

Zmiany wynikające z CPR wymagają odpowiedniego przygotowania środowiska budowlanego – tak producentów, jak i przede wszystkim użytkowników wyrobów budowlanych. Komisja Europejska zakłada działania przygotowawcze na poziomie UE, do których należą: zorganizowanie w dniu 25 czerwca br. konferencji na temat CPR, uruchomienie specjalnego portalu poświęconego tej tematyce, opracowanie i publikacja materiałów informacyjnych oraz wytycznych działania dla uczestników rynku wyrobów budowlanych. Niezwykle ważne w tym kontekście jest podjęcie odpowiednich działań na poziomie krajowym. Szkolenia organizowane regularnie dla przemysłu przez Instytut Techniki Budowlanej stanowią jedną z odpowiedzi na zapotrzebowanie w tym zakresie.

Bibliografia

[1] Dyrektywa Rady Wspólnot Europejskich w sprawie zbliżenia ustaw i aktów wykonawczych państw członkowskich dotyczą-

- cych wyrobów budowlanych (89/106/EWG). Seria: Dokumenty WE dotyczące budownictwa, ITB, Warszawa 1994
- [2] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 z dnia 9 marca 2011 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylające dyrektywę Rady 89/106/EWG. Dz.U. UE L 88 z dnia 4.4.2011
- [3] Ogłoszenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 11 maja 2004 r. w sprawie stosowania prawa Unii Europejskiej (M.P. 2004 nr 20, poz. 359)
- [4] Ustawa z dnia 16 kwietnia o wyrobach budowlanych (Dz.U. z 2004 r. nr 92, poz 881 z późn. zmianami)
- [5] Fangrat J., Prejzner H., Tworek J., Wall S.: *Ewolucja wymagań podstawowych w świetle zagadnień środowiskowych*. Artykuł zgłoszony na konferencję Krynica 2012
- [6] Tworek J.: *Deklaracja właściwości użytkowych wyrobów budowlanych wg rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady nr 305/2011*. Materiały Budowlane nr 8/2011
- [7] Rozporządzenie PE i Rady (WE) nr 764/2008 z dnia 9 lipca 2008 r. ustanawiające procedury dotyczące stosowania niektórych krajowych przepisów technicznych do produktów wprowadzonych legalnie do obrotu w innym państwie członkowskim oraz uchylające decyzję nr 3052/95/WE (Dz.U. UE L 218 z 13.8.2008 r.) ■



MARIUSZ JACZEWSKI

Politechnika Gdańska
Katedra Inżynierii
Drogowej
mariusz.jaczewski@
wilis.pg.gda.pl



JÓZEF JUDYCKI

Politechnika Gdańska
Katedra Inżynierii
Drogowej
jozef.judycki@wilis.pg.
gda.pl

Zastosowanie w warunkach polskich francuskiej metody projektowania nawierzchni asfaltowych o podbudowach związanych spoiwami hydraulicznymi

Artykuł jest kontynuacją adaptacji francuskich kryteriów zmęczeniowych do warunków polskich w ramach prac nad weryfikacją katalogu typowych konstrukcji podatnych i półsztywnych z 1997 r. Pierwsza część przedstawiona w artykule [1] dotyczyła francuskich kryteriów zmęczeniowych do projektowania nawierzchni podatnych. W niniejszym artykule przedstawiono francuską klasyfikację nawierzchni asfaltowych z podbudowami związanymi spoiwami hydraulicznymi. Przedstawiono główne założenia metody francuskiej projektowania nawierzchni na podbudowach związanych hydraulicznie, stosowane we Francji

kryteria zmęczeniowe oraz przykład ilustrujący korzystanie z praw zmęczeniowych.

Klasyfikacja nawierzchni asfaltowych na podbudowach związanych spoiwami hydraulicznymi we Francji [2], [3], [4]

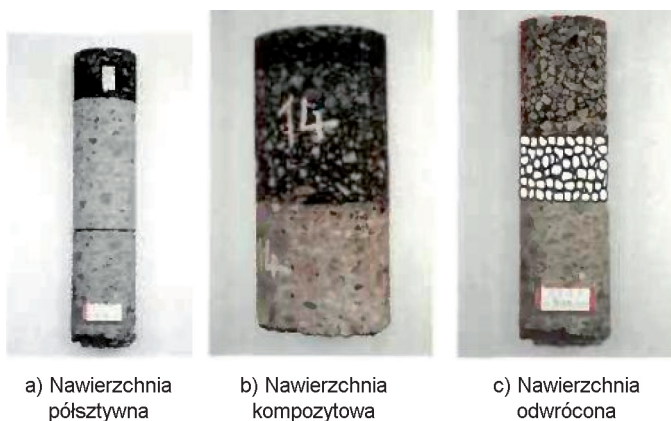
Katalog oraz metoda francuska pozwalają na projektowanie trzech typów konstrukcji nawierzchni na podbudowach związanych spoiwami hydraulicznymi.

Zostały one przedstawione na rysunku 1 i są to odpowiednio:

- nawierzchnie półsztywne (*semi-rigide, chaussees a assise traitée aux liants hydrauliques*) – rysunek 1a,
- nawierzchnie kompozytowe lub inaczej mieszane (*chaussees a structure mixte*) – rysunek 1b,
- nawierzchnie odwrócone (*chaussees a structure inverse*) – rysunek 1c.

Nawierzchnie półsztywne (*semi-rigide, chaussees a assise traitée aux liants hydrauliques*) – rysunek 1a

Typowa konstrukcja nawierzchni półsztywnej to stosunkowo cienki pakiet wierzchnich warstw asfaltowych (6–14 cm) oraz podbudowa z materiałów związanych spoiwami hydrau-



Rys. 1. Przykładowe konstrukcje nawierzchni z warstwą związaną spoiwem hydraulicznym, rysunki za [2], [3]

licznymi o znacznej grubości (20–50 cm). Podbudowa związana spoiwem hydraulicznym może być wykonana w jednej lub w dwóch warstwach. Konstrukcje te stanowią około 40% wszystkich konstrukcji we Francji. Warstwy związane spoiwem są wymiarowane dla jednej fazy pracy konstrukcji, do wystąpienia spękań zmęczeniowych w podbudowie związanej spoiwem hydraulicznym. Warunkiem projektowym jest zachowanie trwałości (brak spękań zmęczeniowych) w podbudowie związanej spoiwem hydraulicznym po przejściu całkowitego ruchu obliczeniowego w okresie eksploatacji.

Nawierzchnie kompozytowe lub inaczej mieszane (*chaussees a structure mixte*) – rysunek 1b

Nawierzchnie kompozytowe mają dwie warstwy podbudowy: warstwę górną z betonu asfaltowego i warstwę dolną z materiału związanego spoiwem hydraulicznym. Typowa konstrukcja to pakiet wierzchnich warstw asfaltowych (2–8 cm), warstwa górna podbudowy z mieszanek mineralno-asfaltowych (10–20 cm) oraz warstwa dolna podbudowy z materiałów związanych spoiwami hydraulicznymi (20–40 cm). Przyjmuje się, że stosunek grubości wszystkich warstw asfaltowych do sumy grubości całej konstrukcji, czyli sumy grubości warstw asfaltowych i warstw związanych spoiwem hydraulicznym powinien być nie mniejszy niż 50% (do ruchu 20-letniego). W oryginalnej nazwie francuskiej w opracowaniu [3] użyto określenia *chaussees a structure mixte* – nawierzchnia o konstrukcji mieszanej. W tłumaczeniu na język angielski w opracowaniu [2] użyto określenia *composite pavement structure* – nawierzchnia o konstrukcji kompozytowej. Dalej używana będzie nazwa „konstrukcja kompozytowa”. Konstrukcje te stanowią około 5% wszystkich konstrukcji we Francji.

Konstrukcja kompozytowa jest wymiarowana do dwóch faz pracy. Pierwsza faza pracy trwa od wykonania nawierzchni do wystąpienia spękań zmęczeniowych w warstwie podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym. W drugiej fazie pracy warstwy asfaltowe spoczywają na podbudowie spękanej o mniejszej nośności. Koniec fazy drugiej to wystąpienie pewnej dopuszczalnej liczby spękań zmęczeniowych w warstwach asfaltowych. Projektowanie nawierzchni kompozytowych we Francji jest w swej istocie takie samo, jak dotychczasowe dwuetapowe projektowanie

nawierzchni półsztywnych w Polsce. Występują jednak istotne różnice w prawach zmęczeniowych i samej metodyce projektowania.

Nawierzchnie odwrócone (*chaussees a structure inverse*) – rysunek 1c

Typowa konstrukcja nawierzchni odwróconej to pakiet wierzchnich warstw asfaltowych (2–8 cm), warstwa podbudowy z materiałów asfaltowych (10–20 cm), warstwa kruszywa niezwiązanego (ok. 12 cm) oraz warstwa podbudowy z materiałów związanych spoiwami hydraulicznymi (15–50 cm). Celem zastosowania warstwy kruszywa pomiędzy warstwą podbudowy asfaltowej i podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym jest przeciwdziałanie spękanom odbitym. Warstwy są wymiarowane do jednej fazy pracy konstrukcji, tj. do przekroczenia jednego z następujących kryteriów zniszczenia: spękań w warstwach z mieszanek mineralno-asfaltowych, wyczerpania trwałości warstwy związanej spoiwem hydraulicznym oraz deformacji podłoża, lub warstwy z kruszywa niezwiązanego. Ze względu na brak zastosowań takiego rozwiązania w Polsce, konstrukcja ta zostanie pominięta w dalszym opisie.

Różnice pomiędzy francuskimi i polskimi nawierzchniami asfaltowymi na podbudowach związanych spoiwami hydraulicznymi

W Polsce stosuje się jeden typ nawierzchni na podbudowach związanych spoiwami hydraulicznymi. Przy większym ruchu występują trzy warstwy asfaltowe (ścieralna, wiążąca i podbudowa asfaltowa) na podbudowie związanej spoiwem hydraulicznym. Taka nawierzchnia w Polsce nosi nazwę „nawierzchni półsztywnej” – ma ona dwie warstwy podbudowy; górną asfaltową i dolną związaną spoiwem hydraulicznym. Odpowiada ona francuskiej „nawierzchni kompozytowej” (*chaussees a structure mixte*).

We Francji oprócz nawierzchni kompozytowych stosowane są dwa typy nawierzchni, które w Polsce nie występują. Są to „nawierzchnie półsztywne” (*semi-rigide*) o bardzo cienkich warstwach asfaltowych i nawierzchnie odwrócone (*chaussees a structure inverse*). Nawierzchnie typu *semi-rigide* o bardzo cienkich warstwach asfaltowych na podbudowach związanych hydraulicznie nie są w Polsce stosowane ze względu na możliwość wystąpienia licznych poprzecznych spękań odbitych. Klimat Polski jest dużo ostrzejszy od klimatu Francji.

Stosowane we Francji i w Polsce nazwy typów nawierzchni są różne i mogą wprowadzać w błąd. We Francji i w Polsce stosowane są inne materiały związane hydraulicznie, o czym będzie mowa w dalszej części artykułu.

Francuskie kryteria zmęczeniowe dotyczące warstw podbudowy związanych spoiwami hydraulicznymi [2], [3], [4]

Do każdego z przedstawionych wyżej typów nawierzchni na podbudowach związanych spoiwami hydraulicznymi metoda francuska podaje inną metodykę wymiarowania, opartą

jednak o takie samo kryterium zmęczeniuowe do warstw związanych spoiwami hydraulicznymi. Występują w nim niewielkie zmiany w stosowanych współczynnikach modyfikujących trwałość zmęzeniową, w zależności od funkcji jaką pełni warstwa związana spoiwem hydraulicznym w konstrukcji.

Podstawowa wersja kryterium zmęzeniowego do warstw związanych spoiwem hydraulicznym, stosowanego we Francji, przedstawiona jest wzorem:

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_{t,ad}(NE) k_r k_d k_c k_s \quad (1)$$

w którym:

- $\sigma_{t,ad}$ – dopuszczalne poziome naprężenie rozciągające, na spodzie warstw z materiałów związanych spoiwami hydraulicznymi, [MPa],
- $\sigma_{t,ad}(NE)$ – naprężenie rozciągające, przy którym następuje zniszczenie przy zginaniu próbki po 360 dniach dojrzewania, po *NE* obciążeniach, [MPa],
- k_r – współczynnik ryzyka,
- k_d – współczynnik uwzględniający efekt nieciągłości w warstwie podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym,
- k_c – współczynnik materiału,
- k_s – współczynnik podłoża.

Po rozwinięciu wyrażenia $\sigma_{t,ad}(NE)$ w oparciu o charakterystykę zmęzeniową warstw związanych spoiwami, kryterium przyjmuje postać:

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_6 \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b k_r \cdot k_d \cdot k_c \cdot k_s \quad (2)$$

w którym:

- b – nachylenie krzywej zmęzeniowej materiału w układzie współrzędnych $\log \sigma - \log N$,
- σ_6 – naprężenie rozciągające, przy którym następuje zniszczenie w teście zginania próbek po 360 dniach dojrzewania, po 10^6 cyklach [MPa].

Pozostałe oznaczenia podano przy wzorze (1).

Współczynnik k_d , dopuszczający efekt nieciągłości warstwy podbudowy, przyjmuje jedną z dwóch wartości, w zależności od zastosowanego w podbudowie materiału:

- 1/1,25 (0,8) do materiałów klas G4 i G5 związanych spoiwem hydraulicznym oraz do zagęszczonego betonu. G4 i G5 są to mieszanki kruszyw związane spoiwami hydraulicznymi o wysokich modułach sprężystości E oraz o wysokiej wytrzymałości R ,
- 1 do materiałów klas G2 i G3 związanych spoiwem hydraulicznym. G2 i G3 są to mieszanki kruszyw związanych spoiwami hydraulicznymi o mniejszych modułach sprężystości niż G4 i G5.

Wartość b jest stałą materiałową pochodzącą z badań zmęzeniowych i podaną do każdego z materiałów związanych spoiwem hydraulicznym. Wartości $-1/b$, podane w tabelach V.4.3 oraz V.4.7 w [2], [3], zawierają się w przedziale od 10 (do gruntów związanych żużlem lub wapnem pucolanowym) do 16 (do kruszyw związanych krzemowo-aluminiowymi popiołami lotnymi i wapnem).

Podobnie jak w przypadku kryterium zmęzeniowego do warstw asfaltowych, także i tutaj wymagane jest podejście iteracyjne przy projektowaniu ze względu na współczynnik związany z ryzykiem. Współczynnik ten zależy od liczby powtarzalnych obciążeń i musi być dostosowywany na bieżąco do wyników obliczeń.

Różnice pomiędzy kryteriami obecnie stosowanymi w Polsce a kryterium francuskim oraz jego przystosowanie do warunków polskich

Główną różnicą pomiędzy kryteriami stosowanymi dotychczas w Polsce a kryterium francuskim jest opis materiałów związanych spoiwami oraz zmiany charakteru jego pracy w poszczególnych etapach wymiarowania.

W Polsce warstwy związane spoiwami hydraulicznymi opisywane są dwoma modułami sprężystości Younga (w pierwszej i drugiej fazie pracy nawierzchni półsztywnej) oraz dwoma współczynnikami Poissona (także ustalonymi w zależności od fazy pracy nawierzchni). Sama klasyfikacja materiałów odbywa się na podstawie rodzaju zastosowanego spoiwa oraz wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach (w przypadku cementu) lub innej liczbie dni do pozostałych spoiw.

We Francji mieszanka związana spoiwem hydraulicznym opisana jest modulem sprężystości Younga E po 360 dniach pielęgnacji, wartością σ_6 , czyli naprężeniem rozciągającym, przy którym następuje zniszczenie w teście zginania próbek po 360 dniach dojrzewania, po 10^6 cyklach oraz parametrami b i SN związanymi z charakterystyką zmęzeniową materiału. Klasyfikacja mieszanek bazuje na ich wytrzymałości na rozciąganie proste po 360 dniach (R_{t360}) oraz module Younga wyznaczonym po 360 dniach kondycjonowania próbek. Do obliczeń przyjmuje się wartości zredukowane modułu Younga oraz wytrzymałości na rozciąganie w postaci σ_6 . Przyjęte do projektowania moduły sprężystości Younga w opisie francuskim są średnio dwa do trzech razy większe niż w opisie polskim.

Zastosowanie kryteriów zmęzeniowych do poszczególnych rodzajów nawierzchni z warstwami związanymi spoiwami hydraulicznymi

Nawierzchnie francuskie typu *semi-rigide*

W przypadku nawierzchni francuskich typu *semi-rigide*, stosuje się bezpośrednio prawo zmęzeniowe przedstawione wzorem (2). Dopuszczalne naprężenia rozciągające należy wyznaczyć do każdej z warstw związanych spoiwem, uwzględniając położenie warstwy w konstrukcji nawierzchni. W modelowaniu mechanistycznym należy uwzględnić zmienne połączenia międzywarstwowe do poszczególnych rodzajów spoiw. W przypadku podbudów jednowarstwowych w nawierzchni „*semi-rigide*”, należy odpowiednio zwiększyć naprężenia wyznaczone z obliczeń mechanistycznych w środku warstwy, by uwzględnić wzrost naprężeń przy spękaniu spowodowany wpływem nieciągłości w warstwie związanej spoiwem hydraulicznym. Kryterium zniszczenia jest pojawienie się spękania warstwy związanej spoiwem hydraulicznym. Warstwy z *mma* mają niewielką grubość (do około 10 cm) i są dobierane z typowego zestawu (np. 4 cm BBMa i 4 cm BBM). Pełnią one głównie rolę warstwy ściernalnej i ochronnej w stosunku do warstw związanych cementem. Ich grubości nie są wyznaczane ze względu na obciążenia strukturalne.

Nawierzchnie francuskie typu kompozytowego

W przypadku nawierzchni francuskich typu kompozytowego, wymiarowanie konstrukcji jest podobne do stosowanego w Polsce do nawierzchni półsztywnych. Zakłada się, że nawierzchnia pracuje w dwóch fazach: pierwsza z nich trwa od wykonania nawierzchni do spękań zmęczeniowych warstw związanych spoiwem hydraulicznym, druga od spękań podbudowy związanej hydraulicznie do spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych. Wymaga to zastosowania innych wzorów do dwóch kryteriów zmęczeniowych. Odpowiednio zmodyfikowane wzory do warstw asfaltowych oraz do warstw związanych spoiwem hydraulicznym przedstawiono poniżej.

- I faza – kryterium spękań warstw związanych spoiwem hydraulicznym:

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_t(NE) \cdot k_r \cdot k_c \cdot k_s \quad (3)$$

- II faza – kryterium spękań warstw asfaltowych:

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) \cdot k_r \cdot k_c \quad (4)$$

w których:

- $\sigma_{t,ad}$ – dopuszczalne poziome naprężenia rozciągające przy zginaniu, wyznaczone na spodzie warstw z materiałów związanych spoiwami hydraulicznymi, [MPa],
- $\sigma_t(NE)$ – naprężenie rozciągające przy zginaniu, przy którym następuje zniszczenie przy zginaniu próbki 360-dniowej z materiałów związanych spoiwami hydraulicznymi po *NE* obciążeniach, [MPa],
- $\varepsilon_{t,ad}$ – dopuszczalne odkształcenia poziome warstwy, określane na spodzie warstw asfaltowych,
- $\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f)$ – typowe odkształcenie, przy którym z 50% prawdopodobieństwem następuje zniszczenie zginanej próbki mieszanki mineralno-asfaltowej, otrzymane po *NE* cyklach obciążenia, w temperaturze ekwiwalentnej, przy częstotliwości charakterystycznej dla odkształceń występujących w rozważanej warstwie,
- k_r – współczynnik ryzyka,
- k_c – współczynnik materiału,
- k_s – współczynnik podłoża.

Ze względu na charakter pracy i parametry materiałowe poszczególnych warstw, część współczynników jest pomijana. Szczególną uwagę należy zwrócić na przyjmowanie różnego ruchu obliczeniowego do każdej z faz oraz odpowiedniego ryzyka (zróżnicowanego do każdego z materiałów). Dodatkowo należy pamiętać o odpowiednim zdefiniowaniu parametrów materiałowych oraz połączeń międzywarstwowych do poszczególnych faz.

Szczegółowe informacje dotyczące projektowania wg kryteriów francuskich można znaleźć w poradnikach [2], [3] oraz w rozdziale trzecim opracowania Politechniki Gdańskiej [5]. W celu zilustrowania zastosowania metody francuskiej wykonano przykład obliczeniowy do nawierzchni kompozytowej. Dodatkowo zaprojektowano konstrukcję nawierzchni według

metodyki stosowanej w Polsce, przy zastosowaniu kryteriów Dempsey'a oraz Instytutu Asfaltowego.

Przykład obliczeń

Przedstawiono przykład obliczania nawierzchni konstrukcji kompozytowej spełniającej wymagania polskiej kategorii obciążenia ruchem: KR4. W przykładzie pominięto konstrukcję typu *semi-rigide* (ze względu na ograniczenia klimatyczne) oraz konstrukcję typu odwróconego (w Polsce nie stosuje się konstrukcji takiego typu). Dla porównania zaprojektowano konstrukcję półsztywną według metodyki stosowanej w Polsce z zastosowaniem kryteriów Dempsey'a oraz Instytutu Asfaltowego.

Dane o ruchu:

- kategoria obciążenia ruchem: KR4,
- wymagana liczba osi standardowych 100 kN w okresie obliczeniowym 20 lat, $N_{100} = 7,3$ mln,
- koło pojedyncze o ciężarze 50 kN,
- ciśnienie kontaktowe 650 kPa.

Przyjęto nawierzchnię asfaltową na podbudowie związanej spoiwem hydraulicznym. Układ warstw przyjęto według polskiej praktyki. W tabeli 1 podano warstwy konstrukcji stosowane w Polsce i ich najbliższe odpowiedniki we Francji.

W tabeli 2 podano parametry zastosowanych materiałów. W przypadku parametrów charakterystyki zmęczeniowej wartości dobrano z materiałów francuskich, stanowiących najbliższy odpowiednik materiałów polskich.

Współczynniki modyfikujące trwałość zmęczeniową oraz wartości pośrednie konieczne do wyznaczenia ryzyka zniszczenia nawierzchni podano w tabeli 3. Metodyka przyjmowania ryzyka została podana w artykule [1].

Do wyznaczenia konstrukcji kompozytowej według metodyki francuskiej wykorzystano wzory (3) i (4). Do wyznaczenia konstrukcji półsztywnej według metodyki polskiej zasto-

Tabela 1. Schemat projektowanej konstrukcji nawierzchni wraz z zastosowanymi materiałami

L.p.	Warstwa konstrukcji nawierzchni	Materiał stosowany w Polsce	Najbliższy odpowiednik we Francji	Grubość warstwy
1	Warstwa ścieralna	SMA	BBMa	4 cm
2	Warstwa wiążąca	AC16W	BBM	8 cm
3	Górna warstwa podbudowy zasadniczej	AC22P	GB3	Do obliczenia
4	Dolna warstwa podbudowy zasadniczej	kruszywo związane cementem C 5/6	GC3 / GC2	Do obliczenia
5	Wzmocnione podłoże	Moduł wzmocnionego podłoża $E \geq 120$ MPa, $\nu = 0,35$		

Tabela 2. Parametry materiałowe poszczególnych warstw konstrukcji

Materiał polski	Odpowiednik francuski	E (10°C) [MPa]	E ($\theta=12^\circ\text{C}$) [MPa]	ν	ε_6 [μstrain]	σ_6 [MPa]	<i>b</i>	<i>SN</i>
SMA	BBMa	7200	6500	0,3	100	–	–0,2	0,25
AC16W	BBM	7200	6500	0,3	100	–	–0,2	0,25
AC22P	GB3	12300	11100	0,3	90	–	–0,2	0,3
C 5/6	GC2	15000 3000	15000 3000	0,3	–	0,57	–0,067	1

Tabela 3. Współczynniki modyfikujące trwałość zmęczeniową

Materiał	Ryzyko zniszczenia nawierzchni					k_r	k_c	k_s
	r	u	Sh [cm]	c [cm ⁻¹]	δ			
AC22P	12%	-1,175	2,5	0,02	0,391	0,810	1,3	-
C 5/6	20%	-0,842	3,0	0,02	1,345	0,840	1,4	1,0

Tabela 4. Wyniki obliczeń konstrukcji nawierzchni z podbudowami z kruszywa związanego cementem

L.p.	Warstwa nawierzchni	Materiał	Grubości warstw [cm]		
			Obliczona wg metody francuskiej	Obliczona wg IA oraz Dempsey'a	Przyjęta wg Katalogu [7]
1	Warstwa ścieralna	SMA/BBMa	4	4	4
2	Warstwa wiążąca	AC16W/BBM	6	6	8
3	Górna warstwa podbudowy	AC22P/GB3	9	11	12
4	Dolna warstwa podbudowy	C 5/6/GC2 (R _m =5 MPa w Katalogu [7])	18	20	20
5	Całkowita grubość konstrukcji		37	41	44
6	Trwałość zmęczeniowa (osi 100 kN)		10,57 mln	7,34 mln	7,3 mln

sowano wzory wg [6]. Obie konstrukcje zostały obliczone do dwóch faz pracy.

Wyniki obliczeń podano w tabeli 4. Dodatkowo przedstawiono konstrukcję z obecnie obowiązującego polskiego „Katalogu typowych konstrukcji podatnych i półsztywnych” [7], przyjętą przy obciążeniu nawierzchni ruchem kategorii KR4.

W przypadku obliczeń dokonanych wg metody francuskiej starano się zachować stosunek grubości warstw asfaltowych do całkowitej grubości nawierzchni, na poziomie 0,5. Stąd wynika tak duża trwałość zaprojektowanej konstrukcji. W przypadku pocienienia warstwy związanej spoiwem hydraulicznym lub warstwy asfaltowej nawierzchni obliczonej według metody francuskiej o 1 cm znacząco spada trwałość zmęczeniowa i nawierzchnia nie spełnia już założeń kategorii ruchu KR4. Przy zmniejszeniu grubości warstwy związanej cementem o 1 cm (z 18 cm do 17 cm) i przy pozostawieniu pozostałych grubości warstw bez zmian, trwałość zmęczeniowa nawierzchni wynosi 5,96 mln osi. Przy zmniejszeniu grubości warstwy podbudowy asfaltowej o 1 cm (z 9 cm do 8 cm) i przy pozostawieniu pozostałych grubości warstw bez zmian, trwałość zmęczeniowa nawierzchni wynosi 5,79 mln osi.

Konstrukcja zaprojektowana według metody francuskiej jest wyraźnie cieńsza od polskiej konstrukcji katalogowej.

Pomiędzy obliczeniami według wzorów Dempsey'a i Instytutu Asfaltowego a konstrukcją katalogową występuje dobra zbieżność. Niewielka różnica w grubości konstrukcji obliczonej według kryteriów Dempsey'a i Instytutu Asfaltowego w stosunku do Katalogu [7] wynika z przyjęcia do obliczeń podbudowy związanej cementem o wyższej wytrzymałości niż przyjęta w Katalogu [7]. Do obliczeń przyjęto podbudowę o wytrzymałości C5/6, według nowej klasyfikacji, czyli o wytrzymałości minimalnej 6 MPa. W Katalogu [7] wytrzymałość podbudowy stabilizowanej cementem wynosiła R_m5, czyli od 3,5 do 5 MPa, czyli o wytrzymałości maksymalnej 5 MPa.

Podsumowanie

Francuski sposób wymiarowania nawierzchni zawierających warstwy związane spoiwem hydraulicznym różni się od dotychczas stosowanych kryteriów Dempsey'a oraz Instytutu Asfaltowego. Francuzi rozróżniają trzy typy takich nawierzchni, z których jedna jest zbliżona do stosowanych w Polsce. Głównymi różnicami są:

1. Inne kryteria zmęczeniowe do warstw asfaltowych i związanych spoiwami hydraulicznymi.
 2. Inna charakterystyka materiałów związanych spoiwami hydraulicznymi (inna klasyfikacja, znacząco większe moduły sprężystości oraz wytrzymałości materiałów związanych spoiwami).
 3. Różne modele pracy nawierzchni o podbudowach związanych spoiwami hydraulicznymi (nawierzchnie półsztywne – *semi-rigide* – 1 etap pracy; nawierzchnie kompozytowe – 2 etapy pracy).
 4. Zróżnicowane założenia dotyczące połączeń międzywarstwowych, w zależności od rodzaju zastosowanego spoiwa oraz etapu pracy nawierzchni.
 5. Zróżnicowanie ruchu przyjmowanego do wymiarowania nawierzchni kompozytowych w zależności od etapu pracy; przy takim samym ruchu rzeczywistym większy ruch obliczeniowy do warstw związanych spoiwami hydraulicznymi niż do warstw asfaltowych. Wprowadzenie zróżnicowanego ryzyka zniszczenia nawierzchni w zależności od etapu pracy.
- Reasumując można stwierdzić, że przy odpowiednio przyjętych założeniach materiałowych, francuskie kryteria zmęczeniowe mogą stanowić dobre narzędzie do projektowania konstrukcji nawierzchni w Polsce. Kryteria francuskie, razem z innymi, będą wykorzystane przy opracowywaniu nowego polskiego Katalogu przez zespół Politechniki Gdańskiej.

Bibliografia

- [1] Jaczewski M., Judycki J., *Adaptacja francuskich kryteriów zmęczeniowych do projektowania nawierzchni półsztywnych w warunkach polskich*, Drogownictwo nr 5, 2012
- [2] *French Design Manual for Pavement Structures*, Guide technique, Ministere de l'Equipelement, des Transports et du Tourisme, LCPC, SETRA, May 1997
- [3] *Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussées*, Guide Technique, LCPC, Setra, Décembre 1994
- [4] *Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves*, Edition 1998, SETRA, LCPC
- [5] Judycki J., Jaskuła P., Pszczoła M., Ryś D., Jaczewski M., Alenowicz J., *Weryfikacja i aktualizacja «Katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych» z 1997 roku*, Raport z trzeciego etapu badań, Gdańsk, listopad 2011
- [6] Judycki J., *Porównanie kryteriów zmęczeniowych do projektowania podatnych i półsztywnych nawierzchni drogowych w aspekcie nowego polskiego katalogu typowych konstrukcji*, część 1, Drogownictwo nr 1, 1999
- [7] *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*, GDDKiA, Warszawa 1997 ■