prof. dr hab. inż. Tomasz Siwowski[1)*)]
ORCID: 0000-0002-2003-000X
prof. dr hab. inż. Antoni Szydło[2)]
ORCID: 0000-0002-3363-9391
dr inż. Mateusz Rajchel[1)]
ORCID: 0000-0003-4930-3443

Pierwsze krajowe zastosowanie nawierzchni betonowej na obiektach mostowych

The first Polish application of concrete pavement on road bridges

DOI: 10.15199/33.2022.04.12

Streszczenie. Coraz więcej dróg w Polsce ma nawierzchnię betonową, natomiast na mostach położonych w ciągu tych dróg nadal jest układana nawierzchnia bitumiczna ze względu na brak krajowych technologii. Powoduje to określone komplikacje technologiczne i eksploatacyjne. W artykule przedstawiono przegląd nawierzchni betonowych, stosowanych na mostach drogowych na świecie. Na tym tle opisano pierwsze krajowe zastosowanie nawierzchni betonowej wykonanej na kilku obiektach mostowych w ciągu drogi ekspresowej S-7.
Słowa kluczowe: nawierzchnia betonowa; obiekty mostowe; przegląd; technologia.

Abstract. More and more roads in Poland have a concrete pavement. However, due to the lack of national technologies, bituminous pavement is still being laid on the bridges located along these roads. This causes certain technological and operational complications. The article presents an overview of concrete pavements used on road bridges around the world. Against this background, the first domestic application of concrete pavement, made on several bridge structures along the S-7 expressway, was described.
Keywords: concrete pavement; bridge; overview; technology.

Wraz z coraz powszechniejszym stosowaniem w Polsce nawierzchni betonowych na drogach samorządowych [1], ekspresowych i autostradach [2] pojawiła się naturalna potrzeba wdrożenia takich nawierzchni również na obiektach mostowych zlokalizowanych w ciągu tych dróg. Obecnie wykonuje się na nich tradycyjną nawierzchnię bitumiczną, co stwarza pewne kłopoty technologiczne wykonawcom oraz problemy utrzymaniowe zarządcom dróg. W związku z tym wydaje się uzasadnione opracowanie i wdrożenie krajowych technologii nawierzchni betonowych, dedykowanych obiektom mostowym. Główne korzyści z ich stosowania to: jednolite właściwości użytkowe nawierzchni na moście i na drodze (rodzaj materiału, makrotekstura, właściwości antypoślizgowe, kolor nawierzchni); poprawa bezpieczeństwa użytkowników wynikająca z takich samych właściwości nawierzchni; ujednolicenie standardu utrzymania nawierzchni na moście i na drodze oraz wyeliminowanie problemu braku przyczepności warstw hydroizolacji do płyty pomostu. Pozostałe zalety nawierzchni betonowych wynikają z cech materiałowych betonu, m.in. większej trwałości i odporności na koleinowanie nawierzchni betonowej w porównaniu z bitumiczną, mniejszej podatności na zmianę temperatury i inne warunki otoczenia oraz jasnego koloru nawierzchni, na której lepiej są widoczne obiekty po zmroku.

Nawierzchnie mostowe z betonu cementowego najczęściej są wykonywane w USA i Kanadzie, natomiast bitumiczne zdecydowanie rzadziej niż w Europie. Wynika to z następujących faktów [3]:

- większa trwałość nawierzchni betonowych znacznie ogranicza konieczność zamykania odcinków drogowych i prowadzenia remontów (co zmniejsza koszty społeczne);
- wykonawcy obiektów mostowych nie dysponują zwykle technologią do wykonania nawierzchni bitumicznych i wówczas ich układanie musi zostać podzlecone innej firmie, co powoduje wzrost kosztów;
- izolacje przeciwwilgociowe, konieczne w przypadku nawierzchni bitumicznych, są wrażliwe na błędy wykonawcze; w przypadku niestarannego wykonania dochodzi często do rozwarstwień między płytą pomostu i izolacją, a w konsekwencji do zniszczenia nawierzchni mostowej.

W artykule opisano stosowane na świecie technologie betonowych nawierzchni mostowych oraz pierwsze krajowe ich zastosowanie, wdrożone z inicjatywy GDDKiA pod naszym nadzorem naukowym.

Rodzaje nawierzchni z betonu cementowego na obiektach mostowych

Ogólny podział betonowych nawierzchni mostowych pokazano na rysunku 1. Stosowane głównie w USA i Kanadzie rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe żelbetowych płyt pomostowych bez nawierzchni dzieli się w zależności od wymaganego poziomu zabezpieczenia zbrojenia przed korozją na [4]:

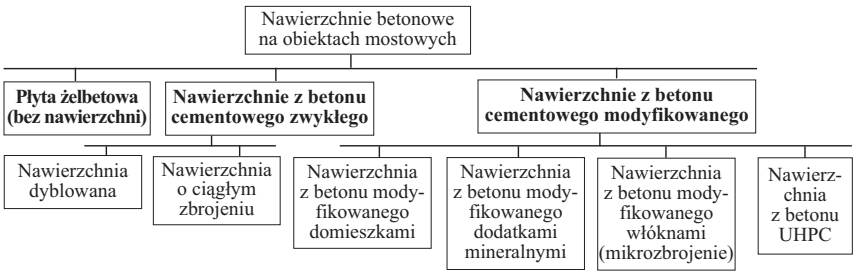
a) płyty konwencjonalne z betonu zwykłego (rysunek 2a); w tym przypadku często są stosowane powłoki uszczelniające nakładane na beton płyty przez natryskiwanie lub za pomocą szczotki;

b) płyty pogrubione ze zwiększoną otuliną prętów siatki górnej zbrojenia z betonu zwykłego (rysunek 2b);

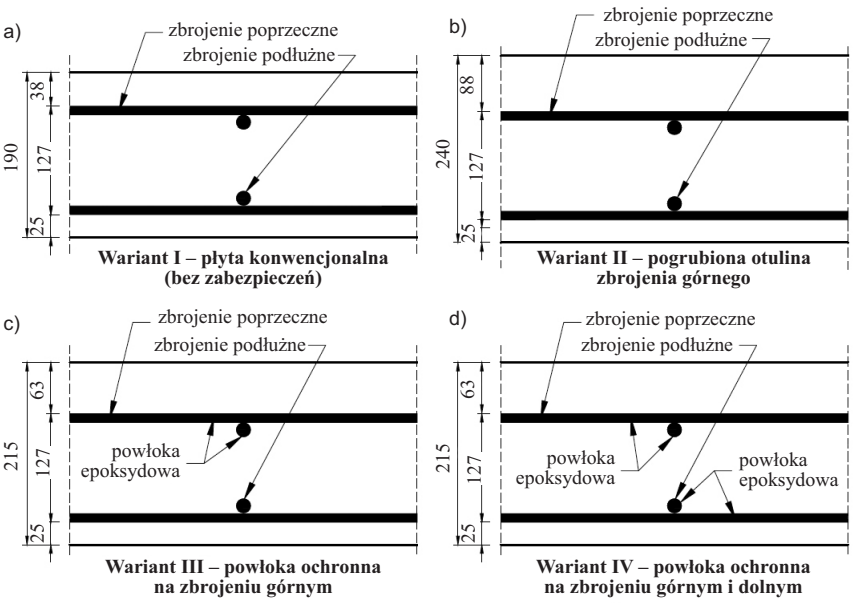
c) płyty konwencjonalne z betonu zwykłego; pręty siatki górnej zbrojenia zabezpieczone przed korozją (rysunek 2c);

d) płyty konwencjonalne z betonu zwykłego, pręty siatki górnej i dolnej zbrojenia zabezpieczone przed korozją (rysunek 2d).

[1)] Politechnika Rzeszowska; Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury
[2)] Politechnika Wrocławska; Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
[*)] Adres do korespondencji: siwowski@prz.edu.pl



Rys. 1. Ogólny podział betonowych nawierzchni mostowych
Fig. 1. General division of concrete bridge pavements

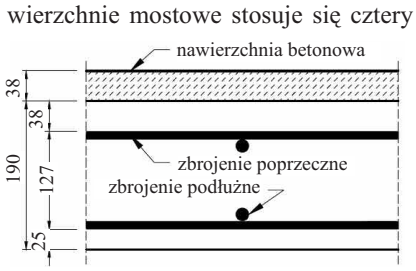


Rys. 2. Płyty żelbetowe bez nawierzchni stosowane w USA
Fig. 2. Reinforced concrete bridge decks without pavements used in the USA

W celu zabezpieczenia zbrojenia płyt przed korozją stosuje się galwanizację lub częściowo wymienia pręty stalowe na kompozytowe GFRP (*glass fibre reinforced polymer*), a w przypadku niektórych lokalizacji mostów modyfikuje skład betonu, aby go uszczelnić. W tym celu wprowadza się do mieszanki betonowej odpowiednie dodatki chemiczne i/lub tzw. inhibitory korozji, bądź stosuje ochronę elektrochemiczną (głównie katodową).

Stosowane głównie w Europie **nawierzchnie mostowe z betonu cementowego zwykłego** stanowią przedłużenie typowych betonowych nawierzchni drogowych, tj. nawierzchni z płyt betonowych dyblowanych i kotwionych lub nawierzchni z płyt betonowych o zbrojeniu ciągłym. Rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe tych nawierzchni są znane i stosowane na drogach krajowych w Polsce [6].

Powszechnie stosowaną technologią, zarówno przy budowie nowych obiektów, jak również remontowanych, są **nawierzchnie z betonu cementowego modyfikowanego** (rysunek 3). Wykonuje się je w postaci nakładki o średniej grubości 40 – 50 mm, układanej najczęściej w technologii „mokre na mokre" bezpośrednio na żelbetowej płycie pomostu, bez dodatkowej hydroizolacji (rysunek 3). Warstwa betonu modyfikowanego, oprócz wymagań dotyczących trwałości i eksploatacji, musi zapewnić odpowiednią izolację płyty pomostu i mieć odpowiednią sczepność z podłożem. W USA i Kanadzie na tego typu nawierzchnie mostowe stosuje się cztery



Rys. 3. Schemat typowej nawierzchni z betonu modyfikowanego w USA
Fig. 3. Diagram of a typical modified concrete pavement in the USA

główne rodzaje modyfikowanych mieszanek z betonu cementowego [4]:

- **beton modyfikowany emulsją lateksową** (LMC – *latex-modified concrete*);
- **beton modyfikowany mikrokrzemionką** (MMC – *microsilica modified concrete*);
- **beton modyfikowany dodatkiem popiołu lotnego** (HPFAC – *high performance fly ash concrete*);
- **beton zbrojony włóknami** (FRC – *fiber reinforced concrete*).

Domieszka w postaci lateksu (emulsja polimerowa styrenowo-butadienowa) jest dodawana do świeżej mieszanki betonowej w celu poprawy jej urabialności, co umożliwia łatwiejsze wbudowanie i zagęszczenie, zmniejszenie skurczu betonu podczas wiązania oraz poprawę wodoszczelności i odporności chemicznej stwardniałego betonu. Mikrokrzemionka i popiół lotny znacznie poprawiają właściwości fizyczne betonu oraz jego trwałość. Jako mikrozbrojenie są stosowane najczęściej włókna stalowe, polipropylenowe oraz węglowe. Oprócz wzmocnienia warstwy nawierzchni włókna zwiększają także odporność na skurcz betonu, a w efekcie minimalizują liczbę mikropęknięć w nawierzchni.

W ostatnich kilku latach, zarówno w Europie [7], jak i w USA [8], zaczęto stosować na nawierzchnie mostowe **beton ultrawysokowartościowy UHPC**, łączący w sobie zalety stosowania wymienionych domieszek i dodatków. Należy on do kompozytów cementowych o bardzo dużej wytrzymałości (na ściskanie – powyżej 150 MPa, a na rozciąganie – powyżej 5 MPa) oraz trwałości. Typowy beton UHPC składa się z cementu portlandzkiego, piasku drobnego, dodatku w postaci mikrokrzemionki, dużej zawartości upłynniających domieszek chemicznych oraz włókien (większej od 2% objętości mieszanki) dodawanych jako mikrozbrojenie. W przypadku konstrukcyjnego betonu UHPC stosuje się zbrojenie włóknami stalowymi, co umożliwia przenoszenie przez nawierzchnię dużych deformacji rozciągających (pewien stopień plastyczności przy rozciąganiu) przed uzyskaniem granicznej wytrzymałości betonu na rozciąganie. Większość betonów UHPC jest samozagęszczalna, a więc mieszanka betonowa łatwo układa się pod ciężarem własnym bez konieczności stosowania specjalnego sprzętu.

Zalety betonu UHPC do nawierzchni obiektów mostowych są następujące [7, 8]:

- bardzo mała przepuszczalność (nasiąkliwość) oraz duża odporność na cykle zamrażania/odmrażania, co redukuje zagrożenie destrukcji nawierzchni i ekstremalnie zwiększa jej trwałość;
- niewielki skurcz, który likwiduje niebezpieczeństwo zarysowania dzięki dużej zawartości włókien;
- duża odporność na ścieranie redukująca niebezpieczeństwo koleinowania;
- bardzo duża wytrzymałość i sztywność nawierzchni; cienka warstwa z betonu UHPC może zwiększać nośność płyty pomostu przy niewielkim zwiększeniu obciążenia stałego (od 0,6 do 1,2 kN/m^2);
- doskonała przyczepność do betonu (nowej lub istniejącej płyty pomostu).

Porównanie kosztów nawierzchni mostowych z betonu cementowego modyfikowanego pokazano w tabeli 1. Dla porównania podano także koszt typowej nawierzchni bitumicznej oraz koszt wymiany żelbetowej płyty pomostu, będącej zazwyczaj konsekwencją niewielkiej trwałości nawierzchni mostowej.

Porównanie kosztów nawierzchni mostowych z betonu cementowego modyfikowanego (na podstawie [8])
Comparison of the cost of modified concrete bridge pavements (acc. to [8])

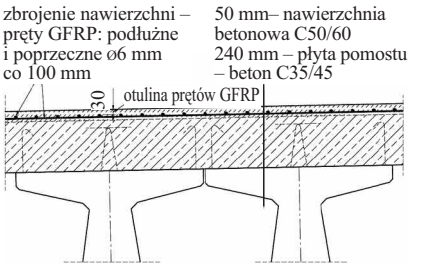
Rodzaj nawierzchni mostowej	Zakres grubości [mm]	Koszt [$/m^2]
Nawierzchnia z betonu modyfikowanego domieszkami (np. LMC)	25 – 127	193 – 419
Nawierzchnia z betonu modyfikowanego dodatkami mineralnymi (MMC, HPFAC)	25 – 127	183 – 269
Nawierzchnia z betonu modyfikowanego włóknami	38 – 102	150 – 215
Nawierzchnia z betonu UHPC (niezastrzeżona)	25 – 52	32 – 64
Nawierzchnia z betonu UHPC (prawnie zastrzeżona)	25 – 52	97 – 184
Nawierzchnia z betonu polimerowego (żywicznego)	3 – 152	107 – 183
Typowa nawierzchnia bitumiczna z izolacją	38 – 102	32 – 86
Wymiana żelbetowej płyty pomostu	n/d	462 – 570

Nawierzchnie betonowe na obiektach mostowych w ciągu drogi ekspresowej S-7

Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA) zdecydowała się na **pilotażową budowę pięciu obiektów mostowych z nawierzchnią betonową zlokalizowanych w ciągu odcinka drogi ekspresowej S-7 Pieńki – Płońsk**. W przypadku trzech obiektów zastosowano technologię żelbetowej płyty pomostu bez nawierzchni, a dwóch – nawierzchnię betonową o zbrojeniu ciągłym, układaną na warstwie poślizgowej (tzw. pływającą).

Pierwsza technologia została zastosowana na obiektach jednoprzęsłowych o schemacie statycznym belki swobodnie podpartej i rozpiętości odpowiednio 12,6, 18,3 i 26,0 m oraz szerokości pomostu 16,4 ÷ 21,0 m. Konstrukcja przęseł wszystkich obiektów jest również jednakowa: ustrój nośny ze strunobetonowych belek prefabrykowanych typu „T" zespolonych z żelbetową monolityczną płytą współpracującą o łącznej grubości 0,29 m, tj. pogrubioną o 5 cm w stosunku do grubości katalogowej płyty 0,24 m. Ze względu na konieczność zastosowania grindingu, w celu uzyskania odpowiedniej tekstury, zaplanowano naddatek płyty grubości 10 mm. Łączna grubość płyty monolitycznej wynosiła zatem 0,30 m. Do jej zbrojenia zastosowano pręty zbrojeniowe klasy AIIIN ze stali B500SP o podwyższonej ciągliwości oraz charakterystycznej granicy plastyczności f_{yk} = 500 MPa. Ochrona antykorozyjna prętów zbrojeniowych została zapewniona przez normową grubość otuliny, tj. w przypadku siatki dolnej 40 mm od spodu płyty, a w przypadku siatki górnej 80 mm od wierzchu płyty (30 + 50 mm). W celu minimalizacji ryzyka wystąpienia i propagacji rys skurczowych na górnej powierzchni płyty pomostu, stanowiącej jednocześnie nawierzchnię, zastosowano dodatkowo siatki zbrojeniowe 100 x 100 mm z prętów kompozytowych GFRP o średnicy 6 mm, pełniące rolę zbrojenia przeciwskurczowego. Zostały one umieszczone 30 mm poniżej górnej powierzchni pomostu i jednocześnie ok. 50 mm nad zbrojeniem górnym płyty pomostu (rysunek 4).

Do wykonania płyty użyto betonu o następujących parametrach: klasa betonu C50/60; klasa ekspozycji XF4; stopień wodoszczelności W10; stopień mrozoodporności F200; nasiąkliwość max. 4%. Zastosowano kruszywo o ciężarze właściwym min. 2,90 t/m^3 i odporności na rozdrabnianie kategorii nie wyższej niż LA 15 oraz dodatek mikrokrzemionki. Nawierzchnia betonowa ma uszorstnioną górną powierzchnię (grinding) zapewniającą uzyskanie miarodajnego współczynnika tarcia nawierzchni co najmniej 0,44.



Rys. 4. Przekrój poprzeczny żelbetowej płyty pomostu obiektów mostowych bez nawierzchni
Fig. 4. Cross-section of reinforced concrete bridge deck without pavement

Betonowanie płyty ustroju nośnego wykonano jednoetapowo, kształtując odpowiedni spadek nawierzchni w celu skutecznego odwodnienia: jednostronny 4,5% (na dwóch obiektach) oraz dwustronny 2,5%. Po zakończeniu zacierania betonu jego powierzchnia została pokryta preparatem do pielęgnacji świeżego betonu. Po osiągnięciu przez beton projektowanej wytrzymałości wyrównano nawierzchnię i uszorstniono za pomocą grindingu, tj. podłużnego szlifowania w celu uzyskania wymaganej równości podłużnej i poprzecznej oraz śrutowania, które pozwoliło na uzyskanie jednorodnej i powtarzalnej makrotekstury na całej nawierzchni, zapewniającej wymagany współczynnik tarcia nawierzchni. Technologia umożliwiła bardzo dokładne usunięcie naddatku betonu bez powodowania uszkodzeń w strukturze płyty pomostu. Etapy wykonania płyty pomostu bez nawierzchni pokazano na fotografii.

Na dwóch obiektach mostowych położonych w ciągu 2-km odcinka drogowego z nawierzchnią betonową o ciągłym zbrojeniu zastosowano nawierzchnię analogiczną jak na drodze. Cechą charakterystyczną tej nawierzchni jest brak szczelin poprzecznych, co poprawia komfort jazdy, zmniejsza koszty eksploatacji związane z wymianą uszczelnienia oraz ogranicza przenikanie wody w podłoże. Zbrojenie podłużne przenosi odkształcenia termiczne występujące w płycie betonowej nawierzchni. Mikrospękania w rozstawie 0,8 ÷ 1,5 m powodowane odkształ-

Etapy wykonania żelbetowej płyty pomostu bez nawierzchni: a) kompozytowe zbrojenie nawierzchni; b) betonowanie płyty; c) gotowa płyta pomostu; d) docelowa tekstura płyty po grindingu

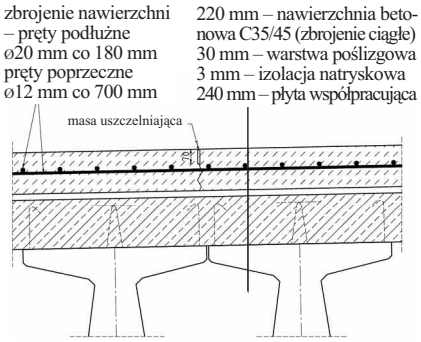
Construction stages of a reinforced concrete deck without pavement: a) GFRP composite reinforcement of the pavement; b) concreting of the deck slab; c) the finished deck slab; d) the target texture of the deck slab after grinding

ceniami termiczno-skurczowymi wpływają na trwałość nawierzchni.

Oba obiekty mają schemat ramowy. Jeden z nich to rama trójprzęsłowa o długości 46,8 m i szerokości pomostu 18,4 m. Konstrukcja przęseł tego obiektu to ustrój nośny ze strunobetonowych belek prefabrykowanych typu „T", zespolonych z żelbetową monolityczną płytą współpracującą o grubości 0,24 m. Drugi obiekt to rama jednoprzęsłowa o rozpiętości 10,6 m i szerokości pomostu 17,25 m. Jego ustrój nośny stanowi żelbetowa płyta monolityczna o grubości 0,55 m.

Na obu obiektach wykonano nawierzchnię grubości 220 mm z betonu cementowego o zbrojeniu ciągłym. Przed ułożeniem nawierzchni na płycie betonowej pomostu wykonano izolację dwuskładnikową na bazie metakrylanu metylu o grubości 3 mm metodą natryskową, na której ułożono warstwę poślizgową z asfaltu lanego MA-11 o grubości 3 cm. Nawierzchnię zdylatowano poprzecznie (tylko nad podporami obiektów mostowych) i podłużnie, a szczeliny wypełniono masą zalewową na gorąco. W środku grubości nawierzchni umieszczono siatkę zbrojeniową 180 x 700 mm z konwencjonalnych prętów stalowych o średnicy 20 mm (pręty podłużne) oraz 12 mm (pręty poprzeczne), co pokazuje rysunek 5.

Nawierzchnię wykonano z betonu klasy C35/45 o stopniu wodoszczelności W10, stopniu mrozoodporności F200 oraz nasiąkliwości max. 4%. Układano ją w jednej warstwie o grubości 220 mm w technologii odkrytego kruszywa o uziarnieniu 0/8 i PSV > 53, zapewniającej uzyskanie miarodajnego współczynnika tarcia nawierzchni co najmniej 0,44. Do zbrojenia nawierzchni zastosowano pręty zbrojeniowe klasy AIIIN ze stali B500SP o podwyższonej ciągliwości oraz charakterystycznej granicy plastyczności f_{yk} = 500 MPa. Nawierzchnia została przedłużona o 10 m poza obiekt mostowy z każdej strony.



Rys. 5. Przekrój poprzeczny żelbetowej płyty pomostu obiektów mostowych z nawierzchnią o ciągłym zbrojeniu

Fig. 5. Cross-section of reinforced concrete bridge deck with a pavement with continuous reinforcement

Podsumowanie

Pierwsze pozytywne doświadczenia wykonawcze pokazały, że stosowanie nawierzchni betonowych na obiektach mostowych w Polsce może przynieść określone korzyści zarówno w fazie budowy, jak i eksploatacji obiektów mostowych. Bez większych trudności można wykonywać obiekty mostowe z nawierzchnią betonową w technologii: płyty żelbetowej bez nawierzchni; nawierzchni betonowej dyblowanej i kotwionej oraz nawierzchni betonowej o zbrojeniu ciągłym. Szczególnie atrakcyjna jest pierwsza z wymienionych technologii, gdyż wpływa na zmniejszenie obciążenia stałego mostu, co prowadzi do redukcji kosztów jego budowy. Z kolei konwencjonalne betonowe nawierzchnie drogowe w zastosowaniu na obiektach mostowych umożliwiają jednolitą technologię układania nawierzchni, bez jej zmiany na odcinkach mostowych. Wszystkie trzy technologie mają także duże zalety eksploatacyjne.

W celu upowszechnienia stosowania nawierzchni betonowych na obiektach mostowych w Polsce, w ramach opracowywanego dla Ministerstwa Infrastruktury *Katalogu typowych nawierzchni na drogowych obiektach mostowych*, wprowadziliśmy prezentowane nawierzchnie jako alternatywę dla konwencjonalnych nawierzchni bitumicznych. Wydaje się uzasadnione, aby GDDKiA podjęła się sfinansowania prac naukowo-badawczych, prowadzących do wdrożenia w Polsce nawierzchni z betonu cementowego modyfikowanego. Coraz większa ich popularność w Europie i USA świadczy o dużych korzyściach ekonomicznych i społecznych, związanych z zastosowaniem innowacyjnych betonów.

Fotografie: T. Siwowski

Literatura

[1] Szydło A, Mackiewicz P. Nawierzchnie betonowe na drogach gminnych. Poradnik. Kraków: Polski Cement; 2005.

[2] Glinicki MA. Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2021.

[3] Piłat J, Radziszewski P, Kowalski K. Jaka nawierzchnia, taki most. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne. 2007; 4: 49 – 52.

[4] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Concrete Bridge Deck Performance. Washington DC: The National Academies Press; 2004; https://doi.org/10.17226/17608.

[5] ACI Committee 222. ACI 222.3R-11: Guide to Design and Construction Practices to Mitigate Corrosion of Reinforcement in Concrete Structures. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute, 2011.

[6] Szydło A, Mackiewicz P, Wardęga R, Krawczyk B. Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych. Warszawa: GDDKiA; 2014.

[7] Brühwiler E, Denarié E. Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. Struct Eng Int. 2013; 23 (4): 450 – 457. https://doi.org/10.2749/101686613X13627347100437.

[8] Munoz JF, De la Varga I. Ultra-High Performance Concrete for Bridge Deck Overlays. No. FHWA-HRT-17-097. Washington DC: Federal Highway Administration; 2018. https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/bridge/17097/17097.pdf.

Przyjęto do druku: 04.04.2022 r.