CEZARY KRASZEWSKI¹⁾

CHARAKTERYSTYKA WYTRZYMAŁOŚCIOWA MIESZANEK KRUSZYW ZWIĄZANYCH HYDRAULICZNIE DO STOSOWANIA W PODBUDOWACH DROGOWYCH

STRESZCZENIE. Artykuł przedstawia przegląd wymagań dla podbudów drogowych, wyniki badań wytrzymałości na ściskanie R_c i wytrzymałości na rozciąganie R_t oraz relacje pomiędzy tymi cechami stwardniałych mieszanek związanych hydraulicznie wg PN-EN 14227:1+5. Zależności pomiędzy różnymi cechami dla betonów konstrukcyjnych są dość dobrze znane i ustalone (Eurokod 2), brakuje natomiast badań mieszanek o mniejszych wytrzymałościach (od 0,5 MPa do 20 MPa), które stosowane są w podbudowach drogowych. Przedstawiona w artykule analiza wyników badań wykazała na istnienie zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie R_c a wytrzymałością na rozciąganie R_t dla mieszanek związanych hydraulicznie (cementem, żużlem granulowanym, popiołem lotnym i spoiwem drogowym) o różnych wytrzymałościach (od 5 MPa do 20 MPa). Przeanalizowano właściwości mieszanek o uziarnieniu 0/22,4mm wykonanych z różnych rodzajów kruszyw: łamanych (ze skał osadowych i przeobrażonych), nie łamanych i z recyklingu betonu. Wyniki badań oraz ustalone zależności pomiędzy badanymi cechami mogą być pomocne przy wymiarowaniu mechanicznym konstrukcji drogowych, zwłaszcza dlatego, że trwałość zmęczeniowa konstrukcji sztywnych i półsztywnych zależy w dużym stopniu od trwałości warstw związanych hydraulicznie.

¹⁾ dr inż. – członek Mazowieckiej Izby Inżynierów

1. WSTĘP

W styczniu 2005 r. PN-EN 14227 cz. 1 ÷ 5 zostały wprowadzone do zbioru Polskich Norm w języku oryginału, a następnie w 2007 r. w wersji polskiej opublikowano (cz. 1, 2, 3 i 5) normy dotyczące mieszanek związanych spoiwami hydraulicznymi (HBM) (ang. *hydraulically bound mixtures*):

- PN-EN 14227-1:2007 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Wymagania. Część 1: Mieszanki związane cementem,
- PN-EN 14227-2:2007 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Specyfikacje. Część 2: Mieszanki żużlowe,
- PN-EN 14227-3:2007 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Wymagania. Część 3: Mieszanki związane popiołami lotnymi,
- PN-EN 14227-4:2005 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Wymagania. Część 4: Popioły lotne do mieszanek (oryg.),
- PN-EN 14227-5:2007 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Wymagania. Część 5: Mieszanki związane spoiwem drogowym.

Mieszanki związane hydraulicznie przeznaczone są do stosowania w warstwach drogowych, takich jak: ulepszone podłoże, podbudowa zasadnicza i pomocnicza nawierzchni półsztywnych i sztywnych [1 - 3]. Przykładowe przekroje nawierzchni drogowej z układem warstw konstrukcyjnych i podłoża przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

warstwa ścieralna	podbudowa	nawierzchnia
warstwa wiążąca		
podbudowa zasadnicza		
podbudowa pomocnicza		
podłoże ulepszone (warstwa mrozochronna, odcinająca, wzmacniająca)	podłoże	
podłoże gruntowe		

Rys. 1. Układ warstw w konstrukcji nawierzchni drogowej podatnej i półsztywnej
Fig. 1. Cross-section of flexible and semi - rigid road pavement

Dotychczas, do wykonywania podbudów drogowych stosowane były głównie mieszanki kruszyw naturalnych lub gruntów, związanych cementem (stabilizacja gruntów cementem wg PN-S-96012, chude betony wg PN-S-06103 i betony popiołowe wg PN-S-96013).

Podstawowym kryterium projektowym dla tych podbudów była odpowiednia wytrzymałość na ściskanie R_c i wskaźnik mrozoodporności związanej mieszanki.

warstwa ścieralna		podbudowa	nawierzchnia
podbudowa zasadnicza			
podbudowa pomocnicza			
podłoże ulepszone (warstwa mrozoochronna, odcinająca, wzmacniająca)		podłoże	
podłoże gruntowe			

Rys. 2. Układ warstw w konstrukcji nawierzchni drogowej sztywnej
Fig. 2. Cross-section of rigid road pavement

Wg norm PN-EN 14227 (cz. 1 ÷ 5) mieszanki związane hydraulicznie mogą być związane nie tylko cementem, ale także innymi spoiwami: wielkopieczowym żużlem granulowanym, spoiwami drogowymi lub popiołami lotnymi. Jako składniki do tych mieszanek należy stosować kruszywa: naturalne (nie łamane, łamane)²⁾ oraz sztuczne i z recyklingu, co daje dużą różnorodność mieszanek biorąc pod uwagę rodzaj zastosowanego spoiwa i kruszywa.

Klasyfikacja wytrzymałościowa mieszanek związanych hydraulicznie opiera się na dwóch alternatywnych systemach:

- System I, w którym podstawowym kryterium mechanicznym jest wytrzymałość na ściskanie R_c . Przykładową klasyfikację mieszanek związanych hydraulicznie wg PN-EN 14227-5 przedstawiono w tablicy 1.
- System II, w którym klasyfikacji dokonuje się na podstawie wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednie R_t i wartości modułu sprężystości E , po czym określa się klasy mieszanek w skali od T1 do T5. Przykładową klasyfikację R_t , E wg PN-EN 14227-5 przedstawiono na rysunku 3.

W Polsce, ze względu na dotychczasowe doświadczenia krajowe ze stosowaniem tego typu materiałów w budownictwie drogowym przyjęta zostanie klasyfikacja w systemie I, R_c [3].

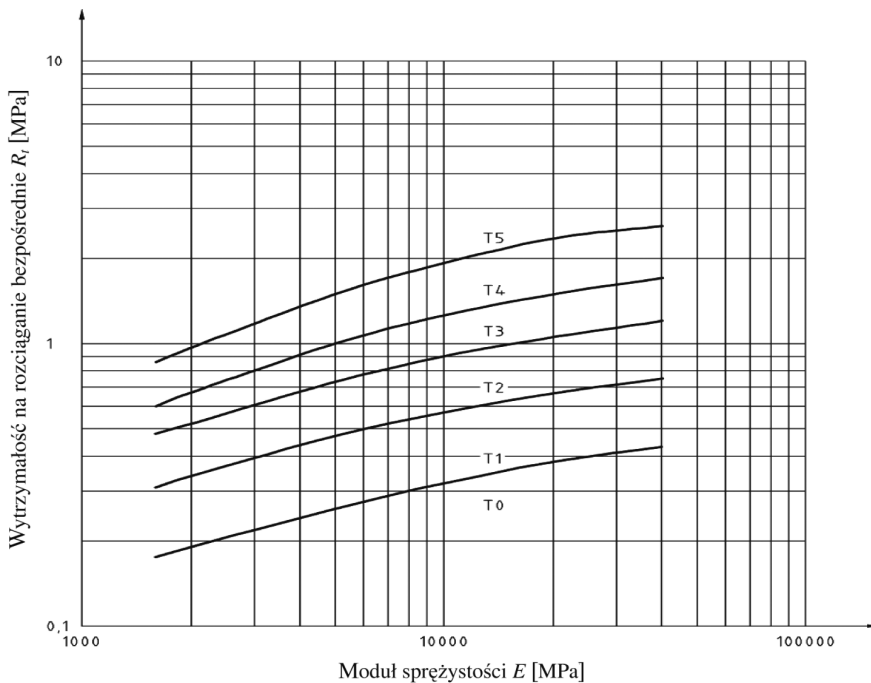
Analizy przedstawione w niniejszym artykule przeprowadzono na wynikach badań mieszanek HBM w IBDiM zgodnie z PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2, które były wykonane w celu opracowania krajowych Wymagań Technicznych (mieszanki związane hydraulicznie) wdrażających normy EN.

²⁾ Obecna normalizacja PN EN nie dokonuje podziału na kruszywa łamane i nie łamane. Autor wprowadził ten podział dodatkowo, w celu szczegółowego zdefiniowania zastosowanych kruszyw w badaniach

Tablica 1. Klasyfikacja wg wytrzymałości na ściskanie R_c
 Table 1. Classification by compressive strength R_c

Minimalna R_c [MPa] dla walca o wskaźniku smukłości 2 ^{*)}	Minimalna R_c [MPa] dla walca o wskaźniku smukłości 1 ^{*)} i sześcianu	Klasa R_c
0,4	0,5	C _{0,4/0,5}
0,8	1	C _{0,8/1}
1,5	2	C _{1,5/2}
3	4	C _{3/4}
6	8	C _{6/8}
9	12	C _{9/12}
12	16	C _{12/16}
15	20	C _{15/20}
18	24	C _{18/24}
21	28	C _{21/28}
24	32	C _{24/32}
27	36	C _{27/36}

^{*)} jeżeli wykorzystano walce o wskaźniku smukłości innym niż 1 lub 2 należy przed zastosowaniem określić ich korelację z walcami o wskaźnikach smukłości 1 lub 2



Rys. 3. Klasyfikacja wg wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednie R_t i moduł sprężystości E
 Fig. 3. Classification by direct tensile strength R_t and elastic modulus E

2. TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA DROGOWYCH WARSTW ZWIĄZANYCH HYDRAULICZNIE

Współczesne projektowanie konstrukcji drogowych opiera się na metodach mechanicznych polegających na analizie stanu odkształceń i naprężeń warstw drogowych obciążonych standardową osią obliczeniową. Tymi metodami opracowano w Polsce katalogi typowych nawierzchni drogowych [4, 5].

Mieszanki związane hydraulicznie w podbudowach drogowych podlegają innym kryteriom zmęczeniowym niż warstwy niezwiązane czy warstwy asfaltowe. Liczne badania [6, 7] wykazują, że dominującym kryterium w konstrukcjach półsztywnych i sztywnych jest trwałość zmęczeniowa warstw związanych hydraulicznie. Trwałość zmęczeniową tych warstw oblicza się w dwóch etapach. Etap I, przed wystąpieniem spękań i etap II, po wystąpieniu spękań zmęczeniowych, kiedy zmieniają się stałe materiałowe związanej warstwy. Zwłaszcza w I etapie, kiedy warstwa związana hydraulicznie jest jeszcze niespękana, jest płytą ciągłą z ewentualnymi pęknięciami skurczowymi, a naprężenia $\sigma_{x,y}$ i odkształcenia rozciągające $\varepsilon_{x,y}$, powodują zarysowania materiału i występowanie szkód zmęczeniowych. Trwałość zmęczeniowa nawierzchni drogowej w I etapie wg różnych kryteriów [6] wynika zawsze z trwałości zmęczeniowej warstwy związanej hydraulicznie. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni drogowej sztywnej i półsztywnej przedstawiono na rysunku 4.

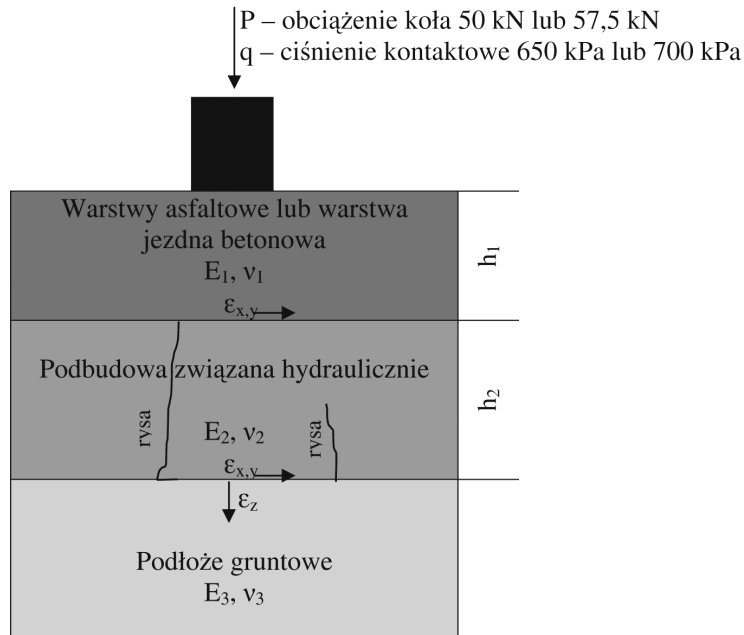
Jednym z kryteriów zmęczeniowych dla warstw związanych spoiwem hydraulicznym stosowanym w Polsce wg [6, 7] jest kryterium Dembsey'a:

$$\log N_f = 11,784 - 12,121 (\sigma / R_b) , \quad (1)$$

gdzie:

- N_f – liczba obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych podbudowy związanej hydraulicznie,
- σ – naprężenie, jakie występuje w spodzie warstwy podbudowy związanej hydraulicznie pod obciążeniem osią obliczeniową,
- R_b – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu materiału podbudowy, po normowym okresie pielęgnacji.

Podstawą projektowania nawierzchni półsztywnych i sztywnych jest wytrzymałość na rozciąganie materiału związanego hydraulicznie R_t . Zwłaszcza wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu R_b ma w tym przypadku istotne znaczenie, co wynika z przyjętego modelu do projektowania. Są to cechy, które dotychczas były rzadko badane w Polsce dla mieszanek HBM, gdyż nie wymagały tego normy i specyfikacje techniczne. Do projektowania przyjmowano głównie wytrzymałość na ściskanie R_c , a pozostałe cechy szacowano wg różnych zależności. W niniejszym artykule przedstawiono zależności wytrzymałości na rozciąganie R_t od wytrzymałości na ściskanie R_c dla różnych mieszanek HBM wg norm PN-EN 14227: 1÷5 ustalonych na podstawie badań przeprowadzonych w IBDiM [2].



- P – obciążenie koła,
- q – ciśnienie kontaktowe,
- ϵ_z – odkształcenie ściskające w podłożu,
- $\epsilon_{x,y}$ – odkształcenie rozciągające na spodzie warstw asfaltowych i związanych hydraulicznie,
- E_i, ν_i – stałe materiałowe poszczególnych warstw,
- h_i – grubości warstw.

Rys. 4. Model konstrukcji nawierzchni drogowej sztywnej i półsztywnej
 Fig. 4. Model of rigid and semi-rigid road pavement

3. ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY PARAMETRAMI WYTRZYMAŁOŚCIOWYMI MIESZANEK HBM I BETONÓW CEMENTOWYCH

W przypadku betonów cementowych istnieją określone empirycznie zależności między poszczególnymi cechami betonu i na podstawie znajomości wytrzymałości na ściskanie f_c możliwe jest określenie z przybliżeniem także innych właściwości materiału. Oceny metod badań cech betonu i relacji pomiędzy nimi na podstawie zależności normowych i analizy wyników badań dokonał *M. A. Glinicki* [8] wykazując niespójność wymagań i metod badawczych na podstawie Polskich Norm oraz to, że badania wytrzymałości na rozciąganie dają duży rozrzut wyników, znacznie większy niż wytrzymałości na ściskanie.

Autor niniejszego artykułu zauważa, że występuje niespójność w symbolach oznaczeniowych we wprowadzonych normach PN-EN 14227 1÷5 w stosunku do norm dotyczących betonów i ich badań, np. wytrzymałość na ściskanie mieszanek związanych hydraulicznie oznacza się jako R_c , a w przypadku betonów tą samą cechą oznacza się f_c .

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań mieszanek związanych hydraulicznie wg PN-EN 14227-1÷5 z zastosowaniem różnych rodzajów i zawartości spoiw. Przeanalizowano właściwości mieszanek typu 2 o uziarnieniu 0/22,4 mm wykonanych z różnych kruszyw: łamanych (ze skał osadowych i przeobrażonych), nie łamanych i z recyklingu betonu. Zasadniczym kryterium była wytrzymałość na ściskanie R_c i mrozoodporność stwardniałej mieszanki wynikająca z dotychczasowej polskiej praktyki. Analizę mrozoodporności mieszanek związanych hydraulicznie zawiera praca C. Kraszewskiego [9]. Zbadano także wytrzymałość na rozciąganie R_t .

Przedstawiona w artykule analiza wyników badań wykazała, że istnieje zależność pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie R_t a wytrzymałością na ściskanie R_c dla mieszanek związanych hydraulicznie (cementem, żużlem granulowanym, popiołem lotnym i spoiwem drogowym) o wytrzymałościach R_c w zakresie od 5 MPa do 20 MPa, a wyniki badań oraz ustalone zależności pomiędzy badanymi cechami mogą być wykorzystane przy wymiarowaniu mechanicznym konstrukcji drogowych.

Przeanalizowane zostały także zależności normowe stosowane dla betonów cementowych wg PN-S-96013 pomiędzy wytrzymałością charakterystyczną na rozciąganie bezpośrednio f_{ctk} , wytrzymałością charakterystyczną na rozciąganie przy zginaniu $f_{ctk,fl}$ a wytrzymałością charakterystyczną na ściskanie f_c w odniesieniu do wyników badań mieszanek związanych hydraulicznie (HBM).

4. METODYKA OKREŚLANIA PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH MIESZANEK ZWIĄZANYCH HYDRAULICZNIE

Wg PN-EN 14227:1÷5 parametry wytrzymałościowe mieszanek związanych hydraulicznie (HBM) określa się na podstawie pomierzonych wartości odpowiednich cech: R_c lub R_t i E . Dokładnie, przyjmuje się średnią wartość z trzech wyników badań, a w przypadku, gdy wynik odbiega o więcej niż 20 % od średniej, to jest on odrzucany i średnia wyciągana jest z pozostałych dwóch wartości. W tym miejscu należy wyjaśnić, że wartości R_c lub R_t i E mieszanek HBM nie są wartościami charakterystycznymi, obliczonymi jako 5 % kwantyl rozkładu statystycznego, jak w przypadku wytrzymałości betonów konstrukcyjnych, lecz są to wartości średnie z 3 lub 2 wyników. Klasyfikacja R_c jest klasyfikacją alternatywną do klasyfikacji R_t , E i nie ma pomiędzy nimi zależności.

Do określania wytrzymałości na rozciąganie metodą bezpośrednią R_t dopuszcza się stosowanie metody pośredniej (rozłupywania) R_{it} , która jest mniej kłopotliwa. W PN-EN 14227 1÷5 zalecana jest następująca zależność:

$$R_t = 0,8 R_{it} .$$

Parametry wytrzymałościowe dla mieszanek związanych hydraulicznie ustala się na podstawie przeprowadzanych badań:

- wytrzymałość na ściskanie R_c [MPa] – wg PN-EN 13286-41,
- wytrzymałość na rozciąganie bezpośrednie R_t [MPa] – wg PN-EN 13286-40,
- wytrzymałość na rozciąganie pośrednie R_{it} [MPa] – wg PN-EN 13286-42,
- moduł sprężystości E [MPa] – wg PN-EN 13286-43.

W krajowych Wymaganiach Technicznych dla mieszanek związanych hydraulicznie przyjęto klasyfikację wg R_c [3], natomiast informacja o wytrzymałości na rozciąganie R_t będzie bardzo pomocna do określania trwałości zmęczeniowej, zwłaszcza, że brak jest danych odnośnie zależności $R_t = f(R_c)$ dla mieszanek HBM. Są zależności dla betonu cementowego, ale czy można je bezpośrednio zastosować do mieszanek HBM? Na ogół przyjmuje się, że wytrzymałość betonu na rozciąganie wynosi 0,1 wartości wytrzymałości na ściskanie. Dla podbudów związanych cementem szacuje się wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $R_b \approx 0,2 R_c$ (wytrzymałości na ściskanie) [10].

Przedstawione w artykule mieszanki związane hydraulicznie są mieszankami o wilgotności optymalnej tzw. „mieszanka półsucha”, co odróżnia je od mieszanek betonowych, gdzie ważna jest konsystencja i wskaźnik wodno-cementowy w/c mieszanki. Dla betonów cementowych wskaźnik w/c zawiera się na ogół od 0,4 do 0,6, natomiast w mieszankach drogowych związanych hydraulicznie wskaźnik ten, przyjmując go jako stosunek woda/spoiwo (w/s) może wynosić ~ od 0,3 do ~3,0. Zwłaszcza przy niskich dodatkach spoiwa 3 % ÷ 6 % stosunek w/s zawierać się będzie w granicach 2 ÷ 3. W przypadku gruntów niespoistych (piasków, pospółek, żwirów) stabilizowanych cementem wskaźnik w/c zawiera od 1,0 do 3,5 [11].

5. WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań mieszanek HBM przedstawia tablica 2. Przyjęto następujące oznaczenia:

- R_c – wytrzymałość na ściskanie walca [MPa],
- R_{it} – wytrzymałość na rozciąganie metodą pośrednią [MPa],
- R_t – wytrzymałość na rozciąganie bezpośrednie [MPa], przy czym $R_t = 0,8 R_{it}$ wg PN-EN 14227-1÷5.

Zakres przeprowadzonych badań objął szeroki przedział zmienności parametrów wynikających z właściwości zastosowanych materiałów i ich zawartości w mieszance. Zbadano mieszanki zawierające różne rodzaje kruszyw pod względem pochodzenia i obróbki oraz różne spoiwa, co dało przekrojowy obraz właściwości fizyko-mechanicznych mieszanek HBM do wykonywania różnych warstw konstrukcyjnych w budownictwie drogowym o wytrzymałości na ściskanie od 0,5 MPa do 20 MPa.

Przeanalizowane zostały właściwości różnorodnych mieszanek zawierających:

- 4 rodzaje kruszyw (łamane dolomitowe, lamane granodiorytowe, niełamane, kruszywo z recyklingu betonu),
- 3 rodzaje spoiw (cement CEM I 32.5, spoiwo drogowe Silment CQ-25, żużel granulowany), stosując 2 dodatki każdego spoiwa,
- 2 mieszanki popiołowe (popioły krzemionkowe, popioły wapienne).

Łącznie zbadanych zostało 26 różnych mieszanek, stosując pielęgnację próbek trwającą 28, 42, 90 i 180 dni. Zastosowano pielęgnację wg zasady polegającej na tym, że ostatnie 14 dni przed badaniem, próbka była nasycana wodą pod ciśnieniem atmosferycznym, np. przy pielęgnacji 28. dniowej próbka dojrzewała 14 dni warunkach wilgotnych ($w = 95 \div 100 \%$) i temp. $+20^{\circ}\text{C}$ i 14 dni w wodzie o temp. $+20^{\circ}\text{C}$, co odpowiadało dotychczas stosowanej pielęgnacji dla gruntów stabilizowanych cementem [1], czy betonów popiołowych zgodnie z PN-S-06103.

Badania przeprowadzone zostały na próbkach walcowych o wymiarach: ϕ 100 mm i $h = 120$ mm (smukłość ~ 1) zagęszczonych przy wilgotności optymalnej standardową energią Proctora wg PN-EN 13286-50:2007 oraz PN-EN 13286-2:2007.

Wyniki badań zależności $R_t = f(R_c)$ dla mieszanek HBM z podziałem na rodzaj stosowanego spoiwa i czas pielęgnacji przedstawiono w tablicy 3.

Wyniki badań przedstawione w tablicy 3 wskazują, że występuje zależność pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie bezpośrednie R_t a wytrzymałością na ściskanie R_c . Nie stwierdza się znaczącej różnicy w relacjach procentowych $R_t = \% (R_c)$ pomiędzy badanymi rodzajami mieszanek biorąc pod uwagę zastosowane spoiwo, kruszywo i okres pielęgnacji. Zauważa się, że zależność $R_t = \% (R_c)$ jest proporcjonalna do wytrzymałości na ściskanie, a jej zależność przedstawiono na rysunku 5. Niezależnie od rodzaju mieszanki (pod względem zastosowanego spoiwa), w zakresie wytrzymałości od 5 MPa do 20 MPa występuje zależność pomiędzy analizowanymi właściwościami. Wytrzymałość na rozciąganie bezpośrednie R_t wynosi średnio $9 \% \div 11 \%$ wytrzymałości R_c . Znaczącą różnicę zauważa się w przypadku mieszanek żużlowych, które charakteryzują się znacznie niższą od pozostałych mieszanek wytrzymałością na ściskanie R_c wynoszącą około 0,5 MPa. W tym przypadku zależność procentowa R_t od R_c jest mniejsza i wynosi ok. 6 %, czyli połowę tego jak dla pozostałych mieszanek.

Tablica 2. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie mieszanek wg PN-EN 14227-1-5
 Table 2. Test results of compressive strength and tensile strength of hydraulically bound mixtures acc. PN-EN 14227-1-5

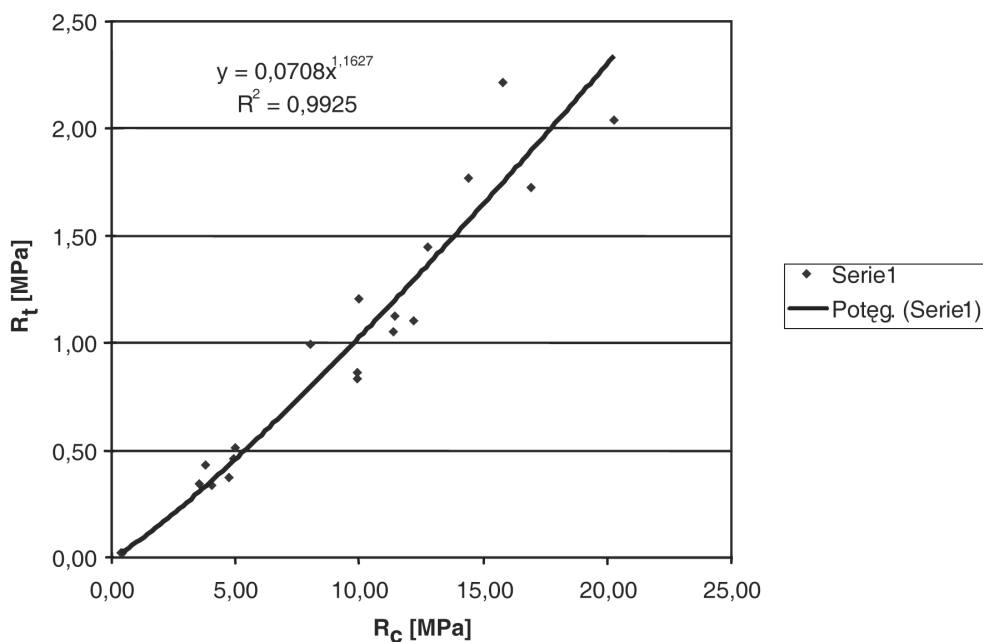
Mieszanki związane hydraulicznie		R_c, R_{tr}, R_t [MPa]																
rodzaj kruszywa	rodzaj spoiwa	dodatek spoiwa	R_c^{28}	R_{tr}^{28}	R_t^{28}	$\% R_t(R_c)$	R_c^{42}	R_{tr}^{42}	R_t^{42}	$\% R_t(R_c)$	R_c^{90}	R_{tr}^{90}	R_t^{90}	$\% R_t(R_c)$	R_c^{180}	R_{tr}^{180}	R_t^{180}	$\% R_t(R_c)$
dolomitowe	cement portlandzki	6 %	2,19	0,41	0,328	15,0					4,06	0,46	0,368	9,1	2,58	0,53	0,424	16,4
		12 %	13,76	1,29	1,032	7,5					13,37	1,94	1,552	11,6	18,44	2,56	2,048	11,1
	SILMENT CQ-25 żużel granulowany*)	6 %					4,18	0,52	0,416	10,0	4,82	0,48	0,384	8,0	5,5	0,56	0,448	8,1
		12 %					13,42	1,02	0,816	6,1	13,2	1,49	1,192	9,0	10,09	1,69	1,352	13,4
granodiorytowe	cement portlandzki	10 %	0,24	0			0,29	0,02	0,016	5,5	0,3	0,04	0,032	10,7	0,32	0,04	0,032	10,0
		25 %	0,24	0			0,38	0,02	0,016	4,2	0,39	0,02	0,016	4,1	0,27	0,02	0,016	5,9
	SILMENT CQ-25 żużel granulowany*)	6 %	4,88	0,61	0,488	10,0					7,18	0,83	0,664	9,2	6,89	0,99	0,792	11,5
		12 %	12,47	1,75	1,4	11,2					13,08	2,85	2,28	17,4	15,65	2,59	2,072	13,2
granodiorytowe	cement portlandzki	6 %					4,43	0,53	0,424	9,6	6,83	0,83	0,664	9,7	7,31	0,74	0,592	8,1
		12 %					9,87	1,31	1,048	10,6	14,36	1	0,8	5,6	13,97	1,93	1,544	11,1
	SILMENT CQ-25 żużel granulowany*)	10 %	0,41				0,48	0,03	0,024	5,0	0,53	0,04	0,032	6,0	0,59	0,03	0,024	4,1
		25 %	0,41				0,43	0,03	0,024	5,6	0,47	0,03	0,024	5,1	0,28	0,03	0,024	8,6

Mieszanki związane hydraulicznie		R_c, R_{tr}, R_t [MPa]																
rodzaj kruszywa	rodzaj spoiwa	dodatek spoiwa	R_c^{28}	R_{tr}^{28}	R_t^{28}	% $R_t(R_c)$	R_c^{42}	R_{tr}^{42}	R_t^{42}	% $R_t(R_c)$	R_c^{90}	R_{tr}^{90}	R_t^{90}	% $R_t(R_c)$	R_c^{180}	R_{tr}^{180}	R_t^{180}	% $R_t(R_c)$
naturalne (niełamane)	cement portlandzki	6 %	3,45	0,66	0,528	15,3					3,17	0,49	0,392	12,4	3,68	0,38	0,304	8,3
		12 %	10,86	1,6	1,28	11,8					11,62	1,63	1,304	11,2	10,52	2,07	1,656	15,7
	SILMENT CQ-25	6 %					3,03	0,39	0,312	10,03	1,85	0,11	0,088	4,8	2,25	0,21	0,168	7,5
		12 %					7,5	1,02	0,816	10,09	5,91	0,78	0,624	10,6	9,81	1,3	1,04	10,6
z recyklingu betonu	cement portlandzki	10 %	0,38				0,21	0,01	0,008	3,8	0,18	0,01	0,008	4,4	0,2			
		25 %	0,2				0,16	0,01	0,008	5,0	0,2	0,01	0,008	4,0	0,13			
z recyklingu betonu	cement portlandzki	6 %	4,53	0,48	0,384	8,5					5,4	0,53	0,424	7,9	6,7	0,65	0,52	7,8
		12 %	8,63	0,99	0,792	9,2					12,86	0,83	0,664	5,2	12,94	1,61	1,288	10,0
	SILMENT CQ-25	6 %					2,42	0,26	0,208	8,6	2,73	0,27	0,216	7,9	3,94	0,35	0,28	7,1
		12 %					8,84	0,8	0,64	7,2	6,21	1,03	0,824	13,3	5,96	1,1	0,88	14,8
mieszanki popiołowe	żużel granulowany*)	10 %	0,79				0,59	0,06	0,048	8,1	0,54	0,03	0,024	4,4	0,31	0,02	0,016	5,2
		25 %	0,78				0,65	0,06	0,048	7,4	0,62	0,04	0,032	5,2	0,88	0,04	0,032	3,6
mieszanki popiołowe	popioły krzemionkowe	6 %					12,16	1,38	1,104	9,1	11,36	1,32	1,056	9,3	8,02	1,24	0,992	12,4
		6 %					20,24	2,55	2,04	10,1	16,9	2,16	1,728	10,2	15,81	2,77	2,216	14,0

*) plus 1 % wapna hydratyzowanego

Tablica 3. Zależność procentowa wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednio R_t w stosunku do wartości wytrzymałości na ściskanie R_c z uwzględnieniem rodzaju mieszanki
 Table 3. The relationship between direct tensile strength R_t and compressive strength R_c in consideration of type of mixture

	Okres pielęgnacji		28 dni		42 dni		90 dni		180 dni		Średnia w [%]	Średnia globalna w [%]
	ilość spoiwa		6 %	12 %	6 %	12 %	6 %	12 %	6 %	12 %		
Mieszanki związane cementem	R_c [MPa]		3,76	11,43			4,95	12,73	4,96	14,39		
	R_t [MPa]		0,43	1,13			0,46	1,45	0,51	1,77		
	$R_t = \% (R_c)$		11,48	9,85			9,33	11,39	10,28	12,27		$R_t = \% (R_c) = 10,77$
	rodzaj popiołu		K	W	K	W	K	W	K	W		
Mieszanki popiołowe K - popioły krzemionkowe W - popioły wapienne	R_c [MPa]				12,16	20,24	11,36	16,90	8,02	15,81		
	R_t [MPa]				1,10	2,04	1,06	1,73	0,99	2,22		$R_t = \% (R_c) = 10,26$
	$R_t = \% (R_c)$				9,08	10,08	9,30	10,22	12,37	14,02		$R_t = \% (R_c) = 10,84$
	ilość spoiwa		6 %		6 %	12 %	6 %	12 %	6 %	12 %		
Mieszanki na spoiwach drogowych	R_c [MPa]				3,52	9,91	4,06	9,92	4,75	9,96		
	R_t [MPa]				0,34	0,83	0,34	0,86	0,37	1,20		
	$R_t = \% (R_c)$				9,67	8,38	8,33	8,67	7,83	12,09		$R_t = \% (R_c) = 9,16$
	ilość żużla		10 %		25 %	10 %	25 %	10 %	25 %	10 %	25 %	
Mieszanki żużłowe	R_c [MPa]				0,39	0,41	0,39	0,42	0,36	0,39		
	R_t [MPa]				0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02		
	$R_t = \% (R_c)$				6,11	5,93	6,19	4,76	6,76	6,15		$R_t = \% (R_c) = 5,99$
	ilość żużla		10 %		25 %	10 %	25 %	10 %	25 %	10 %	25 %	



Rys. 5. Wykres zależności wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednie R_t od wytrzymałości na ściskanie R_c

Fig. 5 The relationship between the direct tensile strength R_t and compressive strength R_c

Określono także średnie globalne zależności procentowej $R_t = \% (R_c)$, które wyniosły 10,26 % dla mieszanek cementowych, na spoiwach drogowych i na popiołach lotnych oraz 5,99 % dla mieszanek żuźlowych. Globalny wskaźnik oznacza, że analizowano wszystkie wyniki bez względu na rodzaj mieszanki, rodzaj kruszywa, okres pielęgnacji, lecz rozpatrując je pod względem parametru wiodącego. Za parametr wiodący w tym przypadku przyjęto wytrzymałość na ściskanie R_c .

Z analizy badań (tabl. 3 i 4) wynika, że zależności $R_t = \% (R_c)$, dla mieszanek o niskich wytrzymałościach na ściskanie (< 5 MPa) należy rozpatrywać wg innych zależności niż mieszanki o wytrzymałościach z zakresu 5 MPa ÷ 20 MPa.

Analizując wyniki badań przedstawione w tablicy 4 (uwzględniające rodzaj zastosowanego kruszywa w mieszance) obserwuje się, że występuje zależność $R_t = \% (R_c)$ dla mieszanek o wytrzymałościach 5 MPa ÷ 20 MPa, która wynosi $R_t = (8,9 \div 10,8) \% R_c$, a więc blisko wartości 9 % ÷ 11 % jakie obliczono bez uwzględniania rodzaju kruszywa tylko biorąc pod uwagę rodzaj mieszanki. Zależność ta jest stała i jest uzależniona jedynie od wytrzymałości na ściskanie R_c .

Tablica 4. Zależność procentowa wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednio R_t w stosunku do wartości wytrzymałości na ściskanie R_c z uwzględnieniem rodzaju kruszywa

Table 4. The percent relationship between direct tensile strength R_t and compressive strength R_c in consideration of type of aggregate

Rodzaj mieszanki	Rodzaj kruszywa	$R_t = \% (R_c)$
Wszystkie mieszanki z podziałem na rodzaj kruszywa (bez mieszanek żuźlowych)	dolomit	10,439
	granodioryt	10,606
	kruszywa naturalne nie łamane	10,770
	kruszony beton	8,939
	popioły lotne	10,844
	średnia	10,320
Mieszanki żuźłowe	dolomit	6,74
	granodioryt	5,73
	naturalne	4,31
	kruszony beton	5,65
	średnia	5,608

Uśredniając, uzyskano zależność $R_t = \% (R_c) \sim 10 \%$ czyli taką, że wytrzymałość mieszanek HBM na rozciąganie R_t wynosi około 0,1 wartości wytrzymałości na ściskanie R_c . Uzyskano, więc taki sam współczynnik, jaki na ogół dotychczas się przyjmowało się dla betonów cementowych. Przedstawione w artykule zależności $R_t = \% (R_c)$, uzyskane w wyniku licznych badań IBDiM, są porównywalne z zależnościami stosowanymi w Wielkiej Brytanii na podstawie pracy [12], gdzie podano dla każdej klasy C mieszanki związanej hydraulicznie wg EN 14227 1÷5 odpowiadającą wartość R_t , z której wynika, że relacja R_t / R_c wynosi od 0,09 ÷ 0,15 tj. $R_t = \% (R_c) = 9 \% \div 15 \%$ w zakresie $R_c = 5 \text{ MPa} \div 20 \text{ MPa}$ i jest niezależna od rodzaju mieszanki. Przykładowe zależności brytyjskie dla mieszanek cementowych, popiołowych i żuźlowych przedstawiono w tablicy 5 na podstawie [12].

Zauważa się, że dane przedstawione w tablicy 5 wskazują trend, polegający na tym, że czym niższa jest wytrzymałość na ściskanie R_c , tym występuje większa wartość relacji $R_t / R_c = 0,16 \div 0,20$ (16 % ÷ 20 %) i odwrotnie dla wyższych wytrzymałości R_c mniejsza wartość $R_t / R_c = 0,07 \div 0,09$ (7 % ÷ 9 %). Uzasadnia to postawienie tezy, że mieszanki HBM z różnych zakresów wytrzymałościowych R_c charakteryzują się odmiennymi i indywidualnymi relacjami R_t / R_c .

Analiza badań IBDiM (tabl. 3 i 4) i danych zawartych w tablicy 5 wskazują na występowanie następujących zakresów wytrzymałościowych pod względem wytrzymałości R_c , w których można przyjąć, że relacja R_t / R_c jest stała:

- $R_c = 0 \div 5 \text{ MPa}$,
- $R_c = 5 \div 20 \text{ MPa}$,
- R_c powyżej 20 MPa.

Tablica 5. Wytrzymałość na ściskanie R_c i odpowiadająca jej wytrzymałość na rozciąganie bezpośrednie R_t dla mieszanek związanych hydraulicznie
 Table 5. Compressive strength R_c and relevant direct tensile strength R_t for hydraulically bound mixtures

Wytrzymałość charakterystyczna R_c po 28 dniach [MPa]		Klasa wytrzymałościowa	Średnia wytrzymałość na rozciąganie bezpośrednie R_t [MPa]	R_t / R_c dla $H / D = 1$	R_t / R_c dla $H / D = 2$
cylinder o smukłości $H / D = 2$	cylinder o smukłości $H / D = 1$				
mieszanki żuźlowe i popiołowe					
1,5	2	C _{1,5/2,0}	0,39	0,20	0,26
3	4	C _{3/4}	0,62	0,16	0,21
6	8	C _{6/8}	0,98	0,12	0,16
9	12	C _{9/12}	1,28	0,11	0,14
12	16	C _{12/16}	1,55	0,10	0,13
15	20	C _{15/20}	1,8	0,09	0,12
18	24	C _{18/24}	2,02	0,08	0,11
21	28	C _{21/28}	2,24	0,08	0,11
24	32	C _{24/32}	2,44	0,08	0,10
27	36	C _{27/36}	2,64	0,07	0,10
mieszanki cementowe					
1,5	2	C _{1,5/2,0}	0,39	0,20	0,26
3	4	C _{3/4}	0,62	0,16	0,21
5	6	C _{5/6}	0,87	0,15	0,17
8	10	C _{8/10}	1,18	0,12	0,15
12	15	C _{12/15}	1,55	0,10	0,13
16	20	C _{16/20}	1,87	0,09	0,12
20	25	C _{20/25}	2,17	0,09	0,11

Zależności pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie pośrednie przy rozłupywaniu f_{sp} i wytrzymałością na ściskanie f_c zawiera raport duńskiego Instytutu Drogowego [13], gdzie przedstawiono wyniki badań podbudów związanych cementem o wytrzymałości na ściskanie $f_c = 3 \text{ MPa} \div 5 \text{ MPa}$. Wyniki badań zawarte w tej pracy przedstawiają, że występuje stała relacja $f_{sp} / f_c = 0,2$, która po przeliczeniu z zależności $R_t = 0,8 R_{it}$ z norm PN-EN 14227-1÷5 daje wynik $R_t / R_c = 0,16$. Jest to, więc wartość zbliżona do zależności brytyjskich w zakresie niskich wytrzymałości R_c do 5 MPa. Praca Instytutu Duńskiego przedstawia także zależność wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{jt} do wytrzymałości na ściskanie f_c wynoszącą $f_{jt} / f_c = 0,1 \div 0,3$.

Uzyskane zależności charakteryzują się jednak dużym rozrzutem wyników i szerokim przedziałem analizowanej zależności. Badania Duńskiego Instytutu Drogowego były wykonane na próbkach cylindrycznych $\phi 150 \times 300$ mm, z których następnie wycięto belki do oznaczenia wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{jt} , czym można tłumaczyć dużą zmienność wyników tych badań.

Zauważa się wpływ smukłości H/D próbki na relację R_t/R_c (tabl. 5) Przedstawione wcześniej analizy mieszanek HBM dotyczyły próbek o smukłości ~ 1 , więc porównanie wyników badań ma uzasadnienie. Ale dla innej smukłości, $H/D = 2$, relacje R_t/R_c przedstawiają się zupełnie odmiennie, a ich wartości są od 20 % do 33 % większe niż przy smukłości $H/D = 1$ i należy to uwzględnić w analizie badań. W krajowych Wymaganiach Technicznych do PN-EN 14227-1÷5 [3] przyjęto, że próbki mieszanek HBM do badań będą w kształcie cylindra o smukłości 1.

Powyższe obliczenia i analizy dowodzą, że występuje ścisła zależność pomiędzy wytrzymałością R_t/R_c , która nie jest zależna od rodzaju zastosowanego spoiwa, kruszywa lub okresu pielęgnacji próbek i jest stała w zakresie wytrzymałości na ściskanie R_c od 5 MPa do 20 MPa. Stwierdzono także, że mieszanki o niższych wytrzymałościach $R_c < 5$ MPa należy analizować osobno, gdzie będą obowiązywać inne zależności, których w niniejszej pracy nie objęto.

6. WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE PRZY ZGINANIU I JEJ ZALEŻNOŚCI Z POZOSTAŁYMI WŁAŚCIWOŚCIAMI WG ZALEŻNOŚCI NORMOWYCH

Badania i analiza zależności pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie R_t a wytrzymałością na ściskanie R_c wykazały, że zachodzi relacja pomiędzy tymi właściwościami dla mieszanek HBM, podobnie jak dla betonów konstrukcyjnych. Dokonano, zatem analiz obliczeniowych relacji wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu R_b od wytrzymałości na ściskanie R_c i wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednio R_t , stosując zależności normowe, jakie przyjmuje się dla betonów.

Zastosowane niżej wzory do obliczeń przyjęto z literatury i norm obecnie obowiązujących w Polsce dotyczących betonów cementowych. Przeprowadzone analizy dotyczą zależności wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu R_b uzyskanych metodą obliczeń w odniesieniu do pomierzonych w badaniach IBDiM wartości wytrzymałości R_{it} i R_c . Poniższe zależności powstały w wyniku analizy pośredniej „teoretycznej”, której wyniki przedstawiono w tablicy 6 i na rysunku 6.

Do analiz zależności wartości wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie R_t i R_c a wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu dla betonu R_b wykorzystano następujące wzory³⁾:

a) wg Eurokodu 2

$$f_{ctk,fl} = [1 + (200 / h)^{0,5}] f_{ctk} \quad , \quad (2)$$

gdzie:

$f_{ctk,fl}$ – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu charakterystyczna [MPa],

f_{ctk} – wytrzymałość na rozciąganie charakterystyczna [MPa],

h – grubość płyty (warstwy) [mm],
(do obliczeń przyjęto przeciętną grubość warstwy $h = 200$ mm).

b) wg [8]

$$f_{fl} \approx 1,78 f_{ct} \quad , \quad (3)$$

przy czym:

f_{ct} – wytrzymałość na rozciąganie bezpośrednie [MPa],

f_{fl} – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa].

c) wg zależności do potęgi 1/2 [8]

$$f_{ctk,fl} = 0,72 f_{ck}^{1/2} \quad , \quad (4)$$

d) wg zależności do potęgi 2/3 [8]

$$f_{ctk,fl} = 0,38 f_{ck}^{2/3} \quad , \quad (5)$$

gdzie:

$f_{ctk,fl}$ – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu charakterystyczna [MPa],

f_{ck} – wytrzymałość na ściskanie charakterystyczna (kostki) [MPa].

Wyniki przeprowadzonych obliczeń i zależności przedstawiono w tabelicy 6. Przyjęto dla mieszanek popiołowych, analogicznie jak w tabelicy 3, następujące oznaczenia:

K – popiół krzemionkowy,

W – popiół wapienny.

³⁾ Różnice w oznaczeniach poszczególnych cech wytrzymałościowych mieszanek związanych hydraulicznie (HBM) i betonów wynikają z braku zgodności tych oznaczeń w normach, np. dla betonów stosuje się oznaczenie f , a dla mieszanek HBM oznaczenie R , przyjęto oznaczenia zgodnie z normami dla poszczególnych materiałów.

Tablica 6. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i obliczonych wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wg zależności normowych
 Table 6. Test results of compressive strength and calculated flexural strength according to literature relationships

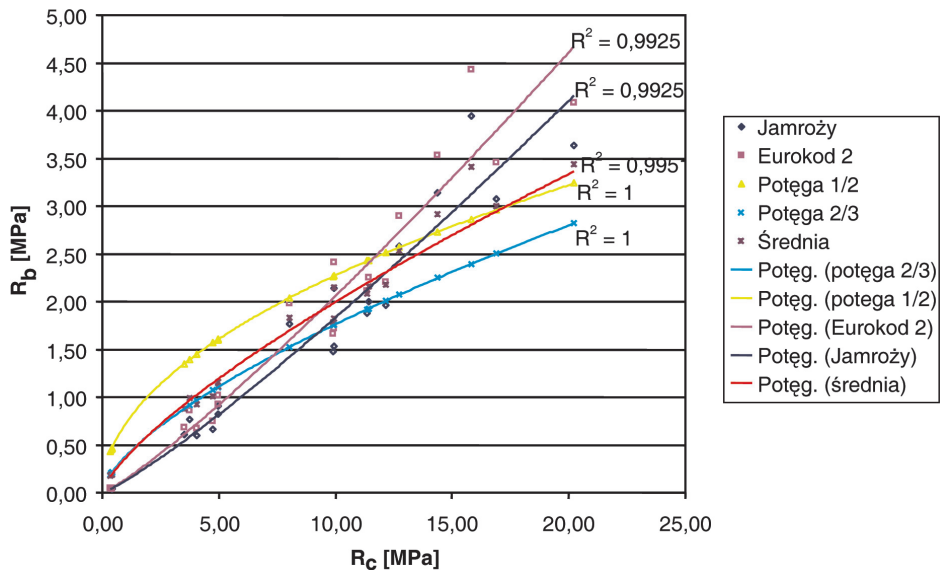
Okres pielęgnacji	28 dni		42 dni		90 dni		180 dni		Średnia globalna w [%] R_t i R_b w stosunku do R_c
	6 %	12 %	6 %	12 %	6 %	12 %	6 %	12 %	
ilość spoiwa									
R_c [MPa]	3,76	11,43			4,95	12,73	4,96	14,39	
R_t [MPa]	0,43	1,13			0,46	1,45	0,51	1,77	
R_b [MPa]	0,54	1,41			0,58	1,81	0,64	2,21	
f_{fl} wg Jamrożego	0,77	2,00			0,82	2,58	0,91	3,14	
f_{fl} wg Eurokodu 2 dla $h = 200$ mm	0,86	2,25			0,92	2,90	1,02	3,53	
f_{fl} wg zależności do potęgi 1/2	1,40	2,43			1,60	2,57	1,60	2,73	
f_{fl} wg zależności do potęgi 2/3	0,92	1,93			1,10	2,07	1,11	2,25	
f_{fl} średnia arytm.	0,99	2,15			1,11	2,53	1,16	2,91	
$R_t = \% (R_c)$ wg badań HBM	11,48	9,85			9,33	11,39	10,28	12,27	$R_t = \% (R_c)$ 10,77
$R_b = \% (R_c)$ wg zależności literat.	26,24	18,85			22,48	19,87	23,36	20,25	$R_b = \% (R_c)$ 21,84
rodzaj popiołu			K	W	K	W	K	W	
R_c [MPa]			12,16	20,24	11,36	16,90	8,02	15,81	
R_t [MPa]			1,10	2,04	1,06	1,73	0,99	2,22	
R_b [MPa]			1,38	2,55	1,32	2,16	1,24	2,77	
f_{fl} wg Jamrożego			1,97	3,63	1,88	3,08	1,77	3,94	
f_{fl} wg Eurokodu 2 dla $h = 200$ mm			2,21	4,08	2,11	3,46	1,98	4,43	
f_{fl} wg zależności do potęgi 1/2			2,51	3,24	2,43	2,96	2,04	2,86	
f_{fl} wg zależności do potęgi 2/3			2,01	2,82	1,92	2,50	1,52	2,39	
f_{fl} średnia arytm.			2,17	3,44	2,08	3,00	1,83	3,41	
$R_t = \% (R_c)$ wg badań HBM			9,08	10,08	9,30	10,22	12,37	14,02	$R_t = \% (R_c)$ 10,84
$R_b = \% (R_c)$ wg zależności literat.			17,87	17,01	18,35	17,74	22,79	21,56	$R_b = \% (R_c)$ 19,22

Mieszanki popiołowe
 K - popioły krzemionkowe
 W - popioły wapienne

Okres pielęgnacji	28 dni		42 dni		90 dni		180 dni		Średnia globalna w [%] R_t i R_b w stosunku do R_c
	ilość spoiwa		6 %	12 %	6 %	12 %	6 %	12 %	
R_c [MPa]			3,52	9,91	4,06	9,92	4,75	9,96	
R_t [MPa]			0,34	0,83	0,34	0,86	0,37	1,20	
R_b [MPa]			0,43	1,04	0,42	1,08	0,47	1,51	
f_n wg Jamrożego			0,61	1,48	0,60	1,53	0,66	2,14	
f_n wg Eurokodu 2 dla $h = 200$ mm			0,68	1,66	0,68	1,72	0,74	2,41	
f_n wg zależności do potęgi 1/2			1,35	2,27	1,45	2,27	1,57	2,27	
f_n wg zależności do potęgi 2/3			0,88	1,75	0,97	1,75	1,07	1,76	
f_n średnia arytm.			0,88	1,79	0,92	1,82	1,01	2,15	
$R_t = \% (R_c)$ wg badań HBM			9,67	8,38	8,33	8,67	7,83	12,09	$R_t = \% (R_c)$ 9,16
$R_b = \% (R_c)$ wg zależności literat.			24,99	18,06	22,76	18,33	21,31	21,55	$R_b = \% (R_c)$ 21,17
			ilość żużla		10 %	25 %	10 %	25 %	
R_c [MPa]			0,39	0,41	0,39	0,42	0,36	0,39	
R_t [MPa]			0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
R_b [MPa]			0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	
f_n wg Jamrożego			0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
f_n wg Eurokodu 2 dla $h = 200$ mm			0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	
f_n wg zależności do potęgi 1/2			0,45	0,46	0,45	0,47	0,43	0,45	
f_n wg zależności do potęgi 2/3			0,20	0,21	0,20	0,21	0,19	0,20	
f_n średnia arytm.			0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,19	
$R_t = \% (R_c)$ wg badań HBM			0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	$R_t = \% (R_c)$ 5,99
$R_b = \% (R_c)$ wg zależności literat.			0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	$R_b = \% (R_c)$ 11,97

Mieszanki na spoiwach drogowych

Mieszanki żużłowe



Rys. 6. Zależności obliczeniowe między wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu R_b i wytrzymałością na ściskanie R_c na podstawie wzorów normowych
 Fig. 6. The relationship between flexural strength R_b and compressive strength R_c according to standard relationship

Zestawione w tabelicy 6 wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie R_{tt} , R_t i na ściskanie R_c oraz obliczenia wg zależności normowych wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu R_b twardniejącej mieszanki wskazują, że w miarę czasu dojrzewania wartości tych parametrów wzrastają, ale relacja pomiędzy analizowanymi wytrzymałościowymi R_t , R_b w funkcji R_c dla mieszanek o wytrzymałości $R_c = 5 \div 20$ MPa (m. cementowe, m. popiołowe, m. na spoiwach drogowych) kształtuje się na zbliżonym poziomie $\approx 20\%$ dla zależności $R_b = \% R_c$.

W przeprowadzonych analizach dostrzega się, że obliczone zależności są bardzo zbliżone dla wszystkich mieszanek HBM, niezależnie od rodzaju mieszanki, czasu dojrzewania próbek, czy zastosowanego kruszywa. Pomijając te zmienne można zglobalizować wyniki badań dla wszystkich mieszanek o wytrzymałościach $R_c = 5 \div 20$ MPa, podobnie jak przy ustalaniu relacji $R_t = \% R_c$. Obliczona średnia zależność dla tego przedziału wytrzymałości przedstawiona na rysunku 6 wskazuje, że relacja $R_b = \% R_c$ wynosi od 19,22 % do 21,84 % w zależności od przyjętej zależności normowej.

Dla mieszanek o mniejszej wytrzymałości na ściskanie $R_c \sim 0,5$ MPa (m. żuźlowe) uzyskuje się inną zależność $R_b = \% R_c = 11,97\%$, która wynosi średnio około 50 % wartości zależności obliczonych dla mieszanek mocniejszych, o większej wytrzymałości na ściskanie R_c .

Analizując wykres zależności $R_b = \% R_c$ (rys. 6) obserwuje się, że przy większych wytrzymałościach na ściskanie $R_c \geq 15$ MPa występuje większe zróżnicowanie w obliczonych zależnościach $R_b = \% R_c$ wg różnych wzorów. W zakresie wytrzymałości na ściskanie R_c od 5 MPa do 15 MPa relacje $R_b = \% R_c$ są do siebie zbliżone i wynoszą średnio $R_b \approx 20 \% R_c$. Jest to istotne spostrzeżenie, gdyż jest to zakres wytrzymałościowy, jaki głównie stosowany będzie w praktyce inżynierskiej w wykonywaniu podbudów drogowych z mieszanek HBM wg nowych norm.

Są to zależności obliczeniowe wg wzorów z norm dla betonów cementowych, więc w celu zweryfikowania i uściślenia tych relacji wskazane jest przeprowadzenie badań bezpośrednich w laboratorium. Pomimo tego, że dla mieszanek związanych hydraulicznie normy PN-EN 14227-1÷5 nie przewidują badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu R_b , tylko wytrzymałość na rozciąganie bezpośrednie R_t lub pośrednie R_t , można skorzystać z metody badania, jakie przeprowadza się dla betonów zgodnie z PN-EN 12390-5. Należy jednak zwrócić uwagę, aby sposób przygotowania (zagęszczania) próbki odzwierciedlał energię zagęszczania Proctora, jaką stosuje się przy formowaniu próbek cylindrycznych do określania wytrzymałości na ściskanie.

Obliczone zależności wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu od wytrzymałości na ściskanie $R_b = \% R_c$ wskazują, że te relacje są stałe, niezależnie od rodzaju mieszanki pod względem zastosowanego rodzaju spoiwa czy kruszywa, czasu pielęgnacji w zakresie wytrzymałości na ściskanie $R_c = 5$ MPa ÷ 15 MPa. Upoważnia to do przyjęcia tezy, że istnieje ścisła zależność $R_b = f(R_c)$ dla mieszanek związanych hydraulicznie. Mieszanki o mniejszych wytrzymałościach R_c (0,5 MPa ÷ 5 MPa), które będą raczej dotyczyły gruntów ulepszonych spoiwami hydraulicznymi PN-EN 14227-10÷14 [1] będą charakteryzować się innymi właściwościami i zależnościami, dla których powinny zostać ustalone oddzielne relacje.

7. WNIOSKI

- a) Wyniki badań wytrzymałościowych mieszanek kruszyw związanych hydraulicznie HBM wykazały, że istnieje ścisła zależność pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie R_t a wytrzymałością na ściskanie R_c . Zależność procentowa $R_t = \% R_c$ wynosi $\approx 10 \%$ dla mieszanek o wytrzymałości na ściskanie $R_c = 5$ ÷ 20 MPa. Zależność ta jest niezależna od rodzaju kruszywa (naturalne, sztuczne, łamane, niełamane), rodzaju spoiwa (cement, popiół lotny, spoiwo drogowe) i okresu pielęgnacji (28, 42, 90, 180 dni), ale zależy wyłącznie od wytrzymałości na ściskanie R_c .
- b) Zależności procentowe $R_t = \% R_c$ dla mieszanek o mniejszych wytrzymałościach $R_c < 5$ MPa) na ściskanie wykazują odmienne relacje i powinny one zostać ustalone oddzielnie. Będą one raczej dotyczyć gruntów związanych spoiwem hydraulicznym, które powinny być zgodne z PN-EN 14227:10÷14.

- c) Na podstawie wyników obliczeń zależności wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu R_b wg wzorów normowych dla betonów cementowych szacuje się dla mieszanek HBM istnienie zależności $R_b = \% R_c \approx 20 \%$ niezależnie od zastosowanego rodzaju kruszywa, spoiwa czy okresu pielęgnacji dla mieszanek w wytrzymałości $R_c = 5 \text{ MPa} \div 15 \text{ MPa}$. Wyniki obliczeń relacji $R_b = \% R_c$ należy uważać za przybliżone, ustalone na podstawie zależności, jakie stosuje się dla betonów. Dla dokładnego ustalenia tych zależności niezbędne jest wykonanie badań laboratoryjnych wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wg normy PN-EN 12390-5.
- d) Analizowane zależności w innych przedziałach wytrzymałości na ściskanie R_c przedstawiają odmienne relacje i uzasadnione jest przyjęcie następujących przedziałów wytrzymałościowych R_c do analiz:

- $0 \div 5 \text{ MPa}$,
- $5 \div 20 \text{ MPa}$,

w których występuje stała zależność R_t / R_c .

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Kraszewski C.*: Kruszywa i grunty związane hydraulicznie w konstrukcjach drogowych. Drogownictwo nr 3/2009
- [2] Badania i analiza porównawcza właściwości mieszanek związanych hydraulicznie wg dotychczasowych norm PN i nowych norm PN-EN 14225:1÷5 praca zbiorowa pod redakcją *Cezarego Kraszewskiego*, Warszawa, listopad 2007 r.
- [3] *Błażejowski K., Jabłoński K., Kraszewski C., Wilczek J.*: Projekty dokumentów aplikacyjnych do norm PN-EN 14227-1÷5. Maszynopis, opracowanie na zlecenie IBDiM, Warszawa 2008
- [4] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. IBDiM, Warszawa 1997
- [5] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych. IBDiM, Warszawa 1997
- [6] *Judycki J.*: Analizy obliczeniowe dotyczące weryfikacji katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Praca zbiorowa, Gdańsk 1995
- [7] Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych, IBDiM, Warszawa 2001
- [8] *Glinicki M.A.*: Analiza wymagań wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu w nawierzchni drogowej. Drogi i Mosty nr 1/2005
- [9] *Kraszewski C.*: Analiza wyników badań mrozoodporności mieszanek z kruszyw związanych hydraulicznie. Drogi i Mosty nr 3/2008
- [10] *Judycki J.*: Podstawy określania współczynników równoważności obciążenia osi do projektowania nawierzchni drogowych. Drogi i Mosty 2/2006

- [11] *Rafalski L.*: Podbudowy drogowe. Studia i materiały, zeszyt 59, IBDiM, Warszawa 2007
- [12] Heavy duty pavements. The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries. Edition 4. Interpave. Precast Concrete Paving and Kerb Association, 2007
- [13] Mechanistic Design of Semi-Rigid Pavements – An Incremental Approach. Danish Road Institute, Report 138, 2004

WYKAZ POWOŁANYCH NORM

- PN-S-96012:1997 Drogi samochodowe. Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem
- PN-S-06103 Drogi samochodowe. Podbudowa z betonu popiołowego
- PN-S-96013 Drogi samochodowe. Podbudowa z chudego betonu. Wymagania i badania
- PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- PN-EN 206-1 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- PN-EN 12390-5 Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badania
- PN-EN 12390-6 Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badania
- PN-B-03264 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie
- PN-EN 13286-41:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 41: Metoda oznaczania wytrzymałości na ściskanie mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym
- PN-EN 13286-40:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 40: Metoda oznaczania wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednie mieszanek mineralnych związanych spoiwem hydraulicznym
- PN-EN 13286-42:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 42: Metoda oznaczania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym
- PN-EN 13286-43:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 43: Metoda oznaczania modułu sprężystości mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym

- PN-EN 13286-50:2007 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 50: Metoda sporządzania próbek związanych hydraulicznie za pomocą aparatu Proctora lub zagęszczania na stole wibracyjnym
- PN-EN 13286-2:2007 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 2: Metody określania gęstości i zawartości wody. Zagęszczanie metodą Proctora
- PN-EN 14227-10:2006 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Specyfikacja – Część 10: Grunty stabilizowane cementem. (oryg.)
- PN-EN 14227-11:2006 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Specyfikacja – Część 11: Grunty stabilizowane wapnem. (oryg.)
- PN-EN 14227-12:2006 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Specyfikacja – Część 12: Grunty stabilizowane żużlem. (oryg.)
- PN-EN 14227-13:2006 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Specyfikacja – Część 13: Grunty stabilizowane hydraulicznym spoiwem drogowym. (oryg.)
- PN-EN 14227-14:2006 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Specyfikacja – Część 14: Grunty stabilizowane popiołami lotnymi

STRENGTH CHARACTERISTICS OF HYDRAULICALLY BOUND AGGREGATE MIXTURES IN ROAD CONSTRUCTION

Abstract

The article presents a survey of requirements concerning hydraulically bound road bases and results of compressive R_c and tensile strength R_t tests. Also the relationships between properties of hardened mixtures according to PN-EN 14227-1÷5 were considered. Relationships between different properties for concrete are known and are established (Eurocode 2). There is lack of such relation for road hydraulic bound mixtures of lower compressive strength 0.5 MPa ÷ 20 MPa. The analysis presented in this study discovered a relationship between compressive strength R_c and tensile strength R_t for various hydraulically bound mixtures (bound by cement, granulated slag, fly ash or hydraulic road binder) of compressive strength within the range 5 MPa ÷ 20 MPa. Properties of hydraulically bound mixtures of aggregates graded 0/22.4 mm using various types of aggregates (crushed or uncrushed, sedimentary or metamorphic rock and recycled concrete) were analyzed in this study. Test results and relationship between tested properties can be helpful for mechanistic design of road construction especially because the fatigue life of rigid or semi-rigid road pavement depends substantially on durability of hydraulically bound layers.