

WPLYW RODZAJU GLINY I ZAWARTOŚCI CEMENTU NA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE ZIEMI UBIJANEJ

Piotr Leon NARLOCH, Piotr WOYCIECHOWSKI, Paweł JĘDA

*Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej
ul. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa
e-mail: p.narloch@il.pw.edu.pl, p.woyciechowski@il.pw.edu.pl, pawel.m.jeda@gmail.com*

Streszczenie: W niniejszym artykule opisano wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek ziemi ubijanej różniących się między sobą rodzajem gliny użytej do mieszanki oraz zawartością stabilizatora w postaci cementu portlandzkiego CEM I 42,5R. Badania oraz analiza wyników została oparta na zagranicznej literaturze, normie nowozelandzkiej NZS 4298:1998, normie amerykańskiej NMAC14.7.4 oraz archiwalnych polskich normach branżowych z lat 60. XX wieku, dotyczących budownictwa z gliny.

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

1. WSTĘP

Jednym z zadań stojących przed współczesnym budownictwem jest dążenie do ograniczenia zużycia energii i emisji zanieczyszczeń przy produkcji materiałów budowlanych, ich transporcie na teren budowy oraz przy wznoszeniu budynków. Pośród zrównoważonych technik budowlanych warto zwrócić uwagę na ziemię ubijaną – technikę budowy, w której wykorzystuje się lokalnie dostępny grunt, zalegający pod warstwą humusu.

Mimo, że w ostatnich latach powstały liczne publikacje dotyczące techniki ziemi ubijanej, autorzy nie znaleźli pozycji wyjaśniającej jeden z kluczowych problemów, jakim jest wpływ rodzaju gruntu na parametry wytrzymałościowe gotowych elementów niestabilizowanych oraz stabilizowanych cementem. Wiele propozycji literaturowych oraz norm zagranicznych zawiera co prawda rekomendowane uziarnienie mieszanki ziemi, jednakże nomogramy oraz tabele dotyczące uziarnienia znacząco różnią się między sobą wartościami granicznymi. Jednocześnie opracowania te nie opisują wyczerpująco wpływu zawartości poszczególnych minerałów czy związków

chemicznych zawartych w gruntach na cechy mechaniczne i trwałościowe materiału.

W niniejszym artykule autorzy przeanalizowali wartości wytrzymałości na ściskanie próbek ziemi ubijanej wykonanych z mieszank o zbliżonym uziarnieniu, jednakże z użyciem trzech różnych glin. Gliny te stanowiły odpady z placów budów, a ich wywóz wiązał się z dodatkowym kosztem dla inwestorów. Przeprowadzona w artykule analiza miała na celu ustalenie czy możliwe jest użycie gliny, uznanej za odpad z budowy w charakterze surowca do produkcji nowego, nośnego materiału konstrukcyjnego. Drugi cel analizy wiązał się z ustaleniem, czy pewne różnice w składzie chemicznym i mineralnym gruntu będą miały znaczący wpływ na właściwości wytrzymałościowe materiału, czy też różnice te mogą zostać pominięte w projektowaniu mieszank ziemi ubijanej.

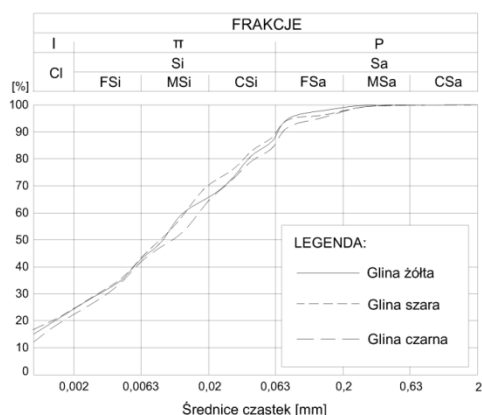
2. MATERIAŁY UŻYTE DO BADAŃ

2.1. Skład granulometryczny

Na potrzeby badań pozyskano trzy gliny pochodzące z różnych rejonów w okolicy Warszawy. Każda z glin posiadała inną barwę - żółtą, jasnoszarą i ciemnoszarą. Wskazywało to na ich odmienny skład chemiczny lub mineralny. W dalszej części artykułu gliny będą określane, jako: glina żółta (barwa żółta), glina szara (barwa jasnoszara), glina czarna (glina ciemnoszara).

W celu ustalenia przybliżonego uziarnienia poszczególnych glin przeprowadzono analizy areometryczne. Badaniom tym poddano po dwie próbki z każdej z glin – jedną stanowiła wilgotna glina przywieziona w postaci zbrilonych brył, drugą wysuszona mączka o średnicy ziaren do 2 mm. Mączka ta została uzyskana po wysuszeniu glin

w stanie powietrzno-suchym, a następnie zmieleniu materiału w Bębnie Los Angeles. Intencją badania glin w dwóch formach było określenie, czy proces jej rozdrabniania miał istotny wpływ na zmianę uziarnienia. Wyniki badań nie wykazały znaczących różnic w składzie granulometrycznym danego rodzaju gliny. Nie zaobserwowano również dużych rozbieżności w uziarnieniu pomiędzy glinami pozyskanymi z różnych lokalizacji (rys.1). Z uwagi na ich zbliżone uziarnienie, można stwierdzić, że ewentualne różnice w badaniach wytrzymałościowych wiążą się z odmiennym składem chemicznym lub mineralnym materiału.



Rys. 1. Wykres uziarnienia poszczególnych glin
Fig. 1. Graph of granular composition of each type of loam

2.2. Skład chemiczny glin

Gliny użyte do badań wytrzymałościowych zostały poddane badaniu składu chemicznego metodą fluorescencyjnej spektrometrii rentgenowskiej (XRF). Metoda ta służy do identyfikacji pierwiastków w danej substancji i określenia ich ilości. Pierwiastki są wykrywane na podstawie charakterystycznej długości fali (X) lub energii (E) emisji promieniowania rentgenowskiego. Stężenie danego pierwiastka określane jest za pomocą pomiaru intensywności linii jego charakterystyki. Zidentyfikowane składy chemiczne badanych glin zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Procentowa zawartość tlenków w przebadanych próbkach glin, oszacowana na podstawie wyników badania metodą XRF.

Table 1. The percentage of oxides in the tested loam sample, assessed based on the XRF testing results.

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | CaO | TiO ₂ | inne |
|--------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|------------------|------|
| Glina żółta | 71,64 | 15,60 | 5,30 | 2,10 | 1,30 | 0,77 | 0,24 |
| Glina szara | 68,21 | 15,07 | 5,92 | 2,72 | 4,00 | 0,73 | 0,31 |
| Glina czarna | 65,41 | 19,10 | 8,97 | 1,42 | 1,32 | 1,02 | 0,29 |

2.3. Skład mineralny

Badanie składu mineralnego omawianych glin zostało wykonane metodą analizy termicznej w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Uniwersytetu Warszawskiego. Pomiary wykonano w aparacie Q600 amerykańskiej firmy TA Instrument. Stosowano następujące warunki analizy: naważka 58-65 mg, czułość dobierana automatycznie przez aparat, szybkość nagrzewania 10°C/min., atmosfera-powietrze. Ustalony skład mineralny glin zestawiono w tabeli 2. Przeprowadzone badania składu granulometrycznego wykazały zbliżone uziarnienie poszczególnych glin, jednakże badania składu chemicznego i mineralnego wykazały wyraźne różnice w ich składzie.

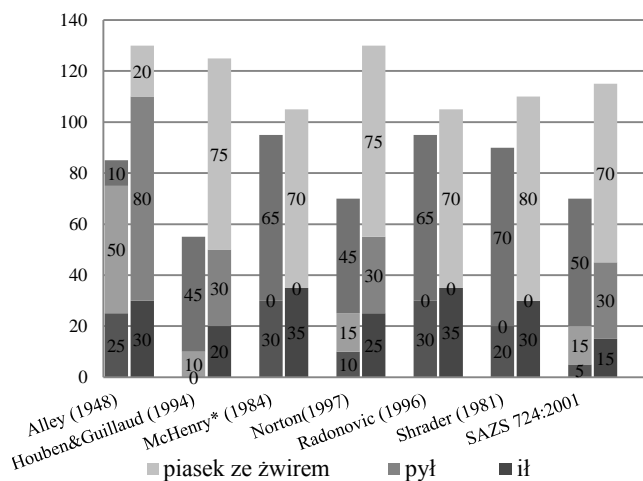
Tabela 2. Skład mineralny badanych próbek glin
Table 2. The mineral composition of the researched loam samples

| Rodzaj próbki gliny | Procentowa zawartość poszczególnych składników | | | | | | |
|---------------------|--|----------|-------|---------|---------|-----------------------|--------------|
| | minerały ilaste, w tym: | | | goethyt | węglany | Substancja organiczna | kwarc i inne |
| | beidellit | kaolinit | illit | | | | |
| Żółta | 24,7 | 2,7 | ak* | 2,0 | 1,7** | - | 69,0 |
| Szara | 2,3 | 1,6 | 35,1 | 2,0 | 5,0 | 0,4 | 53,6 |
| Czarna | 10,4 | 8,5 | 18,9 | 2,0 | 6,1 | 0,3 | 53,9 |

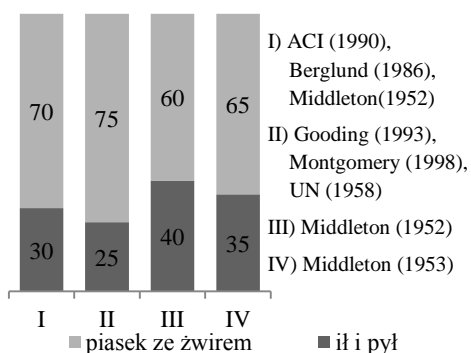
*ak. – akcesoryczny ** - Mg₂CO₃

2.4. Rekomendowany skład mieszanki ziemi

Rekomendowane proporcje w zakresie uziarnienia zależą od rodzaju i procentowej zawartości stabilizatorów dodawanych do mieszanki ziemi. Do produkcji ziemi ubijanej niestabilizowanej stosuje się zwiększoną zawartość gliny. Na rys. 2 przedstawiono zestawienie rekomendowanych zawartości poszczególnych frakcji w mieszance ziemi nie zawierającej dodatków stabilizujących opracowane przez V. Maniatis'a i P. Walker'a [6]. Według wymienionych autorów, zawartość frakcji ilowych i pyłowych powinna mieścić się w granicach około 20-35%, natomiast frakcji piaskowej i żwirowej 50-75% [6]. W przypadku stosowania stabilizatorów, najlepsze parametry otrzymuje się przy większej zawartości kruszywa w stosunku do frakcji spoistych. Odpowiedni wybór stabilizatora zależy przede wszystkim od ilości mniejszych frakcji oraz od wskaźnika plastyczności spoiwa. Dla mieszanek ziemi stabilizowanych cementem portlandzkim wykresy przedstawiające proporcje zawartości frakcji ilowej i pyłowej do frakcji piaskowej i żwirowej przedstawiono na rys. 3. Okazuje się on być zbliżony z górną granicą proponowaną przez V. Maniatis'a oraz P. Walker'a [6] dla mieszanek ziemi bez dodatków stabilizujących.



Rys. 2. Graniczne wartości procentowe poszczególnych frakcji wg [6]
Fig. 2. Mass limit percentage values of each fraction according to [6]



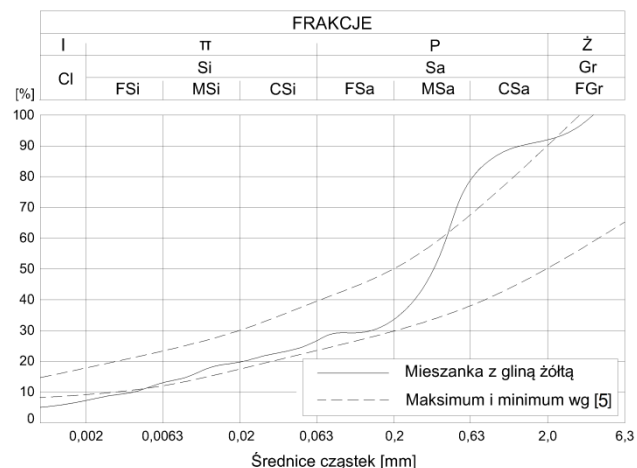
Rys. 3. Zalecenia dotyczące proporcji mieszanki z dodatkiem cementu [6]

Fig. 3. Recommendations regarding the mixture proportions with added cement [6]

2.5. Wybór optymalnego składu mieszanki ziemi

Podjętą decyzję o składzie mieszanki ziemi przyjętej do badań wzięto pod uwagę wyniki M. Halla i Y. Dierbib'a [4], którzy przeanalizowali wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z 10 różnych mieszanek ziemi niestabilizowanej. Najwyższe wartości osiągnęły próbki zawierające 30% frakcji iłowych i pyłowych. Spośród nich za optymalny uznano skład 613 oznaczający zawartość 60% frakcji piaskowej, 10% frakcji żwirowej i 30% frakcji iłowej i pyłowej. Skład ten osiągał najwyższą wytrzymałość na ściskanie oraz najlepiej odpowiadał wszystkim wymaganiom opisanym powyżej. W badaniach przeprowadzonych przez autorów niniejszego artykułu użyto piasku o uziarnieniu 0-2mm oraz żwiru 2-4mm.

Krzywą uziarnienia zaprojektowanej mieszanki ziemi pokazano na rys. 4. Do umożliwienia dokonania oceny mieszanki na krzywą uziarnienia naniesiono zalecany obszar uziarnienia według [5]. Jak widać, zaprojektowana mieszanka w przeważającej części mieści się w obszarze zalecanym.



Rys. 4. Krzywa uziarnienia mieszanki ziemi 613

Fig. 4. The granular composition curve of soil mixture 613

2.6. Stabilizator

Rolą stabilizatora jest polepszenie trwałości i wytrzymałości elementów wykonanych z ziemi ubijanej. Najpopularniejszym z nich jest cement portlandzki. Dlatego też, w opisywanym badaniu wykorzystano cement klasy CEM I 42,5 R w ilościach 0, 3 oraz 6 % w stosunku do suchej masy pozostałych składników.

3. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK

Przed przystąpieniem do formowania należało w pierwszej kolejności określić potrzebną ilość wody do wytworzenia mieszanki. W tym celu, wyznaczono wilgotności optymalne metodą Proctora dla mieszanek ziemi o składzie 613 z udziałem różnych glin. Powszechnie uważa się, iż dzięki dodaniu wody gwarantującej otrzymanie maksymalnej gęstości, uzyskuje się zarazem największą wytrzymałość elementów. Badanie wykonano dla mieszanek ziemi nie zawierających cementu oraz z jego udziałem wynoszącym 3 i 6 % masy pozostałych suchych składników. Wyznaczone wartości wilgotności optymalnych mieszanek ziemi z udziałem różnych glin dla danego % dodatku cementu były zbliżone – różnice w wartościach nie przekraczały 0,5%. Uśrednione wartości wilgotności optymalnych zestawiono w tabeli 3. Do przygotowania mieszanek zawierających cement nie posłużono się bezpośrednio wyznaczoną wilgotnością

optymalną w badaniu Proctora, z uwagi na zauważalne zwiększenie sypkości oraz wodożądności mieszanek zawierających cement, w porównaniu do mieszanek niestabilizowanych. Na potrzeby badania opisywanego w niniejszym artykule autorzy zaprojektowali mieszanki ziemi o wilgotnościach pokazanych w tabeli 3.

Tabela 3. Przyjęte wilgotności mieszanek ziemi
Table 3. Assumed moisture content of soil mixtures

| Symbol Mieszanki | Wilgotność optymalna [% masy] | Zaprojektowana wilgotność [% masy] |
|------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 613 – 0% CEM I | 8,0 | 8,0 |
| 613 – 3% CEM I | 8,5 | 10,0 |
| 613 – 6% CEM I | 9,0 | 12,0 |

Po ustaleniu ilości wszystkich składników przystąpiono w pierwszej kolejności do wymieszania suchego materiału. W momencie uzyskania jednorodnej barwy mieszaniny dolewano odpowiednią ilość wody. Mieszalnik mechaniczny wyłączano po dwóch minutach od momentu dodania płynu. Tak przygotowane mieszanki były wykorzystane w przeciągu 45 minut, zgodnie z wymogami normy nowozelandzkiej NZS 4298:1998 [7]. Przygotowanie próbek odbywało się zgodnie z tą normą oraz zaleceniami opisanymi w publikacji [4]. Polegało ono na dwudziestokrotnym opuszczeniu ubijaka o masie 6,5kg z wysokości 30 cm na każdą z trzech jednakowych warstw próbki sześcienniej o boku 100mm. Formowanie przeprowadzano w metalowych formach o ściankach uprzednio pokrytych środkiem antyadhezyjnym. Gotowe elementy były bezpośrednio rozformowane, a następnie umieszczane na 28 dni w komorze klimatycznej o wilgotności względnej powietrza wynoszącej 95% i temperaturze 20°C. Zbliżone warunki sezonowania próbek z ziemi ubijanej stabilizowanej zaproponowano w [1].

4. UZYSKANE WYNIKI WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE

Po okresie sezonowania nie stwierdzono spękań na powierzchni próbek, jednakże ich górne powierzchnie nie były gładkie (rys. 5). Z tego powodu, dla zapewnienia równomiernego rozkładu obciążenia, górna powierzchnia próbek została wyrównana 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. Ziemia ubijana, układana i zagęszczana warstwowo, zachowuje strukturę warstwową

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 poprzez obciążenie próbki w kierunku jej formowania.



Rys.5. Wygląd próbek po 28 dniach sezonowania
Fig. 5. The appearance of the samples after 28 days of curing

Do otrzymania wyniku wytrzymałości na ściskanie według normy nowozelandzkiej potrzebne są pomiary, z co najmniej pięciu próbek. W celu zwiększenia dokładności otrzymanych rezultatów wykonano dla każdej serii po 10 próbek. Według normy nowozelandzkiej NZS 4298:1998 [7], wartość charakterystyczną wytrzymałości na ściskanie określa się na podstawie wzoru:

$$f' = \left(1 - 1,5 \frac{X_s}{X_a}\right) x_1 \quad (1)$$

gdzie:

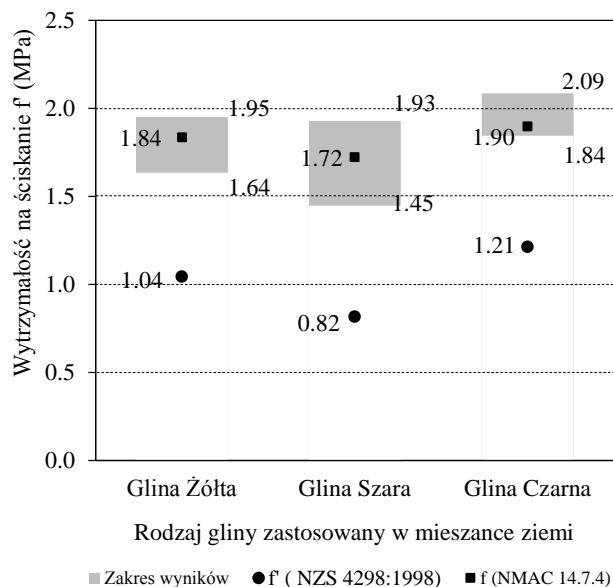
f' – wytrzymałość charakterystyczna;

X_a – średnia arytmetyczna;

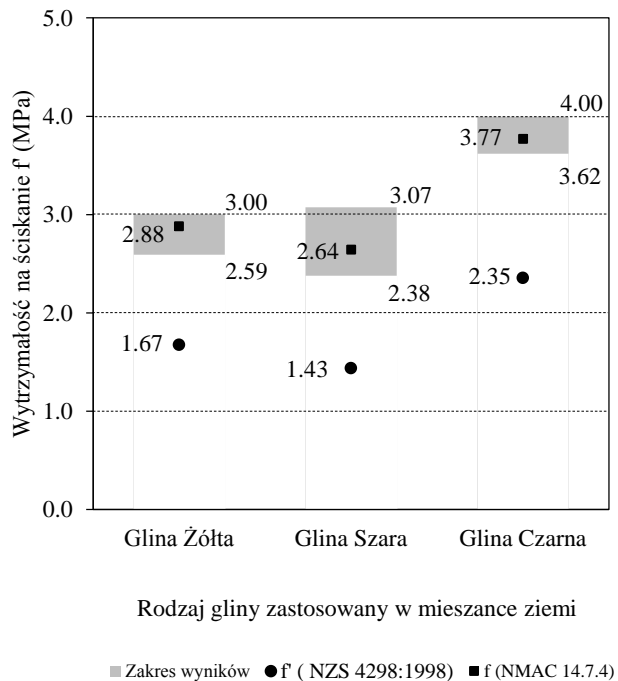
X_s – odchylenie standardowe;

x_1 – najmniejsza wartość z pomiarów

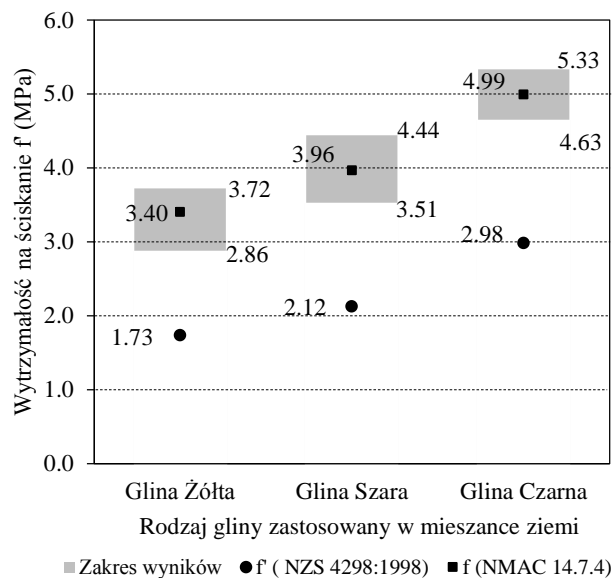
Wyniki uzyskane z pomiarów przedstawiono na wykresach (rys. 6, rys. 7, rys. 8), na których prostokątem oznaczono zbiór otrzymanych rezultatów odczytanych z prasy wytrzymałościowej, kwadratem znacznikiem średnią arytmetyczną z tych wyników (średnia wytrzymałość na ściskanie wg normy amerykańskiej 14.7.4 NMAC [2]), zaś okrągłym wytrzymałość charakterystyczną danej serii f' uwzględniającą zgodnie z normą nowozelandzką współczynnik kształtu wynoszący dla próbek sześciennych 0,7. Zależność wytrzymałości na ściskanie od zawartości cementu dla poszczególnych glin przedstawiono na rys. 9.



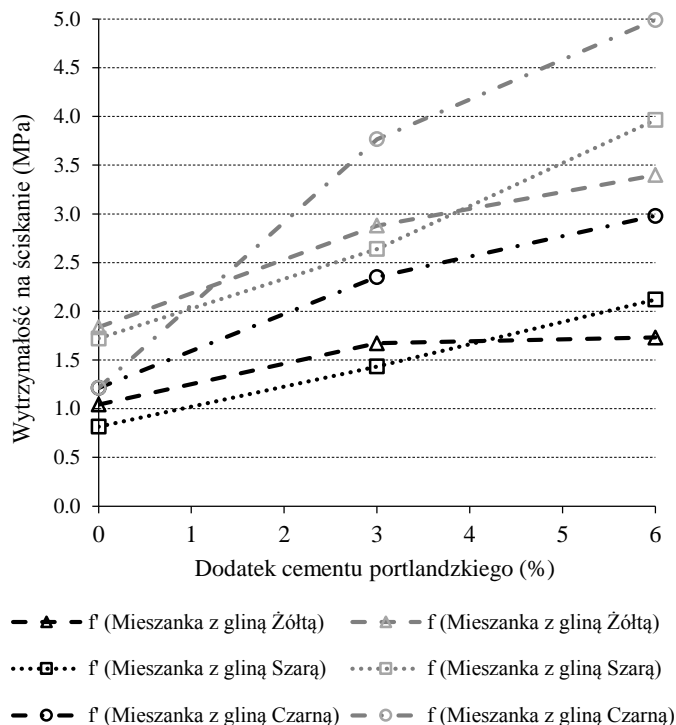
Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dla ziemi ubijanej bez stabilizatora.
Fig. 6. Compressive strength after 28 days for rammed earth without a stabilizer



Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dla ziemi ubijanej z dodatkiem 3% cementu
Fig. 7. Compressive strength after 28 days for rammed earth with the addition of 3% of cement



Rys. 8. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dla ziemi ubijanej z dodatkiem 6% cementu
Fig. 8. Compressive strength after 28 days for rammed earth with the addition of 6% of cement



Rys. 9. Zależność wytrzymałości od zawartości cementu po 28 dniach
Fig. 9. Compressive strength depending on the cement content after 28 days

5. ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

Przeprowadzone badania pozwalają sformułować następujące wnioski:

- Przy braku stabilizatorów wyniki średniej wytrzymałości na ściskanie wszystkich badanych materiałów były zbliżone, jednakże nie spełniały wymogu minimalnej wytrzymałości na ściskanie wynoszącej 1,3 MPa stawianego przez normę nowozelandzką NZS 4298:1998.
- W przypadku stabilizacji mieszanki ziemi dodatkiem cementu portlandzkiego udało się przekroczyć dla wszystkich glin, wartość minimalnej wytrzymałości na ściskanie określoną w normie nowozelandzkiej. Okazuje się, że użycie nawet 3% tego dodatku zapewniło w każdym wypadku osiągnięcie wymaganej wytrzymałości.
- W przeciwieństwie do badań M. Halla [3] wyniki nie wykazują wyraźnej zależności liniowej, aczkolwiek za główną przyczynę tego faktu uważa się występowanie w niektórych przypadkach znacznego odchylenia standardowego.
- Wyniki otrzymane w badaniach osiągnęły wyraźnie mniejszą wytrzymałość w porównaniu z rezultatem pracy M. Hall'a i Y. Dierbib'a [3], [4]. Za powstanie tej rozbieżności autorzy uważają odmienne warunki sezonowania. W powoływanej pracy próbki były sezonowane w komorze o wilgotności względnej $75\pm 5\%$, zaś próbki autorów niniejszego artykułu sezonowano w komorze klimatycznej o wilgotności $95\pm 5\%$. Pozostałe czynności i założenia zostały przeprowadzone niemalże identycznie w obu pracach. Odwołując się do porównania wyników badań wstępnych oraz badań właściwych niniejszej pracy stwierdzono jednoznacznie, iż decydujący wpływ na pogorszenie parametrów odgrywa sposób sezonowania próbek. Informacja ta okazuje się zgodna ze znaną w budownictwie z ziemi regułą wpływu zawartości wody na wytrzymałość wyrobów.

Najlepsze wyniki wytrzymałościowe uzyskano – niezależnie od zawartości cementu – w przypadku gliny czarnej. Może to być związane z faktem dość wysokiej zawartości kaolinitu w tej glinie (ok. 8,5%) – wyższej 3-5 krotnie niż w pozostałych glinach. Kaolinit, jako pucolana ma zdolność do reakcji z produktami hydratacji cementu, co może prowadzić do wzrostu wytrzymałości. Wniosek ten jest tym bardziej uzasadniony, że w przypadku mieszanek ziemi bez dodatku cementu wyniki wytrzymałościowe wszystkich glin są bardzo zbliżone (od 1,77 do 1,9 MPa), zaś wraz ze wzrostem dodatku cementu różnice w wartościach wytrzymałości na ściskanie pogłębiają się.

PODZIĘKOWANIA

Autorzy składają serdeczne podziękowania firmie PROCERBUD za udostępnienie glin do badań laboratoryjnych. Podziękowania kierowane są również do Patryka Ruskowskiego, Macieja Kowańskiego, Martynty Kałużki i Karoliny Przybyłek – studentów Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej – za pomoc przy pracach laboratoryjnych oraz do dr Ireneuszowa Gawriuczenkova i dr Macieja Maślakowskiego za opracowanie i udostępnienie wyników analizy składu mineralnego glin użytych w badaniach.

Summary: The article describes the results of research on the compressive strength of rammed earth samples that differed from each other with regards to the type of loam used for the mixture and the amount of the stabilizer. Portland cement CEM I 42,5R was used as the stabilizer. The research and the analysis of the results were based on foreign publications, the New Zealand norm NZS 4298:1998, the American standard NMAC14.7.4 and archival Polish standards from the 1960's that dealt with earth material.

Literatura

- [1] Beckett C. T. S., Augarde C. E. *The effect of climate on the unconfined compressive strength of rammed earth Unsaturated Soils: Research and Applications*, pp 287-292, 2012
- [2] Construction Industries Division of the Regulation and Licensing, *New Mexico Earthen Building Materials Code, 14.7.4NMAC Housing and Construction*, Santa Fe, New Mexico, 2006
- [3] Hall M., *The mechanisms of moisture ingress and migration in rammed earth walls*, PHD thesis, Sheffield Hallam University, UK, 2004
- [4] Hall M., Dierbib Y. *Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency*, *Construction and Building Materials* 18: 281-286, 2004
- [5] Houben H, Guillaud H. *Earth construction – a comprehensive guide*. Second ed. London: Intermediate Technology Publications, 1996.
- [6] Maniatidis V., Walker P., *A review of Rammed Earth Construction, Innovation Project "Developing Rammed Earth for UK Housing"*, Natural Building Technology Group, Department of Architecture & Civil Engineering, University of Bath, 2003
- [7] Standards New Zealand. *NZS 4298: 1998 Materials and workmanship for earth buildings – incorporating amendment no. 1. Standards New Zealand*, Wellington, New Zealand, 1998