

mgr inż. Piotr Leon Narloch¹⁾
 dr hab. inż. Piotr Woyciechowski, prof. PW^{1)*}
 Łukasz Bieliński¹⁾
 Rafał Kostro¹⁾
 inż. Adam Kruszyński¹⁾

Wytrzymałość na ściskanie ziemi ubijanej niestabilizowanej do wznoszenia ścian monolitycznych

Compressive strength of unstabilized rammed earth used to erect monolithic walls

DOI: 10.15199/33.2015.06.41

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek z ziemi ubijanej bez dodatków stabilizacyjnych. Mieszanki ziemi, z których uformowano poszczególne serie próbek, różniły się między sobą uziarnieniem. Z uwagi na brak aktualnych polskich norm dotyczących ziemi ubijanej, badania oraz analiza wyników bazowały na zagranicznej literaturze, normie nowozelandzkiej NZS 4298:1998 oraz archiwalnych polskich normach branżowych z lat sześćdziesiątych XX wieku, dotyczących budownictwa z gliny.

Słowa kluczowe: ziemia ubijana, wytrzymałość na ściskanie, budownictwo z ziemi, zrównoważony materiał budowlany.

Abstract. The paper presents results of the compressive strength test of unstabilized rammed earth samples. Soil mixtures used in the test differ in the particle size distribution. Due to the lack of valid Polish Standards about rammed earth, the test and the analysis of results were based on foreign science publications, New Zealand Standard NZS 4298:1998 and old polish branch standards from 1960s, concerning building with raw soil.

Keywords: rammed earth, compressive strength, building with earth, sustainable building material.

Ziemia ubijana stanowi jeden z najbardziej zrównoważonych materiałów budowlanych. Pozwala ona na wzniesienie monolitycznych murów z lokalnie dostępnego gruntu, zarówno przy użyciu nowoczesnego sprzętu budowlanego, jak również tradycyjnych niezmechanizowanych narzędzi. Technika ta polega na dynamicznym ubijaniu warstw wilgotnej mieszanki w deskowaniu ustawionym na stabilnym fundamencie. Ze względu na skład mieszanki użytej do budowy można wyróżnić ziemię niestabilizowaną, zawierającą wyłącznie odpowiednio przygotowaną mieszankę bez stabilizatorów zwiększających trwałość i wytrzymałość oraz ziemię stabilizowaną, w której do gruntów dodano składniki poprawiające właściwości mechaniczne materiału. W artykule podjęto próbę oceny możliwości zastosowania gruntu bez dodatków stabilizujących do wznoszenia monolitycznych murów nośnych.

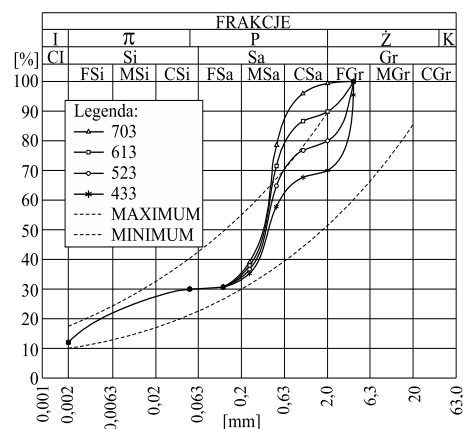
¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

^{*)} Autor do korespondencji:
 e-mail: p.woyciechowski@il.pw.edu.pl

Materiały do badań

Podstawowym kryterium decydującym o przydatności mieszanki ziemi do wzniesienia ściany techniką ubijania jest brak humusu. Grunt zawierający materiał organiczny charakteryzuje się dużą ściśliwością, a ponadto ulega biodegradacji. Kolejnym kryterium przydatności mieszanki jest jej uziarnienie, przy czym w literaturze spotyka się różne zalecenia dotyczące uziarnienia. H. Houben i H. Goillard w swojej publikacji [2] zaproponowali rekomendowany zakres uziarnienia, pokazany na rysunku 1 (linie przerywane). M. Hall i Y. Djebib postawili hipotezę, że istotniejszym czynnikiem od uziarnienia wpływającym na wartość wytrzymałości na ściskanie jest stosunek zawartości gruntów spoiwych do niespoistych. Badania przeprowadzone przez autorów tej hipotezy – opublikowane w [4] wykazały, że najlepszą wytrzymałość uzyskuje się przy stosunku masowym frakcji ilowej i pyłowej do frakcji piaskowej i żwirowej wynoszącym 3 – 7. Bazując na tych informacjach, zaprojektowano cztery mieszanki ziemi. Każda z nich zawierała stosunek gruntu spoiwego do nie-

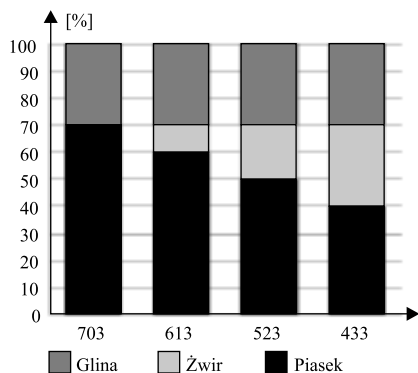
spoiwego w wymienionej proporcji. Ponadto mieszanki dobrano w taki sposób, aby dwie z nich (433, 523) miały uziarnienie rekomendowane przez [2], natomiast pozostałe dwie (613, 703) zawierały mniejszą od rekomendowanej zawartość frakcji żwirowej.



Rys. 1. Krzywe uziarnienia poszczególnych mieszanek ziemi użytych w badaniu. (Maximum i minimum – obszar dobrego uziarnienia wg [2], pozostałe opisy w tekście)

Fig. 1. The particle size distribution charts of rammed earth mixtures used in the research. (Maximum and minimum – area of particle size distribution recommended in [2])

Mieszanki ziemi przygotowano z trzech podstawowych składników – gliny, piasku i żwiru. Na rysunku 2 podano skład mieszanek ziemi użytych do przygotowania próbek. Symbol mieszanki 523 oznacza masowe proporcje kolejno piasku, żwiru i gliny w mieszance. Jednym z kluczowych problemów w standaryzacji ziemi jest zmienny skład gliny. Istotny jest także rozkład poszczególnych frakcji w mieszance oraz jej wilgotność. O wytrzymałości ziemi ubijanej decydować będzie ponadto skład mineralny oraz kształt ziaren [4], dlatego też do przygotowania wszystkich mieszanek użyto gliny, piasku i żwiru tego samego pochodzenia. Dobór ilości wody do mieszanki odbywał się na drodze badań prowadzących do ustalenia wilgotności optymalnej.



Rys. 2. Skład poszczególnych mieszanek ziemi ubijanej niestabilizowanej stosowanej w badaniu

Fig. 2. Composition of soil mixtures

W badaniu wykorzystano glinę górnortriasową ze złoża odkrywkowego w Szkucinie. O jej zastosowaniu zdecydował fakt, że dostawca materiału zadeklarował skład chemiczny, mineralogiczny oraz orientacyjne uziarnienie klasyfikujące glinę jako il pylasty. Ponadto glina została dostarczona w formie fabrycznie zmielonej do postaci mączki o granulacji ziaren 0 – 1 mm. Taka forma materiału umożliwiała jego łatwe mieszanie z pozostałymi składnikami. Deklarowany skład chemiczny oraz mineralny gliny podano w tabeli 1. W celach weryfikacyjnych przeprowadzono badanie składu chemicznego gliny metodą fluorescencji rentgenowskiej oraz uziarnienia metodą analizy areometrycznej gliny w formie zmielonej oraz w formie brył, w której została ona odkrywkowo wydobyta. Wyniki ba-

Tabela 1. Skład chemiczny i mineralny gliny użytej do badań

Table 1. Chemical and mineralogical composition of loam used in the research

Skład chemiczny (przebadany)		Skład chemiczny (deklarowany przez producenta) [5]		Skład mineralny (deklarowany przez producenta) [5]	
SiO ₂	61,78%	SiO ₂	55,00 – 62,14%	kwarc	17 – 25%
Al ₂ O ₃	19,63%	Al ₂ O ₃	15,70 – 17,70%	kaolinit	3 – 10%
Fe ₂ O ₃	10,65%	Fe ₂ O ₃	6,09 – 7,90%	illit	3 – 10%
TiO ₂	0,89%	TiO ₂	0,70 – 0,90%	hematyt	3 – 5%
K ₂ O	3,18%	K ₂ O	2,90 – 3,50%	plagioklaz	< 3%
CaO	0,66%	CaO	0,33 – 0,81%	skaleń potasowy	< 3%
MnO	0,11%	MnO	0,04 – 0,17%	goethyt	< 2%
Pozostałe tlenki	3,09%	Na ₂ O	0,06 – 0,26%	anataz	< 5%
		P ₂ O ₅	0,05 – 0,18%	minerały mieszanopakietowe	32 – 53%
		MgO	2,20 – 3,20%	faza amorficzna	15%

dań potwierdziły uziarnienie i skład chemiczny deklarowany przez producenta.

Badania wstępne

Przed przystąpieniem do badań przeprowadzono badania rozpoznawcze z użyciem żwiru o różnym uziarnieniu. Sporządzono trzy warianty próbek 433. Pierwsza seria została uformowana z mieszanki zawierającej wyłącznie żwir o uziarnieniu 2 – 4 mm, druga z udziałem 50% masy żwiru 2 – 4 mm i 50% masy żwiru 4 – 8 mm, trzecia zaś po jednej trzeciej masy żwiru o uziarnieniu odpowiednio: 2 – 4 mm, 4 – 8 mm i 8 – 16 mm. Prawie połowa próbek ze żwirem o uziarnieniu większym niż 4 mm nie nadawała się do badań, ponieważ zawierały one liczne ubytki o dużych rozmiarach. Z tego powodu do badania zasadniczego zastosowano żwir o uziarnieniu 2 – 4 mm. Składniki mieszanki – glina, piasek i żwir – zostały wysuszone do stałej masy w temperaturze 105 °C, a następnie wymieszane ze sobą w stanie suchym. Do tak przygotowanych mieszanek ziemi dolewano odpowiednią ilość wody, aby każda z nich osiągnęła wilgotność optymalną.

Formowanie próbek z mieszanki o wilgotności optymalnej zapewnia najlepszą podatność na ubijanie, a więc maksymalną gęstość próbek i w konsekwencji maksymalną wytrzymałość na ściskanie. Zgodnie z normą nowozelandzką NZS 4298:1998 wilgotność

ziemi użytej do wzniesienia muru nie powinna być niższa o więcej niż 3% i wyższa o więcej niż 5% od wilgotności optymalnej. Przed przystąpieniem do formowania próbek wyznaczono wilgotność optymalną każdej z mieszanek. W pomiarach tych użyto tego samego ubijaka, za pomocą którego później wykonano próbki ziemi ubijanej. Wartość wilgotności optymalnej podano w tabeli 2. Podobnie jak w [4] wilgotność optymalna mieszanek ziemi wynosiła 7 – 9%. W badaniu zauważono zależność, że im więcej frakcji żwirowej w mieszance, tym mniejsza wilgotność optymalna.

Tabela 2. Wilgotności optymalne mieszanek ziemi użytych do badania

Table 2. Moisture content of soil mixtures used in the research

Parametr	Symbol mieszanki ziemi			
	703	613	523	433
Wilgotność optymalna [% masy]	9	8	8	7

Badanie wytrzymałości na ściskanie

Próbki ziemi ubijanej do badań wytrzymałościowych zostały uformowane z wykorzystaniem metody autorstwa M. Halla i Y. Djerbiba [4] w sześciennych stalowych formach o wymiarach 100 x 100 x 100 mm. Na formę przykręcony był kołnierz prowadzący, w którym poruszał się ubijak o masie 6,5 kg i wymiarach podstawy 96 x 96 mm, który opuszczano swobodnie z wysokości

30 cm ponad powierzchnią próbki. Mieszankę ziemi wsypano do form w trzech równych warstwach, zagęszczając każdą z nich dwudziestoma uderzeniami ubijaka. W ten sposób uformowano po 10 próbek z każdej z czterech mieszanek. Próbki rozformowywano po upływie 24 h, a następnie sezonowano w komorze klimatycznej o podwyższonej wilgotności wynoszącej 75%RH ($\pm 5\%$) i temperaturze $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ przez 28 dni.

Po okresie sezonowania nie stwierdzono spękań na powierzchni próbek, ale ich górne powierzchnie nie były gładkie. Z tego powodu zostały wyrównane gładzią szpachlową, a w czasie obciążania próbek zastosowano podkładki z płyty pilśniowej miękkiej. Wszystkie badania przeprowadzono zgodnie z kierunkiem formowania w celu zapewnienia odpowiedniego modelu zniszczenia zgodnego z teoretycznym modelem rozkładu naprężeń. Sposób umieszczania próbek w maszynie wytrzymałościowej jest odmienny niż stosowany w przypadku próbek betonowych. Ziemia ubijana, układana i zagęszczana warstwowo zachowuje warstwową strukturę zarówno w monolitycznej ścianie, jak i w formowanych próbkach. Można zatem przyjąć, że zarówno charakterystyka materiału, jak i techniki formowania sprawiają, że reprezentatywny do określenia nośności konstrukcji jest sposób badania wytrzymałości przez obciążenie próbki w kierunku jej formowania. Po badaniu oznaczono wilgotność materiału w chwili zniszczenia. Próbki zostały rozdrobnione i wysuszone do stałej masy w suszarce o temperaturze $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Wilgotność masowa próbek z każdej mieszanki wynosiła w chwili zniszczenia 1,2% masy próbek.

Na rysunku 3 podano wartość wytrzymałości na ściskanie obliczoną wg norm nowozelandzkich i archiwalnych polskich norm branżowych [1]. Zgodnie z NZS 4298:1998 [3] wartość charakterystyczną wytrzymałości na ściskanie UCS (ultimate compressive strength) można obliczyć za pomocą wzoru:

$$f' = [1 - 1,5 \cdot (X_s/X_a)] \cdot x_1$$

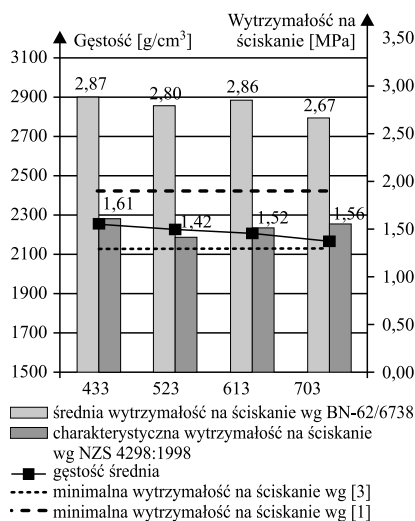
gdzie:

f' – wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie;

X_a – średnia arytmetyczna;

X_s – odchylenie standardowe;

x_1 – najniższy rezultat.



Rys. 3. Wyniki wytrzymałości na ściskanie i średnia gęstość ziemi ubijanej z poszczególnych mieszanek

Fig. 3. The results of compressive strength and average density for each rammed earth soil type

Uzyskaną wartość f' należy następnie przemnożyć przez współczynnik kształtu wynoszący dla próbek sześciennych 0,7.

Archiwalna norma branżowa BN-62/6738-02 [1] zaleca przyjąć jako wynik badania wytrzymałości na ściskanie średnią arytmetyczną wartość pięciu próbek, przy czym różnica pomiędzy najniższą i najwyższą wytrzymałością próbek przyjętych do obliczenia nie powinna przekraczać 20% [1]. Uzyskane wartości wytrzymałości charakterystycznej spełniają wymagania normy nowozelandzkiej NZS 4298:1998 [3], tzn. że minimalna charakterystyczna wytrzymałość na ściskanie UCS próbek z ziemi niestabilizowanej powinna być na poziomie 1,3 MPa [3]. Otrzymane wyniki spełniają również warunek podany w polskiej normie branżowej, w której minimalną wytrzymałość na ściskanie próbek bez stabilizatora określono na poziomie 1,9 MPa [1]. Należy podkreślić, że uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie poszczególnych serii próbek różnią się nieznacznie.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

■ zaprojektowane mieszanki ziemi mogą być stosowane jako materiał konstrukcyjny do wznoszenia ścian monolitycznych z wykorzystaniem

techniki ubijania. Ich wytrzymałość charakterystyczna UCS przewyższa wartości wymagane w normie nowozelandzkiej [3], a minimalna średnia wytrzymałość zalecaną wartość w polskiej normie branżowej z lat sześćdziesiątych XX wieku [1]. Można zatem stwierdzić, że pod względem wytrzymałości na ściskanie materiał ten jest wystarczający do pełnienia funkcji konstrukcyjnej. Należy przebadać pozostałe właściwości ziemi ubijanej, m.in. mrozoodporność i nasiąkliwość, aby sprawdzić, czy w Polsce (w klimacie umiarkowanym) jest możliwe zastosowanie ziemi bez dodatków stabilizacyjnych;

■ na podstawie badań wstępnych wyeliminowano stosowanie kruszyw o uziarnieniu powyżej 4 mm. Próbki ze składu 433 wykonane ze żwiru 2 – 8 mm charakteryzowały się słabą strukturą i uzyskały bardzo małą wytrzymałość;

■ wartości średnie wytrzymałości na ściskanie próbek o zawartości gliny 30% są do siebie zbliżone niezależnie od składu kruszywa i wynoszą od 2,67 MPa do 2,87 MPa.

Wyniki badań wskazują, że uzyskanie z mieszanki gliny, piasku i żwiru materiału do budowy ścian konstrukcyjnych budynków niskich jest łatwe w przypadku prawidłowego doboru ilości wody i przebiegu ubijania. Osobne zagadnienie stanowi trwałość tak uzyskanego materiału. W tym przypadku konieczne jest zmodyfikowanie składu mieszanki przez wprowadzenie spoiwa mineralnego, np. cementu. Badania w tym zakresie są obecnie prowadzone przez autorów.

Literatura

- [1] BN-62/6738-02 Budownictwo z gliny – masy gliniane.
- [2] Houben H., Goillard H. Earth construction – a comprehensive guide. Second ed. London: Intermediate Technology Publications, 1996.
- [3] Standards New Zealand. NZS 4298:1998 Materials and Workmanship for Earth Buildings. Standards New Zealand, Wellington, New Zealand, 1998.
- [4] Hall M., Djerbib Y., Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency. Construction and Building Materials 18, s. 281 – 286, 2004.
- [5] <http://www.ceradbud.pl/glina-surowa> dostęp 10.12.2014 r.

Otrzymano 13.12.2014 r.