

Wpływ spoiw drogowych oraz cementu z dodatkiem mleczanu diamidoaminy na wytrzymałość na ściskanie i mrozoodporność gruntów spoistych

The effect of hydraulic road binders and cement with diamidoamine lactate additive on the compressive strength and freeze-thaw resistance of cohesive soils

Szymon Węgliński

Poznan University of Technology

e-mail: szymon.weglinski@put.poznan.pl

Streszczenie

W podłożu często występują grunty spoiste. Aby stanowiły pełnowartościowe podłoże budowlane powinny zostać ulepszone. Popularnym sposobem ulepszania jest stabilizacja spoiwami. Oprócz cementu powszechnego użytku stosuje się mieszanki klinkieru portlandzkiego, popiołów, żużli i dodatków, znane pod nazwą spoiw drogowych. Standardowe spoiwa pozwalają na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie, nie zapewniają jednak oczekiwanej normami mrozoodporności, która powinna zapewniać ochronę konstrukcji nawierzchni przed uszkodzeniami mrozowymi. W artykule zaproponowano zastosowanie hydrofobizującego dodatku pochodzenia organicznego, wytworzonego z naturalnych surowców – tłuszczów roślinnych i zwierzęcych, w celu ograniczenia wchłaniania wody w głąb stabilizowanej warstwy, zapewniając poprawę wytrzymałości na ściskanie oraz mrozoodporności warstwy. Dodatek mleczanu diamidoaminy do mieszanek gruntowo – cementowych zwiększył ich wytrzymałość na ściskanie 3 do ośmiokrotnie dla próbek zawierających 7% spoiwa i 2 do dwu i półkrotnie dla próbek zawierających 9%, w odniesieniu do standardowych spoiw.

Słowa kluczowe: cement, grunt, mleczan diamidoaminy, spoiwo drogowe, stabilizacja gruntów

Summary

Cohesive soils are very often found in the soil subbase. In order to be a fully-fledged building subbase, they must be improved. A popular way to improve is to stabilise with binders. In addition to common cement, mixtures of Portland clinker, ash, slag and additives, known as hydraulic road binders, are used. Standard binders allow for increased compressive strength, but do not provide the expected frost resistance that should protect the road structure from frost damage. In the paper the use of a hydrophobic additive of organic origin, produced from natural raw materials – vegetable and animal fats is proposed to reduce water absorption into the stabilised layer, providing improved compression strength and frost resistance of the layer. The addition of diamidoamine lactate to the soil–cement mixtures increased their compressive strength 3 to 8 times, for samples containing 7% binder and 2 to 2.5 times for samples containing 9%, in relation to standard binders.

Keywords: cement, diamidoamine lactate, road binders, soil, soil stabilisation

1. Wprowadzenie

Przygotowanie podłoża gruntowego do inwestycji budowlanych – kubaturowych i drogowych – jest jednym z najważniejszych etapów realizacji procesu budowlanego. Obecnie większość obszarów

1. Introduction

Preparation of the soil substrate for construction projects – buildings and roads – is one of the most important stages of the construction process. At present, most of the investment areas with

inwestycyjnych o dobrej nośności podłoża jest już wykorzystana i nowe obiekty budowlane muszą być wznoszone na gruntach wymagających poprawy. W centralnej i wschodniej części Europy, w podłożu występują grunty spoiste, wykształcone w wyniku akumulacji lądolodów.

Grunty spoiste zbudowane są głównie z materiałów ilastych, które są drobnoziarniste i hydrofilowe oraz mają zdolność do sorpcji i wymiany jonowej. Materiały ilaste mają największy wpływ na właściwości inżyniersko-geologiczne gruntów (1). Ze względu na budowę mineralogiczną, są one bardzo wrażliwe na działanie wody, której obecność jest główną przyczyną powstawania wysadzin, powodujących szczególnie uszkodzenia konstrukcji nawierzchni drogowych.

W celu poprawy właściwości mechanicznych słabych gruntów oraz ochrony konstrukcji przed zniszczeniem należy wzmacniać podłoże gruntowe. Ulepszanie gruntu jest celową zmianą stanu, rodzaju lub zachowania materiału tworzącego podłoże, która ma pozwolić na osiągnięcie oczekiwanej reakcji podłoża na istniejące lub projektowane czynniki otoczenia, w tym obciążenie (2). Typowym sposobem ulepszenia jest stabilizacja spoiwami hydraulicznymi.

Marasteanu i inni (3), z chemicznego punktu widzenia, traktują podłoża jako układy elektrolitowe, w których występują wymiany jonowe. Znajomość struktury minerałów ilastych budujących grunty spoiste ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia zachowania gruntów o ujemnym ładunku elektrycznym na powierzchniach zawartych w nich cząstek. Onyelowe i Okoafor (4) dodają, że z uwagi na dużą powierzchnię materiałów ilastych oraz ładunki elektryczne, grunty spoiste mają właściwości sorpcyjne. Aby utrzymać neutralność elektryczną ładunki dodatnie są przyciągane i utrzymywane na krawędziach i powierzchni cząstek ilastych.

Herzog i Mitchell (5) twierdzą, że poprawa właściwości gruntów stabilizowanych cementem w dużej mierze zależy od twardnienia cementu portlandzkiego. Zakładając, iż korzystne parametry gruntów stabilizowanych, wynikają wyłącznie z procesu hydratacji, można uznać grunt za chemicznie obojętny składnik. Jeżeli jednak oprócz utwardzania zachodzą reakcje między cementem a składnikami gruntów, może to powodować powstanie dodatkowych produktów, które wzmacniają wiązania wewnątrz struktury gruntu oraz między cząstkami gruntu i cementu. W przypadku gruntów spoistych w ten sposób zmniejsza się plastyczność oraz wysadzinowość powodowana kontaktem z wodą. Duża zdolność do wymiany kationów może prowadzić do wiązania wolnych kationów. Składniki gruntów inne niż materiały ilaste, a przede wszystkim rozdrobniona krzemionka, są bardziej reaktywne i mogą potencjalnie reagować z cementem. Przyjmuje się, że stabilizacja glin powoduje powstawanie wtórnych produktów hydratacji, oprócz produktów zwykłej hydrolizy i hydratacji cementu, które można uznać za pierwotne produkty stabilizujące grunt. Dobre efekty utwardzania gruntu spoistego uzyskuje się przy zastosowaniu w roli środka hydrofobizującego związku powierzchniowo-czynnego zawierającego kation diamidoaminowy (6). Kationowy środek powierzchniowo czynny jest silnie przyciągany przez minerały znajdujące się w gruncie,

good load-bearing capacity are already in use and new buildings have to be founded on soils requiring improvement. In the central and eastern part of Europe, there are cohesive soils in the subbase, formed as a result of the accumulation of continental glaciers.

Cohesive soils are mainly composed of clay materials which are characterised by high dispersion and hydrophilicity as well as the ability to sorption and ions exchange. Clay materials have the greatest influence on the engineering and geological properties of soils (1). Due to their mineralogical composition, they are very sensitive to water, the presence of which is the main cause of heaves, especially damaging road structures.

In order to improve the mechanical properties of weak soils and to protect the structure from damage, the soil subbase should be improved. Soil improvement is a deliberate change in the condition, type or behaviour of the material forming the subbase which is intended to achieve the expected reaction of the subbase to existing or projected environmental factors, including loading (2). A typical way to improve is to stabilise with hydraulic binders.

From a chemical point of view, Marasteanu et al. (3) treat subbases as electrolyte systems in which ion exchange occurs. Knowledge of the structure of clay materials building cohesive soils is crucial for understanding the behaviour of soils with negative electrical charge on the surfaces of particles. Onyelowe and Okoafor (4) add that due to the large surface area of clay materials and electrical charges, cohesive soils have a sorption property. To maintain electrical neutrality, positive charges are attracted and maintained on the edges and surfaces of clay particles.

Herzog and Mitchell (5) claim that the improvement of the properties of cement-stabilised soils depends largely on the hardening of Portland cement. Assuming that the favourable parameters of stabilised soils result only from the hydration process, the soil can be considered as a chemically inert component. However, if, in addition to curing, reactions between cement and soil components occur, this may result in the creation of additional cement material which strengthens the bonds within the soil microstructure and between soil and cement particles. In the case of cohesive soils, this reduces the plastic behaviour and the swelling caused by contact with water. A high cation exchange capacity can lead to free cations being bound. Soil components other than clay materials such as fine-grained silica are more chemically active and may potentially react with cement. It is assumed that the stabilisation of clays results in the formation of secondary hydration products, in addition to the usual hydrolysis and hydration of cement, which can be considered as primary stabilising reactions. Good curing effects of cohesive soils are obtained by using a surfactant containing a diamidoamine cation as a hydrophobising agent (6). The cationic surfactant is strongly attracted by the minerals in the soil, which allows its modification at the level of ionic bonds and makes the soil hydrophobic compared to unmodified soil. There is a reduction in water absorption inside the soil microstructure and thus a reduction in the harmful effects of water, e.g. when the subbase is frozen.

co pozwala na jego modyfikację na poziomie wiązań jonowych oraz sprawia, że grunt staje się hydrofobowy w porównaniu do gruntu niemodyfikowanego. Następuje zmniejszenie wchłaniania wody wewnątrz mikrostruktury gruntu i tym samym ograniczenie szkodliwego działania wody np. przy przemarzaniu podłoża.

2. Materiały i metody

2.1. Grunty spoiste

Do badań wytypowano grunty występujące często na obszarze Wielkopolski w przypowierzchniowej warstwie podłoża nawierzchni drogowych, która potencjalnie może podlegać ulepszeniu – stabilizacji spoiwami. Wykorzystano dwa rodzaje gruntów spoistych, których właściwości oznaczono w ramach badań. Grunty pobrano z wykopów, z poziomu ok. 0,5 m – 1,0 m poniżej poziomu terenu naturalnego, z uwagi, iż na podobnej głębokości najczęściej projektuje się spód konstrukcji nawierzchni drogowej, co ma odpowiadać wierzchniej warstwie podłoża podlegającej stabilizacji. Oba badane grunty spoiste miały taką samą genezę, powstały skutkiem erozyjno-akumulacyjnej działalności lodolodu północnopolskiego, fazy leszczyńskiej. Można przyjąć, iż mają zbliżone parametry fizyko-mechaniczne, gdyż minerały budujące frakcję ilastą są takie same i w przewadze składają się z illitu oraz kaolinitu. Główną różnicą jest zawartość frakcji ilastej, decydująca o rodzaju gruntu. Właściwości fizyczne i mechaniczne analizowanych gruntów określono zgodnie z normami (7, 8). Na podstawie badań uziarnienia rozpoznano piasek gliniasty [siSa – krzywa przesiewu oznaczona trójkącikami na rysunku 1] oraz glinę piaszczystą [clSa – oznaczoną kółeczkami na rysunku 1]. Wyniki badań wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego przedstawiono na rysunku 2. Obydwa badane grunty okazały się materiałem bardzo wysadzinowym – wskaźniki piaskowe wyniosły odpowiednio 17 [Pg / siSa] oraz 8 [Gp / clSa].

2.2. Spoiwa hydrauliczne

Jako spoiwo podstawowe do stabilizacji wykorzystano cement CEM II/B-S 32,5 R, z uwagi na popularność jego zastosowania w realizacjach robót drogowych. W skład tego cementu wchodzi klinkier portlandzki i żużel wielkopiecowy. Mleczan diamidoaminy zastosowano jako dodatek hydrofobizujący. W celach porównawczych wykonano mieszanki z gruntu stabilizowanego drogowymi spoiwami hydraulicznymi. Wybrano dwa spoiwa hydrauliczne zawierające klinkier portlandzki i popioły lotne. Spoiwo A zawierało dodatek wapna palonego, zaś spoiwo B łupków

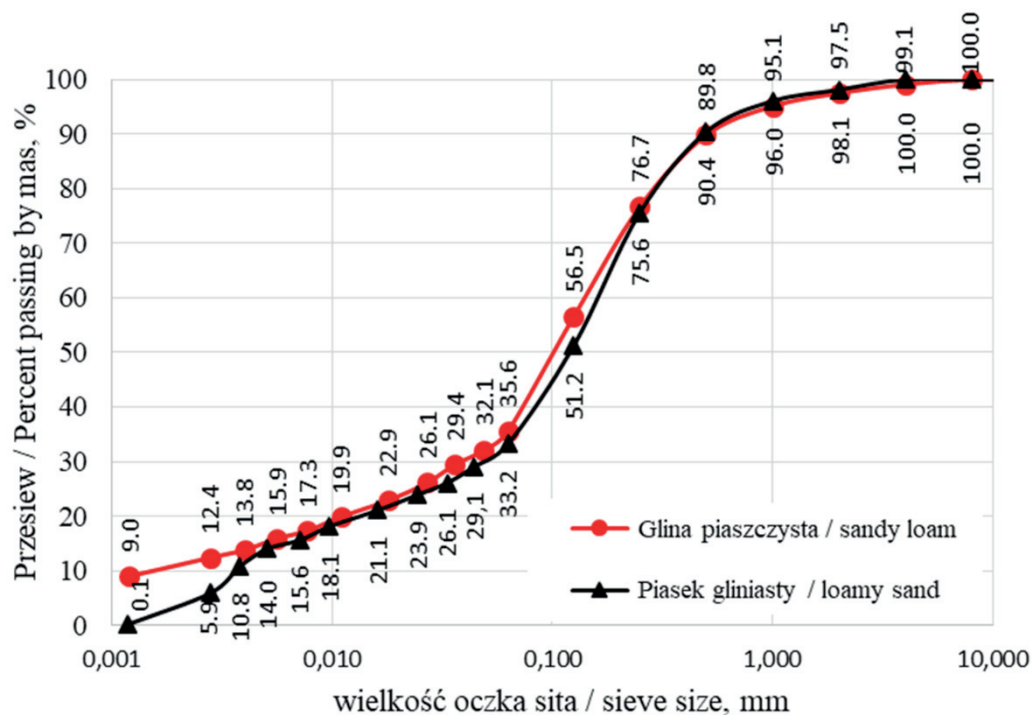
2. Material and methods

2.1. Cohesive soils

Cohesive soils, often found in the Great Poland region in the near-surface layer of road structures, which can potentially be improved – stabilised with binders, were selected for the study. Two types of cohesive soils were used, and their properties were determined. The soils were taken from excavations, from the level of about 0.5 m – 1.0 m below the level of natural ground, due to the fact that at a similar depth the underside of the road structure is most often designed, which is to correspond to the top layer of the subbase to be stabilised. Both cohesive soils studied had the same genesis, formed as a result of erosive and accumulation activity of the North Polish continental glacier, the Leszno phase. It can be assumed that they have similar physical and mechanical parameters, because the minerals building the clay fraction are the same and consist mostly of illite and kaolinite. The main difference is the clay fraction content which determines the type of soil. Physical and mechanical properties of the analysed soils were determined according to the standards (7, 8). On the basis of particle size distribution tests, loamy sand [siSa – screening curve marked in triangles in Figure 1] and sandy loam [clSa – marked in rollers in Figure 1] were recognised. The results of the optimal moisture content and maximum volumetric density of the soil matrix are shown in Figure 2. Both studied soils turned out to be a very frost-susceptible material – sand equivalent values were 17 [Pg / siSa] and 8 [Gp / clSa] respectively.

2.2. Hydraulic binders

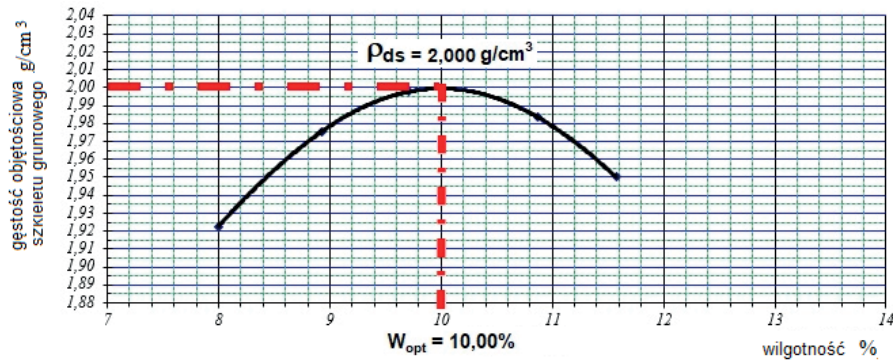
CEM II/B-S 32.5R cement was used as the basic binder for stabilisation, due to the popularity of its use in road works. The cement



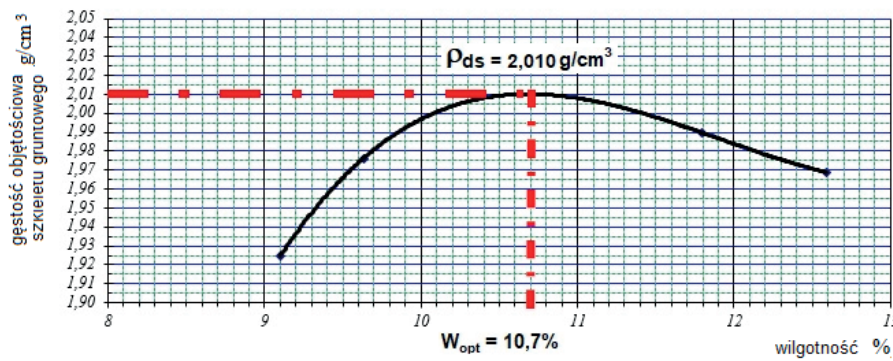
Rys. 1. Uziarnienie gruntów

Fig. 1. Soil particle size distribution

a) Pg / siSa



b) Gp / clSa



Rys. 2. Wilgotność optymalna i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego

Fig. 2. Optimum moisture content and maximum volumetric density of the soil matrix

przywęglowych. Wyniki badań czasu początku wiązania w aparacie Vicata oraz wytrzymałości na ściskanie i zginanie – przeprowadzonych zgodnie z normami (9, 10), zestawiono w tablicy 1.

2.3. Dodatek hydrofobizujący

Mleczan diamidoaminy wykorzystany w badaniach został wyprodukowany i dostarczony przez Instytut Ciężkiej Syntezy Organicznej „Blachownia” z Kędzierzyna Koźła. Środek hydrofobizujący stanowiący dodatek do gruntów stabilizowanych cementem wytworzono przy wykorzystaniu tłuszczów odpadowych. Amidoaminy tłuszczowe [alkilamidoaminy] są obok amin syntezowanych z nityli lub z alkoholi, podstawową grupą wytwarzanych w świecie związków służących do otrzymywania kationowych i amfoterycznych związków powierzchniowo czynnych. Proces otrzymywania soli diamidoamin przebiega dwuetapowo. W pierwszym etapie z triglicerydu lub kwasu tłuszczowego uzyskuje się odpowiednią

consists of Portland clinker and blast furnace slag. diamidoamine lactate was used as a hydrophobic additive. For comparison purposes mixtures from soil stabilised with road hydraulic binders were prepared. Two hydraulic road binders containing Portland clinker and fly ash were selected. Binder A contained the addition of burnt lime, while binder B of carbonaceous shale. The results of tests of setting time with Vicat apparatus and compressive and bending strength - conducted in accordance with the standards (9, 10), are listed in Table 1.

2.3. Hydrophobic additive

The diamidoamine lactate used in the research was produced and delivered by the Institute of Heavy Organic Synthesis “Blachownia” from Kędzierzyn Koźle. The hydrophobising agent which is an additive to cement-stabilised soils was produced using waste fats. Fatty amidoamines [alkylamidoamines] are, apart from amines synthesized from nitriles or alcohols, the basic group of compounds

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI SPOIW HYDRAULICZNYCH

PROPERTIES OF HYDRAULIC BINDERS

Rodzaj spoiwa Binder type	Początek czasu wiązania Initial setting time, min	Wytrzymałość na zginanie / Flexural strength, MPa			Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength, MPa		
		R ₂	R ₇	R ₂₈	R ₂	R ₇	R ₂₈
CEM II/B-S 32.5R	121	3.1 ± 0.3	-	8.7 ± 0.2	15.9 ± 0.4	-	47.5 ± 0.6
Spoivo A Binder A	121	-	4.8 ± 0.2	7.4 ± 0.4	-	27.5 ± 0.3	40.5 ± 0.7
Spoivo B Binder B	147	-	4.3 ± 0.5	7.1 ± 0.3	-	22.1 ± 0.4	36.6 ± 0.6

Tablica 2 / Table 2

SKŁADNIKI ORAZ WŁAŚCIWOŚCI MLECZANU DIAMIDOAMINY
COMPONENTS AND PROPERTIES OF DIAMIDOAMINE LACTATE

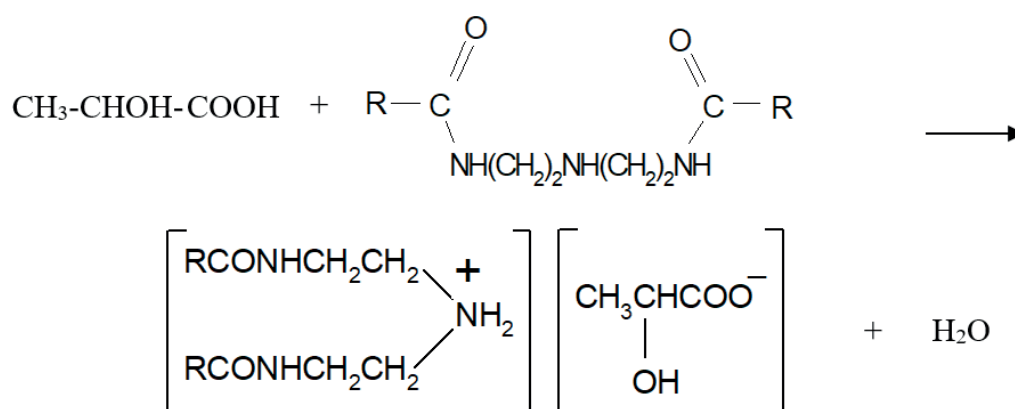
	Wartości / Value
Składniki / components:	
oleina / olein, g	800
DETA, g	156
Diamidoaminy / Diamidoamines:	
zasadowość / alkaliness, ml _{HCl} /g	1.9
zawartość środków kationowych / content of cationic agents, %	96.3
liczba kwasowa / acid number, -	5.9
Mleczan diamidoaminy / Diamidoamine lactate:	
diamidoamina / diamidoamine, -	413
kwas mlekowy / lactic acid, g	36
woda / water, g	4000
wskaźnik pH / pH index, -	6.5
gęstość w 20°C / density in 20°, g/cm ³	0.974
Lepkość dynamiczna / dynamic viscosity in 0.01-8.0 rpm, Pa s	812.0-4.8

produced in the world for obtaining cationic and amphoteric surfactants. The process of obtaining diamidoamine salts is carried out in two stages. In the first stage, a suitable diamidoamine is obtained from the triglyceride or fatty acid. In the second stage, in the reaction of the acid with diamidoamine, the appropriate diamidoamine salt is obtained, in the case under consideration diamidoamine lactate. The properties of diamidoamine lactate are listed in Table 2. The diagram of obtaining diamidoamine salts is shown in Fig. 3. Preliminary results confirming the effectiveness of the additive in hydrophobic impregnation of cohesive soils are presented in (6, 11).

2.4. Preparation of samples

The preparation of samples and the proportions of components of the individual mixtures were determined on the basis of the following assumptions:

- The optimum moisture content of the soil-cement mixture was assumed to be the optimum



Rys. 3. Schemat reakcji otrzymania mleczanu diamidoaminy

Fig. 3. Reaction diagram for obtaining diamidoamine lactate

diamidoaminę. W drugim etapie, w reakcji kwasu z diamidoaminą, otrzymuje się odpowiednią sól diamidoaminy, w rozważanym przypadku mleczan diamidoaminy. Właściwości mleczanu diamidoaminy zestawiono w tabelicy 2. Schemat otrzymywania soli diamidoamin przedstawiono na rysunku 3. Wstępne wyniki potwierdzające skuteczność dodatku w hydrofobizacji gruntów spoiwych przedstawiono w (6, 11).

2.4. Przygotowanie próbek

Przygotowanie próbek oraz proporcje składników poszczególnych mieszanek określono na podstawie następujących założeń:

- Za wilgotność optymalną mieszanki gruntowo-cementowej przyjęto wilgotność optymalną samego gruntu, co miało odwzorować pewne uproszczenie stosowane w praktyce podczas realizacji prac na placach budów.

moisture content of the soil itself, which was to reflect a certain simplification applied in practice during the works on construction sites.

- The addition of diamidoamine lactate, due to its liquid form and significant water content in its composition [about 90%], made it necessary to reduce the amount of added water, necessary to obtain the optimum moisture content.
- The hydraulic binders were added, in the contents of 7% and 9% in relation to the dry soil mass.
- The amount of diamidoamine lactate addition were 3%, 5%, 7%, and 9%, in relation to the mass of dry soil.

Quantities of mixture components were determined according to laboratory formulas [list of components in Table 3]. The samples were compacted in cylindrical moulds of equal height and diameter of 80 mm. The samples were made by dynamic compaction accor-

- Dodatek mleczanu diamidoaminy, z uwagi na płynną postać oraz znaczną, 90% zawartość wody w swoim składzie, powodował konieczność zmniejszenia ilość wody dodanej, niezbędnej do uzyskania wilgotności optymalnej.
- Spoiwa hydrauliczne dodawano masowo, w ilości 7% i 9% w odniesieniu do masy suchego gruntu.
- Dodatek mleczanu diamidoaminy wynosił 3%, 5%, 7% i 9% w odniesieniu do masy suchego gruntu.

Skład mieszanek określono wg. receptur laboratoryjnych i przedstawiono w tablicy 3. Próbkę ubijano w formach walcowych, o wysokości i średnicy wynoszących 80 mm. Próbkę wykonano poprzez zagęszczanie dynamiczne zgodne z I metodą Proctora, przy wilgotności optymalnej gruntu (7). Po rozformowaniu, próbkę poddano pielęgnacji, w zależności od okresu twardnienia, w wilgotnym piasku a następnie w wodzie. Wytrzymałość na ściskanie oznaczano po okresie 7 oraz 28 dni twardnienia (12).

ding to the 1st Proctor method, at the optimum soil moisture content (7). After demoulding, the samples were cured, depending on the hardening period, in moist sand and then in water. Compressive strength was determined after 7 and 28 days of hardening (12).

The frost resistance tests included 14 cycles of freezing and thawing. A single freezing cycle consisted of eight hours of freezing the samples at -23°C and sixteen hours of thawing in water at room temperature (11). An automatic chamber was used for the tests in which an automatic change of cycles, including temperature took place. The compressive strength of the frozen samples was determined after 28 days of hardening. The differences in damage to the samples for the different binders are shown in Fig. 4.

3. Results and discussion

3.1. Binder performance indicator

In order to make it easier to compare the results, a certain indicator called the performance indicator for hydraulic binders was

Tablica 3 / Table 3

SKŁADNIKI MIESZANEK

MIXTURE COMPONENTS

Rodzaj gruntu Soil	Nazwa mieszanki Notation of mixture	Wilgotność naturalna Water content	Wilgotność optymalna Optimal water content	Wsad suchego gruntu Dry mass of soil	Dodatek spoiwa Mass of cement or binder		Dodatek mleczanu diamidoaminy Mass of diamidoamine lactate		Masa wody Mass of water
		%	%	g	%	g	%	g	g
Pg / siSa	7% C	2.12	10.0	8 813	7.0	616.9	-	-	756.6
	7% M 7% C						7.0	616.9	139.7
	9% M 7% C						9.0	793.2	0.0
	7% A						-	-	756.6
	7% B						-	-	756.6
	9% C	2.12	10.0	8,813	9.0	793.2	-	-	774.2
	3% M 9% C						3.0	264.4	509.8
	5% M 9% C						5.0	440.7	333.6
	7% M 9% C						7.0	616.9	157.3
	9% A						-	-	774.2
9% B	-	-	774.2						
Gp / clSa	7% C	6.15	10.7	8,479	7.0	593.5	-	-	449.2
	3% M 7% C						3.0	254.4	194.9
	5% M 7% C						5.0	423.9	25.3
	7% M 7% C						7.0	593.5	0.0
	7% A						-	-	449.2
	7% B	-	-	449.2					
	9% C	6.15	10.7	8,479	9.0	763.1	-	-	467.4
	3% M 9% C						3.0	254.4	213.0
	5% M 9% C						5.0	423.9	43.5
	7% M 9% C						7.0	593.5	0.0
9% A	-						-	467.4	
9% B	-	-	467.4						

C – CEM II/B – S Portland cement, M – mleczan diamidoaminy / diamidoamine lactate, A – spoiwo drogowe A / road binder A, B – spoiwo drogowe B / road binder B

Badania mrozoodporności obejmowały 14 cykli zamrażania i rozmrażania. Pojedynczy cykl mrożenia polegał na ośmiogodzinnym mrożeniu próbek w temperaturze -23°C i szesnastogodzinnym ich rozmrażaniu w wodzie o temperaturze pokojowej (11). Do badań wykorzystano automatyczną komorę, w której następowała automatyczna zmiana cykli, w tym temperatury. Wytrzymałość na ściskanie próbek poddanych mrożeniu określono po 28 dniach twardnienia. Różnice w uszkodzeniach próbek dla różnych spoiw przedstawiono na rysunku 4.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Wskaźnik skuteczności spoiwa

W celu łatwiejszego porównania wyników zaproponowano pewien wskaźnik nazwany wskaźnikiem skuteczności działania spoiw hydraulicznych. Jako wartość 1,0 przyjęto wyniki wytrzymałości na ściskanie uzyskane dla próbek stabilizowanych wyłącznie cementem. Wartości powyżej 1,0 świadczą o większej, a wartości poniżej 1,0 świadczą o mniejszej skuteczności działania stabilizatora - cementu z dodatkiem mleczanu diamidoaminy lub spoiw drogowych, w uzyskanej wytrzymałości na ściskanie w porównaniu do samego cementu. W tabelicy 4 przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie dla badanych mieszanek, a na rysunkach 5-8 wskaźniki skuteczności działania spoiw hydraulicznych i dodatku hydrofobizującego.

3.2. Mieszanki z piasku gliniastego

Spośród mieszanek z 7% ilością dodatku spoiwa, największą wytrzymałość na ściskanie, oznaczaną po 7 dniach twardnienia, uzyskały dwie mieszanki – 7%M-7%C oraz 9%M-7%C. Obie mają również największą wytrzymałość po 28 dniach. Po badaniu mrozoodporności, największą wytrzymałość uzyskała mieszanka wyłącznie z dodatkiem cementu. Mieszanki stabilizowane cementem miały wyraźnie wyższą wytrzymałość na ściskanie niż mieszanki stabilizowane spoiwami drogowymi. Uzyskane wskaźniki mrozoodporności nie spełniają jednak wymagań normy (11).

Spośród mieszanek z 9% ilością dodatku spoiwa, największą wytrzymałość po 7 dniach miała mieszanka stabilizowana cementem. W przypadku próbek badanych po 28 dniach twardnienia, największą wytrzymałość uzyskały dwie mieszanki – 3%M-9%C oraz 9%M-9%C. Dla próbek poddanych badaniu mrozoodporności największą wytrzymałość miała mieszanka 3%M-9%C. Wymagany

a) Pg stabilizowany cementem z dodatkiem 7% mleczanu diamidoaminy / Pg stabilised with cement with a 7% addition of diamidamine lactate



b) Pg stabilizowany spoiwem drogowym A w ilości 7% / Pg stabilised with road binder A at 7%



c) Pg stabilizowany spoiwem drogowym B w ilości 7% / Pg stabilised with road binder B at 7%



Rys. 4. Próbkę po cyklach mrożenia

Fig. 4. Samples after freezing cycles

proposed. The compressive strength results obtained for samples stabilised with cement only were assumed to be 1.0. Values above 1.0 indicate higher, and values below 1.0 indicate lower performance of the stabiliser – cement with diamidamine lactate or road binders, in obtained compressive strength. Table 4 presents the results of compressive strength for the tested mixtures and Figs. 5-8 show the performance indicators of hydraulic binders and hydrophobising agent addition.

3.2. Loamy sand mixtures

For the mixtures with a 7% binder addition, the highest compressive strength, determined after 7 days of hardening, was achieved by two mixtures – 7%M-7%C and 9%M-7%C. Both are also characterised by the highest 28-day durability. After the frost resistance test, the greatest strength was achieved for the mixture with a cement addition only. The mixtures stabilised with cement showed significantly higher compressive strength than those stabilised with

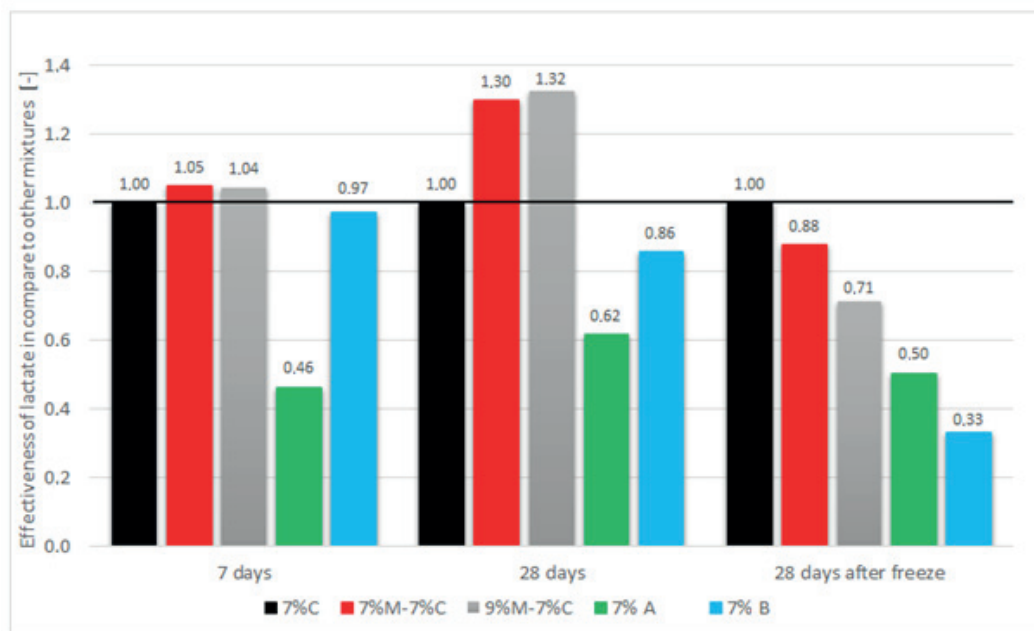
Tablica 4 / Table 4

WYNIKI OZNACZENIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE

RESULTS OF THE COMPRESSIVE STRENGTH DETERMINATION

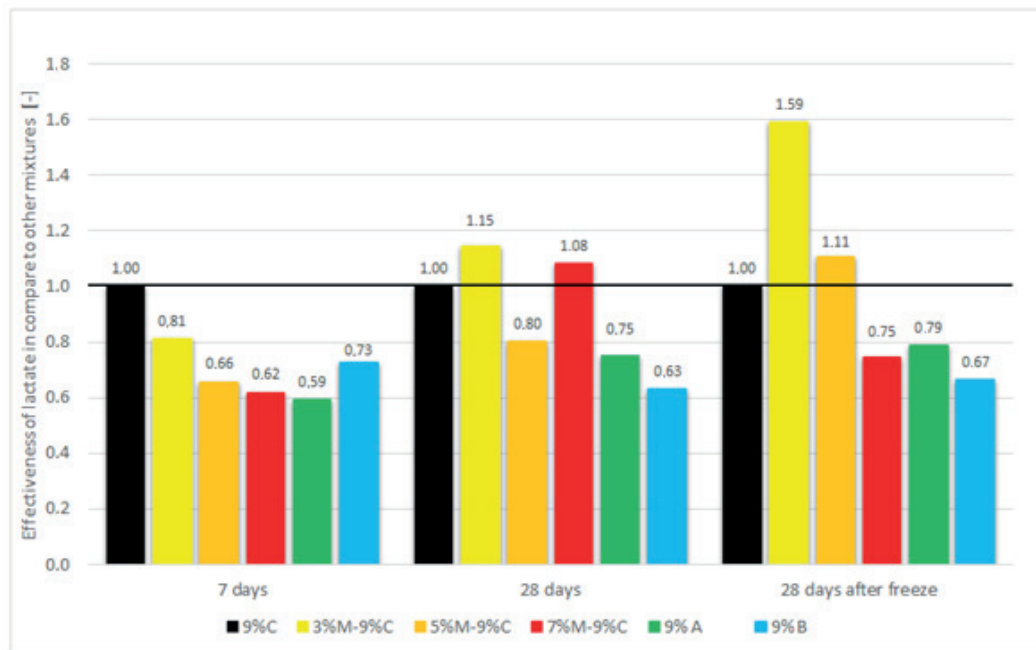
Rodzaj gruntu / Soil	Nazwa mieszanki Notation of mixture	Wartość wytrzymałości na ściskanie po / compressive strength after			Wskaźnik mrozoodporności Frost resistance index (11)
		7 dniach / 7 days	28 dniach / 28 days	Mrozeniu / Freezing	
		MPa	MPa	MPa	
Pg / siSa	7% C	2.14 ± 0,50	2.79 ± 0,48	1.45 ± 0,21	0.52
	7% M 7% C	2.24 ± 0,06	3.62 ± 0,16	1.27 ± 0,20	0.35
	9% M 7% C	2.23 ± 0,15	3.69 ± 0,54	1.03 ± 0,16	0.28
	7% A	0.99 ± 0,14	1.72 ± 0,25	0.73 ± 0,04	0.42
	7% B	2.09 ± 0,07	2.39 ± 0,35	0.48 ± 0,08	0.20
	9% C	3.15 ± 0,64	4.06 ± 0,19	2.21 ± 0,59	0.54
	3% M 9% C	2.56 ± 0,17	4.65 ± 0,67	3.52 ± 0,43	0.76
	5% M 9% C	2.07 ± 0,22	3.25 ± 0,05	2.45 ± 0,36	0.75
	7% M 9% C	1.95 ± 0,29	4.39 ± 0,62	1.65 ± 0,26	0.38
	9% A	1.87 ± 0,23	3.05 ± 0,21	1.74 ± 0,24	0.57
	9% B	2.29 ± 0,23	2.57 ± 0,44	1.47 ± 0,15	0.57
Gp / cISa	7% C	2.01 ± 0,04	2.37 ± 0,60	0.15 ± 0,06	0.06
	3% M 7% C	1.72 ± 0,37	2.95 ± 0,55	1.60 ± 0,22	0.54
	5% M 7% C	1.16 ± 0,05	1.94 ± 0,10	0.66 ± 0,04	0.34
	7% M 7% C	1.42 ± 0,28	2.75 ± 0,53	0.55 ± 0,16	0.20
	7% A	1.26 ± 0,25	1.51 ± 0,14	0.40 ± 0,03	0.27
	7% B	1.73 ± 0,09	1.39 ± 0,18	0.43 ± 0,02	0.31
	9 C	2.37 ± 0,06	4.59 ± 0,19	0.46 ± 0,05	0.10
	3% M 9% C	1.87 ± 0,26	3.15 ± 0,24	1.91 ± 0,23	0.61
	5% M 9% C	2.23 ± 0,21	3.15 ± 0,56	1.00 ± 0,19	0.32
	7% M 9% C	2.31 ± 0,17	3.62 ± 0,87	1.55 ± 0,18	0.43
	9% A	1.77 ± 0,17	2.55 ± 0,13	0.36 ± 0,10	0.14
	9% B	1.81 ± 0,34	2.24 ± 0,04	0.38 ± 0,15	0.16

C – CEM II B-S / Portland cement, M – mleczan diamidoaminy / diamidoamine lactate, A – spoiwo drogowe A / road binder A, B – spoiwo drogowe B / road binder B



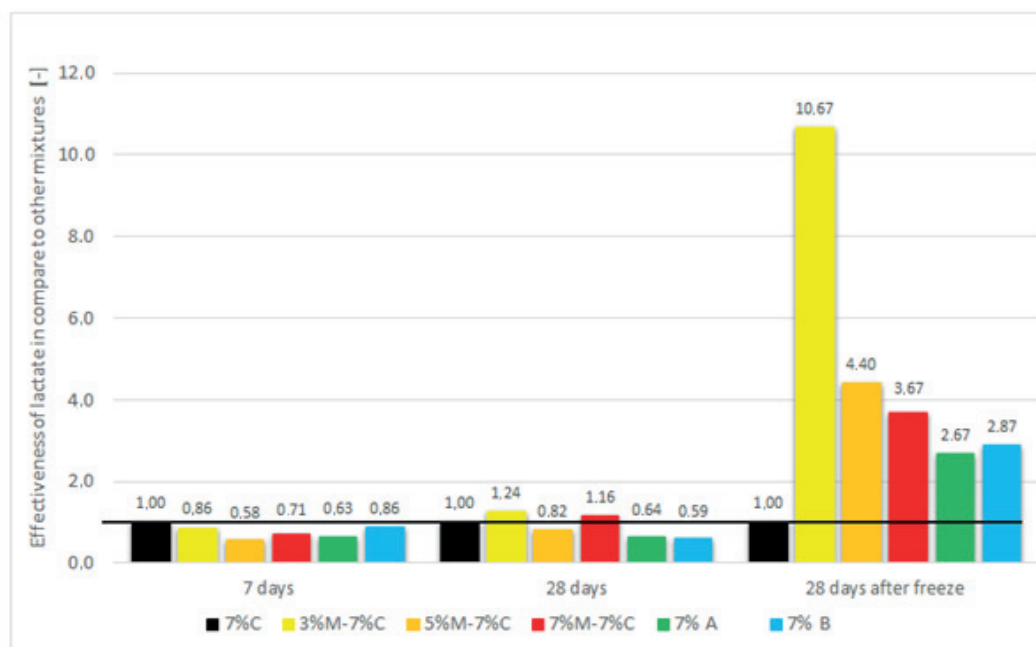
Rys. 5. Wskaźnik skuteczności spoiw dla mieszanek piasku gliniastego z 7% dodatkiem spoiwa

Fig. 5. Binder performance indicator for loamy sand mixtures with a 7% binder addition



Rys. 6. Wskaźnik skuteczności spoiw dla mieszanek piasku gliniastego z 9% dodatkiem spoiwa

Fig. 6. Binder performance indicator for loamy sand mixtures with a 9% binder addition



Rys. 7. Wskaźnik skuteczności spoiw dla mieszanek gliny piaszczystej z 7% dodatkiem spoiwa

Fig. 7. Binder performance indicator for sandy loam mixtures with a 7% binder addition

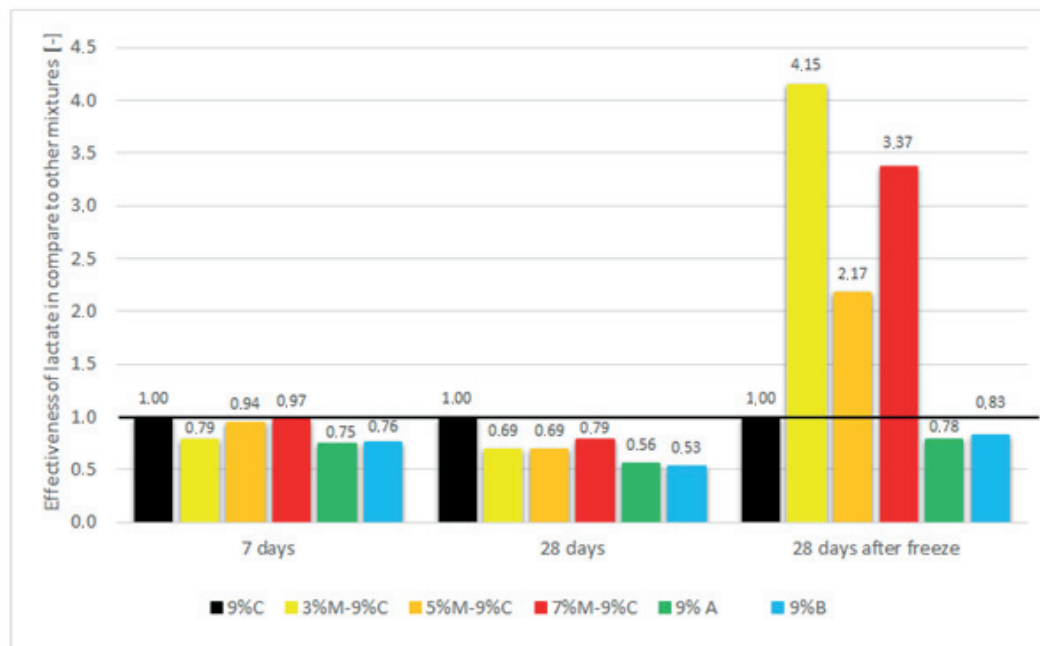
normą (11) wskaźnik mrozoodporności uzyskały wyłącznie dwie mieszanki: 3%M-9%C i 5%M-9%C.

W porównaniu do próbek wzorcowych, w których spoiwem był cement, najlepsze wskaźniki skuteczności poprawy wytrzymałości, w zależności od czasu twardnienia, stwierdzono dla mieszanek:

- po 28 dniach twardnienia – 9%M-7%C (o 32% więcej),
- dla próbek poddanych mrożeniu – 3%M-9%C (o 59% więcej).

road binders. However, the obtained frost resistance indexes do not meet the requirements of the standard (11).

The mixtures with the 9% binder addition, the cement-stabilised mixture had the highest strength after 7 days. In the case of samples tested after 28 days of hardening, the highest strength values were obtained by two mixtures – 3%M-9%C and 9%M-9%C. For the samples subjected to the frost resistance test, the mixture of 3%M-9%C showed the highest strength. Only two mixtures obtained the frost resistance index required by the standard (11):



Rys. 8. Wskaźnik skuteczności spoiw dla mieszanek gliny piaszczystej z 9% dodatkiem spoiwa

Fig. 8. Binder performance indicator for sandy loam mixtures with a 9% binder addition

Analizując uzyskane wyniki, w odniesieniu do wyników oznaczeń wytrzymałości na ściskanie badanych spoiw, mieszanki stabilizowane spoiwami drogowymi, uzyskały mniejsze wytrzymałości na ściskanie. Mniejsza w porównaniu do cementu wytrzymałość na ściskanie obu spoiw drogowych może wynikać z mniejszej klasy wytrzymałości spoiw oraz mniejszej ilości klinkieru portlandzkiego w składzie spoiwa.

3.3. Mieszanki z gliny piaszczystej

Spośród próbek z dodatkiem spoiw w ilości 7%, zbadanych po 7 dniach twardnienia, największą wytrzymałości na ściskanie uzyskano dla dodatku cementu. Po 28 dniach twardnienia, wyraźnie lepszą wytrzymałość na ściskanie uzyskano dla dwóch mieszanek stabilizowanych cementem z dodatkiem mleczanu diamidoaminy 3%M-7%C i 7%M-7%C. W przypadku próbek poddanych działaniu mrozu, największą wytrzymałość na ściskanie, nawet dziesięciokrotnie większą niż dla cementu, uzyskała mieszanka 3%M-7%C. Pomimo znacznej poprawy wytrzymałości na ściskanie, żadna z badanych mieszanek nie uzyskała wymaganych normą (2) wskaźników mrozoodporności.

W przypadku dodatku spoiwa w ilości 9%, największą wytrzymałość po 7 jak i po 28 dniach twardnienia uzyskały mieszanki stabilizowane cementem. W badaniach mrozoodporności, najlepsze właściwości miały dwie mieszanki: 3%M-9%C oraz 7%M-9%C. Żadne z zastosowanych spoiw i dodatków nie pozwoliło na osiągnięcie wymaganych normą (2) wskaźników mrozoodporności.

W odniesieniu do próbek wzorcowych, stabilizowanych cementem, największe wskaźniki skuteczności poprawy wytrzymałości na ściskanie, w zależności od czasu twardnienia, zanotowano dla mieszanek:

3%M-9%C and 5%M-9%C.

Compared to control group, where cement was the binder, the best performance indicators for strength improvement, depending on the hardening time, were observed for the mixtures:

- after 28 days of hardening – 9%M-7%C [32% more],
- for samples subjected to freezing – 3%M-9%C [59% more].

Analysing the results obtained, in relation to the results of the compressive strength determinations of the tested binders, the mixtures stabilised with road binders had the lower compressive strength. The lower compressive strength of both road binders in relation to cement may be due to the lower strength class of the binders and the lower content of Portland clinker in the binder composition.

3.3. Sandy loam mixtures

For the samples with the 7% binder addition, tested after 7 days of hardening, the highest compressive strength was obtained for the cement addition. After a period of 28 days of hardening, a significantly better compressive strength was obtained for the two mixtures stabilised with diamondamine lactate, i.e. 3%M-7%C and 7%M-7%C. In the case of frost-treated samples, the highest compressive strength, even ten times higher than that of cement, was obtained by the mixture of 3%M-7%C. In spite of significant improvement of compressive strength, none of the tested mixtures achieved the frost resistance indexes required by the standard (11).

In the case of the 9% binder addition, the highest strength after 7 as well as 28 days of hardening was achieved by the cement-stabilised mixtures. In frost resistance tests, the following two mixtures demonstrated the best parameters: 3%M-9%C and 7%M-9%C. None of the binders and additions used allowed to achieve the frost resistance indexes required by the standard (11).

- po 28 dniach twardnienia – mieszanka 3%M-7%C [o 24% więcej],
- dla próbek poddanych mrożeniu – mieszanka 3%M-7%C [ponad dziesięciokrotnie].

Zastosowanie mleczanu diamidoaminy w ilości od 3% do 7% nie zapewnia poprawy wytrzymałości wczesnej, po 7 dniach, próbek stabilizowanych cementem. W przypadku próbek badanych po 28 dniach twardnienia, wyłącznie dwie mieszanki z dodatkiem badanego środka hydrofobizującego [3%M-7%C i 7%M-7%C] osiągnęły wyższe wytrzymałości na ściskanie. Każda ilość dodatku mleczanu pozwoliła na poprawę wytrzymałości na ściskanie próbek badanych po 28 dniach twardnienia, w tym poddanych 14 cyklom mrożenia.

4. Wnioski

Dodatek mleczanu diamidoaminy w ilości 3% i 5% w odniesieniu do masy gruntu powoduje zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i zwiększenie mrozoodporności mieszanek z piasku gliniastego. W odniesieniu do mieszanek stabilizowanych samym cementem uzyskana wytrzymałość na ściskanie zwiększyła się ok. 3 do ośmiokrotnie w przypadku 7% ilości cementu oraz ok. 2 do 2,5 w przypadku 9% ilości cementu.

Mleczan diamidoaminy zastosowany jako dodatek do stabilizacji cementem gliny piaszczystej poprawia, co najmniej dwukrotnie, mrozoodporność w odniesieniu do mieszanek z samym cementem.

Wykonane badania gruntów spoistych – piasków gliniastych i glin piaszczystych stabilizowanych cementem, potwierdzają powszechne doświadczenie badaczy, zawarte w literaturze przedmiotu, iż nie jest możliwe uzyskanie oczekiwanego wskaźnika mrozoodporności – co najmniej 0,6 – dla stabilizacji gruntu wyłącznie cementem, w ilości do 9%.

W przypadku piasków gliniastych stabilizowanych 4 różnymi spoiwami: cementem, cementem z dodatkiem środka hydrofobizującego, spoiwem drogowym A, spoiwem drogowym B, spośród badanych mieszanek wyłącznie 2 spełniły jednocześnie wymagania mrozoodporności i wytrzymałości na ściskanie [stabilizowane cementem z dodatkiem mleczanu diamidoaminy], określone w normie (2). Żadna z mieszanek gliny piaszczystej stabilizowanej 4 badanymi spoiwami nie spełniła normowych wymagań mrozoodporności.

Stabilizacja gruntów mało spoistych i średnio spoistych spoiwami drogowymi daje mniejszą wytrzymałość na ściskanie niż dla tego samego dodatku cementu lub mieszanki cementu i mleczanu diamidoaminy.

Literatura / References

1. B. Grabowska-Olszewska, E. M. Sergeev, Gruntoznawstwo. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa, 1977.
2. PN-EN 13282-2:2015-06 Hydrauliczne spoiwa drogowe -- Część 2: Hydrauliczne spoiwa drogowe normalnie wiążące -- Skład, wymagania i kryteria zgodności

With regard to the control group stabilised with cement, the highest rates of compression strength improvement, depending on the hardening period, were recorded for the following mixtures:

- after 28 days of hardening – mixture 3%M-7%C [24% more],
- for samples subjected to freezing – mixture 3%M-7%C [more than ten times].

The use of diamidoamine lactate in the addition of 3% to 7% does not improve the early strength, after 7 days, of the samples stabilised with cement. In the case of the samples tested after 28 days of hardening, only two mixtures with the addition of the tested hydrophobising agent [3%M-7%C and 7%M-7%C] achieved higher compressive strength. Each addition of lactate allowed to improve the compressive strength of the samples tested after 28 days of hardening, including those subjected to 14 freezing cycles.

4. Conclusions

The addition of 3% and 5% of diamidoamine lactate in relation to the soil mass resulted in increased compressive strength and increased frost resistance of the loamy sand mixtures. With regard to the mixtures stabilised with cement alone, the compressive strength achieved increase of about 3 to 8 times for 7% of cement and about 2 to 2.5 times for 9% of cement.

Diamidoamine lactate used as an addition to stabilise sandy loam with cement improves, at least twice, the frost resistance in relation to the mixtures with cement only.

The research carried out on cohesive soils – loamy sand and sandy loam stabilised with cement confirm the common experience of the researchers, included in the literature, that it is not possible to obtain the expected frost resistance index – at least 0.6 – for soil stabilisation with cement only, in the cement up to 9%.

In the case of loamy sand stabilised with 4 different binders: cement, cement with hydrophobising agent, road binder A, road binder B, only 2 of the tested mixtures met simultaneously the requirements of frost resistance and compressive strength [stabilised by cement with diamidoamine lactate] specified in the standard (11). None of the sandy loam mixtures stabilised with the 4 binders tested met the standard frost resistance requirements.

The stabilisation of low and medium cohesive soils with road binders gives a lower compressive strength than for cement alone or the mixture of cement and diamondamine lactate.

3. M.O. Marasteanu, R.M. Hozalski, T.R. Clyne, R. Velasquez, Preliminary laboratory investigation of enzyme solutions as a soil stabilizer. Minnesota Department of Transportation, Minnesota, 2005.
4. C. Onyelowe-Ken, F.O. Okofofor, Geochemistry of soil stabilization. ARPN J. Earth Sci. **1**, 32-35 (2012).
5. A. Herzog, J. K. Mitchell, Reactions accompanying stabilization of clay with cement. Highway Res. Rec. **36**, 146-171 (1963).
6. M. Babiak, J. Kosno, S. Węgliński, A. Jaskiewicz, Studies on effect of the amidoamines-based hydrophobizing agent on freeze resistance and durability of cohesive soils. Przemysł Chemiczny **95**, 2376-2379 (2016).
7. PN-B-04481:1988 Grunty budowlane -- Badania próbek gruntu
8. PN-EN ISO 14688-2:2006 Badania geotechniczne -- Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów -- Część 2: Zasady klasyfikowania
9. PN-EN 196-1:2016 Metody badania cementu -- Część 1: Oznaczenie wytrzymałości
10. PN-EN 196-3:2016-12 Metody badania cementu -- Część 3: Oznaczenie czasów wiązania i stałości objętości
11. T. Błaszczyński, M. Babiak, J. Kosno, S. Węgliński, Freeze-thaw Resistance and Increased Strength of Cohesive Soils Modified with a Cationic Surfactant. Proc. Eng. **172**, 111-118 (2017).