



MARCIN DREGER¹⁾
 MIECZYŚLAW PRZYGODA²⁾
 CEZARY KRASZEWSKI³⁾
 MICHAŁ MITRUT⁴⁾
 LESZEK RAFALSKI⁵⁾
 MARIUSZ WOJDAL⁶⁾

BENTONITE-LOESS SLURRY FOR CONSTRUCTION OF DIAPHRAGM WALLS AND BORED PILES

ZAWIESINA BENTONITOWO-LESSOWA DO WYKONYWANIA ŚCIAN SZCZELINOWYCH I PALI WIERCONYCH

STRESZCZENIE. Zawiesiny bentonitowe wykorzystuje się do wykonywania wykopów wąsko przestrzennych w technologii ścian szczelinowych, a także w technologii pali wierconych. Jeśli bentonit charakteryzuje się dużą granicą płynności, nie jest możliwe wytworzenie zawiesiny o wystarczająco dużej gęstości i małej lepkości. Celem badań było sprawdzenie przydatności lessu do modyfikowania właściwości zawiesin bentonitowych. Wykonano badania kompozycji bentonitowo-lessowych i zawiesin aktywowanych węglanem sodu. Stwierdzono, że dodatek lessu powoduje zmniejszenie granicy płynności kompozycji bentonitowo-lessowej. Badania zawiesin zawierających kompozycje bentonitowo-lessowe pozwoliły na określenie optymalnej zawartości węglanu sodu oraz niezbędnej ilości bentonitu i lessu w zawieszynie zapewniającej wymaganą gęstość. Następnie zbadano zależności pomiędzy zawartością lessu a lepkością umowną i odstojem zawiesin, co pozwoliło na określenie dodatku lessu, przy którym zawiesiny o wymaganej gęstości spełniają kryteria lepkości i odstoju. Stwierdzono, że dodatek lessu umożliwia uzyskiwanie zawiesin bentonitowo-lessowych o odpowiednich właściwościach. Na podstawie przedstawionych wyników badań uzyskano patent i uruchomiono produkcję kompozycji bentonitowo-lessowej do zawiesin przydatnych w technologii ścian szczelinowych.

SŁOWA KLUCZOWE: bentonit, granica płynności, less, pal wiercony, ściana szczelinowa, zawiesina bentonitowo-lessowa, zawiesina tiksotropowa.

ABSTRACT. Bentonite fluids are used in narrow excavations in technologies of slurry walls and bored piles. If bentonite is characterised by high liquid limit, production of support fluid with sufficiently high density and accompanying low viscosity is impossible. The aim of the presented research was to verify the usefulness of loess for modification of bentonite slurries. Various bentonite-loess mixtures and suspensions activated with sodium carbonate were tested. It was noted that an addition of loess results in a decrease in liquid limit of the bentonite-loess mixture. Testing of suspensions produced from different bentonite-loess mixtures enabled determination of the optimum sodium carbonate content as well as the minimum bentonite-loess mixture content in the suspension ensuring the required density. The influence of loess content on viscosity and water bleed was then investigated, which enabled determination of loess content range at which suspensions with the required density fulfil also the requirements regarding viscosity and bleed. It was ascertained that an addition of loess enables production of bentonite-loess slurries with adequate properties. Based on the presented results, a patent was obtained and production of bentonite-loess mixture for use in technology of slurry walls was initiated.

KEYWORDS: bentonite, liquid limit, loess, bored pile, diaphragm wall, bentonite-loess slurry, thixotropic fluid.

DOI: 10.7409/rabdim.020.006

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mdreger@ibdim.edu.pl

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mprzygoda@ibdim.edu.pl

³⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; ckraszewski@ibdim.edu.pl

⁴⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mmitrut@ibdim.edu.pl

⁵⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; lrafalski@ibdim.edu.pl

⁶⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mwojdał@ibdim.edu.pl (✉)

1. WSTĘP

Zawiesiny tiksotropowe wykorzystuje się do wykonywania wykopów wąsko przestrzennych, zwłaszcza głębinowych w technologii ścian szczelinowych, a także w technologii pali. Zadaniem zawiesiny tiksotropowej jest zapewnienie stateczności ścian wykopów lub otworów podczas ich głębinowania w gruncie. Zawiesina tiksotropowa powinna stabilnie rozpieierać ścianki wykopu lub otworu i nie wnikać głęboko w grunt. Zawiesina powinna także łatwo spływać z chwytaka głębiarki, a w czasie betonowania wykopu lub otworu mieć taką gęstość i lepkość, aby była łatwo wypierana przez mieszankę betonową. Ponadto zawiesina odzyskana z wykopu lub otworu powinna być łatwo pompowalna, umożliwiając jej oczyszczenie i ponowne użycie.

Ze względu na stateczność ścian lub pali głębinowych w gruncie korzystne jest stosowanie zawiesiny o odpowiednio dużej gęstości. Ograniczenie gęstości jest powiązane z koniecznością zapewnienia wypierania zawiesiny przez mieszankę betonową. Ponadto lepkość zawiesiny powinna być jak najmniejsza, aby zapewnić jej pompowalność. Po wykonaniu wykopu szczelinowego lub otworu zawiesina pozostaje w nim przez pewien czas. Cechy, które w tym czasie powinna wykazywać zawiesina, to: ograniczony odstęp wody, stabilność czyli jednorodność gęstości na całej głębokości oraz tiksotropia mierzona wytrzymałością żelu. Przykładowe wymagania odnośnie właściwości świeżej zawiesiny bentonitowej stosowanej w technologii monolitycznych ścian szczelinowych są najczęściej następujące:

- gęstość $\rho = 1,04 \div 1,10 \text{ g/cm}^3$,
- lepkość umowna w lejku Marsha (przy przepływie 1 dm^3) $\eta_e \leq 45 \text{ s}$,
- odstęp wody $O \leq 2\%$,
- stabilność - różnica gęstości słupa zawiesiny $\Delta\rho \leq 0,02 \text{ g/cm}^3$,
- wytrzymałość żelu $\tau_F = 1,4 \div 10,0 \text{ Pa}$.

W [1] zamieszczono informacje o zawiesinach tiksotropowych, niewiązujących, stosowanych zwłaszcza do wypełniania głębinowych wykopów szczelinowych do posadowienia fundamentów, np. baret lub ścian szczelinowych. Zawiesiny te najczęściej wykonuje się z aktywnych bentonitów lub z ilów podatnych na aktywację i ewentualnie domieszek chemicznych, które działają dyspergująco, co poprawia stabilność zawiesiny. Stosowanie związków polimerowych jest ograniczone, gdyż mimo zalet technologicznych użycie ich stwarza trudne wymagania [2, 3], a doświadczenia krajowe są nieliczne i niejednoznaczne.

1. INTRODUCTION

Thixotropic support fluids are used in construction of narrow excavations, especially in technologies of slurry walls and piles. The purpose of the fluid is to ensure stability of trenches or holes during the process of their excavation. This thixotropic slurry should exert stable outward pressure against the sides of the excavation without penetrating too deep into the surrounding soil. The fluid should also easily come off the excavator grab and retain adequate density and viscosity during the inflow of concrete to enable replacement of fluid by concrete. Additionally, the support fluid recovered from the pit should be easily pumped, enabling its cleaning and recycling.

High density of the slurry used is advisable from the perspective of stability of walls and bored piles. Limiting of density is however required due to the fact that the fluid should be easily displaced by the concrete. Moreover, viscosity of slurry should be as low as possible to ensure its pumpability. After the trench or hole is excavated, the slurry remains there for a certain amount of time. During this period it should exhibit the following properties: limited water bleed, stability (uniform density along the entire depth) as well as thixotropy measured in gel strength. An example of typical requirements for fresh bentonite support fluid used in technology of monolithic diaphragm walls is given below:

- density $\rho = 1.04 \div 1.10 \text{ g/cm}^3$,
- Marsh funnel viscosity (flow time of 1 dm^3) $\eta_e \leq 45 \text{ s}$,
- water bleed $O \leq 2\%$,
- stability - difference in density within the liquid column $\Delta\rho \leq 0.02 \text{ g/cm}^3$,
- gel strength $\tau_F = 1.4 \div 10.0 \text{ Pa}$.

Information about non-setting thixotropic fluids used especially for filling of deep foundation trenches such as barrettes or diaphragm walls was presented in [1]. Such slurries are typically produced from active bentonites or clays prone to activation with addition of chemical dispersing agents, which improve stability of the suspension. Despite their technological advantages, the use of polymers is limited, since their application engenders the need to fulfil higher requirements [2, 3] and national experience is still sparse and ambiguous.

Bentonite is the component responsible for the characteristic rheological properties (including thixotropy) of the support fluids. It contains a significant fraction of clay ($< 0.002 \text{ mm}$). In terms of petrographic composition, it frequently includes large quantities of montmorillonite – a mineral belonging to the group of smectites – as well as

Bentonit jest składnikiem, który nadaje zawiesinom charakterystyczne właściwości reologiczne (m.in. tiksotropowe) i zawiera dużą ilość frakcji ilowej ($< 0,002$ mm). Pod względem petrograficznym zawiera on najczęściej dużą ilość montmorillonitu, minerału z grupy smektytów oraz inne minerały tej grupy, np. kaolinit lub illit. O aktywności fizykochemicznej bentonitu decyduje zawartość w nim montmorillonitu. Minerale ten jest krzemianem o budowie trójwarstwowej o sumarycznym wzorze chemicznym $Al_2(OH)_2[Si_2O_5]_2 \cdot 4H_2O$, tlenkowym $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 5H_2O$, skróconym AS_4H_5 [4]. Zawiesiny bentonitowe stosowane w technologii ścian szczelinowych lub pali wierconych w gruncie często wymagają aktywowania, polegającego na dodaniu substancji zawierających jony sodowe, które sorbuje na powierzchni cząstek bentonitu działając dyspergująco, co poprawia stabilność zawiesiny i ułatwia tworzenie struktury tiksotropowej. Powszechnie stosowaną domieszką do zawiesin bentonitowych jest węglan sodu Na_2CO_3 . Obecnie bentonity przeznaczone do zawiesin tiksotropowych zawierają odpowiednie środki aktywujące.

W praktyce inżynierskiej okazało się, że nie każdy bentonit może być wykorzystany do sporządzenia zawiesiny tiksotropowej, przydatnej do wypełniania szczelin lub otworów przy formowaniu ścian szczelinowych i pali wierconych. W przypadku, gdy bentonit zawiera bardzo dużo montmorillonitu i charakteryzuje się dużą granicą płynności, nie jest możliwe wytworzenie zawiesiny o odpowiednich właściwościach, a zwłaszcza wystarczająco dużej gęstości i jednocześnie małej lepkości. Już niewielka zawartość bentonitu w zawieszynie powoduje jej zbyt dużą lepkość ale nie zapewnia wystarczająco dużej gęstości. Zbyt mała gęstość zawiesiny stwarza ryzyko obwałów ścian wykopu podczas głębenia. Natomiast duża lepkość zawiesiny utrudnia jej pompowanie i wypieranie przez mieszanke betonową podczas betonowania. Takie właściwości zawiesiny mogą doprowadzić do wymieszania zawiesiny bentonitowej z mieszanke betonową i powstania wad konstrukcji betonowych wykonywanych w gruncie technologią ścian szczelinowych [5].

Less jest gruntem pochodzenia eolicznego, w którym dominuje frakcja pyłowa ($0,002 \div 0,05$ mm) złożona przede wszystkim z kwarcu z domieszką skaleni, węglanów, rzadziej innych minerałów. Zróżnicowanie wielkości ziaren w lessach jest bardzo małe. Gdy frakcja $0,05 \div 0,002$ mm stanowi powyżej 50% analizowanej próby mamy wówczas do czynienia z lessami właściwymi. Dotychczas nie prowadzono badań mających na celu zastosowanie lessu do modyfikowania właściwości zawiesin bentonitowych przeznaczonych do wykonywania ścian szczelinowych lub pali wierconych w gruncie. Badano natomiast inne kompozycje bentonitu i lessu lub

other minerals from the same group, e.g. kaolinite and illite. The physicochemical activity of bentonite is dependent on its montmorillonite content. This mineral is a three-sheet structure silicate, described by the overall formula $Al_2(OH)_2[Si_2O_5]_2 \cdot 4H_2O$ and the oxide formula $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 5H_2O$ simplified as AS_4H_5 [4]. The bentonite slurries used in technologies of diaphragm walls and bored piles often require activation through addition of substances including sodium ions which adsorb to bentonite particles and act as dispersants, improving the suspension stability and facilitating the formation of thixotropic structure. Sodium carbonate (Na_2CO_3) is widely added to bentonite support fluids. Currently bentonites dedicated for thixotropic suspensions include the necessary activating agents.

Engineering practice has shown that not every bentonite is suitable for preparation of a thixotropic fluid for filling of trenches and holes during formation of diaphragm walls and bored piles. If bentonite is characterised by a very high montmorillonite content and high liquid limit, it is impossible to prepare a slurry with adequate properties, especially with sufficiently high density and accompanying low viscosity. In such cases even a small quantity of bentonite in the fluid results in its excessive viscosity before the required density is reached. Insufficient slurry density leads to risk of excavation cave-ins. High fluid viscosity hinders its pumping as well as its replacement by concrete. Such properties of the slurry may lead to its mixing with concrete and to resultant structural flaws in the constructed wall [5].

Loess is an aeolian sediment with a dominant silt fraction ($0.002 \div 0.05$ mm) composed mainly of quartz with additions of feldspars, carbonates and, less frequently, other minerals. Particle size variation in loesses is very limited. When the $0.002 \div 0.05$ mm fraction constitutes over 50% of the analysed sample, one may speak of loess proper. Until now no research has been performed regarding the use of loess to modify properties of bentonite fluids for construction of diaphragm walls or bored piles. Mixtures for different applications, incorporating bentonite and loess or bentonite and other silty soils, have been however tested. The results of such research are presented below.

Mixtures of bentonite with two types of loess were tested in [6] in order to limit the cost of bentonite landfill liners. Upon adding various quantities of bentonite to loess, specimens were compacted and subjected to permeability tests. The minimum bentonite content resulting in the required coefficient of permeability was determined. In [7] the use of silty (saprolitic) soils for landfill bottom liners

bentonitu i innych gruntów pylastych. Poniżej opisano wyniki tych badań.

W celu zmniejszenia kosztu wykonywania uszczelnienia podłoża bentonitem wykonano badania kompozycji bentonitu z dwoma lessami przedstawione w [6]. Do lessów dodawano różne ilości bentonitu, próbki zagęszczano i badano ich wodoprzepuszczalność. W wyniku tych badań określono niezbędną zawartość bentonitu zapewniającą wymagany współczynnik filtracji. W [7] opisano zastosowanie gruntów pylastych (saprolicyicznych) do wykonywania dolnych i górnych warstw składowisk odpadów. Stwierdzono, że w celu zmniejszenia ich przepuszczalności może być dodawany bentonit i przeprowadzono badania ścisłości, wytrzymałości na ścinanie i przepuszczalności takich kompozycji. Podobne badania wytrzymałości kompozycji pyłowo-bentonitowych opisano w [8].

Badania kompozycji piasku, lessu i bentonitu przeznaczonych do barier przeciwfiltracyjnych omówiono w [9]. W wyniku tych badań ustalono składy mieszanek o optymalnych proporcjach składników (piasek i less 8:2 oraz 2% bentonitu), które zapewniały odpowiednio mały współczynnik filtracji, tj. $10^{-3} \div 10^{-4}$ cm/s. W [10] zwrócono uwagę, że less ma duże zdolności adsorpcyjne względem metali ciężkich. W celu zbadania tego zjawiska wykonano kolumny z różnych kompozycji gruntu, bentonitu i lessu. Stwierdzono, że kompozycja zawierająca 20% lessu miała dwa razy większe zdolności adsorpcji Pb w porównaniu do zwykłej mieszanki gruntu i bentonitu. W [11] zbadano wpływ cyklicznego suszenia i nawilżania mieszanek bentonitu i pyłu pod obciążeniem 0, 2, 3 i 8 MPa. Z badań tych wynikało, że cykle suszenia i nawilżania wpływały istotnie na właściwości konsolidacyjne tych kompozycji. Natomiast przedmiotem badań opisanych w [12] było ustalenie wpływu dodatku bentonitu na właściwości pyłu o wskaźniku plastyczności $I_p = 5,8\%$. W wyniku dodatku bentonitu wskaźnik plastyczności zwiększył się, co spowodowało zmiany wytrzymałości na ścinanie badanych kompozycji.

W [13] zbadano wpływ proporcji frakcji pyłowej i ilowej 6 glin z dodatkami pyłu pod kątem przydatności do stabilizacji cementem. Wykonano mieszanki o następujących proporcjach pyłu do gliny: 0:100, 15:85, 30:70 i 45:55, które stabilizowano cementem w ilości 7,5%, 15% i 20%. Wyniki tych badań pokazały, że wytrzymałość stabilizowanych kompozycji zwiększa się ze wzrostem zawartości pyłu.

Z przytoczonego przeglądu literatury wynika, że kompozycje bentonitowo-lessowe badano i wykorzystywano głównie do wykonywania poziomych lub pionowych barier przeciwfiltracyjnych. Nie zastosowano dotychczas takich kompozycji do wykonywania zawieszin tiksotropowych przeznaczonych

and covers was described. It was noted that bentonite may be added to such layers in order to limit their permeability. Compressibility, shearing strength and permeability of such mixtures was tested. Similar strength tests of silt-bentonite mixtures were presented in [8].

Tests of barrier mixtures consisting of sand, loess and bentonite were described in [9]. As a result of the research, optimum mixture compositions were determined (sand and loess in proportion of 8:2 plus 2% of bentonite), providing adequately low coefficient of permeability ($10^{-3} \div 10^{-4}$ cm/s). In [10] it was noted that loess exhibits high capacity for adsorption of heavy metals. In order to investigate this phenomenon, columns of different soil-bentonite-loess mixtures were prepared. It was observed that the mixture with 20% loess content exhibited Pb adsorption capacity two times greater than a typical mixture of soil and bentonite. In [11] the effect of cyclic drying and wetting of bentonite-silt mixtures was investigated under loading of 0, 2, 3 and 8 MPa. The results implied that cycles of drying and wetting had a significant impact on consolidation properties of such mixtures. The research described in [12] was devoted to the effect of bentonite addition on the properties of silt with plasticity index $I_p = 5.8\%$. The index increased due to addition of bentonite, which resulted in changes in shearing strength of the tested mixtures.

In [13] the influence of silt and clay fraction proportions was investigated for 6 clays with addition of silt in terms of their usability for cement stabilisation. Mixtures with the following silt/clay proportions were prepared: 0:100, 15:85, 30:70 and 45:55. They were then stabilised with cement quantities of: 7.5%, 15% and 20%. The results implied that strength of the stabilised mixtures increases with silt content.

The presented literature review showed that bentonite-loess mixtures had been tested and used primarily as horizontal or vertical barriers. Such mixtures had not been used in preparation of thixotropic fluids ensuring stability of trenches and holes. Therefore, research devoted to such applications was performed at the Road and Bridge Research Institute in Warsaw. This article presents the results of tests focused on the use of loess to modify the properties of bentonite support fluids used in the technologies of slurry walls or bored piles. The aim of the research was to identify bentonite-loess mixture composition suitable for production of thixotropic fluids with adequate properties for application in excavations for diaphragm walls and piles. Such a technological solution may also have economic importance due to high cost of bentonite in comparison to loess.

do zapewnienia stateczności ścian szczelinowych lub otworów wierconych w gruncie. W związku z tym w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów przeprowadzono badania kompozycji bentonitowo-lessowych pod tym kątem. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań mających na celu przeanalizowanie zastosowania lessu do modyfikowania właściwości zawieszin bentonitowych przydatnych w technologii wykonywania ścian szczelinowych lub pali wierconych w gruncie. Celem tych badań było poszukiwanie kompozycji bentonitowo-lessowej, z której mogą być wytwarzane zawiesziny tiksotropowe o właściwościach odpowiednich do głębin ścian szczelinowych i pali. Rozwiązanie takie może mieć także znaczenie ekonomiczne z uwagi na duży koszt bentonitu w porównaniu do lessu.

2. MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Do badań wytypowano następujące materiały:

- bentonit M produkowany przez Zakłady Górniczo - Metalowe „ZĘBIEC” S.A. w Zębciu,
- less pobrany z ukopu w woj. lubelskim.

Oba składniki wysuszono, a less dodatkowo rozdrobniono jako składnik przyszłych kompozycji bentonitowo-lessowych. Oznaczono granice płynności bentonitu i lessu metodą Casagrande'a.

Zawiesziny wytwarzano stosując wodę destylowaną, a do ich aktywowania użyto węgla sodu Na_2CO_3 . Wstępnie wykonano kompozycje bentonitu i lessu o następujących proporcjach wagowych: 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25, 70:30, 65:35, 60:40, 55:45 i 50:50. Zbadano granice płynności tych kompozycji i uzyskano zależność określającą wpływ dodatku lessu na granicę płynności bentonitu.

W celu ustalenia optymalnej ilości stabilizatora, węgla sodu Na_2CO_3 , wykonano 5 serii zawieszin o proporcjach bentonitu i lessu wagowo 90:10, 80:20, 70:30 60:40 i 50:50, zawierających 5% tych kompozycji w stosunku do wody i zmienną zawartość węgla sodowego w ilości 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5% i 6% wagowo. Zbadano odstój wody zawieszin wykonanych z tych kompozycji w cylindrze o objętości 1 litra po 24 godzinach od wytworzenia zawieszin. Z badań tych wynikało, że zwiększenie zawartości lessu ponad 20% w kompozycji bentonitowo-lessowej powoduje zwiększenie odstaju zawiesziny. W związku z tym, w celu określenia wpływu zawartości suchej kompozycji na gęstości uzyskiwanych zawieszin wykonano kompozycje o proporcjach bentonitu do lessu wagowo 80:20, następnie zawiesziny o zawartości tej kompozycji 4%, 5%, 6%, 7% i 8% w stosunku do wody oraz dodatku węgla sodu 2% wagowo. Gęstość zawiesziny określano w wyskalowanym naczyniu o objętości 250 cm^3 , a lepkość – w viskozymetrze Marsha mierząc czas przepływu 1 dm^3 zawiesziny.

2. MATERIALS AND TEST METHODS

The following materials were selected for the tests:

- bentonite M produced by Zakłady Górniczo-Metalowe “ZĘBIEC” S.A. in Zębiec
- loess extracted from an excavation in the Lublin Province.

Both ingredients were dried and loess was additionally pulverised for the planned use in bentonite-loess mixtures. Liquid limits of bentonite and loess were determined using the Casagrande method.

Suspensions were produced using distilled water and their activation was achieved by addition of sodium carbonate Na_2CO_3 . Preliminary bentonite-loess mixtures were prepared, using the following compositions by weight: 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25, 70:30, 65:35, 60:40, 55:45 and 50:50. Liquid limits of those mixtures were determined and the relationship between loess content and liquid limit was obtained.

In order to determine the optimum quantity of the stabilising agent (sodium carbonate Na_2CO_3), five series of suspensions were prepared based on the five dry bentonite-loess mixtures 90:10, 80:20, 70:30 60:40 and 50:50. Suspensions consisted of 5% of the given dry mixture in proportion to water and various sodium carbonate content: 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5% and 6% by weight. Water bleed in a 1 litre cylinder was measured 24 hours after mixing of the suspensions. The results implied that loess content of over 20% of the bentonite-loess dry mixture results in an increase in water bleed of the produced suspension. Due to this observation, in order to investigate the impact of dry mixture content on the density of the obtained suspensions, a bentonite-loess 80:20 composition (by weight) was mixed and used for preparation of suspensions with the following content of the dry mineral mixture in proportion to water: 4%, 5%, 6%, 7% and 8%, all with a 2% addition of sodium carbonate by weight. Density of each suspension was then determined in a calibrated 250 cm^3 container. Viscosity was determined in a Marsh funnel by measuring the flow time of 1 dm^3 of suspension.

Bentonite-loess mixtures were then prepared with the following compositions by weight: 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25, 70:30, 65:35, 60:40, 55:45 and 50:50. These mixtures were used to prepare suspensions with 6% content (by weight) of the dry mineral mixtures, activated by a 2% addition of sodium carbonate by weight. Their viscosity and water bleed were determined.

Następnie wykonano kompozycje bentonitu i lessu o następujących proporcjach wagowych: 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25, 70:30, 65:35, 60:40, 55:45 i 50:50. Z tych kompozycji wykonano zawiesiny wodne o zawartości 6% suchej substancji wagowo, aktywowane dodatkiem węglanu sodu w ilości 2% wagowo. Zbadano ich lepkość umowną i odstój wody.

W końcowej części badań zbadano stabilność i wytrzymałość na ścinanie żelu wybranej zawiesiny spełniającej wymaganą gęstość, lepkość i odstój wody. Stabilność mierzono po 24 godzinach od wytworzenia zawiesiny pozostawionej w cylindrze o objętości 1 dm³ pobierając próbki zawiesiny z górnej i dolnej części cylindra i mierząc ich gęstości. Stabilność była obliczana jako różnica tych gęstości. Wytrzymałość żelu mierzono w wiskozymetrze Fann oznaczając wytrzymałość na ścinanie zawiesiny po 10 min pozostawiania jej w spokoju.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Granica płynności bentonitu wynosiła 493%, a lessu 21%. Wyniki badań granicy płynności kompozycji bentonitowo-lessowych o wagowych proporcjach 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25, 70:30, 65:35, 60:40, 55:45 i 50:50 przedstawiono w Tabl. 1. Na Rys. 1. pokazano zależność określającą wpływ dodatku lessu w zakresie od 0% do 50% wagowo na zmianę granicy płynności kompozycji bentonitowo-lessowej.



Fig. 1. Influence of loess content on the liquid limit of the bentonite-loess mixtures

Rys. 1. Wpływ zawartości lessu na granicę płynności kompozycji bentonitowo-lessowej

Zgodnie z oczekiwaniami dodatek lessu spowodował zmniejszenie granicy płynności kompozycji bentonitowo-lessowej w badanym zakresie dodatku lessu, tj. od 0% do 50%. W rezultacie uzyskano liniową zależność pomiędzy dodatkiem lessu a granicą płynności kompozycji bentonitowo-lessowej.

Badania zawiesin o zmiennej zawartości węglanu sodu miały na celu ustalenie optymalnej ilości węglanu do aktywowania zawiesin. Wyniki badań 5 serii zawiesin o wagowych proporcjach bentonitu i lessu 90:10, 80:20, 70:30 60:40 i 50:50,

In the final part of the research, stability and gel shearing strength were determined for the selected suspension which fulfilled the requirements regarding density, viscosity and water bleed. Stability was determined by measuring density of samples taken from the top and bottom of a 1 dm³ cylinder in which the suspension was left standing for 24 hours after mixing. Stability was defined as the difference between the two measured density values. Gel strength was measured in a Fann viscometer by determining the shearing strength of the suspension after letting it stand quiescent for 10 minutes.

3. TEST RESULTS AND THEIR ANALYSIS

Liquid limit of the bentonite equalled 493% and of the loess: 21%. Results of liquid limit tests of bentonite-loess mixtures with compositions of 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25, 70:30, 65:35, 60:40, 55:45 and 50:50 by weight are shown in Table 1. Fig. 1 presents the relationship between loess addition in the range of 0% to 50% by weight and the liquid limit of the bentonite-loess mixture.

Table 1. Results of liquid limit tests of bentonite-loess mixtures

Tablica 1. Wyniki badań granicy płynności kompozycji bentonitowo-lessowych

Bentonite content Zawartość bentonitu [%]/	Loess content Zawartość lessu [%]	Liquid limit Granica płynności w_l [%]
100	0	493
95	5	469
90	10	430
85	15	412
80	20	367
75	25	338
70	30	326
65	35	295
60	40	280
55	45	264
50	50	239

As expected, addition of loess caused a decrease in liquid limit across the investigated range of 0% to 50%. As a result, a linear relationship between loess content and liquid limit of the bentonite-loess mixture was obtained.

Tests of suspensions with various sodium carbonate content were designed to determine the optimum sodium carbonate quantity to activate suspensions. Table 2 presents the results obtained for the 5 series of suspensions based on bentonite-loess mixtures with compositions of 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 and 50:50 by weight, consisting of 5%

zawierających 5% tych kompozycji w stosunku do wody i zmienną zawartość węgla sodowego w ilości 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5% i 6% wagowo podano w Tabl. 2.

Table 2. Water bleed results in % of the suspension tested at varying Na_2CO_3 content

Tablica 2. Wyniki badań odstoju wody w % zawiesin o zmiennej zawartości Na_2CO_3

Bentonite content Zawartość bentonitu [%]	Loess content Zawartość lessu [%]	Na_2CO_3 content / Zawartość Na_2CO_3 [%]						
		0	1	2	3	4	5	6
		Water bleed / Odstój wody O [%]						
90	10	7	3	0	0	2	2	5
80	20	27	4	0	0	5	10	14
70	30	30	12	3	5	6	8	12
60	40	31	12	8	9	16	20	26
50	50	36	14	11	14	22	23	28

W przypadku kompozycji 90:10 i 80:20 minimalny odstój wody wystąpił przy zawartości 2% i 3% węgla sodowego. Natomiast w przypadku kompozycji 70:30, 60:40 i 50:50 – przy zawartości 2% węgla. Oznaczało to, że do aktywowania zawiesin można przyjąć optymalną ilość węgla sodu wynoszącą 2%. W Tabl. 3 przedstawiono wyniki badań gęstości zawiesin wytworzonych z wybranej kompozycji bentonitu i lessu 80:20. Z badań tych wynikało, że wymaganą gęstość $\rho \geq 1,04 \text{ g/cm}^3$ spełniła zawiesina o zawartości 6% tej kompozycji. W związku z tym dalsze badania wykonano przyjmując ten procent zawartości badanych kompozycji.

W Tabl. 4 zestawiono wyniki badań lepkości umownej i odstoju zawiesin wykonanych z różnych kompozycji bentonitu i lessu w zakresie od 100:0 do 50:50 przy 6% zawartości suchej substancji w zawiesinach oraz 2% dodatku węgla sodu.

Table 4. Viscosity and water bleed results for suspensions produced from different bentonite-loess mixtures within the range from 100:0 to 50:50

Tablica 4. Wyniki badań lepkości umownej i odstoju zawiesin wykonanych z różnych kompozycji bentonitu i lessu w zakresie od 100:0 do 50:50

Mixture composition / Skład kompozycji [%]		Marsh funnel viscosity Lepkość umowna w lejku Marsha η_e [s]	Water bleed Odstój wody O [%]
Bentonite / Beton	Loess / Less		
100	0	n.o. ^{*)}	0
95	5	54	0
90	10	38	0
85	15	32	0
80	20	32	1
75	25	31	3
70	30	31	6
60	40	31	15
50	50	31	18

n.o.^{*)} – not obtained due to lack of flow through the funnel / nie oznaczono z uwagi na brak przepływu przez wiskozymetr

of the given dry mineral mixture relative to water and with varying sodium carbonate content (0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5% and 6% by weight).

In the case of 90:10 and 80:20 mineral mixtures the minimum values of bleed were noted at sodium carbonate contents of 2% and 3%. In the case of 70:30, 60:40 and 50:50 mixture compositions – at 2% sodium carbonate content. Such results imply that the optimum sodium carbonate content that may be assumed for adequate suspension activation equals 2%. Table 3 shows a comparison of densities measured for suspensions produced from the chosen 80:20 bentonite-loess mixture. According to the test results, the required density $\rho \geq 1.04 \text{ g/cm}^3$ was reached by the suspension containing 6% of the chosen mineral mixture. Therefore, the 6% dry mixture content was assumed in further research.

Table 3. Density test results for suspensions produced from the 80:20 bentonite-loess mixture with a 2% addition of sodium carbonate

Tablica 3. Wyniki badań gęstości zawiesin wytworzonych z kompozycji bentonitu i lessu 80:20 i 2% dodatku węgla sodu

	Dry mixture content relative to water Zawartość kompozycji w stosunku do wody [%]					
	0	4	5	6	7	8
Density / Gęstość ρ [g/cm^3]	1.000	1.027	1.036	1.044	1.058	1.074

Table 4 presents the results of Marsh funnel viscosity and water bleed tests performed for suspensions prepared from various bentonite-loess mixtures within the range from 100:0 to 50:50, at a set 6% content of the dry mineral mixture in the suspension with a 2% addition of sodium carbonate.

Na Rys. 2 przedstawiono graficznie zależności pomiędzy zawartością lessu w kompozycji bentonitowo-lessowej a lepkością umowną i odstożem tych zawiesin.

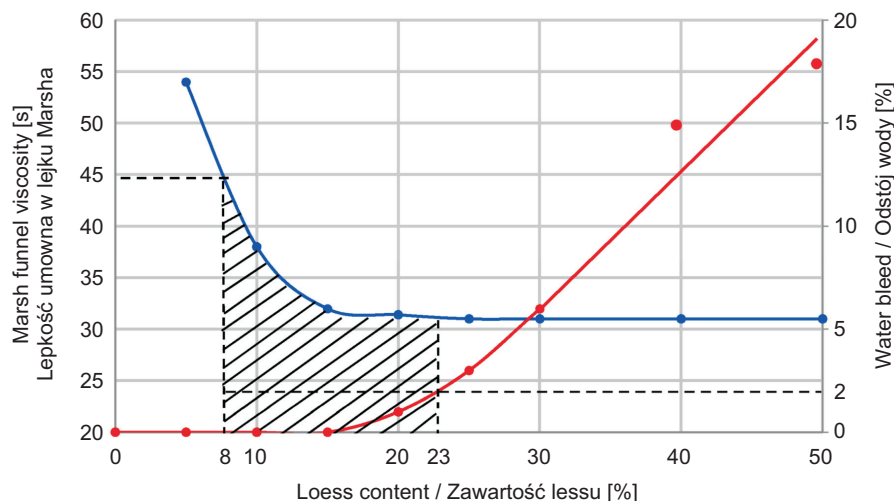


Fig. 2. Influence of loess content in the bentonite-loess mixture on viscosity and water bleed of the produced suspensions
Rys. 2. Wpływ zawartości lessu w kompozycji bentonitowo-lessowej na lepkość umowną i odstoż wody zawiesin bentonitowo-lessowych

Można zauważyć, że zawiesina wytworzona z samego bentonitu charakteryzowała się bardzo dużą lepkością, niemożliwą do oznaczenia z uwagi na brak przepływu w wiskozymetrze. Tym samym zawiesina taka była nieprzydatna w technologii ścian szczelinowych lub pali głębinowych w gruncie. Ze wzrostem zawartości lessu w kompozycji, lepkość zawiesin zmniejszała się, a przy zawartości lessu od 15% do 50% stabilizowała się na niskim poziomie, akceptowalnym odpowiednio do wymagań przytoczonych w rozdziale 1. Natomiast przy zawartościach lessu od 0% do 15% w zawiesinach nie stwierdzono odstożu wody, a przy zawartości lessu 20% odstoż wyniósł zaledwie 1%. Jednakże po przekroczeniu zawartości lessu powyżej 20% odstoż wody zwiększał się znacząco. Z wykresów przedstawionych na Rys. 2 wynika, że zawiesiny zawierające od 8% do 23% lessu charakteryzowały się lepkością umowną mniejszą od 45 s, a jednocześnie odstożem wody mniejszym od 2% (obszar zakreskowany) i pod względem ich lepkości i odstożu były przydatne do wykorzystania w technologii ścian szczelinowych i pali wierconych w gruncie. W Tabl. 5 zestawiono wyniki badań sprawdzających właściwości wybranej zawiesiny bentonitowo-lessowej 80:20, przy zawartości 6% kompozycji bentonitu i lessu w stosunku do wody i 2% dodatku węgla sodu.

Z powyższych badań wynika, że zawiesina ta oprócz małej lepkości umownej i braku odstożu wody, charakteryzowała się gęstością $\rho \geq 1,04 \text{ g/cm}^3$, stabilnością $\Delta\rho \leq 0,02 \text{ g/cm}^3$ oraz wytrzymałością żelu $\tau_F = 1,4 \div 10,0 \text{ Pa}$. Zawiesina miała zatem odpowiednie właściwości do wykorzystania w technologii ścian szczelinowych lub pali wierconych w gruncie. Na podstawie przedstawionych wyników badań uzyskano patent [14],

Graphical representation of the effect of loess content in the bentonite-loess dry mixture on viscosity and water bleed of the suspension is shown in Fig. 2.

It is noteworthy that the suspension produced using only bentonite was characterised by such a high viscosity value that Marsh funnel measurements were impossible due to lack of flow. Therefore, this suspension may not be used in technology of slurry walls or bored piles. With an increase in loess content in the mineral mixture composition, the viscosity of suspensions decreased and for the range from 15% to 50% it stabilised at a low level, acceptable according to the requirements given in Section 1. No water bleed was observed in suspensions produced from mixtures containing 0% to 15% loess, and at 20% loess content in the mixture the bleed in suspension equalled only 1%. Beyond the value of 20%, however, the water bleed increased significantly. Curves presented in Fig. 2 imply that suspensions prepared from mineral mixtures containing 8% to 23% loess were characterised both by Marsh funnel viscosity lower than 45 s and water bleed lower than 2% - as marked by the hatched area. In terms of viscosity and bleed they were suitable for use as slurry in technology of diaphragm walls and bored piles. Table 5 shows a summary of properties tested for the chosen 80:20 bentonite-loess suspension at 6% dry mineral mixture content relative to water, with a 2% addition of sodium carbonate.

As the above test results show, this slurry was characterised not only by low viscosity and lack of water bleed, but also by density of $\rho \geq 1.04 \text{ g/cm}^3$, stability $\Delta\rho \leq 0.02 \text{ g/cm}^3$ and gel strength $\tau_F = 1.4 \div 10.0 \text{ Pa}$. Therefore, such properties made the suspension suitable for use in technology of slurry walls and bored piles. Based on the presented results a patent was obtained [14], a licence contract was signed

a także została podpisana umowa licencyjna i uruchomiona produkcja kompozycji bentonitowo-lessowej do zawiesin przydatnych w technologii ścian szczelinowych. Kompozycja ta została zastosowana z powodzeniem w praktyce do wykonywania zawiesiny tiksotropowej przy głębieniu ścian szczelinowych.

4. WNIOSKI

W przypadku, gdy bentonit zawiera bardzo dużo montmorillonitu i charakteryzuje się dużą granicą płynności, nie jest możliwe wytworzenie zawiesiny o odpowiednich właściwościach, a zwłaszcza wystarczająco dużej gęstości i małej lepkości, przeznaczonej do wykonywania ścian szczelinowych lub pali wierconych w gruncie. Już niewielka zawartość bentonitu w zawieszynie powoduje jej zbyt dużą lepkość ale nie zapewnia wystarczająco dużej gęstości.

Z przeprowadzonych badań wynika, że less może być wykorzystany do modyfikowania właściwości zawiesin bentonitowych, jeśli bentonit zawiera zbyt dużo montmorillonitu. Dodatek lessu powoduje zmniejszenie granicy płynności kompozycji bentonitowo-lessowej, a zależność pomiędzy dodatkiem lessu do bentonitu a granicą płynności jest funkcją liniową. Optymalny dodatek lessu do bentonitu zależy od właściwości lessu oraz bentonitu i może być określony w drodze badań laboratoryjnych. Polegają one na ustaleniu optymalnej zawartości środka aktywującego (np. węgla sodu) oraz określeniu niezbędnej ilości kompozycji bentonitu i lessu w zawieszynie zapewniającej wymaganą gęstość. Po zbadaniu zależności pomiędzy zawartością lessu a lepkością umowną i odstojem zawiesin można ustalić zakres procentowego dodatku lessu do bentonitu, przy którym zawiesiny o wymaganej gęstości spełniają kryteria lepkości umownej i odstoju. Ostatnim krokiem jest sprawdzenie pozostałych cech wytypowanych zawiesin, tj. ich stabilności i wytrzymałości żelu. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że dodatek lessu umożliwia uzyskiwanie zawiesin bentonitowo-lessowych o właściwościach odpowiednich do wykorzystania w technologii ścian szczelinowych lub pali wierconych w gruncie.

BIBLOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Kledyński Z., Rafalski L.: Zawiesiny twardniejące. Studia z zakresu inżynierii nr 66. Polska Akademia Nauk. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2009
- [2] Jefferis S.A., Lam C.: Polymer support fluids: use and misuse of innovative fluids in geotechnical works. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013

and production of bentonite-loess mixture for use in technology of slurry walls and bored piles was initiated. This mixture has been successfully used in practical applications in thixotropic slurries for construction of diaphragm walls.

Table 5. Test results for the 80:20 bentonite-loess suspension at 6% bentonite-loess mixture content in relation to water, with a 2% addition of sodium carbonate
Tablica 5. Wyniki badań właściwości zawiesiny bentonitowo-lessowej 80:20 przy zawartości 6% kompozycji bentonitu i lessu w stosunku do wody i 2% dodatku węgla sodu

Property Właściwość	Test result Wynik badania
Density / Gęstość ρ [g/cm ³]	1.048
Stability / Stabilność $\Delta\rho$ [g/cm ³]	
– top / góra	1.049
– down / dół	1.057
– difference / różnica	0.008
Marsh funnel viscosity Lepkość umowna w lejku Marsha η_e [s]	30
Water bleed / Odstój wody O [%]	0
Gel strength / Wytrzymałość żelu τ_f Pa]	1.92

4. CONCLUSIONS

When bentonite is characterised by very high montmorillonite content and high liquid limit, it is impossible to produce support fluid with adequate properties – especially sufficiently high density and low viscosity – for construction of slurry walls and bored piles. In such cases even a small content of bentonite in the suspension results in excessive viscosity without ensuring sufficient density.

The performed research shows that loess may be used to modify the properties of bentonite slurries when bentonite contains too much montmorillonite. Addition of loess results in a decrease in liquid limit of the bentonite-loess mixture and the relationship between loess content and liquid limit is linear. The optimum quantity of loess added to bentonite is dependent on properties of the two materials and may be determined through laboratory testing. The tests consist in determination of the optimum content of the activating agent (e.g. sodium carbonate) and the minimum content of the bentonite-loess dry mixture ensuring the required density of the obtained suspension. After establishing the influence of loess content in mineral mixtures on viscosity and water bleed of the produced suspensions, a range of loess content may be determined at which suspensions with required density fulfil the criteria

- [3] Lam C., Jefferis S.A., Suckling T.P., Troughton V.M.: Effects of polymer and bentonite support fluids on the performance of bored piles. *Soils and Foundations*, **55**, 6, 2015, 1487-1500
- [4] Czarnecki L., Broniewski T., Henning O.: *Chemia w budownictwie*. Arkady, Warszawa 1997
- [5] Czopowska-Lewandowicz M.: Próba identyfikacji bentonitu w betonie ściany szczelinowej. *Materiały budowlane*, **8**, 2016, 67-69
- [6] Lixue Y.: Laboratory measurement and prediction to the permeability of bentonite-modified less as a landfill liner. *Rock and Soil Mechanics*, **32**, 7, 2011, 1963-1969
- [7] Boscov M.E.G., Soares V., Vasconcelos F.D., Ferrari A.A.P.: Geotechnical properties of a silt-bentonite mixture for liner construction. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Volumes 1-4*, 2009, 217-220
- [8] Francis A., Mohandas T.V.: Compression characteristics of silt-bentonite mixtures in liners. *Iconic Research and Engineering Journals*, **1**, 8, 2018, 75-79
- [9] Byung-Sik Ch., Jae-Woo P., Yong-Jae L., Byung-Hong K.: Geotechnical characterization of permeable barriers mixture of sand, loess and bentonite. *5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics*, September 2018
- [10] Wang Y., Chen Y., Xie H., Zhang Ch., Zhan L.: Lead adsorption and transport in loess-amended soil-bentonite cut-off wall. *Engineering Geology*, **215**, 2016, 69-80
- of viscosity and water bleed. The last stage consists in testing of other properties of the selected fluids, i.e. their stability and gel strength. Based on the performed research it was ascertained that an addition of loess enables production of bentonite-loess slurries with adequate properties for application in technologies of diaphragm walls and bored piles.
- [11] Nowamooz H., Masroufi F.: Hydromechanical behaviour of an expansive bentonite/silt mixture in cyclic suction-controlled drying and wetting tests. *Engineering Geology*, **101**, 3-4, 2008, 154-164
- [12] Wang S., Luna R., Yang J.: Effect of plasticity on shear behaviour of low-plasticity fine-grained soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **29**, 3, 2017, 04016228
- [13] Teerawattanasuk Ch., Voottipruex P.: Influence of clay and silt proportions on cement-treated fine-grained soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**, 3, 2014, 420-428
- [14] Patent PL 228163: Kompozycja do wytwarzania zawiesin tiksotropowych, przeznaczonych do zapewnienia stateczności podłoża podczas wykonywania konstrukcji podziemnych