

dr inż. Tomasz Pytlowany^{1)*}

ORCID: 0000-0001-5545-5465

prof. dr hab. inż. Krzysztof Chmielowski²⁾

ORCID: 0000-0001-9758-0854

dr hab. inż. Izabela Skrzypczak³⁾

ORCID: 0000-0002-3646-6924

dr inż. Andrzej Studziński³⁾

ORCID: 0000-0002-6551-9490

mgr inż. Daniel Bacewicz

Wybrane właściwości fizykomechaniczne mieszanek kruszywowo-bentonitowych

Selected physicalmechanical properties of aggregate-bentonite mixtures

DOI: 10.15199/33.2022.11.47

Streszczenie. Mieszanki kruszywowo-bentonitowe są coraz powszechniej stosowanym rozwiązaniem do stabilizacji oraz uszczelnienia obiektów w inżynierii środowiska i budownictwie, np. składowiska, wały przeciwpowodziowe, zapory ziemne, torowiska drogowe czy kolejowe, a także różnego rodzaju obiekty kubaturowe. W artykule przedstawiono wyniki wybranych badań właściwości fizykomechanicznych mieszanek na bazie wybranego kruszywa i bentonitu. Przeprowadzone badania wykazały, że mieszanki kruszywowo-bentonitowe można uznać za przydatne w budownictwie, m.in. do stabilizacji wykopów.

Słowa kluczowe: mieszanki kruszywowo-bentonitowe; kąt tarcia wewnętrznego; spójność; pęcznienie; współczynnik filtracji.

Abstract. Aggregate-bentonite mixtures are an increasingly widely used solution for stabilization and sealing of both environmental and construction engineering facilities, e.g. landfills, flood embankments, earth dams, road and railway tracks, as well as various types of cubature structures. The article presents the results of selected studies of the physical and mechanical properties of mixtures developed in various proportions based on aggregate and bentonite. The conducted research has shown that the aggregate-bentonite mixtures in question can be considered useful in construction, e.g. for the stabilization of excavations.

Keywords: aggregate-bentonite mixtures; internal friction angle; cohesion; swelling; filtration coefficient.

Projektowanie mineralnych mieszanek bentonitowo-kruszywowych staje się coraz powszechniej stosowanym rozwiązaniem technologicznym. Mogą być stosowane zarówno do stabilizacji, jak i uszczelniania obiektów [1, 2], w tym również tak wymagających jak składowiska odpadów radioaktywnych [3]. O stabilizacji czy doszczelnieniu gruntów naturalnych za pomocą bentonitu decyduje nie tylko rodzaj inwestycji i jej lokalizacja, ale także koszty. Zgodnie z [4] istotnego znaczenia nabiera wybór z przekroju geotechnicznego warstwy gruntu nadającego się do opracowania mieszanki gruntowo-bentonitowej lub kruszywowo-bentonitowej [5]. Jednak o ekonomicznej i technologicznej wydajności opracowanej mieszanki decyduje wiele aspektów. Na koszty wpływać będzie bowiem zarówno procentowa zawartość bentonitu, jak i zaproponowana technologia wykonania, ułożenia oraz

wbudowania mieszanki. Dodatek bentonitu w przypadku grubo uziarnionych gruntów niespoistych jest bez wątpienia większy, ale technologia mieszania i układania mieszanki, jak również koszty kontroli jakości w trakcie wykonawstwa są mniejsze. Natomiast w gruntach mało spoistych stosowana jest najczęściej kosztowniejsza technologia przygotowania mieszanki [4].

W każdym przypadku wybór zarówno gruntu/kruszywa, jak i rodzaju bentonitu oraz ustalenie składu mieszanki bentonitowo-gruntowej, w tym zawartości bentonitu, powinien być potwierdzony badaniami laboratoryjnymi [6÷10], a oznaczenie parametrów mieszanek gruntowo-bentonitowych wykonane zgodnie z procedurami zawartymi w normatywach geotechnicznych.

W artykule przedstawiono wybrane badania mieszanek kruszywowo-bentonitowych o różnych proporcjach piasku oraz bentonitu.

Metoda badań

Mieszanki kruszywowo-bentonitowe powstały na bazie dwóch bazowych rodzajów kruszyw oraz różnego pro-

centowego udziału bentonitu Hekobent, o zawartości montmorylonitu >65%. Bazami były piaski o frakcji 0,0÷0,4 mm (pierwsza grupa mieszanek) oraz 0,4÷1,2 mm (druga grupa mieszanek). Kruszywo pochodziło z Zakładu Eksploatacji Kruszyw w Lipiu (Podkarpacie), było wyflukane, wyselekcjonowane oraz osuszone. W przypadku pierwszej grupy mieszanek dodatek bentonitu wynosił 6/8/10/12% masy piasku drobnego, natomiast dla drugiej 6/8/10% masy piasku (fotografia).

Tak opracowane mieszanki poddano badaniom obejmującym wyznaczenie m.in. wskaźnika pęcznienia w aparacie Wasiliewa, wartości kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności na podstawie badań przeprowadzonych w aparacie bezpośredniego ścinania.

Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań przedstawiono w tabelach 1 i 2 oraz na rysunkach 1 i 2.

Wskaźnik pęcznienia zwiększa się wraz ze zwiększaniem się zawartości bentonitu. Wzrost ten jest większy w przypadku mieszanek na bazie piasku o granulacji 0÷0,4 mm (piasku drobniej-

¹⁾ Karpaska Państwowa Uczelnia w Krośnie

²⁾ Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji

³⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

* Adres do korespondencji:

tomasz.pytlowany@kpu.krosno.pl

a) grupa pierwsza: piasek 0,0–0,4 mm + bentonit w ilości 6/8/10/12%



b) grupa druga: piasek 0,4–1,2 mm + bentonit w ilości 6/8/10%



Opracowane mieszanki kruszywowo-bentonitowe
Prepared aggregate-bentonite mixtures

Tabela 1. Wyniki badań uzyskane z aparatu Wasiliewa oraz wyznaczone parametry pęcznienia

Table 1. Test results obtained from the Vasiliev apparatus and the determined swelling parameters

Grupa mieszanki	Udział bentonitu [%]	Wilgotność pęcznienia – w _k [%]	Wskaźnik pęcznienia – Ep [%]	Średnia wilgotność pęcznienia – w _{k-śr} [%]	Średni wskaźnik pęcznienia – Ep-śr [%]
Grupa pierwsza: piasek 0,0–0,4 mm + bentonit	6	32,91 32,31	5,80 5,70	32,61	5,75
	8	34,11 34,61	6,70 9,70	34,36	8,20
	10	37,41 37,04	11,40 13,90	37,23	12,65
	12	47,45 38,77	13,60 14,70	43,11	14,15
Grupa druga: piasek 0,4–1,2 mm + bentonit	6	29,60 29,30	1,10 1,40	29,45	1,25
	8	32,22 32,67	6,90 6,50	32,95	6,70
	10	34,35	6,80	33,86	7,30
		33,38	7,80		

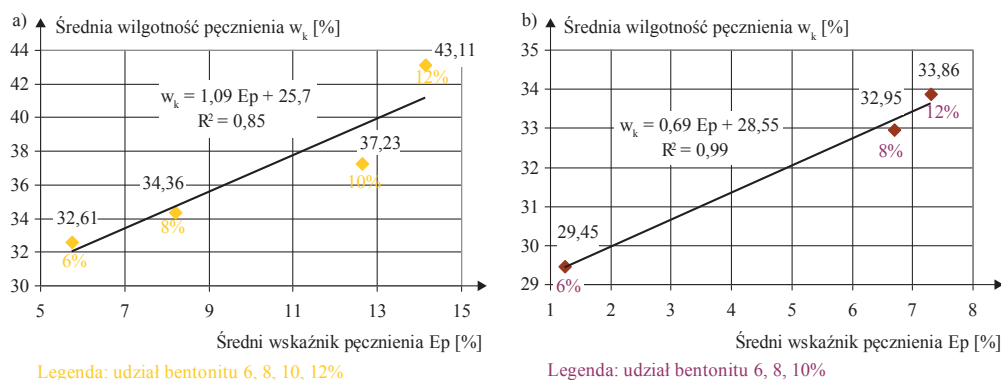
szym) i udziale bentonitu 6/8/10/12%. Wskaźnik pęcznienia wynosił odpowiednio 5,75/8,20/12,65/14,15%. Natomiast w przypadku próbek grupy drugiej, na bazie piasku o granulacji 0,4÷1,2 mm i udziale bentonitu 6/8/10% uzyskano wskaźnik pęcznienia 1,25/6,70/7,30%. W przypadku drugiej grupy mieszanek, większa porowatość materiału bazowego (faza gazowa) znacznie zmniejsza efekt pęcznienia minerałów ilastych zawartych w bentonicie. Stwierdzono również, że mieszanki tej grupy wykazały mniejszą wilgotność pęcznienia.

W przypadku badania wytrzymałości na ścinanie mieszanki grupy pierwszej wykazały zwiększenie spójności wraz ze zwiększaniem się zawartości bentonitu. Dodatek 12% sprawił, że spójność osiągnęła aż 19,42 kPa. Wartość kąta tarcia wewnętrznego wynosiła 28,41÷32,36 i była mniejsza w przypadku próbek o większej zawartości bentonitu. Natomiast mieszanki drugiej grupy wykazują mniejszą dynamikę zwiększenia spójności (z 4 do 5,59%). Zaobserwowano również zwiększenie kąta tarcia wewnętrznego (z 32,56 do 34,79%). W tej grupie mieszanek udział kąta tarcia wewnętrznego decyduje o wytrzymałości. Natomiast udział spójności mieszanek jest niewielki, bo w przypadku dodatku 10% bentonitu wynosi tylko 5,59%. Mimo dodatku bentonitu mieszanka zachowuje się nadal podobnie jak grunt niespoisty. W przypadku pierwszej grupy, po dodaniu bentonitu działanie sił spójności było bardziej wydajne. Efekt ten jest zapewniony przez odpowiednią granulację materiału bazowego (duża zawartość piasku o małej granulacji). Drobniejszy materiał kwarcowy lepiej zespaja się z bentonitem. Taką mieszankę łatwiej też zhomogenizować. Jest to szczególnie zauważalne na etapie przygotowania próbek.

Tabela 2. Wyniki badań uzyskane z aparatu bezpośredniego ścinania oraz wyznaczone parametry mechaniczne

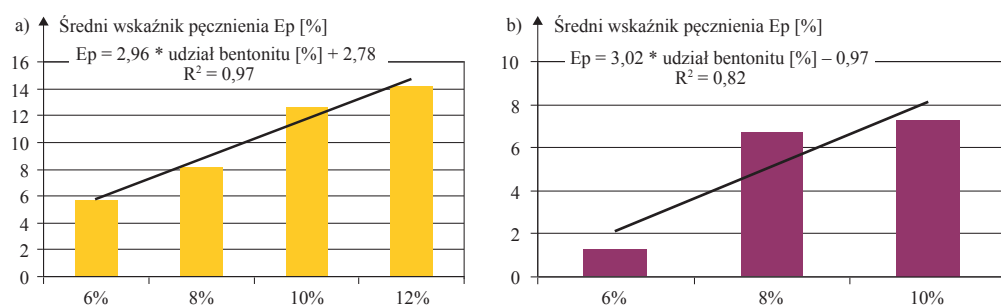
Table 2. Test results obtained from the direct shear apparatus and determined mechanical parameters

Grupa mieszanki	Udział bentonitu [%]	Kąt tarcia wewnętrznego	Tangens kąta tarcia wewnętrznego		Spójność cu [kPa]	Średnia wartość kąta tarcia wewnętrznego	Średnia spójność Cu [kPa]
		φu [rad]	tan φu [°]	[-]		φu [°]	
Grupa pierwsza: piasek 0,0–0,4 mm + bentonit	6	0,530	30,368	0,586	3,595	30,39	3,51
		0,531	30,415	0,587	3,431		
	8	0,560	32,091	0,627	7,902	32,36	7,55
		0,570	32,637	0,640	7,203		
10	0,491	28,116	0,534	15,325	28,41	14,98	
	0,501	28,707	0,548	14,626			
12	0,500	28,631	0,546	18,828	28,65	19,42	
	0,500	28,669	0,547	20,011			
Grupa druga: piasek 0,4–1,2 mm + bentonit	6	0,530	30,368	0,586	3,595	32,56	4,00
		0,607	34,753	0,694	4,407		
	8	0,559	32,028	0,626	4,190	33,13	4,65
		0,597	34,234	0,680	5,106		
	10	0,607	34,787	0,695	5,590	34,53	5,94
		0,598	34,268	0,681	6,289		



Rys. 1. Zależność średniej wartości wilgotności pęcznienia od wskaźnika pęcznienia w przypadku mieszanek: a) grupy pierwszej; b) grupy drugiej

Fig. 1. The relationship between the mean values on the swelling moisture and the swelling index for mixtures: a) the first group; b) the second group



Rys. 2. Zależność wskaźnika pęcznienia od zawartości bentonitu w przypadku mieszanek: a) grupy pierwszej; b) grupy drugiej

Fig. 2. The dependence of the swelling index on the bentonite content for the mixtures of: a) the first group; b) the second group

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że opracowane mieszanki kruszywowo-bentonitowe w przypadku grupy pierwszej na bazie piasku mogą stanowić efektywny materiał do zabezpieczania wykopów. Zastosowany w mieszankach bentonit to materiał ekspansywny zawierający dużą ilość minerału montmorylonitowego. Udział frakcji drobnej kruszywa wzmacnia niekorzystne dla podłoża siły pęcznienia. Zjawisko to jest zauważalne w badaniach pierwszej grupy mieszanek. W mieszankach drugiej grupy, gdzie bazę stanowiło kruszywo o granulacji $0,4 \div 1,2$ mm, obecność minerałów ilastych wywołuje znacznie mniejsze pęcznienie. Dodatek bentonitu do gruntu niespoistego powoduje zwiększenie spójności, zwiększając wytrzymałość gruntu, ale może też spowodować spadek wartości kąta tarcia wewnętrznego.

Bentonit zmieszany z gruboziarnistym piaskiem zmniejsza skurcz i ściśliwość oraz zwiększa wytrzymałość i stabilność

mieszanki. Wybór kruszywa najlepiej nadającego się do efektywnej mieszanki kruszywowo-bentonitowej jest możliwy tylko na podstawie odpowiednio przeprowadzonych badań laboratoryjnych. Należy podkreślić, że wybór ten zawsze podyktowany jest ekonomią. Na koszty wpływać będzie zarówno procentowa zawartość bentonitu w składzie mieszanki, przyjęcie odpowiedniej technologii wykonania, a także ułożenia mieszanki w miejscu wbudowania. Dodatek bentonitu w grubo uziarnionych gruntach niespoistych jest wprawdzie większy, ale zgodnie z [1] technologia mieszania i układania mieszanki, jak również koszty kontroli jakości w trakcie wykonawstwa są mniejsze. Zaletą mieszanek bentonitowo-piaskowych zamiast naturalnej gliny zastosowanej w przegrodzie jest to, że mają one mniejszy skurcz po wyschnięciu i są mniej podatne na uszkodzenia przez mróz. Podczas wysychania zmniejsza się wskaźnik pustych przestrzeni bentonitu, co zapobiega dużemu skurczowi i zapewnia dużą wytrzymałość.

Literatura

- [1] Kockar M, Akgun H, Akturk O. Preliminary Evaluation of a Compacted Bentonite/Sand Mixture as a Landfill Liner Material. *Journal of Solid Waste Technology and Management*. 2005; 31(4):187-192.
- [2] Akgun H, Kockar M, Akturk O. Evaluation of a compacted bentonite/sand seal for underground waste repository isolation. *Environmental Earth Sciences*. 2006; <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0212-6>.
- [3] Holopainen P. Crushed aggregate-bentonite mixtures as backfill material for repositories of low- and intermediate level radioactive waste. *Engineering Geology*. 1985; [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(85\)90014-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(85)90014-6).
- [4] Cichy W, Bryk J. Doszczelnianie gruntów naturalnych za pomocą bentonitu. Etap III. Analiza wymagań i zaleceń dotyczących projektowania doszczelniania gruntów naturalnych za pomocą bentonitu. Analiza wymagań dotyczących kontroli jakości robót związanych z doszczelnianiem gruntów naturalnych za pomocą bentonitu. Gdańsk, 2006 r. https://www.zmbzura.pl/zalaczniki/30/Doszczelnianie_gruntow_bentonitem.pdf. 29.09.2022.
- [5] Navarro V, Cabrera V, De la Morena G, Asensio L, Yustres A, Torres-Serra J. A new double-porosity macroscopic model of bentonite free swelling. *Engineering Geology*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106725>.
- [6] Kumar U, Saikrishnamacharyulu I. Effect of Bentonite Blend on the Compressive Strength of Various Concrete Mixes. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2021; <https://doi.org/10.17577/IJERTV10IS040258>.
- [7] Akcanca F, Aytakin M. Effect of wetting – drying cycles on swelling behavior of lime stabilized sand–bentonite mixtures. *Environmental Earth Sciences*. 2012; <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1207-5>.
- [8] Mohammadi A., Ebadi T., Ahmadi M. Effect of Bentonite Addition on Geotechnical Properties of Oil-Contaminated Sandy Soil. *Journal of Civil Engineering and Construction*. 2018; <https://doi.org/10.32732/jceec.2018.7.4.153>.
- [9] Kokoszka W., Skrzypczak I., Wilk K.: Analysis of geotechnical properties of miocene deposits of the Carpathian Foredeep. *Civil And Environmental Engineering Reports*, 2018; <https://doi.org/10.2478/ceer-2018-0051>.
- [10] Właściwości mechaniczne gruntów. <http://www.tsbudowa.eu/wlasciwosci-mechaniczne-gruntow>, dostęp 19.09.2022.

Przyjęto do druku: 22.09.2022 r.