

Badania trwałości zmęczeniowej nawierzchni betonowej autostrady A4

Budowa autostrady A4 od Wrocławia w kierunku do granicy z Niemcami jest największą inwestycją autostradową w Polsce, jeżeli chodzi o nawierzchnie betonowe. Łączna długość dwujezdniowego odcinka wynosi ok. 150 km. Na długości 90 km na obu jezdniach wykonano w rok po zakończeniu budowy badania nieniszczące wybudowanej konstrukcji nawierzchni. Badania te powtórzono po następnym roku eksploatacji nawierzchni. Miały na celu sprawdzenie założeń projektowych, w tym ocenę trwałości zmęczeniowej. Badania wykonywała Katedra Dróg i Lotnisk Politechniki Wrocławskiej oraz Instytut Badań Technicznych TPA. W artykule przedstawiono uzyskane rezultaty badań nieniszczących nawierzchni.

Rodzaje konstrukcji nawierzchni

Podstawowa konstrukcja nawierzchni przedmiotowej autostrady jest następująca:

- płyta betonowa o grubości 27 cm, dyblowana i kotwiona, beton klasy B40
- geowłóknina o masie 450 do 550 g/m²
- chudy beton, grubości 20 cm
- warstwa mrozochronna, grubości 30 cm
- grunt stabilizowany cementem o wytrzymałości $R = 2,5$ MPa, jako wzmocnienie podłoża.

Konstrukcja ta projektowana jest dla 30.000.000 obciążeń osi 115 kN.

Wytrzymałość obliczeniowa na rozciąganie przy zginaniu betonu cementowego wynosiła 5,5 MPa. Długości płyt wynoszą 5 m, a szerokości 4,5 m na pasie wolnym oraz 4 m na pasie szybkim. W szczelinach poprzecznych zastosowano dyble o średnicy 25 mm, długości 60 cm i rozstawie co 25 cm. Natomiast kotwy zastosowano w szczelinach podłużnych. Średnica kotew wynosiła 20 mm, długość 80 cm, były wykonane ze stali żebrowanej i umiejscawiane co 1 m. Szczeliny cięto piłami mechanicznymi w takim okresie, ażeby wytrzymałość betonu nie przekroczyła 15 MPa.

Szczeliny poprzeczne wypełniono elastycznymi profilami, natomiast podłużne wypełniono asfaltową masą zalewową.

Na odcinku Wrocław – Legnica ułożone zostały eksperymentalnie dwa typy nawierzchni, niestosowane w Polsce: płyta betonowa o ciągłym zbrojeniu oraz płyta betonowa gruba na podbudowie z kruszywa.

Nawierzchnię o ciągłym zbrojeniu zastosowano pomiędzy dwoma obiektami mostowymi na długości ok. 1100 m. Konstrukcja tej nawierzchni jest następująca:

- beton cementowy, B40, grubości 23 cm (do zbrojenia zastosowano pręty podłużne o średnicy 20 mm, w rozstawie co 18 cm, w odległości ok. 11 cm od górnej powierzchni, oraz pręty poprzeczne o średnicy 12 mm i rozstawie co 70 cm, ułożone pod kątem ok. 65°)
- podbudowa, chudy beton, $R = 6 - 9$ MPa, grubości 20 cm
- warstwa mrozochronna grubości 35 cm
- grunt stabilizowany cementem, $R = 1,5-2,5$ MPa, grubości 15 cm.

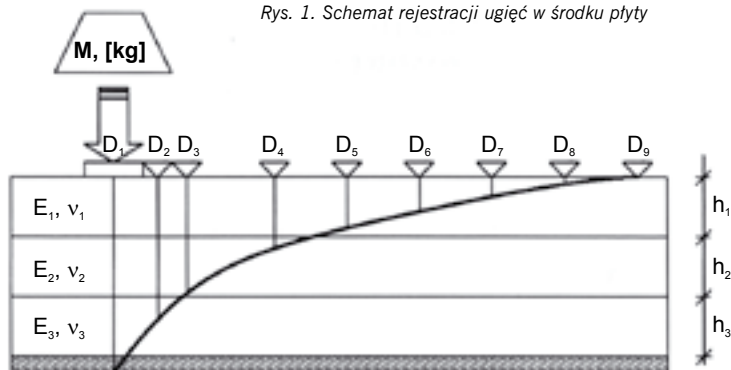
Zastosowano zbrojenie podłużne ciągłe. Poszczególne pręty łączono na zakładkę w taki sposób, ażeby łączenie nie wystąpiło w jednej linii poprzecznej.

Szerokość jezdni wraz z pasem awaryjnym oraz opaskami wiodącymi wynosi 11 m. Zastosowano dwie szczeliny podłużne, które wypełniono masą zalewową.

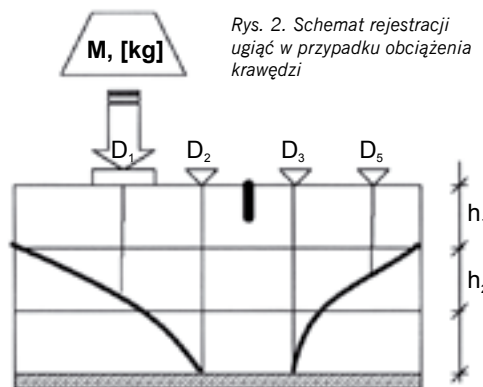
Na obu końcach odcinka na długości ok. 30 m zastosowano w rozstawie co ok. 4,8 m bloki żelbetowe o wysokości ok. 0,87 m (nie licząc grubości płyty, razem z płytą ich grubość wynosi 1,10 m) i szerokości 0,65 m. Zadaniem bloków jest kompensacja przemieszczeń i odształceń nawierzchni. Odcinek ten zlokalizowany jest na jezdni północnej w km 130+685 do 131+790.

Drugi typ eksperymentalnej nawierzchni to jest płyta dyblowana i kotwiona o grubości 30 cm,

Rys. 1. Schemat rejestracji ugięć w środku płyty



Rys. 2. Schemat rejestracji ugięć w przypadku obciążenia krawędzi



ułożona na 30-cm warstwie kruszywa łamanego, pod którą znajduje się warstwa mrozochronna o grubości 25 cm, a poniżej 15-cm warstwa gruntu stabilizowanego cementem, wzmacniająca podłoże. Długość odcinka wynosi ok. 1500 m. Wymiary płyt w planie jak na odcinku podstawowym. Odcinek ten zlokalizowany jest na jezdni północnej w km 129+280 do 130+685.

Lokalizacja i rodzaje badań

Badania zostały wykonane na autostradzie A4 w km 59+441 do 150+670 na jezdni południowej i północnej. Przeprowadzono następujące rodzaje badań:

- pomiary ugięć za pomocą FWD
- badania wytrzymałości betonu za pomocą metody sklerometrycznej
- badania wytrzymałości betonu za pomocą metody ultradźwiękowej.

Dodatkowo w nawierzchni zainstalowano czujniki do pomiaru temperatury w przekroju płyty po grubości, jak również czujniki do pomiaru odkształceń.

Wyniki pomiarów ugięć oraz wytrzymałości zostały wykorzystane do obliczeń trwałości zmęczeniowej nawierzchni.

Nawierzchnia została podzielona na sekcje pomiarowe. Sekcje pomiarowe zostały wydzielone przy zastosowaniu następujących kryteriów:

- rodzaj konstrukcji nawierzchni (typowa, o ciągłym zbrojeniu, płyta gruba)
- usytuowanie jezdni (północna, południowa)
- termin wykonania nawierzchni.

W tabeli 1 zestawiono podział na sekcje badawcze.

Wymienione rodzaje badań wykonywano w 2006 roku, a następnie te same badania powtórzono w 2007 roku.

Badania wykonywano na pasie prawym i lewym każdej jezdni. Przy czym na pasie prawym częstotliwość wykonywania pomiarów wynosiła 10 na 1 km, a na pasie lewym 5 na 1 km.

W tabeli 2 zestawiono temperatury powietrza, przy których wykonywano pomiary ugięć.

Temperatury powietrza podczas badań w 2007 roku były znacznie wyższe niż w 2006 r. za wyjątkiem sekcji 6, gdzie zanotowano temperatury porównywalne.

Wyniki pomiarów ugięć

Ugięcia mierzono za pomocą ugięciomierza dynamicznego FWD. Płyta pomiarowa sytuowana była w środku płyty, a następnie ugięcia mierzono w następujących odległościach od osi obciążenia: $D_1 = 0,0$; $D_2 = 0,2$; $D_3 = 0,3$; $D_4 = 0,45$; $D_5 = 0,6$; $D_6 = 0,9$; $D_7 = 1,2$; $D_8 = 1,5$; $D_9 = 1,8$ m. Obciążenie pomiarowe wynosiło 120 kN. Na rys. 1 pokazano schemat pomiaru ugięć w środku płyty. Ponadto mierzono przemieszczenia płyt na krawędzi według schematu pokazanego na rys. 2.

Wyniki pomiarów ugięć wykorzystano do identyfikacji modułów warstw nawierzchni z betonu cementowego, podbudowy z chudego betonu oraz podłoża. Wyniki pomiarów ugięć na krawędzi wykorzystano do oceny współczynnika współpracy płyt na krawędzi lub inaczej współczynnika przenoszenia obciążeń.

Tabela 1. Zestawienie sekcji pomiarowych

Seksja	Jezdnia	Odcinek, km	
		od	do
1***	północna	89,540	150,670
2*	północna	130,685	131,790
3**	północna	129,280	130,685
4***	północna	59,441	89,540
5***	południowa	59,441	101,630
6***	południowa	101,630	150,670

* sekcja 2 – odcinek o ciągłym zbrojeniu
 ** sekcja 3 – płyta gruba na kruszywie
 *** sekcje 1, 4, 5, 6 – nawierzchnie typowe: płyta na chudym betonie

Tabela 2. Temperatura powietrza w trakcie wykonywania pomiarów

Seksja	Pas wolny			Pas szybki		
	T°C 2006 r	T°C 2007 r	ΔT°C	T°C 2006 r	T°C 2007 r	ΔT°C
1	17,7	24,8	7,1	17,5	30,7	13,2
2	1,7	19,6	17,9	2,2	37,5	35,3
3	6,3	20,2	13,9	5,9	37,6	31,7
4	5,1	24,2	19,1	5,4	20,4	15,0
5	13,3	24,2	10,9	18,3	28,0	9,7
6	17,1	19,7	2,6	16,5	16,8	0,3

Tabela 3. Współczynniki przenoszenia obciążeń

Seksja	Pas wolny			Pas szybki		
	k 2006 r	k 2007 r	Δ %	k 2006 r	k 2007 r	Δ %
1	0,89	0,92	3,6	0,84	0,91	7,9
2	0,98	0,95	-2,7	0,96	0,95	-1,0
3	0,93	0,95	2,3	0,96	0,99	3,2
4	0,81	0,91	12,4	0,84	0,91	8,7
5	0,90	0,90	0,3	0,87	0,92	5,7
6	0,85	0,85	0,1	0,85	0,84	-1,6

Współczynnik przenoszenia obciążeń określano z zależności (1):

$$k = \frac{D_{3k} D_{2s}}{D_{2k} D_{3s}} \quad (1)$$

gdzie:

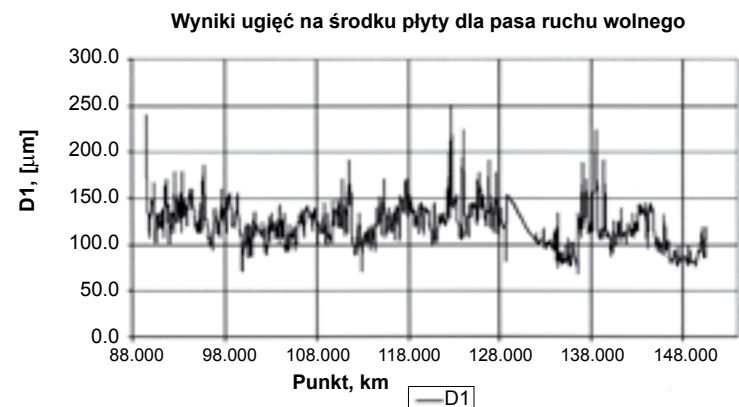
k – współczynnik przenoszenia obciążeń

D_{2k} – ugięcie krawędzi obciążonej, μm

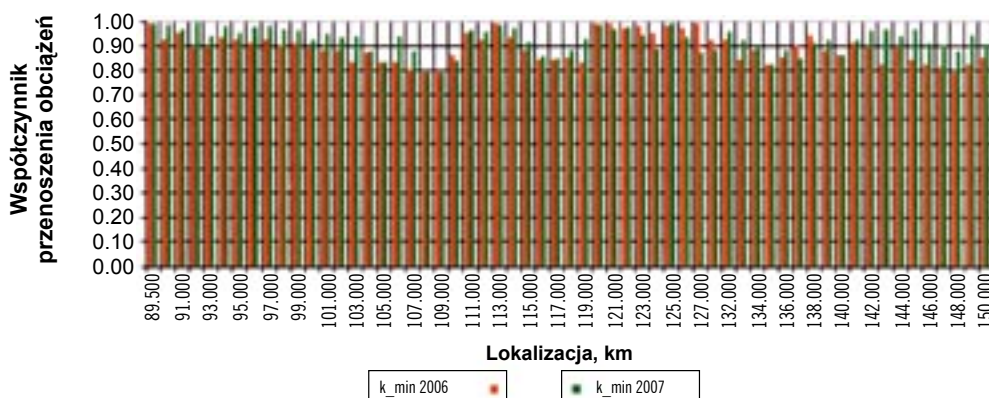
D_{3k} – ugięcie krawędzi nieobciążonej, μm

D_{2s} – ugięcie na środku płyty, najbliżej obciążonej krawędzi, μm

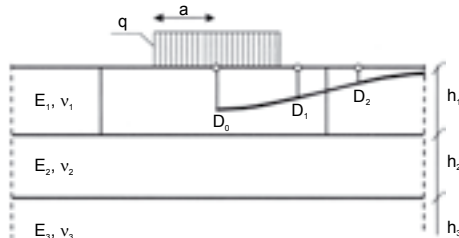
Rys. 3. Przykładowy wykres ugięć w przypadku obciążenia płyty w środku. Sekcja 1, 2006 r.



Rys. 4. Wykres współczynników przenoszenia obciążeń, sekcja 1, rok 2006, 2007

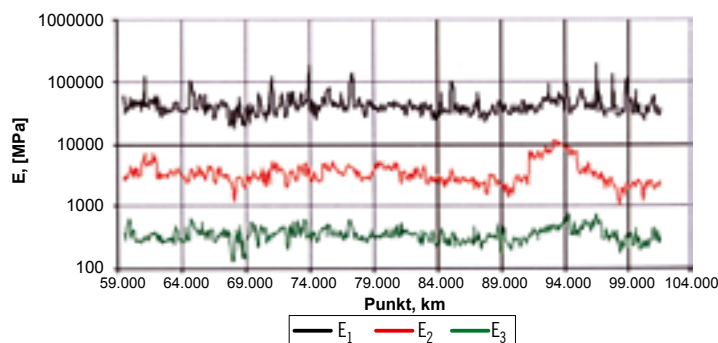


Rys. 5. Model obliczeniowy nawierzchni



Rys. 6. Przykładowe moduły warstw zidentyfikowane na sekcji 5 w 2006 roku.

Wartości modułów warstw dla pasa ruchu wolnego



D_{3s} – ugięcie na środku płyty, najbliższej obciążonej krawędzi, μm .

Na rys. 3 pokazano przykładowy wykres ugięć nawierzchni od obciążenia na środku płyty.

Na rys. 4 pokazano przykładowe wartości współczynników przenoszenia obciążeń.

W tabeli 3 zestawiono współczynniki przenoszenia obciążeń dla różnych sekcji, zarejestrowane w 2006 i 2007 roku.

Według doświadczeń brytyjskich, współczynniki przenoszenia obciążeń powyżej 0,8 świadczą o dobrej współpracy pomiędzy płytami.

Identyfikacja modułów warstw i podłoża

Do identyfikacji modułów warstw konstrukcji nawierzchni przyjęto model obliczeniowy przedstawiony na rys. 5.

Wykorzystując pomierzone czasy przemieszczeń na każdym stanowisku obliczono moduły płyty betonowej (E_1), podbudowy z chudego betonu (E_2) oraz podłoża (E_3) równoważnego (podłoża naturalne, stabilizacja, warstwa mrozochronna).

Na rys. 6 pokazano przykładowe moduły zidentyfikowane na sekcji 5 w 2006 roku.

Tabela 4. Średnia minimalna wytrzymałość na ściskanie dla wszystkich pomiarów

Młotek Schmidta			Betnoskop		
2006 r. R [MPa]	2007 r. R [MPa]	Wzrost [%]	2006 r. R [MPa]	2007 r. R [MPa]	Wzrost [%]
49,68	51,48	3,62	47,20	48,93	3,67

Tabela 5. Średnia minimalna wytrzymałość na ściskanie dla jezdni północnej i południowej

Jezdnia	Młotek Schmidta			Betnoskop		
	2006r. R [MPa]	2007r. R [MPa]	Wzrost [%]	2006r. R [MPa]	2007r. R [MPa]	Wzrost [%]
północna	51,96	53,31	2,60	48,07	49,14	2,23
południowa	47,32	49,63	4,88	46,42	48,79	5,11

Tabela 6. Średnia minimalna wytrzymałość na ściskanie dla każdej sekcji

Sekcja	Młotek Schmidta			Betnoskop		
	2006 R [MPa]	2007 R [MPa]	Wzrost [%]	2006 R [MPa]	2007 R [MPa]	Wzrost [%]
1	50,86	50,48	-0,75	47,95	48,47	1,08
2	43,76	54,32	24,13	41,64	53,10	27,52
3	40,58	48,01	18,31	41,08	47,81	16,38
4	54,89	58,95	7,40	48,61	50,37	3,62
5	48,59	50,20	3,31	45,2	47,32	4,69
6	45,89	49,00	6,78	47,72	50,33	5,47

Badania wytrzymałości betonu

Na przedmiotowej nawierzchni równocześnie z pomiarami ugięć prowadzono badania nieniszczące wytrzymałości betonu za pomocą metody sklerometrycznej (młotek Schmidta) i ultradźwiękowej (betnoskop). W tabelach 4-6 zestawiono uzyskane wyniki.

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że:

- W ciągu roku zanotowano średni wzrost wytrzymałości na ściskanie o średnio 3,6%.
- Na jezdni południowej wzrost wytrzymałości był nieznacznie większy niż na jezdni północnej.
- Duże przyrosty średnich wytrzymałości w sekcjach nr 2 i 3 nie są wiarygodne. Sekcje nr 2 i 3 były to krótkie odcinki doświadczalne, na których badania przeprowadzono tylko w trzech przekrojach.
- Podczas badania młotkiem Schmidta w sekcji nr 1 zanotowano mały spadek wytrzymałości o 0,75%. Tymczasem badanie betnoskopem w tej samej sekcji wykazało wzrost wytrzymałości o 1,08%. Najprawdopodobniej średni przyrost wytrzymałości betonu w tej sekcji był bliski zera.
- W sekcjach nr 4, 5 i 6 zanotowano wzrost średniej wytrzymałości na ściskanie o 3,3-7,4%.

Podsumowując badania wytrzymałościowe, można wyciągnąć następujące wnioski:

- Na całej długości badanego odcinka autostrady A-4 beton ma wytrzymałość na ściskanie powyżej 40 MPa.
- Wyniki uzyskane podczas badania młotkiem Schmidta i betonoskopem są zbliżone do siebie. Odchyłki mieszczą się w granicach błędów pomiarowych obu metod.
- Pomiędzy 2006 a 2007 rokiem zanotowano średni wzrost wytrzymałości na ściskanie o około 3%.

Trwałość zmęczeniowa nawierzchni

Wykorzystując badania identyfikacyjne modułów oraz wytrzymałości na zginanie, obliczono trwałość zmęczeniową dla badanych nawierzchni.

Do oceny trwałości wykorzystano zależność (2):

$$N = 10^{\frac{1}{0,078} \left(1 - \frac{\sigma_{\max}}{R_{zg}}\right)} \quad (2)$$

gdzie:

N – liczba powtarzalnych obciążeń osi 115 kN

R_{zg} – wytrzymałość betonu na zginanie, MPa

σ_{\max} – maksymalne naprężenia w płycie betonowej, MPa.

Maksymalne naprężenia w betonie (σ_{\max}) obliczono jako sumę naprężeń od obciążenia kołem obliczeniowym oraz temperatury wg zależności (3,4):

$$\sigma = \sigma_T + \sigma_R \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{\sigma}{k} \quad (4)$$

gdzie:

σ_T – naprężenia od temperatury, MPa

σ_R – naprężenia od obciążenia kołem, MPa

k - współczynnik przenoszenia obciążeń.

Na rys. 7 pokazano przykładowy wykres trwałości zmęczeniowej określony na sekcji 5 w 2006 roku. W tabeli 7 zestawiono średnie trwałości zmęczeniowe nawierzchni w poszczególnych sekcjach w różnych latach dla wytrzymałości na zginanie zarejestrowanej podczas wbudowywania betonu.

Natomiast w tabeli 8 trwałości zmęczeniowe z uwzględnieniem 2% wzrostu wytrzymałości na zginanie.

Z porównania wyników obliczeń z tabel 7 i 8 wynika, że trwałość zmęczeniowa na większości sekcji wzrasta w niewielkim stopniu.

Podsumowując należy stwierdzić, że trwałość zmęczeniowa badanej nawierzchni jest większa od projektowanej trwałości równej 30.000.000 osi obliczeniowych.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania nieniszczące na nawierzchni betonowej autostrady A4 wykazały, że:

- wytrzymałość na ściskanie betonu spełnia założenia projektowe
- zaobserwowano niewielki, ok. 2-3%, wzrost wytrzymałości betonu w okresie 1 roku
- istotny wpływ na uzyskiwane wartości trwałości zmęczeniowej ma temperatura powietrza podczas badania; przy wysokich temperaturach powietrza obserwuje się zjawisko wybrzuszania płyt, co powoduje identyfikowanie mniejszych modułów podbudowy i podłoża, a tym samym

Rys. 7. Przykładowy wykres trwałości zmęczeniowej określony na sekcji 5 w 2006 roku.

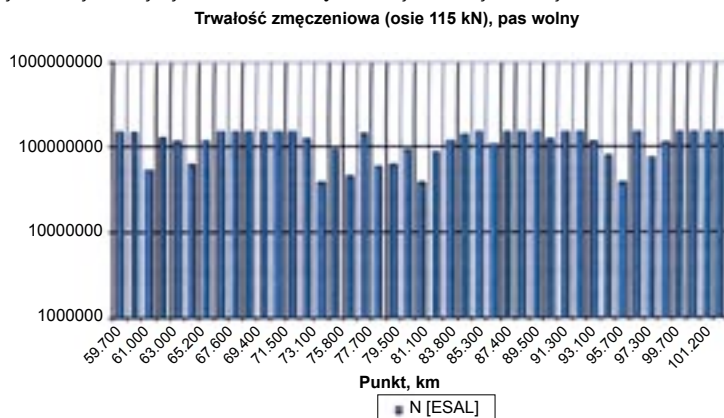


Tabela 7. Średnie wartości dopuszczalnej liczby obciążeń osi obliczeniowych na poszczególnych sekcjach

Sekcja	Pas wolny			Pas szybki		
	N 2006 r	N 2007 r	Δ %	N 2006 r	N 2007 r	Δ %
1	117451496	102721296	-12,5	94789229	75432810	-20,4
2	142554204	139162587	-2,4	148978125	145580688	-2,3
3	124662560	106812736	-14,3	126554190	119335758	-5,7
4	90310537	75151596	-16,8	94460692	78632077	-16,8
5	130346456	128442575	-1,5	124978322	111751845	-10,6
6	116046405	108971298	-6,1	91393377	87494936	-4,3

Tabela 8. Średnie wartości dopuszczalnej liczby obciążeń osi obliczeniowych na poszczególnych sekcjach dla zwiększonej o 2% wytrzymałości na zginanie

Sekcja	Pas wolny			Pas szybki		
	N 2006 r	N 2007 r	Δ %	N 2006 r	N 2007 r	Δ %
1	117451496	110722961	-5,7	94789229	125855579	32,8
2	142554204	143528122	0,7	148978125	150000000	0,7
3	124662560	119533403	-4,1	126554190	131236071	3,7
4	90310537	85763495	-5,0	94460692	88971037	-5,6
5	130346456	133861292	2,7	124978322	119114314	-4,7
6	116046405	118925341	2,5	91393377	97994779	7,2

mniejszą trwałość zmęczeniową; większe są też współczynniki przenoszenia obciążeń; w przypadku niskich temperatur obserwuje się zjawisko odrywania krawędzi, a tym samym mniejsze współczynniki przenoszenia obciążeń,

- badane odcinki autostrady spełniają wymagania projektowe co do trwałości zmęczeniowej nawierzchni.

prof. Antoni Szydło

Katedra Dróg i Lotnisk Politechnika Wrocławska

inż. Igor Ruttmar

TPA Instytut Badań Technicznych Polska

Literatura

- 1 A. Szydło, Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego, Polski Cement, Kraków 2004 r.
- 2 Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Guide technique. SETRA, LCPC, Paris 1994 r.
- 3 AASHTO Guide for design of Pavement Structures. Part II Rigid Pavement, 1998