni lotniskowych” – podręcznik wydany przez Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej w 1967 roku oraz S. Kozieł „Lotniskowe nawierzchnie betonowe” – podręcznik wydany przez Wydawnictwa Komunikacji i Łączności w 1972 roku. W 1983 roku Wydawnictwa Komunikacji i Łączności wydały kolejny podręcznik pt. „Nowoczesne nawierzchnie betonowe” autorstwa nestora

polskiego drogownictwa Stefana Rolli. W tym samym roku Państwowe Wydawnictwa Naukowe wydały książkę Czesława Lewinowskiego pt. „Wymiarowanie konstrukcji jezdni drogowych z betonu cementowego”. W 2001 roku został wydany „Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztucznych” a w 2004 roku ukazała się książka A. Szydło „Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria wymiarowanie, realizacja” wydana przez Polski Cement [10]. W 2005 roku ukazała się pozycja autorstwa A. Szydło, P. Mackiewicza „Nawierzchnie betonowe na drogach gminnych” [11]. W 2014 roku został zweryfikowany i zaktualizowany „Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztucznych” [13].

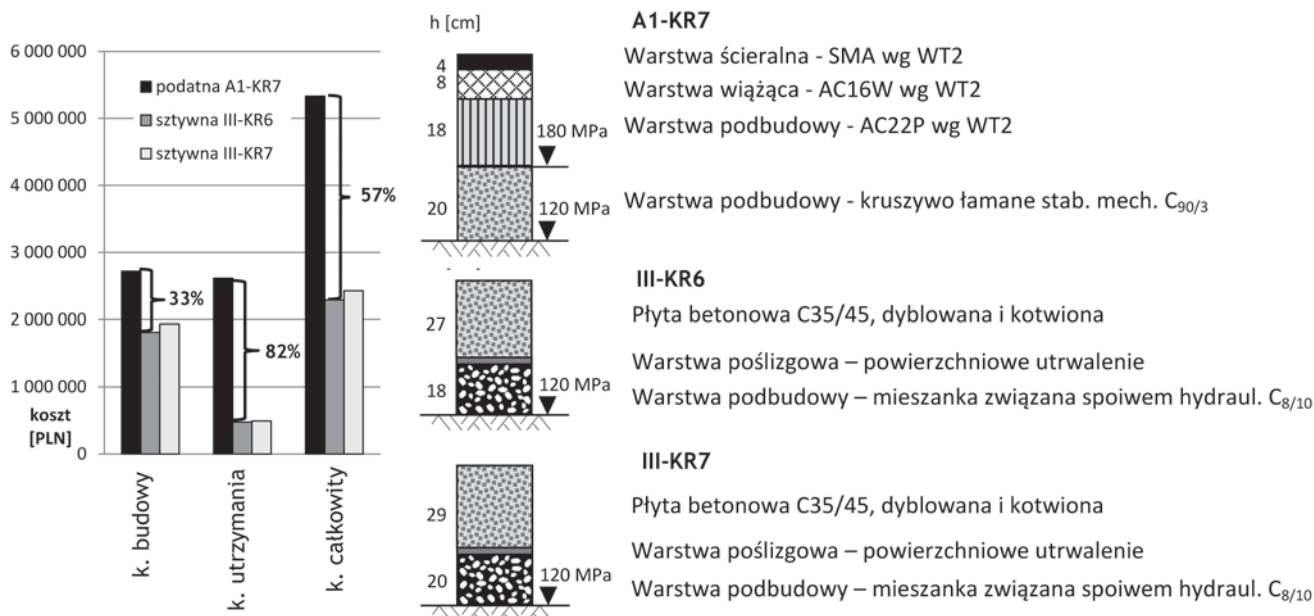
Pierwsze odcinki o nawierzchni betonowej realizowano na autostradzie A4. W 1995 roku dokonano przebudowy odcinka Krzywa – Krzyżowa o długości 17 km stosując recykling starej nawierzchni betonowej (fot. 1).

W dalszym etapie przebudowano odcinek A4 Wrocław – Krzyżowa – 92 km (2002 r.), a następnie odcinek A4 – Krzyżowa – Zgorzelec – 50 km (2010). W 2009 roku wybudowano odcinek A18 Krzywa – Olszyna – 60 km. Natomiast pod koniec 2011 roku oddano do eksploatacji odcinek autostradowy w Polsce na autostradzie A2 o długości ok. 106 km, na którym warstwa wierzchnia została wykonana w technologii „odkrytego kruszywa”, w celu poprawienia warunków ruchowych oraz zmniejszenia poziomu hałasu. W 2012 roku przebudowano i wybudowano drogę S8 na długości 160 km. Obecnie nawierzchnie dróg betonowych stosowane są także na drogach niższych klas, także na drogach gminnych [11].

Nawierzchnie betonowe charakteryzują się m.in. wysokim bezpieczeństwem związanym z jasną kolorystyką oraz dobrymi własnościami przeciwpoślizgowymi. Uwzględniając zarówno koszty budowy, jaki i późniejszego utrzymania, posiadają zdecydowaną przewagę nad innymi typami



Fot. 1. Recykling starej nawierzchni betonowej – Krzywa – Krzyżowa A4 – 17 km



Rys. 1. Koszty budowy i utrzymania najczęściej budowanych w Polsce nawierzchni, 2015 r. [12]

nawierzchni w okresie 20–30-letnim. Na rysunku 1 przedstawiono interpretację graficzną obliczeń kosztów budowy i utrzymania nawierzchni podatnych i sztywnych, najczęściej aktualnie budowanych w Polsce, na podstawie cen z roku 2015 ([12]). Można zauważyć, że koszty budowy i utrzymania nawierzchni betonowych są znacznie niższe (o ok. 30%) niż podatnych. Jeszcze większe różnice występują przy kosztach utrzymania na korzyść nawierzchni betonowych. Całkowity koszt jest niższy o ok. 50%. Warto zaznaczyć, że w przypadku nawierzchni betonowych wymagana jest jedynie wymiana uszczelnień szczelin podłużnych i poprzecznych (co 8–9 lat). Zakres uszkodzeń płyt jest nieznaczny i wynosi około 5% po 20 latach.

Zasady doboru typowych nawierzchni

Konstrukcję nawierzchni z betonu cementowego tworzy zespół warstw ułożonych na naturalnym lub ulepszonym

podłożu gruntowym. Na rysunku 2 pokazano kompletny układ warstw konstrukcji nawierzchni sztywnych. Warstwy górne konstrukcji nawierzchni stanowi warstwa nawierzchniowa (płyta dyblowana i kotwiona, niedyblowana, zbrojona), warstwa poślizgowa i podbudowa zasadnicza. Mają one podstawowe znaczenie w przenoszeniu obciążeń od ruchu drogowego. Warstwy te dobierane są w zależności od kategorii ruchu oraz od typu podbudowy zasadniczej. Natomiast dolne warstwy konstrukcji nawierzchni, warstwa podbudowy pomocniczej i warstwa mrozochronna, stanowią „fundament” dla warstw górnych konstrukcji nawierzchni.

Warstwy te dobierane są w zależności od grupy nośności podłoża gruntowego i od wymaganej nośności na powierzchni dolnych warstw konstrukcji nawierzchni. Warstwa mrozochronna może pełnić także funkcję warstwy odsączającej. Konstrukcja nawierzchni spoczywa na podłożu gruntowym nawierzchni. W razie potrzeby podłożo gruntowe nawierzchni może być wzmocnione przez wykonanie na jego górnej powierzchni warstwy ulepszanego podłoża.



Rys. 2. Schemat warstw konstrukcji nawierzchni sztywnych oraz warstwy ulepszanego podłoża

Punktem wyjścia w procedurze katalogowej [13] doboru konstrukcji nawierzchni jest określenie ruchu projektowego przypadającego na pas obliczeniowy. Określa go się dla dwóch wartości osi standardowych. Wybór osi standardowych (115 kN lub 100 kN) do wyznaczenia kategorii ruchu nie jest bezpośrednio związany z wymaganiami maksymalnych dopuszczalnych nacisków. Zaleca się jednak powiązać wartość osi standardowej z dopuszczalnym naciskiem w przypadku danej drogi publicznej. Przykładowa zależność dla osi 100 kN:

$$N_{100} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot (N_C \cdot r_C^{100} + N_{C+P} \cdot r_{C+P}^{100} + N_A \cdot r_A^{100}) \quad (1)$$

w której:

N_{100} – ruch projektowy, sumaryczna liczba osi standardowych 100 kN w całym okresie projektowym nawierzchni przypadająca na pas obliczeniowy,

N_A, N_C, N_{C+P} – ruch rzeczywisty, sumaryczna liczba autobusów (A), samochodów ciężarowych bez przyczep (C), samochodów ciężarowych z przyczepami oraz ciągników siodłowych z naczepami (C+P) w całym okresie projektowym, w przekroju drogi,

$r_A^{100}, r_C^{100}, r_{C+P}^{100}$ – współczynnik przeliczeniowy liczby autobusów (A), samochodów ciężarowych bez przyczep (C), samochodów ciężarowych z przyczepami oraz ciągników siodłowych z naczepami (C+P) na liczbę osi standardowych 100 kN,

f_1, f_2, f_3 – współczynnik obliczeniowego pasa ruchu, szerokości pasa ruchu, pochylenia niwelety.

Tabela 1. Współczynniki przeliczeniowe pojazdów ciężkich na osie standardowe 100 kN i 115 kN [13]

Lp.	Rodzaje pojazdów	Przykładowe typy sylwetek pojazdów	Współczynnik przeliczeniowy r	
			Oś standardowa 100 kN	Oś standardowa 115 kN
1.	Samochody ciężarowe bez przyczep C		0,347	0,130
2.	Samochody ciężarowe z przyczepami oraz ciągniki siodłowe z naczepami C+P		3,946	1,483
3.	Autobusy A		0,530	0,199

Tabela 2. Klasyfikacja ruchu projektowego (30 lat) [13]

Kategoria ruchu	N_{100} – sumaryczna liczba osi standardowych 100 kN w całym okresie projektowym (30 lat) [milion osi 100 kN na pas obliczeniowy]	N_{115} – sumaryczna liczba osi standardowych 115 kN w całym okresie projektowym (30 lat) [milion osi 115 kN na pas obliczeniowy]
KR1	$0,045 < N_{100} \leq 0,15$	$0,017 < N_{115} \leq 0,06$
KR2	$0,15 < N_{100} \leq 0,75$	$0,06 < N_{115} \leq 0,28$
KR3	$0,75 < N_{100} \leq 6,39$	$0,28 < N_{115} \leq 2,40$
KR4	$6,39 < N_{100} \leq 15,99$	$2,40 < N_{115} \leq 6,00$
KR5	$15,99 < N_{100} \leq 42,63$	$6,00 < N_{115} \leq 16,00$
KR6	$42,63 < N_{100} \leq 101,25$	$16,00 < N_{115} \leq 38,00$
KR7	$N_{100} > 101,25$	$N_{115} > 38,00$

Tabela 3. Typowe konstrukcje górnych warstw nawierzchni sztywnych. Podbudowa zasadnicza: mieszanka niezwiązana z kruszywa $C_{90/3}$ [13]

Kategoria ruchu	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	$\leq 0,15$	0,15 - 0,75	0,75 - 6,39	6,39 - 15,99	15,99 - 42,63	42,63 - 101,25	$> 101,25$
Ruch projektowy (mln osi 115 kN)	$\leq 0,06$	0,06 - 0,28	0,28 - 2,40	2,40 - 6,00	6,00 - 16,00	16,00 - 38,00	$> 38,00$
Typ I							
	niedyblowana	niedyblowana	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona
Legenda:	warstwa nawierzchniowa z betonu cementowego warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki niezwiązanej z kruszywa $C_{90/3}$ wymagany wtórny moduł odkształcenia E_2						

Należy zwrócić uwagę, że sumaryczna liczba pojazdów podawana jest w całym projektowanym okresie eksploatacji. Wymagane jest zatem przeprowadzenie prognozy ruchu w przypadku danej drogi na okres 30 lat. Współczynniki przeliczeniowe pojazdów ciężkich związane są z agresywnością ich oddziaływania na nawierzchnię. Zostały opracowane na podstawie analizy danych ze stacji ważenia pojazdów w drogach krajowych w Polsce w ostatnich 4 latach. Uwzględniają one zróżnicowanie pojazdów pod względem konfiguracji osi i obciążenia.

W tabeli 1 zamieszczono wartości współczynników dotyczące osi 100 kN i 115 kN. Znajomość osi standardowych pozwala projektantowi określić kategorię ruchu od KR1 do KR7. W tabeli 2 zamieszczono klasyfikację ruchu dotyczącą okresu 30 lat.

W dalszym etapie projektowania określa się warunki gruntowe i wodne. Na ich podstawie wyznacza się grupę nośności podłoża (G1–G4) i przyjmuje się odpowiednie wzmocnienie. Istotnym elementem jest zapewnienie wymaganej nośności na powierzchni dolnych warstw konstrukcji

Tabela 4. Typowe konstrukcje górnych warstw nawierzchni sztywnych. Podbudowa zasadnicza: beton asfaltowy [13]

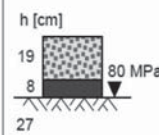
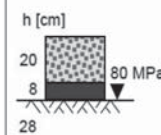
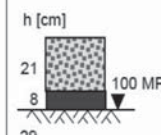
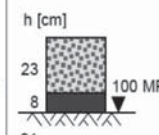
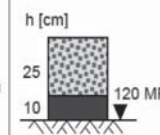
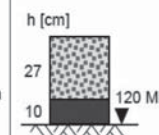
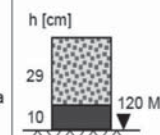
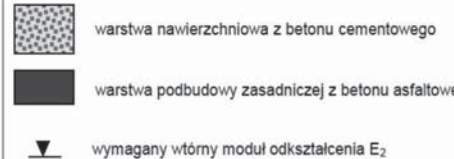



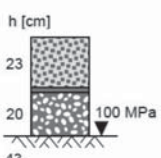
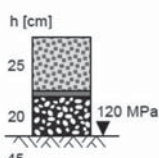
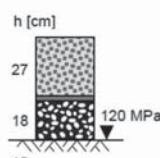
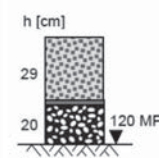
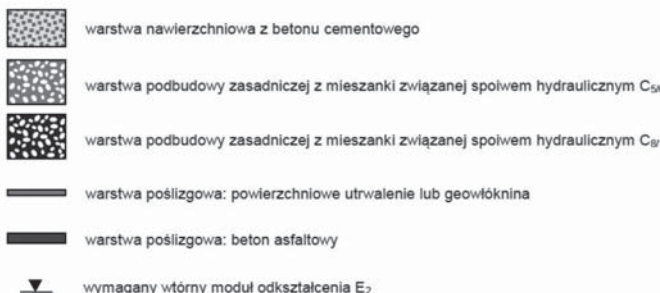






Kategoria ruchu	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	≤ 0,15	0,15 - 0,75	0,75 - 6,39	6,39 - 15,99	15,99 - 42,63	42,63 - 101,25	> 101,25
Ruch projektowy (mln osi 115 kN)	≤ 0,06	0,06 - 0,28	0,28 - 2,40	2,40 - 6,00	6,00 - 16,00	16,00 - 38,00	> 38,00
Typ II							
	niedyblowana	niedyblowana	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona
Legenda:	 <ul style="list-style-type: none">  warstwa nawierzchniowa z betonu cementowego  warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego  wymagany wtórny moduł odkształcenia E_2 						

Tabela 5. Typowe konstrukcje górnych warstw nawierzchni sztywnych. Podbudowa zasadnicza: mieszanka związana spoiwem hydraulicznym $C_{5/16}$, $C_{8/10}$ [13]

Kategoria ruchu	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7
Ruch projektowy (mln osi 100 kN)	≤ 0,15	0,15 - 0,75	0,75 - 6,39	6,39 - 15,99	15,99 - 42,63	42,63 - 101,25	> 101,25
Ruch projektowy (mln osi 115 kN)	≤ 0,06	0,06 - 0,28	0,28 - 2,40	2,40 - 6,00	6,00 - 16,00	16,00 - 38,00	> 38,00
Typ III	-	-	-				
	-	-	-	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona	dyblowana i kotwiona
Legenda:	 <ul style="list-style-type: none">  warstwa nawierzchniowa z betonu cementowego  warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki związanej spoiwem hydraulicznym $C_{5/16}$  warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki związanej spoiwem hydraulicznym $C_{8/10}$  warstwa posilzgowa: powierzchniowe utwardzenie lub geowłóknina  warstwa posilzgowa: beton asfaltowy  wymagany wtórny moduł odkształcenia E_2 						
	-	-	-	o ciągłym zbrojeniu	-	-	-

nawierzchni. Określa się ją na podstawie wartości wtórnego modułu odkształcenia E_2 , wyznaczonego z badania płytą pod naciskiem statycznym (dla KR1-2 wymaga się 80 MPa, dla KR3-4, 100 MPa, a dla KR5-7, 120 MPa)

Wybór górnych typowych konstrukcji dobiera się w zależności od rodzaju podbudowy i kategorii ruchu (tab. 3–5). Podbudowa zasadnicza może być wykonana z mieszanek niezwiązanych ($C_{50/30}$, $C_{90/3}$), betonu asfaltowego, mieszanek związanych spoiwami hydraulicznymi ($C_{5/6}$, $C_{8/10}$), gruntów stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi ($C_{3/4}$, $C_{5/6}$).

W przypadku kategorii ruchu KR1 i KR2 stosuje się płytę betonową niedyblowaną, natomiast w przypadku kategorii KR3, KR4, KR5, KR6 oraz KR7 należy zastosować dyble w szczelinach poprzecznych oraz kotwy w szczelinach podłużnych. W przypadku konstrukcji nawierzchni o ruchu KR7 i podbudowie z mieszanki związanej spoiwem hydraulicznym można zastosować także płytę betonową o zbrojeniu ciągłym, bez szczelin dylatacyjnych. W przypadku nawierzchni o układzie jednowarstwowym lub dwuwarstwowym w technologii klasycznego teksturowania należy wykonać warstwy „mokre na mokre” z tej samej mieszanki betonowej. W końcowym etapie doboru konstrukcji sprawdza się warunek odporności na wysadzinę uwzględniając kategorię podłoża, kategorię ruchu oraz głębokość przemarzania w zależności od rejonu w Polsce.

Typowe rodzaje nawierzchni betonowych

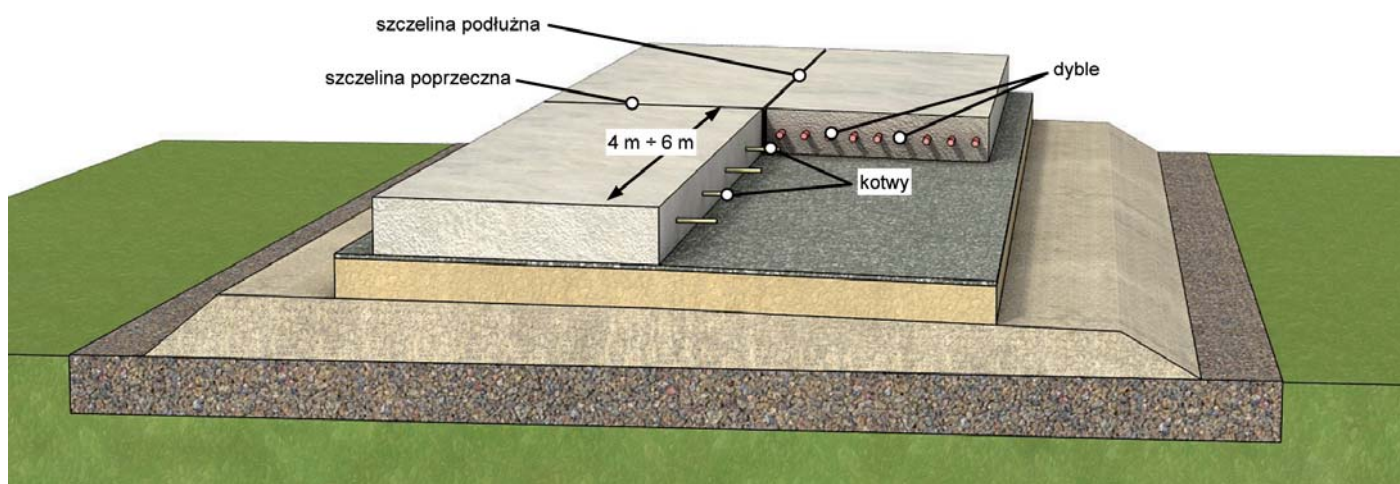
Najbardziej popularną nawierzchnią w przypadku ruchu większego niż KR3 są nawierzchnie dyblowane i kotwione. W tych nawierzchniach w celu zapewnienia właściwej współpracy płyt w szczelinach, pod wpływem zwiększonego obciążenia stosuje się dyble (szczeliny poprzeczne) oraz kotwy (szczeliny podłużne). Poza dyblami na współpracę mają także wpływ inne czynniki związane z podparciem płyty betonowej, zamocowaniem dyble i oddziaływaniem czynników degradujących szczeliny [6], [9], [14]. W Katalogu w obliczeniach przyjęto płytę betonową z dyblami o rozstawie co 25 cm (średnica $\Phi 25$ mm, długość $l = 50$ cm),

kotwy o rozstawie co 100 cm (średnica $\Phi 20$ mm, długość $l = 80$ cm). Dobór tych parametrów powinien zapewnić właściwą współpracę płyt betonowych. Przy indywidualnym doborze dybli uwzględnia się ich rozstaw oraz średnicę. W obliczeniach analizuje się liczbę dybli biorących udział przy przeniesieniu obciążenia z jednej płyty na drugą oraz warunki naprężeń w betonie pod dyblem, a także wokół niego, w celu zapewnienia współpracy płyt na poziomie 80% [4], [5]. Na rysunku 3 pokazano typowy schemat nawierzchni dyblowanej i kotwionej.

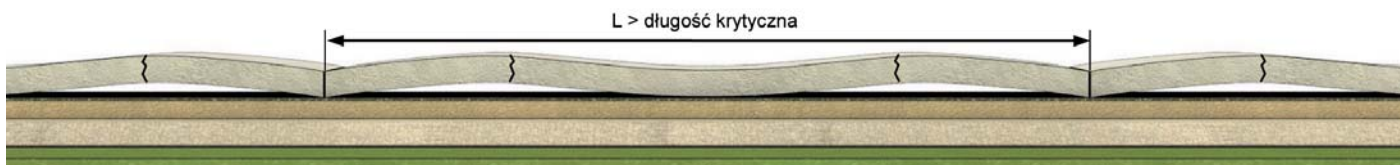
Ze względu na to, że beton wykazuje wrażliwość na działanie wpływów termicznych oraz wilgotnościowych, w celu redukcji tych wpływów w nawierzchniach betonowych stosuje się system szczelin podłużnych i poprzecznych. Rozstaw szczelin w płycie jest uzależniony od tzw. długości krytycznej płyty L_{kryt} . Należy przestrzegać, aby wymiary płyt betonowych w planie (a tym samym rozstawy szczelin) nie przekraczały wymaganej długości. Przykładowo, w przypadku płyty o grubości 25 cm należy zachować maksymalne odległości szczelin około 5,0 m. Jest to związane z oddziaływaniem temperatury na płytę. W katalogu na podstawie pomiarów terenowych przeprowadzono wnikliwe analizy oddziaływania zmian dobowych temperatury na deformację i stan naprężeń w płycie. Na rysunkach 4–5 pokazano odkształcalność płyt długich i krótkich w zależności od oddziaływania temperatury. W przypadku płyt krótkich, ciężar nie powoduje powstawania znacznych naprężeń termicznych.

Jeżeli górna powierzchnia płyty ma wyższą temperaturę od dolnej, to płyta ma tendencję do wyginania się ku górze, ale wskutek ciężaru własnego oraz skrępowania największe naprężenia rozciągające powstają na dolnej powierzchni płyty. Jeżeli natomiast dolna powierzchnia płyty ma wyższą temperaturę od górnej, to płyta ma tendencję do odkształcania się ku dołowi i wtedy największe naprężenia wskutek ciężaru własnego pojawiają się na górnej powierzchni. Oddziaływanie temperatury ma także istotny wpływ na naprężenia pojawiające się w betonie wokół dybli [3], [8].

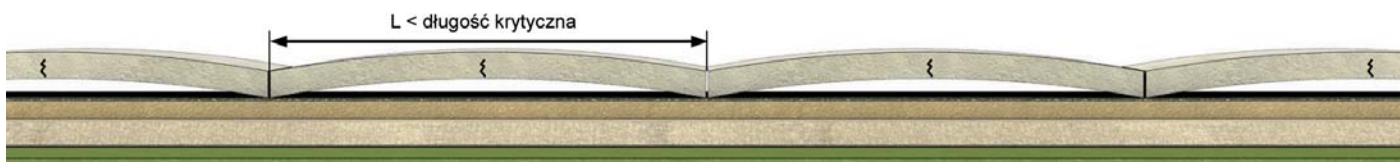
Mniej wrażliwa na oddziaływania termiczne jest nawierzchnia betonowa o ciągłym zbrojeniu (rys. 6). Ten typ



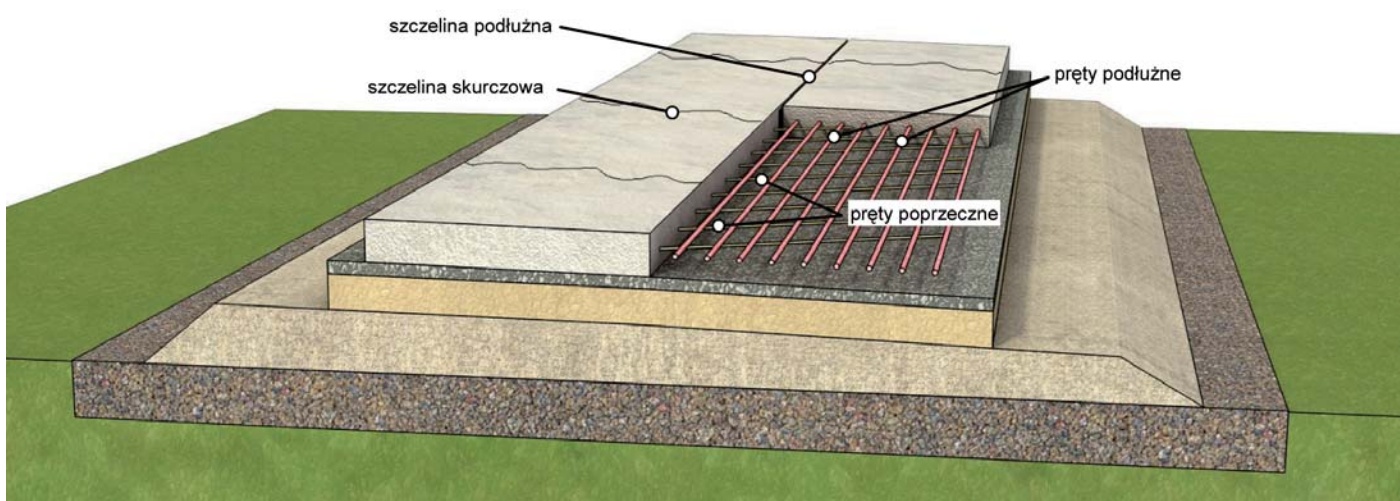
Rys. 3. Schemat nawierzchni dyblowanej z betonu cementowego



Rys. 4. Schemat odkształcenia płyt długich



Rys. 5. Schemat odkształcenia płyt krótkich



Rys. 6. Schemat nawierzchni betonowej o ciągłym zbrojeniu

nawierzchni w Katalogu charakteryzuje się zbrojeniem: pręty poprzeczne o średnicy $\Phi 12$ mm i rozstawie co 70 cm (układane pod kątem 65°) oraz pręty podłużne o średnicy $\Phi 20$ mm i rozstawie co 18 cm (układane na zakładkę 70 cm). Na fotografii 2 pokazano typowy układ zbrojenia.

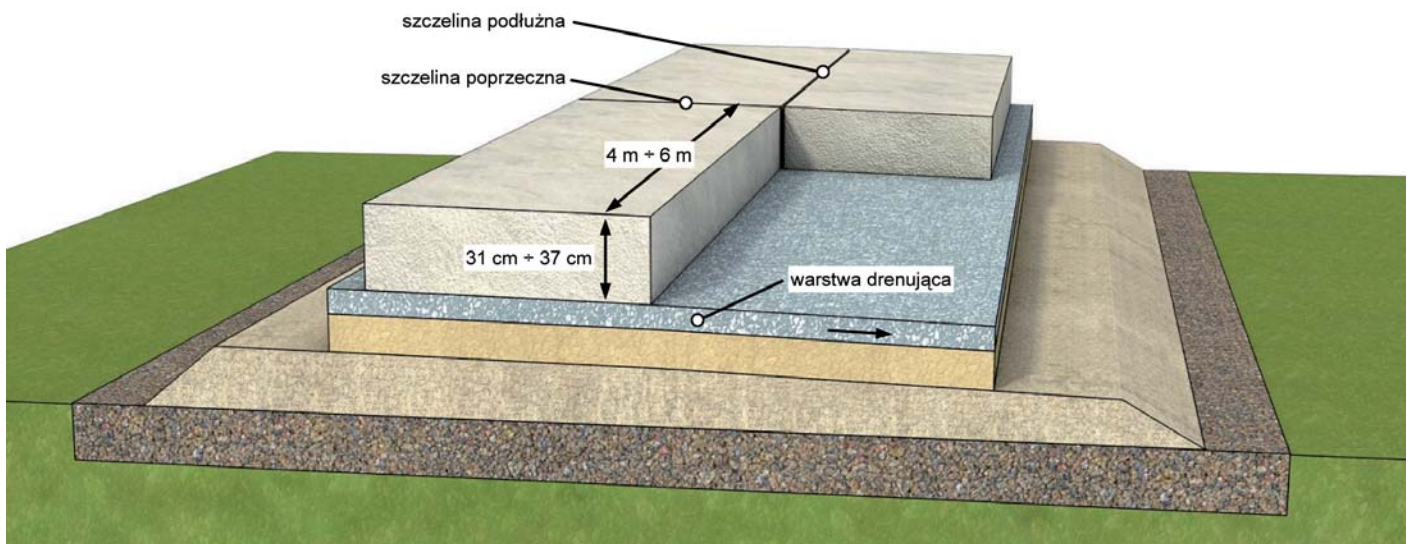


Fot. 2. Układ zbrojenia przy budowie autostrady A4

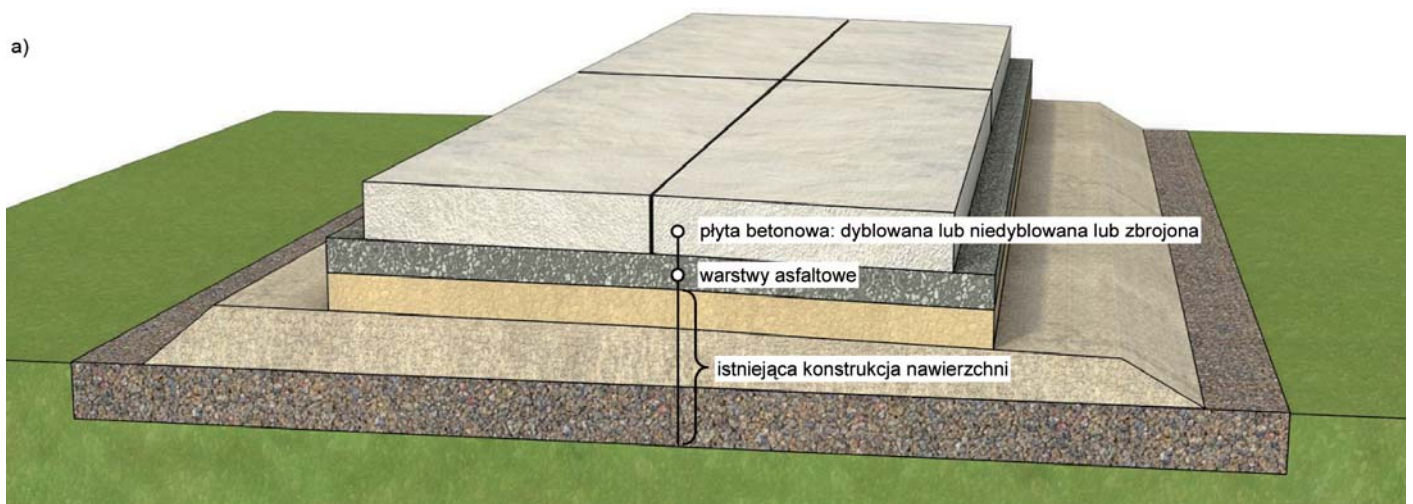
W Polsce wybudowano dwa eksperymentalne odcinki nawierzchni o ciągłym zbrojeniu na autostradzie A4 oraz A2, oba mają długość po ok. 1 km. Zachowują się bez zarzutu. W Europie stosowane są także inne typy nawierzchni betonowych. Przykładem może być płyta gruba (rys. 7), stosowana we Francji.

Układa się ją bezpośrednio na warstwie drenującej z kruszywa lub geowłókniny, bez stosowania podbudowy. Płyta gruba jest mniej wrażliwa na wpływy termiczne, odkształcenia, zmniejsza się w niej skurcz z uwagi na większe siły tarcia o podłoże oraz naprężenia. Wymagane jest jednak dobre odwodnienie pod płytą i odprowadzenie wody poza obręb jezdni. Zgodnie z wymaganiami francuskimi stosuje się płyty o grubości od 31 do 37 cm, przy czym stosuje się zmienną grubość płyty (do 10 cm różnicy) w przekroju poprzecznym. Ma to swoje uzasadnienie z uwagi na większe obciążenie prawej krawędzi jezdni, wywierane przez pojazdy ciężarowe. Taki typ nawierzchni zastosowano na autostradzie A4 na długości 1300 m. zachowuje się bez zarzutu.

Warto wyróżnić także nawierzchni złożone (mieszane) – rysunek 8. Dominują w typowych nawierzchniach w Anglii.



Rys. 7. Schemat nawierzchni betonowej – płyta gruba



Rys. 8. Schematy nawierzchni złożonych (mieszanych): a) whitetopping; b) blacktopping

Mogą być stosowane w przypadku wzmacniania istniejących nawierzchni asfaltowych lub betonowych.

Wykańczanie górnej powierzchni płyty betonowej

Po ułożeniu górnej warstwy nawierzchni należy wygładzić powierzchnię i nadać jej odpowiednią teksturę. Na górnej powierzchni powstaje zaprawa piaskowa (rys. 9), która w pierwszym etapie eksploatacji nawierzchni decyduje o szorstkości nawierzchni ([10]). Wykończenie górnej powierzchni przez nadanie nawierzchni odpowiedniej tekstury jest ważnym problemem związanym z bezpieczeństwem ruchu z uwagi na szczepność koła z nawierzchnią oraz szybkie odprowadzenie wody z nawierzchni. Tekstura istotnie wpływa także na wywoływanie hałasu w trakcie ruchu pojazdów.

Teksturowanie w celu uzyskania odpowiednio szorstkiej nawierzchni można przeprowadzić następującymi metodami: przeciąganie tkaniny jutowej w kierunku podłużnym do kierunku jazdy, przecieranie w kierunku prostopadłym do kierunku jazdy świeżo ułożonej mieszanki betonowej stalową szczotką, rowkowanie poprzeczne za pomocą widełek metalowych (rzadziej stosowane), opóźnianie hydratacji

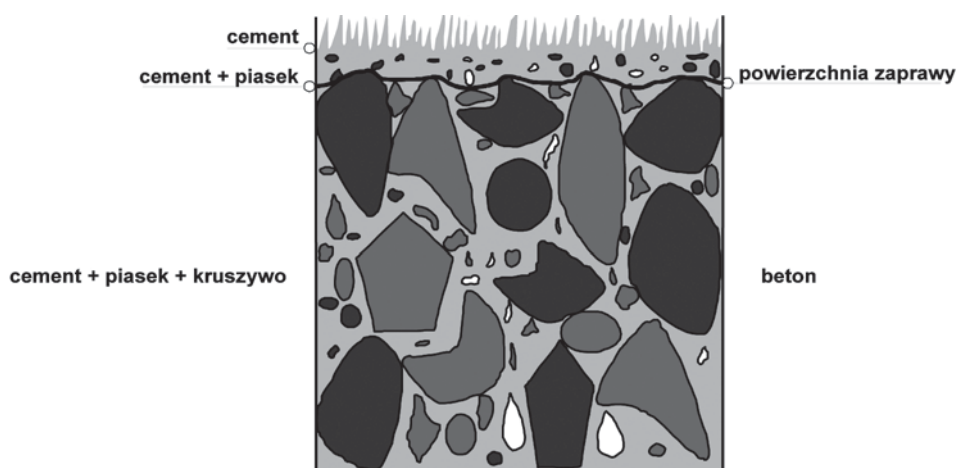
cementu w górnej warstwie świeżo ułożonej nawierzchni (np. przy użyciu glukozy) a następnie wyptukanie niezwiązanej warstwy zaprawy cementowej strumieniem wody lub wyszczotkowanie.

Każdy z wymienionych sposobów posiada szczególne zalety i wady. Przeciąganie juty jest najtańszym sposobem, jednakże uzyskuje się najmniejszą teksturę powierzchni rzędu 0,2 do 0,6 mm. Trwałość tego typu zabiegu wynosi 1–3 lat. Sposób ten ma również zalety. Tak wyprofilowana powierzchnia powoduje obniżenie głośności nawierzchni ok. 1–2 db. Szczotkowanie nawierzchni za pomocą szczotek w kierunku poprzecznym daje większą teksturę w granicach 1–1,5 mm. Jednakże zwiększa się hałas. Zaletą tego sposobu jest stosunkowo szybkie odprowadzenie wody w kierunku poprzecznym oraz duży współczynnik szczelności koła z nawierzchnią. Trwałość zabiegu wynosi 3 do 5 lat.

W USA w ostatnich latach coraz popularniejszą metodą wykańczania (i poprawy) powierzchni nawierzchni betonowych jest rowkowanie i szlifowanie przy użyciu tarcz diamentowych (*diamond grinding and grooving*, fot. 3, [7]). Metoda ta polega na wykonaniu (wycięciu) w nawierzchni dwóch typów podłużnych rowków. Badania wykazały, że metoda ta pozwala na znaczną poprawę przyczepności, przy jednoczesnej poprawie równości (IRI) i znacznym spadku poziomu generowanego przez pojazdy hałasu.

Warto zwrócić uwagę na technologię zwaną ekspozycją kruszywa lub teksturą płuکانego betonu. Mimo iż pierwsze eksperymenty realizowano w USA, to znaczny rozwój i skuteczne opracowanie technologii „odkrytego kruszywa” miało miejsce w Europie. Badania przeprowadzone w Europie jednoznacznie potwierdziły skuteczność tej technologii w obniżaniu poziomu hałasu [2]).

Na podstawie pierwszych badań w Austrii od roku 1990 określano wymagania technologiczne dotyczące wymaganej średnicy ziaren oraz zawartości frakcji kruszywa stosowanego w nawierzchniach betonowych. W dalszym etapie rozwinęto technologię odkrytego



Rys. 9. Przekrój nawierzchni w strefie przypowierzchniowej [10]



Fot. 3. Rowkowanie i szlifowanie diamentowe (*diamond grinding and grooving*), [7]



Fot. 4. Przykład nawierzchni w technologii odkrytego kruszywa realizowanej na autostradzie A2 w Polsce

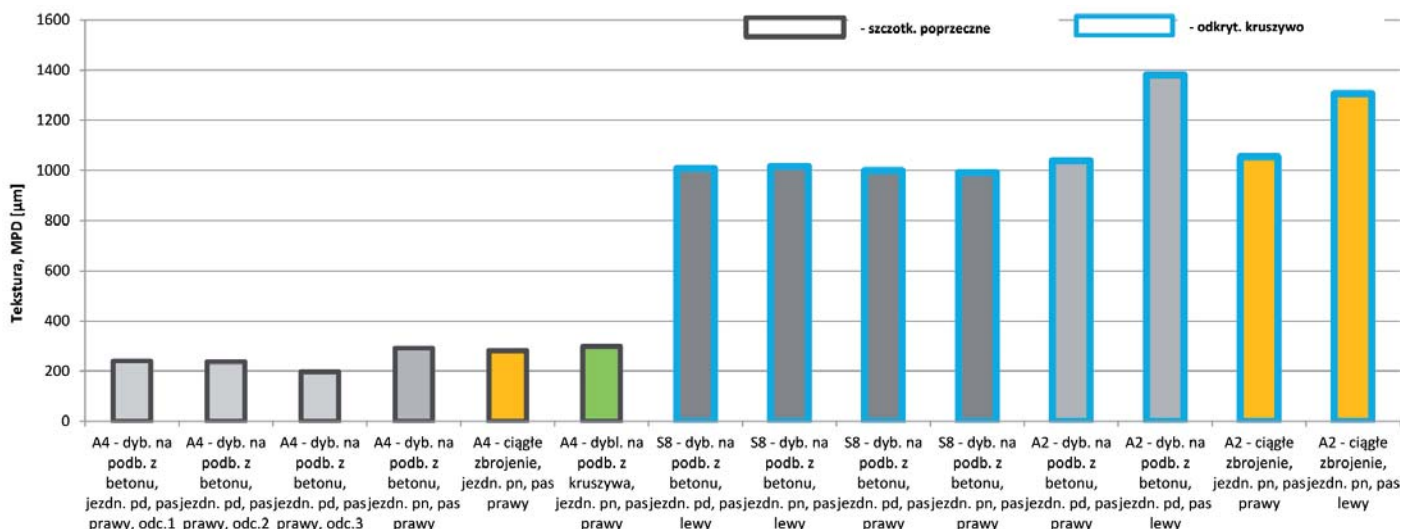
kruszywa w Belgii, Anglii oraz Niemczech. Uzyskując w zakresie częstotliwości powyżej 1000 Hz obniżenie poziomu hałasu o 6–10 dB w porównaniu do konwencjonalnych struktur betonowych. Technologia odkrytego kruszywa została także zastosowana w Polsce na autostradzie A2 (fot. 4) i drodze ekspresowej S8.

Aby wykonać nawierzchnię w technologii „odkrytego kruszywa” beton układa się dwuwarstwowo „mokre na mokre” górna warstwa o grubości 5 cm i kruszywem o uziarnieniu do 8 mm, dolna o uziarnieniu 22 mm. Po ułożeniu warstwę górną zrasza się środkiem (np. glukozą) niszczącym zaprawę cementową i w ramach zabiegów pielęgnacyjnych rozkłada się na nią folię. Można też powierzchnię wmywać wodą pod ciśnieniem. Szczeliny dylatacyjne w warstwie betonu nacina się poprzez folię. W dalszym etapie po około dwóch dniach

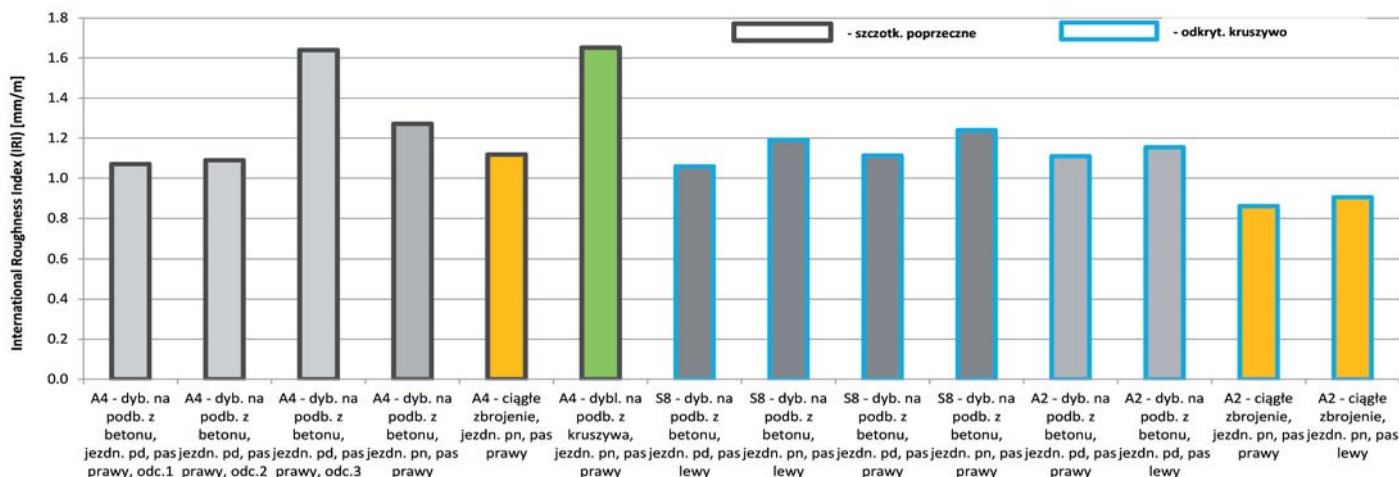
(w zależności od warunków klimatycznych i recepty betonowej) usuwa się folię z powierzchni betonu a niezwiązaną zaprawę cementową wmywa lub szczotkuje, pozostawiając frakcję kruszywa na powierzchni warstwy ścieralnej. Uzyskana w ten sposób tekstura zapewni wymagane cechy przeciwpoślizgowe.

Aktualnie w ramach prac związanych z Rozwojem Innowacji Drogowych (RID) trwają badania tekstury nawierzchni betonowych w Polsce. Analizie poddano trzy odcinki dróg A2, S8 oraz A4. Na autostradzie A2 badana jest nawierzchnia o ciągłym zbrojeniu na podbudowie z mieszanki mineralno-asfaltowej oraz nawierzchnia dyblowana na podbudowie z chudego betonu. Wierzchnia warstwa wykonana jest w technologii odkrytego kruszywa. Na drodze ekspresowej S8 nawierzchnia z odkrytym kruszywem na podbudowie z chudego betonu, na którym jest geowłóknina. Natomiast na

A4 nawierzchnia dyblowana na podbudowie z kruszywa, nawierzchnia o ciągłym zbrojeniu na chudym betonie oraz nawierzchnia dyblowana na podbudowie z chudego betonu, na którym jest ułożona geowłóknina. Wierzchnia warstwa na autostradzie A4 szczotkowana jest poprzecznie. Analizie poddano średnią głębokość profilu (*Mean Profile Depth*) – MPD określoną wg procedury PN-EN ISO 13473-1. Kryteria oceny nawierzchni drogi wg tego parametru zawarte są w DSN ([1]). Wstępnie stwierdzono znaczne zróżnicowanie tekstury (MPD) w zależności od badanych typów odcinków i ich lokalizacji (rys. 10). Zidentyfikowano największą wartość tekstury na stosunkowo młodych, dwu-, trzyletnich odcinkach S8 wykonanych w technologii odkrytego kruszywa. Najmniejsze wartości uzyskano na ponad 15 letniej A4, na której powierzchni stosowano szczotkowanie poprzeczne.



Rys. 10. Wyniki pomiarów dotyczących wskaźnika tekstury MPD na różnych typach nawierzchni



Rys. 11. Wyniki pomiarów dotyczące wskaźnika IRI na różnych typach nawierzchni

Analizie poddano także wskaźnik IRI charakteryzujący pracę zawieszenia w umownie przyjętym modelu obliczeniowym pojazdu w profilu nawierzchni jezdni (rys. 11). Spośród wszystkich badanych typów nawierzchni, niezależnie od miejsca występowania, największe nierówności (wskaźnik IRI) uzyskano na nawierzchni betonowej z podbudową z kruszywa, a najmniejsze na nawierzchni o ciągłym zbrojeniu. Największe nierówności w profilu wystąpiły na A4 na jezdni południowej z 2000 roku gdzie podbudowa jest z chudego betonu, a nawierzchnia betonowa dyblowana i kotwiona.

Prace nad nawierzchniami betonowymi nadal trwają. W dalszym etapie oceniany będzie także wpływ technologii wykończenia, okresu eksploatacji, tekstury i równości na hałas drogowy.

Podsumowanie

Potrzeby wynikające ze stosowania nawierzchni betonowych w związku ze wzrastającym ciężkim ruchem drogowym są jak najbardziej uzasadnione. Nakłady finansowe na utrzymanie tego typu nawierzchni w długim okresie eksploatacji jaki zapewniają nawierzchnie betonowe, sprawiają, że technologia ta jest coraz częściej stosowana w Polsce. Przykładem jest wiele realizacji autostrad i dróg ekspresowych. Planowane są także nowe odcinki w tej technologii. Aktualny Katalog przeznaczony do nawierzchni sztywnych uwzględnia dotychczasowe doświadczenia krajowe i zagraniczne w zakresie technologii budowy nawierzchni betonowych. Na uwagę zasługuje rozszerzony zakres konstrukcji nawierzchni z uwzględnieniem nawierzchni o ciągłym zbrojeniu oraz różnych typów podbudowy z kruszywa. Pozwala to projektantowi i wykonawcy dokonać optymalnych wyborów i dostosować nawierzchnie do własnych potrzeb finansowych. Uwzględnienie kryteriów zmęczenia przy doborze nawierzchni betonowych, zwiększonego nacisku osi, nowoczesnych rozwiązań technologicznych stawia niniejszy Katalog na równi z innymi katalogami europejskimi. W Polsce prowadzi się wiele badań dotyczących nawierzchni betonowych. Monitoruje się ruch pojazdów, analizuje się wpływy klimatyczne na powstawanie dodatkowych naprężeń w płycie betonowej oraz bada się teksturę wpływającą

na cechy przeciwpślizgowe. W dalszym etapie rozwoju nawierzchni betonowych w Polsce należy doskonalić technologię w zakresie redukcji hałasu oraz rozwijać prace nad koncepcją długowiecznych nawierzchni.

Wybrane elementy niniejszego artykułu zrealizowano w ramach przedsięwzięcia „RID”, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad.

Bibliografia

- [1] Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów. Wytyczne stosowania, GDDKiA, Warszawa kwiecień 2015.
- [2] Hendrickx Ir L. (1998). Noiseless concrete pavements, n° 18 FEBELCEM „DOSSIER CEMENT”.
- [3] Mackiewicz P. (2014). „Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements.” App. Therm. Eng., 73 (2014), 1167-1174.
- [4] Mackiewicz P. (2015). „Analysis of stresses in concrete pavement under a dowel according to its diameter and load transfer efficiency.” Canadian Journal of Civil Engineering, 42(11), 845-853.
- [5] Mackiewicz P. (2015). „Finite-Element Analysis of Stress Concentration around Dowel Bars in Jointed Plain Concrete Pavement.” Journal of Transportation Engineering, 141(6).
- [6] Roesler J.R., et al. (2016). „Concrete slab analyses with field-assigned non-uniform support conditions.” International Journal of Pavement Engineering, 17(7), 578-589.
- [7] Scofield L. (2009). „Transportation Noise and Concrete Pavements, Using Quiet Concrete Pavements as the Noise Solution”, ACPA.
- [8] Shoukry S.N., William G.W. and Riad M.Y. (2007). „Effect of thermal stresses on mid-slab cracking in dowel jointed concrete pavements.” Struct. and Infr. Eng., 3(1), 43-51.
- [9] Sii H.B., et al. (2014). „Effect of dowel looseness on response of jointed concrete pavements using three-dimensional finite element analysis.” Advanced Materials Research. 2014. Trans Tech Publ.
- [10] Szydło A. (2004). „Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria wymiarowanie, realizacja.” Polski Cement.
- [11] Szydło A., Mackiewicz P. (2005). „Nawierzchnie betonowe na drogach gminnych.” Polski Cement.
- [12] Szydło A., Mackiewicz P. (2015). „Badania i analizy kosztów budowy i utrzymania nawierzchni betonowych i asfaltowych”. Raport serii U nr 166/2015, Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego.
- [13] Szydło A., Mackiewicz P., Wardęga R., Krawczyk B. (2014). „Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych.” Raport, GDDKiA, Warszawa.
- [14] Zhang Y-c. and L.-l. Gao (2016). „Effect of dowel bar position deviation on joint load-transfer ability of cement concrete pavement.” International Journal of Pavement Research and Technology, 9(1), 30-36.