CEZARY KRASZEWSKI¹⁾

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ MROZODPORNOŚCI MIESZANEK Z KRUSZYW ZWIĄZANYCH HYDRAULICZNIE

STRESZCZENIE. Artykuł przedstawia analizę i metody badań wskaźnika mrozoodporności (w warunkach zamrażania i odmrażania) mieszanek związanych hydraulicznie HBM do stosowania w podbudowach drogowych. Celem analizy było ustalenie odpowiedniej metody badania i poziomu wymagań do Wytycznych Technicznych, wdrażających normy EN do Polski. Wskaźnik mrozoodporności oznaczano wg dotychczasowej praktyki dla tego typu mieszanek oraz nowej zweryfikowanej metody. Dokonano analiz wyników badań, uwzględniając różne właściwości kruszyw, spoiw i właściwości niezwiązanych mieszanek. Łącznie przeanalizowano 4 rodzaje mieszanek wg PN-EN 14227-1÷5, tj. mieszanki cementowe, żużłowe, popiołowe i na spoiwach drogowych, stosując różne rodzaje kruszyw (naturalne łamane i niełamane, z recyklingu betonu) i stosując 2 dodatki spoiw. Uwzględniono także wpływ czasu pielęgnacji w zakresie od 28 do 180 dni.

1. WSTĘP

Mieszanki związane hydraulicznie *HBM* (ang. *Hydraulically Bound Mixtures*) stosowane do podbudów drogowych znalazły się w Polskich Normach PN-EN 14227-1÷5 [1]. Wprowadzone normy PN-EN zawierają wiele nowości, począwszy od właściwości kruszyw opartych na nowej klasyfikacji wg PN-EN 13242 [2] na metodach zagęszczania i pielęgnacji próbek kończąc. Są to normy produktowe dotyczące jedynie

¹⁾ dr inż. – członek Mazowieckiej Izby Inżynierów

właściwości mieszanek, a nie technologii wykonywania i odbioru warstw drogowych, jak dotychczas było w polskiej normalizacji. Normy te podają wymagania dla mieszanek w bardzo szerokim zakresie, ale także propozycje badań i wymagań, które można, jeżeli jest to celowe, przyjąć w kraju zastosowania. Oznacza to, że w miejscu stosowania należy przyjąć krajowe wymagania, uwzględniające specyfikę klimatu, tradycje inżynierskie, wyposażenie laboratoriów drogowych, co powinno się znaleźć w Wytycznych Technicznych wdrażających te normy. Jednym z takich parametrów, jaki należy przyjąć w Polsce, chociaż nowe normy PN-EN [1] nie nakładają takiego obowiązku, jest mrozoodporność mieszanek związanych hydraulicznie, co jest tematem niniejszej pracy. Jest to bardzo ważna właściwość, która ze względu na polski klimat ma znaczący wpływ na trwałość konstrukcji drogowych.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w IBDiM [3] mieszanek typu 2 wg norm PN-EN 14227-1÷5 [1] o uziarnieniu 0/20 mm (0/22,4 mm przyjmując zestaw sit podstawowy +1). Zestaw sit podstawowy+1 przyjęto ze względu na to, że obecnie wszystkie zespoły robocze opracowujące Wytyczne Techniczne do norm PN-EN, np. dot. kruszyw i mieszanek asfaltowych [4] wg normy PN-EN 13043 [5] przyjęły taki zestaw. Ma to na celu uporządkowanie i ujednoczenie w Polsce wymiarów kruszyw do stosowania w budownictwie oraz wykorzystanie szerokiej gamy zalecanych w normach PN-EN [1] uziarnień. Aby wykorzystać zalecane krzywe w normach PN EN 14227 1÷5 oparte głównie na zestawach sit (podstawowy +2), przyjęto następującą zasadę:

Uziarnienie mieszanek powinno opierać się na zestawie sit (podstawowy+1). Należy przyjąć górne sito graniczne, które jest najbardziej zbliżone do sita w zestawie (podstawowy +1), zachowując wykres uziarnienia jak w PN-EN np. 0/20 mm = 0/22,4 mm.

Ta zasada zostanie zawarta w Wytycznych Technicznych dot. mieszanek związanych hydraulicznie.

2. METODYKA BADAŃ

Badania mrozoodporności przeprowadzono dwiema metodami: metodą normową i zweryfikowaną wg IBDiM na próbkach o wymiarach: ϕ 100 mm i $h=120$ mm. Próbkę do badań zostały zagęszczone metodą normalną Proctora wg [6 - 7]. Badania miały na celu zweryfikowanie bądź ustalenie nowych wymagań dotyczących metody badania i poziomu wymagań mrozoodporności dla mieszanek związanych hydraulicznie wg nowych norm PN-EN do stosowania w podbudowach drogowych w Polsce.

Metodę normową przyjęto, jako dotychczas stosowaną wg Polskich Norm [8 - 11] metodę określania wskaźnika mrozoodporności dla podbudów drogowych z mieszanek związanych. Ogólnie metoda normowa przewiduje wstępną pielęgnację w warunkach powietrzno - wilgotnych powodującą twardnienie i następnie poddanie próbki 14 cyklom zamrażania w temp. -23 °C przez 8 godzin i odmrażania w wodzie o temp. $+18$ °C przez 16 godzin. Jako wskaźnik mrozoodporności oznacza się stosunek wytrzymałości na ścislenie próbki po cyklach zamrażania R_c^{z-o} do wytrzymałości próbki nie poddanej zamrażaniu R_c jak niżej:

$$\text{wskaźnik mrozoodporności} = R_c^{z-o} / R_c ,$$

gdzie:

- R_c^{z-o} – wytrzymałość na ściskanie próbki pielęgnowanej w warunkach powietrzno-wilgotnych i następnie poddanej cykлом zamrażania/odmrażania,
- R_c – wytrzymałość na ściskanie próbki pielęgnowanej w warunkach powietrzno-wilgotnych.

Polskie Normy różnie podają wymaganą wartość wskaźnika mrozoodporności, np. wymaga się, aby grunt stabilizowany cementem [9] charakteryzował się wskaźnikiem min. 0,7 w przypadku podbudów zasadniczych i min. 0,6 dla podbudów pomocniczych, natomiast grunt stabilizowany aktywnymi popiołami lotnymi [11] min. 0,6 lub 0,5 – w zależności od umiejscowienia warstwy w konstrukcji drogowej. W przypadku betonu popiołowego norma [8] ustala minimalną wytrzymałość próbek po 14 cyklach zamrażania i odmrażania. Przeliczając te wymagania otrzymujemy wskaźnik mrozoodporności na minimalnym poziomie: 0,5 dla górnych podbudów i 0,3 dla dolnych warstw.

Wyjątkowo norma [10] w badaniu mrozoodporności gruntu stabilizowanego wapnem przewiduje tylko, aby próbka wytrzymała określoną ilość cykli zamrażania (3 lub 5) w zależności od usytuowania w konstrukcji drogowej. Ten wyjątek dotyczy próbek o niskiej wytrzymałości na ściskanie, co nie jest tematem niniejszej pracy, gdyż mieszanki związane hydraulicznie będą mieszankami o wytrzymałościach w zakresie $R_c = 3 \div 20$ MPa i nie brano tej metody pod uwagę.

Nie wszystkie mieszanki wg Polskich Norm są sprawdzane pod względem mrozoodporności. Np. podbudowa z chudego betonu [12] nie jest badana pod tym względem, jak również mieszanki z gruntów piaszczystych stabilizowanych cementem wg [9]. Zakłada się więc „a priori”, że tego typu podbudowy (kruszywowe, żwirowe i piaszczyste) są mrozoodporne.

Drugim skrajnym przypadkiem, jest spełnienie warunku mrozoodporności przy niskiej wytrzymałości, co w wielu przypadkach nie jest możliwe, np. w mieszankach o marce wytrzymałościowej R_m równej 1,5 lub 2,5 MPa wg [9]. W takim przypadku, aby spełnić warunek mrozoodporności trzeba dodać większą ilość spoiwa, w ten sposób uzyskuje się znacznie wyższe od wymaganych wytrzymałości na ściskanie R_c , co prowadzi do przesztynienia podbudowy i powstawania spękań termicznych a następnie spękań odbitych w górnych warstwach asfaltowych. Niskie marki wytrzymałościowe dotyczą raczej gruntów związanych hydraulicznie, dla mieszanek kruszywowych będzie wymagana większa wytrzymałość.

Wg Polskich Norm [8 - 11] badanie mrozoodporności polega na tym, że wstępnie związaną próbkę kruszywa lub gruntu ze spoiwem poddaje się cyklom zamrażania jeszcze przed pełnym zakończeniem pielęgnacji, tj. ostatnie 14 dób polega na zamrażaniu i odmrażaniu próbki. W praktyce nie powinno być przypadku, aby podbudowa zamarzała jeszcze przed całkowitym związaniem, więc może badać mrozoodporność

po pełnym związaniu, podobnie jak w betonie zwykłym, czy badaniu drobnowymiarowych elementów betonowych?

Uwzględniając powyższe zastrzeżenia w odniesieniu do normowej metodyki badawczej zaproponowano w metodzie zweryfikowanej wg IBDiM wydłużenie okresu pielęgnacji próbek, na których następnie przeprowadza się badanie mrozoodporności.

Wątpliwości może budzić także procedura zalewania zamrożonych próbek w temp. $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ wodą o temp. pokojowej tzn. $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tak drastyczne warunki oddziaływania różnicy temperatur nie występują w podbudowie drogowej. Ponieważ jest to badanie przyspieszone, należy jednak zachować tę procedurę.

Przyjęto, że rozpoczęcie 14 cykli zamrażania powinno nastąpić dopiero po ustalonym okresie pielęgnacji tak, aby próbka zdążyła uzyskać normową (projektowaną) wytrzymałość na ściskanie. Pielęgnacja obejmowała okres od 28 do 180 dni w warunkach wilgotnych ($w = 95 \div 100\%$) i temp. $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tak szeroki zakres pielęgnacji pozwolił wybrać lub zweryfikować i uporządkować okresy pielęgnacji stosowane dotychczas w drogownictwie dla różnych typów mieszanek. Jest to istotne z tego względu, że normy serii PN EN 14227-xx (z wyjątkiem PN-EN 14227-1) nie określają czasu i warunków pielęgnacji również dla próbek przeznaczonych do badań wytrzymałości na ściskanie.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Zakres badań objął szeroki przedział zmienności parametrów branych pod uwagę w analizach mrozoodporności. Zastosowano pielęgnację próbek trwającą 28, 42, 90 i 180 dni w warunkach wilgotnych ($w = 95 \div 100\%$) i temp. $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po założonych okresach pielęgnacji próbki były poddane cyklom zamrażania i odmrażania metodą normową i zweryfikowaną. Stosowano mieszanki związane hydraulicznie wykonane z następujących rodzajów kruszyw zgodnych z [2]:

- kruszywa naturalne łamane: dolomit i granodioryt,
- kruszywo naturalne niełamane: mieszanka żwirowo-piaskowa,
- kruszywo sztuczne: kruszywo recyklingowe z betonu.

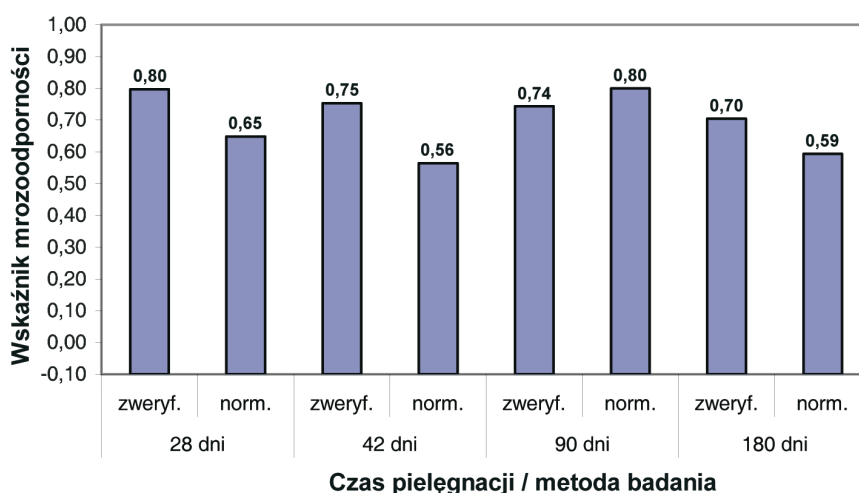
Jako spoiwa zastosowano cement portlandzki CEM I 32.5, spoiwo drogowe Silment CQ25, żużel granulowany wielkopiecowy, oraz popioły lotne (krzemionkowe i wapieniowe). Spoiwa dozowano w ilościach 6% i 12% w stosunku do suchej masy szkieletu ρ_d . Biorąc pod uwagę wszystkie wymienione wyżej kombinacje uzyskano duży zbiór próbek i wyników badań, umożliwiający szczegółową analizę zmian mrozoodporności mieszanek związanych hydraulicznie. Wykonano analizę na 147 średnich wynikach badań, przy czym wynik średni oznacza średnią arytmetyczną z 3 badań. Łącznie zbadano 441 próbek.

Przy analizie mrozoodporności uwzględniono różne właściwości fizyczne zastosowanych kruszyw, związanych mieszanek i mieszanek przed związaniem. Syntetyczne zestawienie wyników badań przedstawiono w tablicy nr 1.

Badania mrozoodporności mieszanek na żużlu granulowanym wykazały, że tego typu mieszanki nie są odporne na cykliczne zamrażanie i odmrażanie. Próbkę uległy rozpadowi i nie było możliwe określenie ich wytrzymałości. Zaobserwowano rozpad wiązań hydraulicznych, a nie rozpad kruszywa. Mrozoodporność takich mieszanek należy oceniać na podstawie badania *CBR* po określonej liczbie cykli zamrażania i odmrażania zagęszczonej mieszanki. Zastosowany granulowany żużel wielkopieczowy miał małą aktywność hydrauliczną (kategoria $\alpha 1$) wg [13]. Analiza mrozoodporności pozostałych typów mieszanek dotyczyła metod badania (metoda normowa i zweryfikowana) uwzględniając też pielęgnację, rodzaj kruszywa, rodzaj i zawartość spoiwa.

Nie można wykluczyć, że żużel granulowany może być uzdatniony i uzyskać odpowiednio wysoką wytrzymałość R_c , wtedy mrozoodporność będzie można zbadać jak dla innych mieszanek związanych hydraulicznie. Dlatego w Wytycznych Technicznych przewidzieć należy mieszanki żużłowe o wyższych wytrzymałościach i większej mrozoodporności badanej, jako wskaźnik mrozoodporności. Ze względu na brak możliwości określenia mrozoodporności wyników badań mieszanek żużłowych nie brano pod uwagę w tej analizie.

Określono globalne wskaźniki mrozoodporności dla wszystkich mieszanek i ustalono zależności % pomiędzy metodą normową a zweryfikowaną. Globalny wskaźnik oznacza, że analizowano wszystkie wyniki bez względu na rodzaj mieszanki, lecz rozpatrując je pod względem parametru wodącego, np. okresu pielęgnacji (28, 42, 90, 180 dni), wytrzymałość próbki (próbki „mocne” o $R_c > 5$ MPa i „słabsze” o $R_c < 5,0$ MPa), zastosowane kruszywo. Przeanalizowano także mrozoodporność próbek z podziałem na rodzaj mieszanki. Wyniki badań przedstawiono poniżej na rysunku 1 oraz w tablicach 2 i 3.



Rys.1. Globalny wskaźnik mrozoodporności próbek mieszanek związanych hydraulicznie

Fig.1. Global frost resistance ratio for all hydraulically bound mixtures

Tablica 1. Syntetyczne zestawienie wyników badań mrozoodporności próbek mieszanek związanych hydraulicznie
 Table 1. Synthetic presentation of frost resistance test results for samples of hydraulically bound mixtures

Rodzaj i zawartość spoiwa	Pielęgnacja (dni)		28		42		90		180		
	Rodzaj kruszywa		zweryf.	norm.	zweryf.	norm.	zweryf.	norm.	zweryf.	norm.	
	Metoda badania										
	Wskaźnik mrozoodporności										
Cement	6 %	dolomit	0	0	nie określono	0,98	0	0,98	0	0,98	0,97
	6 %	granodioryt	0,51	0		0,45	0,77	0,62	0,36		
	6 %	naturalne	0,96	0,73		0,49	0	0	0		
	6 %	beton recykl.	0	0,61		0,71	0,70	0,53	0,40		
Popioły lotne	12 %	dolomit	0,76	0,61	nie określono	0,75	0,95	0,59	0,48		
	12 %	granodioryt	0,87	0,73		0,99	0,83	0,99	0,91		
	12 %	naturalne	0,89	0,7		0,98	0,74	0	0,60		
	12 %	beton recykl.	0,79	0,51		0,52	0,63	0,41	0,63		
Popioły lotne	25 % pop. krzemionkowe	6% cementu	nie określono		0,77	0,55	0,72	0,94	0,99	0,7	
	25 % pop. wapienne	6% cementu	nie określono		0,91	0,73	0,93	0,95	0,92	0,82	
Spoiwo drogowe	6 %	dolomit	nie określono		0	0	0,57	0	0,46	0,22	
	6 %	granodioryt	nie określono		0,34	0,16	0,78	0	0,55	0,53	
	6 %	naturalne	nie określono		0	0	0	0,56	0	0	
	6 %	beton recykl.	nie określono		0	0	0	0	0	0	
Spoiwo drogowe	12 %	dolomit	nie określono		0,88	0,67	0,65	0,88	0,83	0,85	
	12 %	granodioryt	nie określono		0,72	0,49	0,86	0,60	0,81	0,71	
	12 %	naturalne	nie określono		0,88	0,72	0,58	0,98	0	0,33	
	12 %	beton recykl.	nie określono		0,77	0,63	0,93	0,87	0,47	0,39	

Rodzaj i zawartość spoiwa	Rodzaj kruszywa	Pielęgnacja (dni)		28		42		90		180	
		zweryf.	norm.	zweryf.	norm.	zweryf.	norm.	zweryf.	norm.	zweryf.	norm.
		Wskaźnik mrozoodporności									
10 %	dolomit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 %	granodioryt naturalne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 %	beton recykl.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25 %	dolomit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25 %	granodioryt naturalne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25 %	beton recykl.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Uwaga											
0 – oznacza brak wyniku z powodu rozpadu próbki po mrożeniu											

Tablica 2. Globalne wskaźniki mrozoodporności mieszanek związanych hydraulicznie
 Table 2. Global frost resistance ratios for hydraulically bound mixtures

Okres pielęgnacji	28 dni		42 dni		90 dni		180 dni	
	zweryf.	norm.	zweryf.	norm.	zweryf.	norm.	zweryf.	norm.
Metoda badania	0,80	0,65	0,75	0,56	0,74	0,80	0,70	0,59
średnia	22,88		33,42		-7,11		18,63	
% zmiana w stosunku do met. normowej								
metoda normowa	0,662		metoda zweryfikowana		0,740			
% zmiana w stosunku do met. normowej			11,83					
m. cementowa	0,80	0,65			0,73	0,77	0,69	
% zmiana		22,88				-4,71		
m. na spoiwach			0,72	0,53	0,73	0,78	0,62	
% zmiana				34,46		-6,38		
m. popiołowa			0,84	0,64	0,83	0,95	0,96	
% zmiana				31,25		-12,70		
metoda normowa	0,704		metoda zweryfikowana		0,791			
% zmiana w stosunku do met. normowej			12,37					
metoda normowa	0,629		metoda zweryfikowana		0,709			
% zmiana w stosunku do met. normowej			12,57					

Globalny wskaźnik mrozoodporności dla wszystkich mieszanek z podziałem na okresy pielęgnacji

Globalny wskaźnik mrozoodporności dla wszystkich mieszanek bez uwzględniania czasu pielęgnacji

Wskaźnik mrozoodporności w zależności od rodzaju mieszanki

Globalny wskaźnik mrozoodporności dla mieszanek „mocnych” (z 12 % dodatkiem spoiw) bez uwzględniania czasu pielęgnacji

Globalny wskaźnik mrozoodporności dla mieszanek „słabszych” (z 6 % dodatkiem spoiw) bez uwzględniania czasu pielęgnacji

Tablica 3. Globalne wskaźniki mrozoodporności mieszanek związanych hydraulicznie w zależności od rodzaju kruszywa

Table 3. Global frost resistance ratios for hydraulically bound mixtures for various kinds of aggregates

Rodzaj kruszywa w mieszance	Mrozoodporność mieszanki		
	metoda normowa	metoda zweryfikowana	zmiana % w stosunku do metody normowej
Dolomit	0,704	0,745	5,86
Granodioryt	0,598	0,708	18,36
K. naturalne	0,670	0,797	18,91
Beton recykl.	0,597	0,641	7,47
Popioły lotne	0,782	0,873	11,73
Wartość średnia	0,670	0,753	12,46

Z wyników badań mrozoodporności próbek wyselekcjonowanych wg rodzaju kruszywa (tabl. 3) wynika, że wyraźnie najmniejsza różnica (5,86 ÷ 7,47 %) pomiędzy badaniami metodą normową i zweryfikowaną występuje w przypadku dolomitu i betonu z recyklingu, teoretycznie najsłabszych kruszyw pod względem fizycznym. Większa rozbieżność wyników pomiędzy metodami (11,73 ÷ 18,91 %) zachodzi dla pozostałych rodzajów mieszanek. Jednak globalny wskaźnik mrozoodporności kształtuje się na poziomie 0,670 (metoda normowa) i 0,753 (metoda zweryfikowana) a różnica pomiędzy metodami wynosi 12,45 %. Różnicę na poziomie ~12 % (11,83 ÷ 12,57 %) potwierdzają wyniki wskaźników globalnych przedstawionych w tablicy 2.

Nie można jednak rozpatrywać mrozoodporności stwardniałych mieszanek bez brania pod uwagę właściwości składników (kruszyw). Aby zbadać, czy teza, że „słaba mrozoodporność mieszanki związanej hydraulicznie zależy od mrozoodporności kruszywa” jest słuszna przeanalizowano wyniki badań kruszyw zastosowanych do mieszanek (tabl. 4) i właściwości mieszanek (tabl. 5) z uwzględnieniem *C* (ang. *compacity*).

„Compacity” *C* jest to nowa cecha dla mieszanek związanych hydraulicznie wprowadzona wraz z PN-EN 14227-xx. „Compacity” mieszanki przed wbudowaniem definiuje się jako stosunek całkowitej gęstości objętościowej szkieletu do gęstości pozornej. Obecnie nie ma odpowiedniego słowa w języku polskim dla tej cechy, stosuje się termin zagęszczalność lub szczelność mieszanki. Wydaje się, że słowo szczelność mieszanki jest bardziej odpowiednia, ponieważ była stosowana w Polsce na podstawie PN-76/B-06714-08 [14]. Szczelność wg PN-EN 14227-xx oblicza się według następującego wzoru:

$$C = (\gamma_m / 100) \cdot (a / \gamma_A + b / \gamma_B + d / \gamma_D + \dots) ,$$

gdzie:

- C – szczelność (zagęszczalność),
 γ_m – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu wg zmodyfikowanej metody Proctora (Mg/m^3) wg [7],
 γ_A – gęstość składnika A (Mg/m^3),
 γ_B – gęstość składnika B (Mg/m^3),
 γ_D – gęstość składnika D (Mg/m^3),
 a – zawartość składnika A w mieszance (%),
 b – zawartość składnika B w mieszance (%),
 d – zawartość składnika D w mieszance (%).

Minimalna wartość C wg PN-EN 14227-xx powinna wynosić 0,8.

Z analizy tych badań wynika, że kruszywo betonowe jest najsłabsze pod względem odporności na czynniki klimatyczne (woda, mróz), natomiast kruszywo dolomitowe posiada odporność na wysokim poziomie. Oznacza to, że nie występuje tu zależność potwierdzająca wyżej postawioną tezę. Analiza mieszanek pod względem gęstości ρ i zagęszczalności C również nie pozwala na ustalenie jakiegokolwiek zależności potwierdzającej najmniejszą różnicę w badaniach mrozoodporności w przypadku mieszanek dolomitowych i na kruszywach betonowych.

Tablica 4. Wyniki badań nasiąkliwości i mrozoodporności kruszyw zastosowanych w mieszankach

Table 4. Test results of water absorption and frost resistance of aggregates used in mixtures

Rodzaj kruszywa	Nasiąkliwość [%] badana wg		Mrozoodporność [%] lub kategoria F badania wg	
	PN	PN-EN	PN	PN-EN
Dolomit	0,50	0,80	1,70	$F1$
Granodioryt	0,80	1,60	0,50	$F1$
K. naturalne	1,24	1,24	4,16	$F1$
Beton recykl.	5,44	6,36	20,31	$F20$
Wartość średnia	1,995	2,50	6,668	

Analizując wskaźniki mrozoodporności przedstawione w tablicy 2, przyjmując jeden parametr za wiodący obserwuje się, że różnica wyników uzyskanych metodą normową i zweryfikowaną zmniejsza się wraz z okresem pielęgnacji (rys. 1).

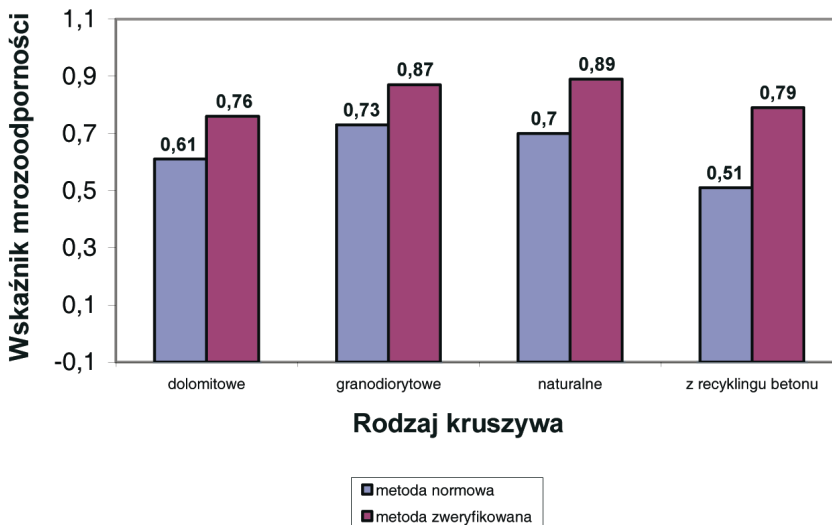
Tablica 5. Właściwości mieszanek związanych hydraulicznie HBM
Table 5. Properties of hydraulically bound mixtures

Rodzaj mieszanki			Właściwości mieszanki		
Kruszywo	Rodzaj spoiwa	Dodatek spoiwa	w_{opt}	ρ_{ds}	C
Dolomitowe	Cement portlandzki	6 %	6,90 %	2,37 g/cm ³	
		12 %	6,50 %	2,46 g/cm ³	
	SILMENT CQ-25	6 %	7,20 %	2,36 g/cm ³	0,83
		12 %	6,30 %	2,38 g/cm ³	0,83
	Żużel granulowany	10 %	9,40 %	2,23 g/cm ³	0,81
		25 %	8,60 %	2,12 g/cm ³	0,81
Granodiorytowe	Cement portlandzki	6 %	6,90 %	2,26 g/cm ³	
		12 %	6,50 %	2,30 g/cm ³	
	SILMENT CQ-25	6 %	8,10 %	2,23 g/cm ³	0,81
		12 %	8,40 %	2,28 g/cm ³	0,81
	Żużel granulowany	10 %	6,40 %	2,12 g/cm ³	0,81
		25 %	7,40 %	2,06 g/cm ³	0,80
Naturalne	Cement portlandzki	6 %	5,60 %	2,15 g/cm ³	
		12 %	6,00 %	2,17 g/cm ³	
	SILMENT CQ-25	6 %	7,30 %	2,14 g/cm ³	0,85
		12 %	7,80 %	2,14 g/cm ³	0,81
	Żużel granulowany	10 %	7,20 %	2,08 g/cm ³	0,83
		25 %	7,40 %	2,13 g/cm ³	0,81
Z recyklingu betonu	Cement portlandzki	6 %	11,80 %	1,88 g/cm ³	
		12 %	11,90 %	1,85 g/cm ³	
	SILMENT CQ-25	6 %	14,10 %	1,815 g/cm ³	0,74
		12 %	12,80 %	1,823 g/cm ³	0,74
	Żużel granulowany	10 %	12,70 %	1,778 g/cm ³	0,73
		25 %	11,70 %	1,821 g/cm ³	0,73
Mieszanki popiołowe na kruszywie dolomitowym	Popioły krzemionkowe 25 %	6 % cement	10,20 %	1,88 g/cm ³	0,77
	Popioły wapienne 25 %	6 % cement	13,80 %	1,83 g/cm ³	0,76

Zacieranie się różnic w wynikach obserwuje się po 42 dniach pielęgnacji. Stosowane obecnie normowe okresy pielęgnacji 28 dni dla mieszanek cementowych i 42 dni dla mieszanek popiołowych i na spoiwach drogowych, wg uzyskanych wyników badań wykazują istotną różnicę w wynikach badań pomiędzy metodami na poziomie $22,8 \div 34,46$ %. Uznać to należy za dowód, że w krótkich okresach (normowych) bardziej adekwatną będzie metoda zweryfikowana. Dajmy szansę na związanie mieszance i badajmy dopiero ją na mrozoodporność.

Po 90 dniach pielęgnacji uzyskano wyniki sprzeczne z zaobserwowanym trendem. Wyniki badań mrozoodporności metodą normową dały lepsze rezultaty niż metodą zweryfikowaną, czego obecnie wyjaśnić nie można. Dlatego w celach badawczych dokonano globalizacji wskaźników mrozoodporności i rozpatrywano je dla całej populacji wyników badań bez podziału na okresy pielęgnacji. Przyjęcie takiego uogólnienia jest uzasadnione tym, że pozwoli na zaobserwowanie trendu i daje informację o przybliżonych poziomach mrozoodporności pomierzonej różnymi metodami i porównanie tych metod.

W przypadku globalnych wskaźników mrozoodporności, biorąc pod uwagę: rodzaj mieszanki i wytrzymałość mieszanki obserwuje się różnicę wyników badań na około 12 % ($11,83 \div 12,57$), co oznacza, że wynik badania metodą zweryfikowaną jest o ok. 12 % „lepszy” niż w przypadku metody normowej, co zilustrowano przykładowo na rysunku 2. Praktycznie nie jest to wielkość istotna, gdyż uzyskiwane wyniki badań przy uśrednianiu 3 wyników dają większe rozrzuty. Normowo wg PN EN 14227-xx dopuszcza się rozrzut wyników do 20 %.



Rys.2. Wskaźnik mrozoodporności mieszanek na spoiwie cementowym (12 %) po 28 dniach pielęgnacji

Fig.2. Frost resistance ratio for cement (12 %) bound mixtures after 28 days

4. WNIOSKI

Przeprowadzona analiza wykazała, że właściwą w Polsce metodą badania mrozoodporności mieszanek związanych hydraulicznie jest metoda zweryfikowana. Próbkę należy poddawać 14 cyklom zamrażania i odmrażania w wodzie dopiero po zakończeniu normowego czasu wiązania.

Mając na uwadze polską praktykę drogową oraz doświadczenia francuskie i brytyjskie [14, 16] jako normowe okresy pielęgnacji należy przyjąć następująco w zależności od rodzaju spoiwa:

- mieszanki cementowe – pielęgnacja 28 dniowa,
- mieszanki popiołowe i na spoiwach drogowych – pielęgnacja 42 dniowa,
- mieszanki żuźlowe – generalnie klasyfikacja *CBR*, a w przypadku mieszanek typu 4 pielęgnacja 90 dniowa.

Badania mrozoodporności polegające na oddziaływaniu 14 cykli zamrażania w temp. $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ przez 8 godz. i odmrażaniu w wodzie o temp. $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ przez 16 godz. należy przeprowadzać po poprzedniej pielęgnacji w warunkach powietrzno - wilgotnych zabezpieczając próbki przed wysychaniem przez normowe okresy.

Uzyskane wyniki badań oraz analizy w niniejszej pracy upoważniają do przyjęcia wartości wskaźników mrozoodporności dla mieszanek związanych hydraulicznie na dotychczasowych poziomach, jak dla gruntów stabilizowanych cementem, tzn.:

$$\min. R_c^{z-o} / R_c = 0,7 \quad \text{– dla podbudów zasadniczych,}$$

$$\min. R_c^{z-o} / R_c = 0,6 \quad \text{– dla podbudów pomocniczych.}$$

Należy zaznaczyć, że wskaźniki mrozoodporności pomierzone metodą zweryfikowaną w ustalonych wyżej okresach pielęgnacji będą korzystniejsze o ok. $20 \div 30\%$ w stosunku do metody normowej. Zyskany w ten sposób „zapas” mrozoodporności jest bezpieczny jak wskazują wyniki badań długoterminowych (do 180 dni) oraz przekonuje to, że mieszanki będą oparte na wyselekcjonowanych kruszywach o ciągłym dobrym uziarnieniu i będą charakteryzowały się znaczną wytrzymałością R_c .

Wynika jeszcze jeden ważny wniosek. Nie należy stawiać zbyt wygórowanych wymagań dla kruszyw pod względem mrozoodporności i nasiąkliwości, gdyż jak wskazują wyniki badań mieszanki wykonane z mniej odpornych kruszyw (recykling betonu) są mieszankami mrozoodpornymi [3, 17]. Dowodzi to, że związana podbudowa musi być mrozoodporna, ale przy ustalaniu kryteriów dla kruszyw należy brać pod uwagę, że kruszywa z recyklingu, czy uboczne odpady przemysłowe charakteryzują się słabszymi parametrami technicznymi niż kruszywa mineralne. Natomiast mieszanki po związaniu uzyskują wymagane parametry.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 14227-1:2007 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Specyfikacja. Część 1: Mieszanki związane cementem
PN-EN 14227-2:2007 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Specyfikacja. Część 2: Mieszanki żuźlowe
PN-EN 14227-3:2007 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Specyfikacja. Część 3: Mieszanki związane popiołami lotnymi
PN-EN 14227-4:2005 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Specyfikacja. Część 4: Popioły lotne do mieszanek
PN-EN 14227-5:2007 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Specyfikacja. Część 5: Mieszanki związane spoiwem drogowym
- [2] PN-EN 13242:2008 (oryg.) Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym
- [3] *Kraszewski C. i inni: Badania i analiza porównawcza właściwości mieszanek związanych hydraulicznie wg dotychczasowych norm PN i nowych norm PN-EN 14227-1÷5. IBDiM, Warszawa 2007*
- [4] *Jabłoński K., Wałęcka H.K., Żurek B.: Dokument Aplikacyjny do normy PN-EN 13043: 2004 – Projekt. PSWNA, Warszawa 2005*
- [5] PN-EN 13043:2004 Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu
- [6] 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
- [7] PN-EN 13286-2:2007 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 2: Metody określania gęstości i zawartości wody. Zagęszczanie metodą Proctora
- [8] PN-S-06103 Drogi samochodowe. Podbudowa z betonu popiołowego
- [9] PN-S-96012:1997 Drogi samochodowe. Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem
- [10] PN-S-96011:1998 Drogi samochodowe. Stabilizacja gruntów wapnem do celów drogowych
- [11] BN-71/8933-10 Drogi samochodowe. Podbudowa z gruntów stabilizowanych aktywnymi popiołami lotnymi
- [12] PN-S-96013:1997 Drogi samochodowe. Podbudowa z chudego betonu. Wymagania i badania
- [13] PN-EN 13286-44:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 44: Metoda oznaczania wskaźnika alfa granulowanego żuźla wielkopiecowego
- [14] PN-76/B-06714-08 Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie szczelności

- [15] *Kraszewski C.* i inni: Badania i analiza porównawcza właściwości mieszanek związanych hydraulicznie wg dotychczasowych norm PN i nowych norm PN-EN 14227-1÷5. IBDiM, Warszawa 2005
- [16]. *Kraszewski C.* i inni: Badania i analiza porównawcza właściwości mieszanek związanych hydraulicznie wg dotychczasowych norm PN i nowych norm PN-EN 14227-1÷5 – Tłumaczenia tekstów dokumentów aplikacyjnych zagranicznych. IBDiM, Warszawa 2005
- [17] *Kraszewski C., Sybilski D.*: Ocena i badania wybranych odpadów przemysłowych do wykorzystania w konstrukcjach drogowych. Praca niepublikowana (maszynopis), IBDiM, Warszawa 2004

ANALYSIS OF FROST RESISTANCE TEST RESULTS FOR HYDRAULICALLY BOUND MIXTURES

Abstract

The paper presents analysis of test results and test methods for determination of frost resistance (in freeze-thaw condition) for hydraulically bound mixtures HBM for use in road bases. The aim of this analysis was to find adequate test method and level of requirements for Polish Technical Guidelines implementing European Standards to Poland. The frost resistance ratio was determined using to Polish Standards and using new test method verified by IBDiM. Analysis performed in this paper considers various properties of aggregates, binders and characteristics of unbound mixtures. Four types of mixtures were examined according to PN-EN 14227-1÷5 i.e.: cement bound mixtures, slag bound mixtures, fly ash mixtures and hydraulic road binder bound mixtures. Various types of aggregates were used for mixtures (natural crushed and not-crushed stone and recycled concrete) and also the binders were used in two different quantities. The curing time from 28 to 180 days was considered in this investigation.