

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW
Zakład Diagnostyki Nawierzchni

SPRAWOZDANIE
z realizacji pracy TD-80 pt.:
„Analiza wpływu stanu podbudowy na ocenę nośności nawierzchni
o konstrukcji pólshzywnej”

Zlecniodawca: GDDKiA, umowa nr 1656/2007

Opracowali:

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI
inż. Przemysław HARASIM
inż. Adam KOWALSKI
Jacek KUSIAK
Radosław BORUCKI

Kierownik Zakładu
Diagnostyki Nawierzchni

mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

Warszawa, listopad 2007

SPIS TREŚCI

1. Podstawa i zakres pracy	3
2. Wprowadzenie	3
3. Badania na wytypowanych odcinkach drogowych	5
4. Obliczenie nośności nawierzchni wytypowanych odcinków	7
5. Obliczenie grubości nakładki wzmacniającej	12
6. Analiza wyników badań i obliczeń	15
7. Wnioski	17
Bibliografia	19

Załącznik 1: Karty badań wykonanych na wytypowanych odcinkach drogowych

1. Podstawa i zakres pracy

Praca wykonana została na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w ramach umowy nr 1656/2007 z dnia 23.01.2007 roku. Celem pracy jest ocena wpływu stanu podbudowy w konstrukcjach półsztywnych na projektowanie wzmocnienia nawierzchni. Niniejsze sprawozdanie opisuje przebieg realizacji zadań ustalonych w programie pracy.

2. Wprowadzenie

Katalog Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [1] opracowany w IBDiM, w 2001 roku podaje zasady wymiarowania konstrukcji nawierzchni drogowych. W projektowaniu nawierzchni asfaltowych zaleca się stosowanie jednej z dwóch metod: metodę ugięć, bazującą na pomiarach belką Benkelmana lub metodę mechanistyczną wykorzystującą wyniki badań ugięciomierzem dynamicznym FWD. Wybór metody projektowania zależy od konstrukcji nawierzchni oraz od kategorii ruchu. Metodę ugięć stosuje się dla ruchu kategorii KR1 – KR4, natomiast dla wyższych kategorii ruchu KR5 i KR6 obliczenia prowadzi się metodą mechanistyczną. Ponadto metodę tę zaleca się w przypadku wątpliwości co do poprawności wyników uzyskiwanych metodą ugięć, w szczególności dla nawierzchni półsztywnych.

Jako nawierzchnię półsztywną definiuje się konstrukcję, w której podbudowę stanowi warstwa związana spoiwem hydraulicznym (cement, popioły lotne, itp.). Jeżeli pomiędzy warstwami asfaltowymi i podbudową znajduje się warstwa z kruszywa niezwiązanego – to taką konstrukcję traktujemy jako podatną.

Metoda ugięć opisana w Katalogu [1] jest modyfikacją metody stosowanej przez wiele lat, również w Polsce. Podstawą jest założenie, że trwałość nawierzchni jest zależna od ugięcia sprężystego nawierzchni, mierzonego w centralnym punkcie obciążenia konstrukcji. Im większe ugięcie nawierzchni, tym niższa jej trwałość. Przyjmuje się założenie, że dla określonego obciążenia drogi ruchem ugięcie obliczeniowe nie może przekroczyć pewnej ustalonej wartości (ugięcia dopuszczalnego). W przypadku przekroczenia tej wartości konstrukcję należy wzmocnić nakładką, o grubości, która pozwoli na zmniejszenie ugięcia nawierzchni, co najmniej do wartości dopuszczalnej.

Metoda oprócz prostoty w stosowaniu ma jednak kilka istotnych ograniczeń. Pojedyncze ugięcie w centrum obciążenia nie daje pełnego obrazu krzywizny wywoływanej przez to obciążenie. Nie otrzymujemy informacji o wielkości naprężeń (lub odkształceń) na spodzie warstw asfaltowych i podbudowy. To samo ugięcie może występować przy różnych (mniejszych lub większych) promieniach krzywizny ugięcia. Przy mniejszym promieniu występują większe naprężenia i w konsekwencji niższa trwałość zmęczeniowa konstrukcji. Kolejne ograniczenie to zależność ugięcia od czynników lokalnych, takich jak: pora roku, wilgotność podłoża, temperatura warstw asfaltowych oraz rodzaj podbudowy (podatna lub związana spoiwem hydraulicznym).

Do wyznaczenia grubości nakładki wzmacniającej potrzebna jest informacja o projektowanym ruchu i wartość ugięcia obliczeniowego. Ugięcie obliczeniowe zależne jest od wartości ugięć pomierzonych na badanym odcinku oraz ich rozproszenia i jest korygowane współczynnikami uwzględniającymi ograniczenia podane wcześniej. Wyznacza się je ze wzoru:

$$U_{obl} = U_m \cdot f_T \cdot f_S \cdot f_P \quad (1)$$

w którym:

U_{obl} ugięcie obliczeniowe,

U_m miarodajne ugięcie sprężyste obliczone ze wzoru:

$$U_m = U_{\text{śred}} + 2S_U \quad (2)$$

f_T współczynnik temperaturowy (korygujący ugięcia ze względu na temperaturę pomiaru ugięć T ($^{\circ}\text{C}$), ze wzoru:

$$f_T = 1 + 0,02(20 - T) \quad (3)$$

f_S współczynnik sezonowości (korygujący ugięcia ze względu na porę roku),

f_P współczynnik podbudowy (korygujący ze względu na rodzaj podbudowy),

$U_{\text{śred}}$ średnie ugięcie sprężyste dla danej sekcji jednorodnej,

S_U odchylenie standardowe ugięć dla sekcji jednorodnej,

Dodatkowo, jeżeli pomiar wykonany został ugięciomierzem FWD, to ugięcie miarodajne należy przeliczyć do metody Benkelmana. Dla nawierzchni asfaltowych przeliczenia ugięć pomiędzy obiema metodami (FWD i Benkelmana) dokonuje się za pomocą wzorów („Katalog ...”, Załącznik C, Procedura 4):

- dla nawierzchni podatnej: $BB = 1,24 \text{ FWD}$ (4)

- dla nawierzchni półsztywnej: $BB = 1,31 \text{ FWD}$ (5)

Po wyznaczeniu ugięć obliczeniowych i ruchu całkowitego określa się wymaganą grubość zastępczą nakładki wzmacniającej z nomogramu. Grubość zastępcza nakładki wzmacniającej jest to grubość w przeliczeniu na tłużeń standardowy.

Katalog nie podaje wartości jakie należy przyjmować dla współczynnika sezonowości f_P , lecz w ramach pracy [2] wykonanej na zlecenie GDDKiA zostały opracowane i wynoszą:

- 1,00 – dla miesięcy marzec i kwiecień,
- 1,15 – maj, czerwiec, lipiec, sierpień, wrzesień,
- 1,25 – październik, listopad.

Wartość współczynnika podbudowy f_P podano orientacyjnie:

- 1,0 – dla nawierzchni podatnych,
- $1,0 \div 1,4$ – dla nawierzchni półsztywnych.

Większą wartość współczynnika f_P zaleca się przyjmować dla podbudowy sztywniejszej. Natomiast gdy podbudowa jest bardzo spękana, to pracuje ona w sposób podobny do podatnej, a wówczas współczynnik f_P jest bliski 1,0.

W celu dokładniejszego oszacowania wartości współczynnika podbudowy należy się posiłkować dodatkowo oceną stanu podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym. Dodatkowe informacje można uzyskać poprzez wykonanie odwiertów w nawierzchni oraz z badań wytrzymałościowych próbek pobranych z podbudowy.

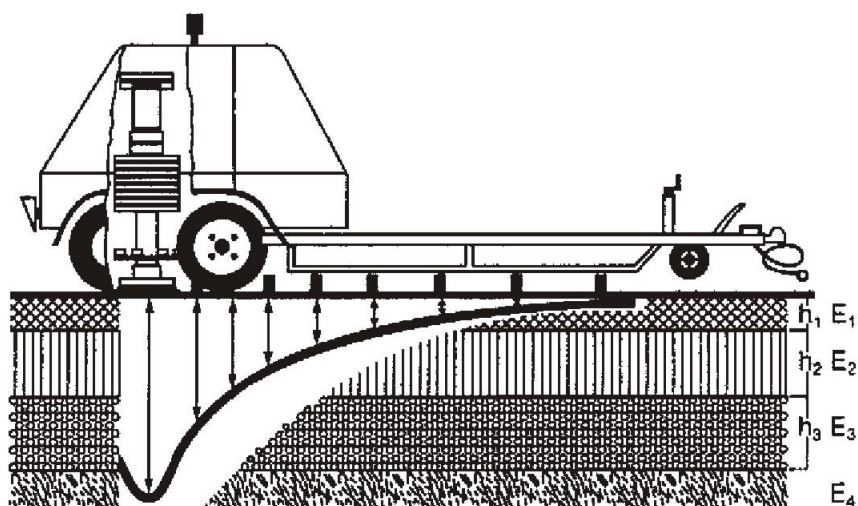
Niniejsza praca ma na celu przybliżenie zagadnień związanych z określeniem wartości współczynnika podbudowy oraz ewentualną ich weryfikację i uściślenie.

3. Badania na wytypowanych odcinkach drogowych

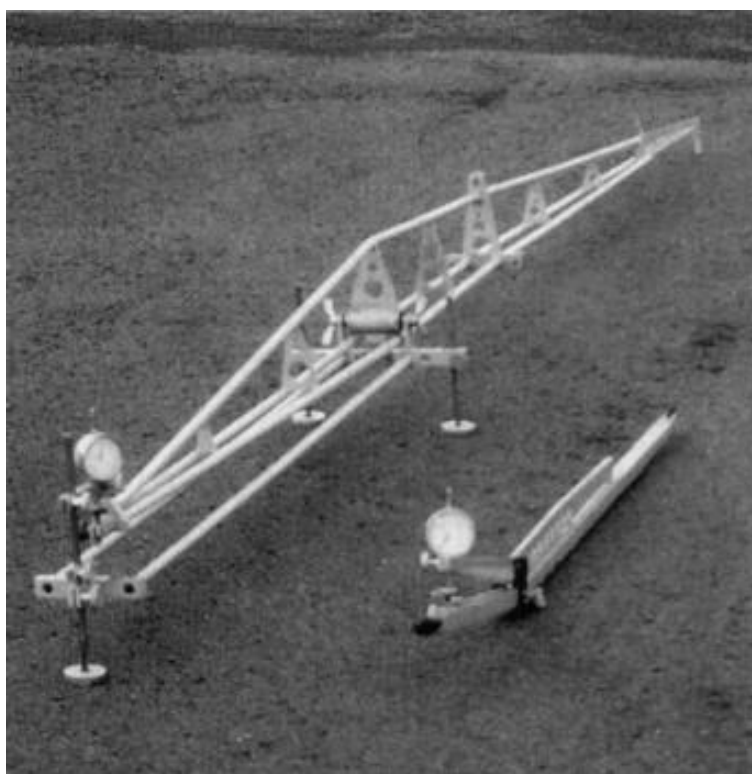
Wytypowano 45 odcinków drogowych, w większości o podbudowie związanej spoiwem hydraulicznym, na których wykonano serię pomiarów ugięć oraz pobrano próbki do badań laboratoryjnych. Odcinki dobrano tak, aby reprezentowały zarówno konstrukcje podatne jak i półsztywne oraz charakteryzowały się różnymi grubościami warstw konstrukcyjnych. Badania ugięć prowadzono głównie ugięciomierzem dynamicznym FWD (rysunki 1 i 2). Na kilkunastu odcinkach wykonano również pomiary ugięć belką Benkelmana (rysunek 3) według [3].



Rysunek 1 Widok ugięciomierza FWD podczas wykonywania badania (na zdjęciu płyta naciskowa i czujniki ugięć, tzw. geofony)



Rysunek 2 Schemat badania ugięciomierzem FWD (wraz z czaszą ugięć)



Rysunek 3 Ugięciomierz belkowy Benkelmana

Na wytypowanych odcinkach dróg wykonano odwierty w nawierzchni w celu rozpoznania układu i grubości warstw oraz pobrania próbek podbudowy do badania wytrzymałości na ściskanie (rysunek 4).

W załączniku 1 zestawiono dane o lokalizacji odcinków badawczych, konstrukcji nawierzchni oraz wszystkie wyniki pomiarów (ugięcia belką Benkelmana oraz FWD) i badań wytrzymałości na ściskanie.



Rysunek 4 Widok próbki podbudowy z betonu cementowego podczas badania wytrzymałości na ściskanie

4. Obliczenie nośności nawierzchni wytypowanych odcinków

Dla pomierzonych ugięć metodą FWD i belką Benkelmana wyznaczono ugięcia obliczeniowe U_{obl} . Przyjęto współczynniki korygujące f_S i f_T zgodnie z zaleceniami Katalogu. Współczynnik f_P przyjęto jako równy 1,00. Dla ugięć FWD uwzględniono również współczynnik przeliczający ugięcia na metodę Benkelmana (f_{BB}). Wyniki obliczeń zestawiono w tabelicy 1.

Tablica 1 Wyznaczone ugięcia obliczeniowe dla pomiarów belką Benkelmana

Odcinek	Rodzaj konstr.	Miesiąc pomiaru	Temp. pomiaru, °C	Współczynniki korygujące			Statystyki ugięć, mm			Ugięcie obliczen.
				f_T	f_S	f_{BB}	$U_{\text{śred}}$	S_U	U_m	
8	POD.	IX	18	1,04	1,15	1,00	0,442	0,139	0,720	0,86
9	PÓŁ.	IV	14	1,12	1,00	1,00	0,366	0,028	0,423	0,47
10	PÓŁ.	III	5	1,30	1,00	1,00	0,025	0,024	0,074	0,10
11	PÓŁ.	IV	15	1,10	1,00	1,00	0,316	0,111	0,538	0,59
12	PÓŁ.	IV	14	1,12	1,00	1,00	0,340	0,037	0,414	0,46
13	POD.	IV	16	1,08	1,00	1,00	0,273	0,056	0,385	0,42
14	PÓŁ.	IV	16	1,08	1,00	1,00	0,275	0,038	0,351	0,38
15	POD.	IV	17	1,06	1,00	1,00	0,294	0,096	0,485	0,51
16	POD.	IV	16	1,08	1,00	1,00	0,898	0,238	1,374	1,48

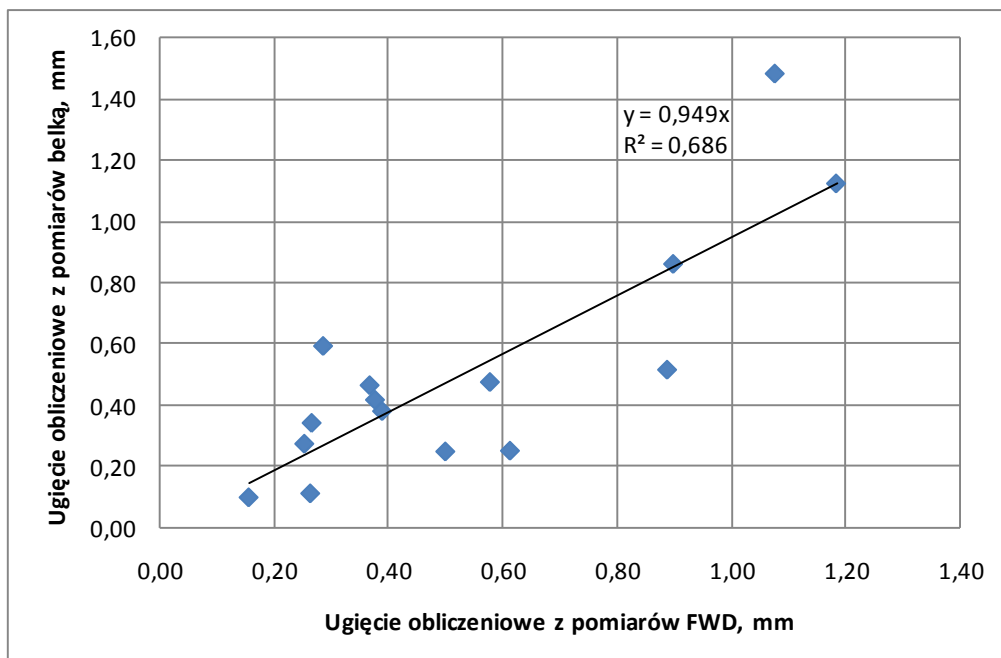
17	POD.	IV	24	0,92	1,00	1,00	0,680	0,271	1,222	1,12
18	PÓŁ.	IV	10	1,20	1,00	1,00	0,141	0,043	0,226	0,27
19	PÓŁ.	IV	11	1,18	1,00	1,00	0,195	0,046	0,288	0,34
20	PÓŁ.	III	8	1,24	1,00	1,00	0,059	0,014	0,088	0,11
21	PÓŁ.	III	10	1,20	1,00	1,00	0,135	0,036	0,207	0,25
25	POD.	III	18	1,04	1,00	1,00	0,170	0,033	0,237	0,25

Tablica 2 Wyznaczone ugięcia obliczeniowe dla pomiarów ugięciomierzem FWD

Odcinek	Rodzaj konstr.	Miesiąc pomiaru	Temp. pomiaru, °C	Współczynniki korygujące			Statystyki ugięć, μm			Ugięcie obl., mm
				f_T	f_S	f_{BB}	$U_{\text{śred}}$	S_U	U_m	
1	PÓŁ.	XI	5	1,30	1,25	1,31	302	115	531	1,13
2	PÓŁ.	XI	5	1,30	1,25	1,31	154	75	304	0,65
3	PÓŁ.	XI	5	1,30	1,25	1,31	500	216	933	1,99
4	PÓŁ.	XI	5	1,30	1,25	1,31	210	41	292	0,62
5	PÓŁ.	XI	21	0,98	1,25	1,31	279	113	505	0,81
6	PÓŁ.	XI	21	0,98	1,25	1,31	331	211	753	1,21
7	PÓŁ.	XI	5	1,30	1,25	1,31	237	74	385	0,82
8	POD.	IX	19	1,02	1,15	1,24	432	93	618	0,90
9	PÓŁ.	IV	19	1,02	1,00	1,31	353	40	432	0,58
10	PÓŁ.	III	5	1,30	1,00	1,31	67	12	91	0,15
11	PÓŁ.	IV	19	1,02	1,00	1,31	160	27	214	0,29
12	PÓŁ.	IV	19	1,02	1,00	1,31	234	21	275	0,37
13	POD.	IV	18	1,04	1,00	1,24	257	17	292	0,38
14	PÓŁ.	IV	23	0,94	1,00	1,31	254	31	316	0,39
15	POD.	IV	23	0,94	1,00	1,24	544	109	762	0,89
16	POD.	IV	19	1,02	1,00	1,24	582	135	851	1,08
17	POD.	IV	22	0,96	1,00	1,24	535	230	995	1,18
18	PÓŁ.	IV	16	1,08	1,00	1,31	114	32	178	0,25
19	PÓŁ.	IV	16	1,08	1,00	1,31	145	21	187	0,27
20	PÓŁ.	III	5	1,30	1,00	1,31	116	19	154	0,26
21	PÓŁ.	III	5	1,30	1,00	1,31	244	58	360	0,61
22	PÓŁ.	XI	5	1,30	1,25	1,31	350	115	581	1,24
23	PÓŁ.	XI	5	1,30	1,25	1,31	328	117	561	1,19
24	PÓŁ.	XI	5	1,30	1,25	1,31	283	29	340	0,72
25	POD.	III	5	1,30	1,00	1,24	252	29	310	0,50
26	PÓŁ.	XI	7	1,26	1,25	1,31	240	118	475	0,98
27	POD.	XI	7	1,26	1,25	1,24	163	59	281	0,55
28	POD.	III	10	1,20	1,00	1,24	451	404	1259	1,87
29	POD.	III	10	1,20	1,00	1,24	393	156	706	1,05

30	POD.	III	10	1,20	1,00	1,24	332	207	746	1,11
31	PÓŁ.	XI	10	1,20	1,25	1,31	482	105	692	1,36
32	PÓŁ.	X	15	1,10	1,25	1,31	403	114	631	1,14
33	PÓŁ.	X	15	1,10	1,25	1,31	359	56	471	0,85
34	PÓŁ.	X	15	1,10	1,25	1,31	364	76	517	0,93
35	PÓŁ.	X	15	1,10	1,25	1,31	284	55	394	0,71
36	PÓŁ.	X	15	1,10	1,25	1,31	216	66	347	0,63
37	PÓŁ.	X	8	1,24	1,25	1,31	144	23	190	0,39
38	PÓŁ.	VIII	16	1,08	1,15	1,31	511	195	900	1,46
39	PÓŁ.	IV	12	1,16	1,00	1,31	216	40	296	0,45
40	PÓŁ.	III	6	1,28	1,00	1,31	230	71	371	0,62
41	PÓŁ.	III	7	1,26	1,00	1,31	242	81	405	0,67
42	POD.	III	7	1,26	1,00	1,24	539	78	694	1,08
43	PÓŁ.	XI	7	1,26	1,25	1,31	266	46	358	0,74
44	PÓŁ.	XI	7	1,26	1,25	1,31	330	77	484	1,00
45	PÓŁ.	III	7	1,26	1,00	1,31	271	61	392	0,65

Po wyznaczeniu ugięć obliczeniowych oceniono zgodność uzyskanych wartości z obu metod pomiarowych. W tym celu sprawdzono korelację ugięć obliczeniowych uzyskanych z badań FWD i belką Benkelmana. Wynik analizy przedstawia rysunek 5.



Rysunek 5 Wykres korelacji ugięcia obliczeniowego z metod FWD i BB

Uzyskano zadowalający poziom współczynnika korelacji $R = 0,83$. Oznacza to, że zarówno z pomiarów ugięć belką Benkelmana jak i z pomiarów FWD otrzymano porównywalne wartości ugięcia obliczeniowego U_{obl} służącego do wyznaczenia grubości nakładki wzmacniającej z nomogramu. Oznacza to również, że współczynniki korygujące zostały w Katalogu dobrane prawidłowo. Dlatego też dalsze analizy oparto na ugięciu obliczeniowym wyznaczonym z pomiarów FWD. Przemawia za tym również fakt, że pomiary ugięć FWD wykonano na wszystkich wytypowanych odcinkach.

Następnie obliczono trwałość konstrukcji, a w przypadku analizy metodą mechanistyczną poszczególnych warstw nawierzchni. Na podstawie pomiarów czaszy ugięć nawierzchni oraz danych o konstrukcji, przedstawionych w załączniku 1 obliczono moduły sprężystości (sztywności) warstw konstrukcyjnych. Obliczenia wykonano programem ELMOD5, wyniki zestawiono w załączniku 1. W następnym kroku wyznaczono moduły miarodajne dla poszczególnych odcinków badawczych. Jako wartość miarodajną przyjęto kwantyl rzędu 0,15 wartości modułów obliczonych w ramach pomiarów na danym odcinku. Oznacza to, że 85% obliczonych dla każdego odcinka wartości jest większych od modułu miarodajnego, przyjętego w dalszych obliczeniach trwałości zmęczeniowej. Jest to metodyka powszechnie stosowana świecie w obliczeniach mechanistycznych.

Obliczone wartości modułów miarodajnych, które w dalszej części analiz służyły do wyznaczenia trwałości zmęczeniowej konstrukcji oraz zaprojektowania wzmocnienia nawierzchni zestawiono w tabelicy 3. Trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni określono wykorzystując kryteria zmęczeniowe przyjęte w Katalogu [1]. Są to:

- kryterium zmęczeniowe warstw asfaltowych [4],
- kryterium deformacji strukturalnych nawierzchni (podłoża gruntowego) [4],
- kryterium zmęczeniowe warstw związanych spoiwem hydraulicznym [5].

Wyznaczono odkształcenia i naprężenia w konstrukcji, w miejscach krytycznych dla trwałości konstrukcji wg poszczególnych kryteriów, tzn.:

- odkształcenia rozciągające na spodzie pakietu warstw asfaltowych,
- odkształcenia pionowe w górnej części podłoża gruntowego,
- naprężenia rozciągające na spodzie warstwy związanej spoiwem hydraulicznym.

Ponieważ metoda ugięć służy do wyznaczania grubości nakładki wzmacniającej, a nie trwałości więc obliczenie trwałości konstrukcji wyznaczono tylko metodą mechanistyczną.

Wyniki obliczeń odkształceń, naprężeń i trwałości wyznaczonej metodą mechanistyczną zestawiono w tabelicy 3.

Tablica 3 Wyniki analiz trwałości konstrukcji odcinków badawczych metodą mechaniczną

Odcinek	Moduły warstw konstrukcyjnych, MPa			Naprężenia i odkształcenia			Trwałość, mln. osi 100 kN		
	E1	E2	E3	ϵ_1	σ_2	ϵ_3	WA	WP	PG
1	4360	456	83	222	0,18	876	0,65	> 100	0,07
2	22616	1612	122	56	0,21	268	14,79	> 100	13,92
3	1078	200	38	455	0,12	1314	0,20	> 100	0,01
4	19357	227	79	65	0,018	258	10,34	> 100	16,51
5	4827	1301	14	94	0,52	895	10,06	0,6	0,06
6	17194	1757	18	36	0,15	200	80,00	> 100	51,73
7	7873	1177	80	97	0,3	511	5,97	> 100	0,77
8	4153	242	35	265	-	809	0,38	-	0,10
9	1080	1333	82	46	0,35	576	> 100	11,70	0,45
10	9813	2952	325	28	0,09	67	> 100	> 100	> 100
11	3063	3556	129	22	0,27	164	> 100	> 100	> 100
12	2644	1702	86	58	0,27	326	82,38	> 100	5,78
13	4404	438	96	114	-	291	5,76	-	9,62
14	1993	12179	58	-30	1,26	305	ścisk.	> 100	7,8
15	1155	171	83	426	-	586	0,24	-	0,42
16	1420	427	29	1,03	-	1152	1,03	-	0,02
17	1768	128	56	412	-	769	0,18	-	0,12
18	3792	8371	221	1	0,47	129	> 100	> 100	> 100
19	4831	1798	148	61	0,23	266	41,7	13,7	14,4
20	11483	570	134	45	0,03	139	54,18	> 100	> 100
21	6086	603	85	146	0,1	547	1,94	0,53	0,57
22	3119	761	38	135	0,22	600	4,44	-	0,38
23	2577	630	80	195	0,33	1123	1,56	-	0,02
24	13688	2237	61	73	0,23	424	9,5	0,39	1,78
25	5177	560	88	128	-	428	3,43	-	1,71
26	4222	245	61	164	0,02	408	1,81	8,62	2,11
27	3795	748	128	120	-	344	5,53	-	4,54
28	1738	262	39	316	-	975	0,45	-	0,04
29	948	68	58	343	-	443	0,57	-	1,46
30	2048	298	60	206	-	538	1,58	-	0,61
31	2813	724	59	186	0,41	1208	1,69	11,2	0,02
32	691	499	87	191	0,34	1593	5,13	0	0,005
33	6422	2734	64	-56	1,23	1052	ścisk.	0	0,03
34	1173	1983	65	-18	1	1233	ścisk.	0	0,01
35	37105	5098	51	13	0,85	378	> 100	30,9	2,98
36	41743	5248	67	25	0,73	308	> 100	> 100	7,46

37	9253	872	134	71	0,1	241	14,53	-	22,4
38	3626	862	62	190	0,56	1400	1,27	0	0,01
39	4704	565	101	136	-	431	3,05	-	1,65
40	20769	3193	62	43	0,47	316	37,9	100	6,65
41	3797	938	51	123	-	568	5,09	-	0,48
42	2999	160	67	463	-	1357	0,08	-	0,01
43	5336	772	62	124	-	529	3,71	-	0,66
44	3190	874	66	136	-	713	4,25	-	0,17
45	1402	2293	70	65	-	575	97,3	-	0,45

Oznaczenia w tablicy 3:

E1 – moduł sztywności pakietu warstw asfaltowych,

E2 – moduł sprężystości warstwy podbudowy,

E3 – moduł sprężystości podłoża gruntowego,

ε_1 – odkształcenie rozciągające na spodzie warstw asfaltowych,

σ_2 – naprężenie rozciągające na spodzie warstwy związanej spoiwem hydraulicznym,

ε_3 – odkształcenie pionowe w górnej części podłoża gruntowego,

WA – trwałość określona dla warstw asfaltowych,

WP – trwałość określona dla warstw podbudowy,

PG – trwałość określona dla podłoża gruntowego,

5. Obliczenie grubości nakładki wzmacniającej

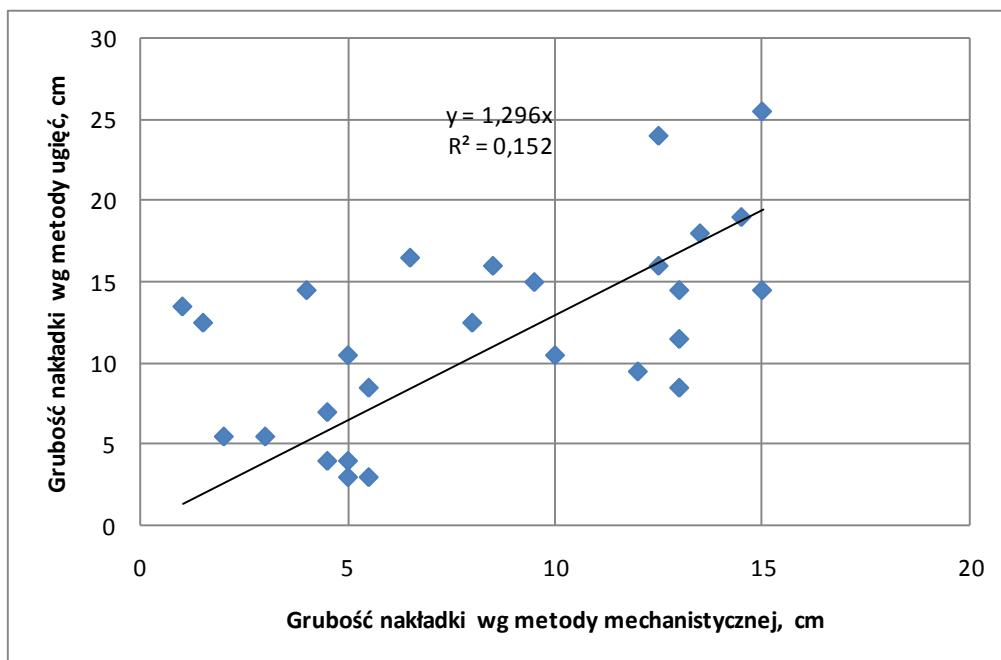
Dla obu metod, tj. ugięć i mechanicznej obliczono grubość nakładki wzmacniającej, przy założeniu liczby osi obliczeniowych w trzech wariantach: 2, 4 i 6 mln. osi 100 kN. Obliczając nakładkę metodą mechaniczną analizowano tylko spełnienie kryterium deformacji strukturalnych (podłoża gruntowego) ponieważ było to kryterium dominujące dla praktycznie wszystkich konstrukcji odcinków badawczych. W obliczeniach pominięto nawierzchnie, dla których trwałość wykraczała poza obszar działania metody ugięć (ruch powyżej kategorii KR4). Przyjęto, że wzmocnienie stanowiła będzie warstwa z betonu asfaltowego o module sztywności $E = 10000 \text{ MPa}$ (w temperaturze 10°C) i stałej Poissona $\nu = 0,3$.

Wyniki obliczeń grubości nakładki wzmacniającej zestawiono w tablicy 4.

Tablica 4 Obliczenie grubości nakładki metodą mechanistyczną i metodą ugięć

Odcinek	Rodzaj konstruk.	Grubość nakładki wzmacniającej metoda mechanistyczna, cm			Grubość nakładki wzmacniającej metoda ugięć, cm		
		2 mln.	4 mln.	6 mln.	2 mln.	4 mln.	6 mln.
1	PÓŁ.	11	9,5	7,5	16	15	14
3	PÓŁ.	17	15	13	26	25,5	25
5	PÓŁ.	14,5	13	10,5	9	8,5	7
7	PÓŁ.	6	5,5	4,5	9	8,5	7
8	POD.	11,5	10	7,5	11	10,5	9
9	PÓŁ.	7	5,5	4	3,5	3	2
15	POD.	6,5	5	3	11	10,5	9
16	POD.	17	15	12	15	14,5	13,5
17	POD.	10	8,5	6	16,5	16	15
21	PÓŁ.	6,5	5	3	3,5	3	2
22	PÓŁ.	8	6,5	4	17,5	16,5	16
23	PÓŁ.	13,5	12,5	10,5	16,5	16	15
24	PÓŁ.	4	3	1	6,5	5,5	4
26	PÓŁ.	2,5	1,5	0	13	12,5	11,5
28	POD.	14	12,5	10	24,5	24	23
29	POD.	2	1	0	14	13,5	12,5
30	POD.	6	4	2	15	14,5	13,5
31	PÓŁ.	15	13,5	11	18,5	18	17,5
33	PÓŁ.	13,5	12	10	10	9,5	8
34	PÓŁ.	14,5	13	11	12	11,5	10,5
35	PÓŁ.	4	2	0	6,5	5,5	4
38	PÓŁ.	16	14,5	12,5	19,5	19	18,5
41	PÓŁ.	7	4,5	3	4	4	3
42	POD.	14	13	11	15	14,5	13,5
43	PÓŁ.	6	4,5	2,5	8	7	6
44	PÓŁ.	9,5	8	6	13	12,5	11,5
45	PÓŁ.	6,5	5	2,5	4	4	3

Sprawdzono zgodność grubości nakładek wzmacniających wyznaczonych metodą mechanistyczną i metodą ugięć. Wykonano w tym celu analizę regresji liniowej (rysunek 6). Otrzymana wartość współczynnika korelacji jest niezadowalająco niska $R = 0,39$. Ponadto grubości wzmocnienia wyznaczone z metody ugięć są znacznie wyższe, zarówno dla nawierzchni podatnych jak i dla półsztywnych (średnio o ok. 4 cm).



Rysunek 6 Wykres korelacji ugięcia obliczeniowego z metod FWD i BB

Powodem różnic w grubościach nakładki wzmacniającej wyznaczonej obu metodami jest prawdopodobnie przyjęcie innych poziomów ufności. Ugięcie miarodajne U_m obliczane wg wzoru (2) wyznaczone jest przy poziomie ufności 98%. Oznacza to, że prawdopodobieństwo wystąpienia ugięć większych niż miarodajne wynosi 2%. Moduły sprężystości (sztywności), wykorzystywane do obliczenia wzmocnienia nawierzchni metoda mechaniczną, wyznaczone były natomiast dla poziomu ufności 85%. Postanowiono zatem wykonać powtórne obliczenia nakładki wzmacniającej, tym razem tylko dla obciążenia 4 mln. osi 100 kN, przy poziomie ufności 95%. Ponownie zatem obliczono moduły warstw konstrukcyjnych (poziom ufności 95%), a następnie metodą kolejnych przybliżeń wyznaczano poszukiwaną grubość wzmocnienia.

Wyniki analiz zestawiono w tablicy 5

Tablica 5 Obliczenie grubości nakładki metodą mechanistyczną (poziom ufności 95%)

Odcinek	Rodzaj konstrukcji	Moduły warstw konstrukcyjnych, MPa			Grubość nakładki, cm 4 mln. osi
		E1	E2	E3	
1	PÓŁ.	2849	337	76	12,0
3	PÓŁ.	963	115	36	17,0
5	PÓŁ.	1716	485	14	20,5
7	PÓŁ.	4579	783	69	8,0
8	POD.	2757	138	30	13,5
9	PÓŁ.	752	1021	76	8,0
15	POD.	577	164	68	9,5
16	POD.	902	396	24	17,5
17	POD.	814	84	35	15,5
21	PÓŁ.	3367	361	76	8,5
22	PÓŁ.	1814	544	34	11,0
23	PÓŁ.	2275	551	74	13,5
24	PÓŁ.	12219	1938	54	4,0
26	PÓŁ.	2122	145	57	5,0
28	POD.	641	164	30	18,0
29	POD.	597	53	45	6,0
30	POD.	1186	196	54	8,5
31	PÓŁ.	1651	562	56	16,0
33	PÓŁ.	4696	2363	54	13,5
34	PÓŁ.	704	1619	57	15,0
35	PÓŁ.	17692	2762	47	8,0
38	PÓŁ.	1202	827	58	17,0
41	PÓŁ.	3333	467	47	8,0
42	POD.	2618	125	63	13,5
43	PÓŁ.	3549	416	59	7,5
44	PÓŁ.	1967	602	63	11,5
45	PÓŁ.	319	1459	69	10,5

6. Analiza wyników badań i obliczeń

Obliczone grubości nakładek wzmacniających (z metody ugięć i metody mechanistycznej, przy 95% poziomie ufności) poddano dalszej analizie. W pierwszej kolejności rozdzielono odcinki z konstrukcją podatną i odcinki z konstrukcją półsztywną. W obu grupach oddzielnie przeanalizowano zgodność grubości nakładek wzmacniających wyznaczonych obu metodami.

Dla nawierzchni podatnych uzyskano podobne grubości wzmocnienia, nieco większe dla metody ugięć. Według metody mechanistycznej średnia grubość nakładki wyniosła 13 cm,

natomiast wyznaczona na podstawie ugięcia obliczeniowego 15 cm. Różnicę tę można traktować jako pewien zapas bezpieczeństwa w metodzie ugięć, uwzględniający ograniczenia tej metody.

Z odcinków o nawierzchni półsztywnej wydzielono kilka konstrukcji, które miały moduły warstwy podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym na poziomie podbudowy niezwiązanej (nawierzchnie podatne). Dla pozostałych odcinków otrzymano średnie grubości nakładki odpowiednio:

- 10,7 cm dla metody mechanistycznej,
- 9,5 cm dla metody ugięć.

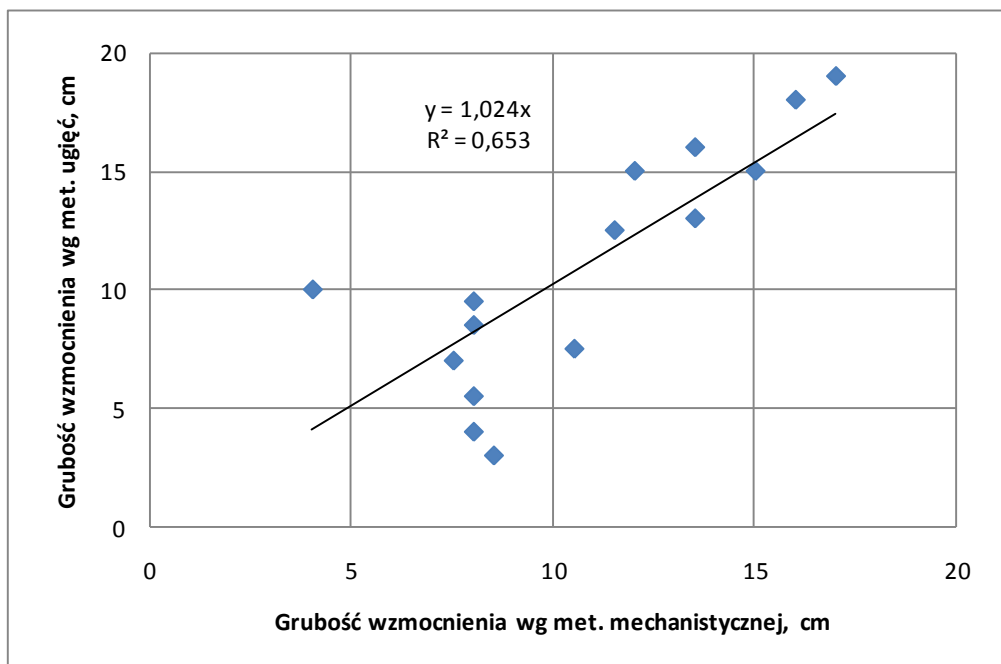
Różnice te sugerują konieczność zastosowania współczynnika podbudowy f_p , w celu uzyskania zbliżonych do siebie grubości nakładek dla obu metod projektowych. Dla oszacowania wielkości tego współczynnika podzielono odcinki o konstrukcji półsztywnej na kolejne dwie grupy:

- o module podbudowy $E_2 < \text{od } 1000 \text{ MPa}$,
- o module podbudowy $E_2 > \text{od } 1000 \text{ MPa}$.

Dla odcinków z obu grup wyznaczono współczynnik podbudowy, którego średnie wartości wyniosły odpowiednio:

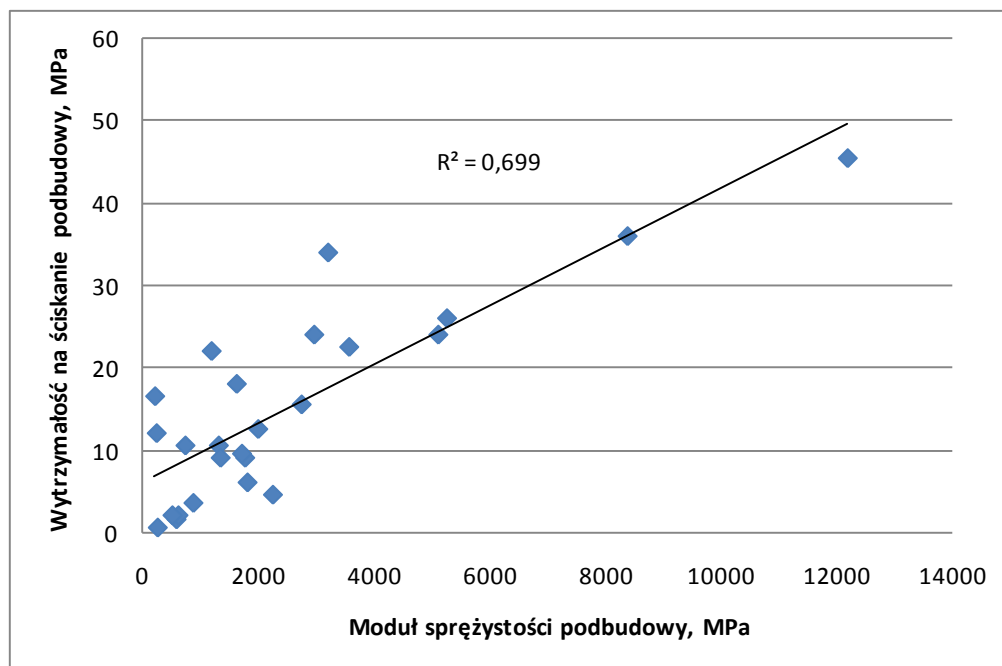
- 1,00 dla konstrukcji o module podbudowy $E_2 < \text{od } 1000 \text{ MPa}$,
- 1,20 dla konstrukcji o module podbudowy $E_2 > \text{od } 1000 \text{ MPa}$.

Wartości ugięć obliczeniowych dla odcinków o konstrukcji półsztywnej skorygowano współczynnikami podbudowy podanymi powyżej. Wyznaczono ponownie grubości nakładki metodą ugięć. Otrzymano dobrą zgodność wzmocnienia obliczonego obu metodami projektowymi (rysunek 7). Współczynnik korelacji wyniósł $R = 0,81$, a współczynnik kierunkowy prostej regresji jest zbliżony do 1.



Rysunek 7 Porównanie grubości nakładki obliczonej metodą mechanistyczną i wyznaczoną metodą ugięć (po korekcie wsp. podbudowy)

Sprawdzono również korelację wartości modułów sprężystości warstwy podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym z wytrzymałością na ściskanie próbek pobranych z tej warstwy. Wyniki analizy przedstawia rysunek 8. Również w tym przypadku otrzymano zadowalającą korelację wartości ($R = 0,84$). Wskazuje to na możliwość szacowania wielkości współczynnika podbudowy na podstawie oceny wytrzymałości na ściskanie próbek pobranych z warstwy związanej spoiwem hydraulicznym.



Rysunek 8 Wykres korelacji wytrzymałości na ściskanie i modułu podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym

6. Wnioski

Wykonana praca pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- dobra korelacja ugięć obliczeniowych wyznaczonych z pomiarów ugięciomierzem belkowym Benkelmana i ugięciomierzem dynamicznym FWD wskazuje, że podane w Katalogu [1] wartości współczynników korekcyjnych (współczynnik temperaturowy f_T oraz współczynnik do przeliczania ugięć FWD na ugięcia Benkelmana) oraz opracowany w 2006 roku współczynnik sezonowości f_S zostały dobrane poprawnie,
- grubość nakładki projektowanej według metody ugięć jest średnio wyższa o ok. 4 cm od zaprojektowanej metodą mechanistyczną; wynika to prawdopodobnie z wyższego poziomu ufności przyjętego w metodzie ugięć (98%, a w metodzie mechanistycznej zazwyczaj przyjmuje się 85% przy obliczaniu modułów warstw konstrukcyjnych),
- dobra korelacja wartości modułów sprężystości warstwy podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym z wytrzymałością na ściskanie próbek pobranych z tej warstwy wskazuje na możliwość szacowania wielkości współczynnika podbudowy na

podstawie oceny wytrzymałości na ściskanie próbek pobranych z warstwy związanej spoiwem hydraulicznym,

- złożoność pracy nawierzchni o konstrukcji półsztywnej, czego przejawem jest trudność wyznaczenia ścisłych wartości współczynnika podbudowy na podstawie badań wykonanych w niniejszej pracy, skłania do wskazania metody mechanistycznej jako najodpowiedniejszą do projektowania wzmocnień nawierzchni półsztywnej,
- przeprowadzone w pracy badania i analizy pomiarów na wytypowanych odcinkach drogowych sugerują przyjęcie następujących, ogólnych zasad przyjmowania wartości współczynnika podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym:
 - dla kruszywa lub gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym – $f_p = 1,0 \div 1,1$,
 - dla chudego betonu cementowego ($R_c < 9 \text{ MPa}$) – $f_p = 1,1 \div 1,2$,
 - dla betonu cementowego - $f_p > 1,2$.

Bibliografia

- [1] Katalog Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, IBDiM Warszawa 2001
- [2] Opracowanie współczynników sezonowych dla nawierzchni dróg w polskich warunkach klimatycznych. IBDiM na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad. Warszawa 2004.
- [3] BN-70/8931-06 Drogi samochodowe. Pomiar ugięć nawierzchni podatnych ugięciomierzem belkowym.
- [4] Thickness design – asphalt pavements for highways and streets, The Asphalt Institute, MS-1, 1981.
- [5] Dempsey B.J. i inni : Report ESL-TR-83-34, University of Illinois, Urbana, 1984.

ZAŁĄCZNIK 1

Karty badań wykonanych na wytypowanych odcinkach drogowych