Karolina KOŚ¹
Eugeniusz ZAWISZA²

CHARAKTERYSTYKA GEOTECHNICZNA OSADÓW DENNYCH ZBIORNIKA RZESZOWSKIEGO

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości geotechnicznych osadów dennych Zbiornika Rzeszowskiego. Przebadano próbki osadów dennych pobranych w cofce zbiornika, powyżej i poniżej wlotu potoku Strug oraz przy stopniu. Osady sklasyfikowano jako materiał pylasty, organiczny, w stanie płynnym. Materiał uśredniony, który powstał przez zmieszanie wszystkich próbek osadów, sklasyfikowano jako pył kilkufrakcyjny, słabo przepuszczalny, o podwyższonej zawartości części organicznych oraz stosunkowo wysokich wartościach parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie i dużej ściśliwości.

Słowa kluczowe: zbiorniki zaporowe, osady denne, charakterystyka geotechniczna

1. Wprowadzenie

Istnienie dużych wielozadaniowych zbiorników jest w Polsce niezbędne [2]. Zbiorniki zaporowe służą retencji wody, pełnią funkcję przeciwpowodziową, rekreacyjną, zapewniają uregulowany odpływ poniżej zapory oraz produkcję ekologicznej energii elektrycznej. Zbiorniki retencyjne zapewniają źródło wody, tak istotnej zwłaszcza w okresach długotrwałych susz, które coraz częściej występują na terenie Polski. Aby zbiorniki zaporowe prawidłowo spełniały te funkcje, niezbędna jest znajomość pojemności retencyjnych oraz dyspozycyjnych zasobów wody, zatem musi być brany pod uwagę proces zamulania, który w sposób istotny wpływa na te parametry.

Zamulanie zbiornika wodnego to całokształt procesów morfologicznych prowadzących do stopniowego zmniejszania się jego pojemności [7]. Proces ten obejmuje sedymentację rumowiska transportowanego przez dopływy oraz w znacznym mniejszym stopniu – akumulację materiału pochodzącego z abrazji brzegów.

¹ Autor do korespondencji: dr inż. Karolina Koś, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, tel. (012) 6624160, email: karolinasudyka@wp.pl.

² dr hab. inż. Eugeniusz Zawisza, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, email kmgibz@ar.krakow.pl

Proces zamulania powoduje w zbiornikach wodnych szereg negatywnych skutków, utrudniając tym samym ich prawidłowe funkcjonowanie:

- zmniejszanie się pojemności retencyjnej, co ma szczególne znaczenie w przypadku zbiorników, których podstawową funkcją jest ochrona przeciwpowodziowa;
- utrudnione jest prowadzenie prawidłowej gospodarki wodnej
- w części wlotowej do zbiornika następuje spłylenie i intensywne zarastanie roślinnością, co w czasie wezbrania powoduje podtopienie lub zalanie terenów przyległych;
- przy niskich stanach wody osady dennie mają negatywny wpływ na jej jakość, co ma szczególne znaczenie w przypadku zbiorników, które są źródłem wody pitnej;
- następuje ograniczenie funkcji rekreacyjnych zbiornika – osady dennie powodują zmętnienie wód, przez co zmniejsza się aktywność turystyczno – rekreacyjna;
- osady mogą być siedliskiem wielu zanieczyszczeń – metali ciężkich, pestycydów oraz szkodliwych związków chemicznych;
- woda wypływająca ze zbiornika pozbawiona jest w większości rumowiska, co powoduje przyspieszoną erozję dna rzeki poniżej zapory, a to skutkuje obniżeniem zwierciadła wody w korycie i w gruncie, przesuszeniem terenów przyległych oraz odsłonięciem fundamentów mostów i nadbrzeży, co często doprowadza do zagrożenia struktury konstrukcji hydrotechnicznych [4].

Ze względu na wymienione negatywne skutki zamulania sztucznych zbiorników wodnych istotne jest ich uwzględnienie zarówno na etapie projektowania jak i eksploatacji. W zbiornikach istniejących pomocne może być rozpoznanie właściwości geotechnicznych i chemicznych zalegających osadów co ułatwi podjęcie decyzji co do ewentualnego wydobycia i zagospodarowania osadów.

2. Ogólna charakterystyka Zbiornika Rzeszowskiego

Stopień Wodny Rzeszów został zbudowany w roku 1973 w 63,7 km rzeki Wisłok. Powstały powyżej stopnia zbiornik wodny miał zapewnić prawidłową eksploatację ujęć wody dla miasta Rzeszowa, ochronę przeciwpowodziową oraz rekreację. Zbiornik wodny pierwotnie miał pojemność 1,8 mln m³ i powierzchnię zalewu 68,2 ha [12]. Poza wodami Wisłoka zbiornik zasilany jest dodatkowo wodami rzeki Strug, która jest jego drugim bezpośrednim dopływem. Całkowita powierzchnia zlewni Wisłoka wynosi 3528,2 km² natomiast powierzchnia cząstkowa zlewni zbiornika wynosi 2060,7 km² co stanowi ponad 58% jego dorzecza [13]. Wisłok bierze swój początek na terenach, które zaliczane są do obszarów górskich i podgórskich. Przepływa przez Doły Jasielsko-Sanockie, Pogórze Strzyżowskie, Pogórze Dynowskie, a następnie Rynną Pod-

karpacką i doliną Sanu do ujścia. Na obszarze objętym zlewnią występują różne rodzaje utworów glebowych o zróżnicowanych klasach bonitacyjnych; w przeważającej części są to gleby słabo przepuszczalne, brunatne i pyłowe oglejone oraz mady oglejone o składzie mechanicznym glin ciężkich i pyłów ilastych [5]. Znaczący jest udział użytków rolnych w całej zlewni rzeki Wisłok, gdyż wynosi on około 70%, z czego grunty orne zajmują 53,9%, sady 1,8%, a łąki i pastwiska 14,3% [5]. Użytki leśne zajmują niewiele ponad 20% całej powierzchni zlewni. W górnych partiach zlewni, na obszarze Beskidu Niskiego udział łąk i pastwisk jest większy (25–30 %), są to głównie tereny nadrzeczne lub połoniny.

Proces zamulania przebiegał w Zbiorniku Rzeszowskim bardzo intensywnie. Obecnie jest on załadowany w około 60%, dlatego funkcje, do których został zbudowany zostały w znacznym stopniu ograniczone. Szacuje się, że w wyniku przeprowadzonego odmulania może zostać wydobytych około 1,5 mln m³ osadów [14].

3. Zakres i metodyka badań

Zakres prac obejmował badania terenowe przeprowadzone na zbiorniku oraz badania laboratoryjne parametrów geotechnicznych próbek pobranych w trakcie badań terenowych. Próbki osadów dennych Zbiornika Rzeszowskiego pobrano w czasie dwóch wyjazdów terenowych:

- czerwiec 2010 r. – próbki pobrano czerpakiem z łodzi, z czterech miejsc oznaczonych jako 1, 2, 3 i 4, to jest: w cofce zbiornika, powyżej i poniżej wlotu potoku Strug do zbiornika oraz przy stopniu (rys. 1.);
- grudzień 2011 r. – próbki również pobrano czerpakiem z łodzi lub wiadrami w przypadku płytkiego zalegania osadów, z czterech miejsc oznaczonych jako 5, 6, 7 i 8 t.j. w części środkowej i cofkowej zbiornika.

Próbki osadów dennych pobierane były w postaci szlamu, który po przewiezieniu do laboratorium był podsuszany.

W ramach badań laboratoryjnych oznaczono skład granulometryczny, podstawowe parametry fizyczne, wytrzymałość na ścinanie, ściśliwość oraz wskaźnik nośności. Badania przeprowadzono na poszczególnych próbkach oraz na materiale uśrednionym otrzymanym przez zmieszanie wszystkich pobranych próbek osadów. Parametry geotechniczne oznaczono zgodnie z obowiązującymi normami [16, 20]. Wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu określono w aparacie Proctora przy energii zagęszczenia 0,59 J cm⁻³. Granicę płynności oznaczono penetrometrem stożkowym, a granicę plastyczności metodą wałeczowania. Badanie zawartości części organicznych przeprowadzono metodą utleniania. Oznaczenie zawartości węglanu wapnia wykonano metodą Scheiblera, zgodnie z normą [18]. Powierzchnię właściwą oznaczono metodą sorpcji błękitu metylowego, zgodnie z normą [16]. Współczynnik filtracji oznaczono w edometrach na próbkach (d=7,5 cm, h= 1,9 cm) o wilgotności optymalnej i wskaźniku zagęszczenia $I_s=1,00$.

Rys. 1. Lokalizacja poboru próbek osadów dennych w Zbiorniku Rzeszowskim [15]

Fig. 1. Localization of bottom sediments sampling [15]

Wytrzymałość na ścinanie oznaczono w aparacie bezpośredniego ścinania (oznaczono parametry całkowite) w skrzynce o wymiarach 60 x 60 mm, z ramkami pośrednimi, które tworzą strefę ścinania o grubości 4 mm. Próbkę były formowane bezpośrednio w skrzynce aparatu przy wilgotności optymalnej i zagęszczane do osiągnięcia wskaźnika zagęszczenia $I_s=1,00$. Próbkę osadów poddawano obciążeniu o wielkości 50, 100 i 200 kPa, a następnie ścinano przy prędkości $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ do uzyskania 10% odkształcenia poziomego próbki. Obliczenia parametrów wytrzymałościowych wykonano dla wartości maksymalnych naprężeń ścinających ($\max \tau_f$) metodą najmniejszych kwadratów.

Badanie ściśliwości przeprowadzono w edometrach. Próbkę formowano bezpośrednio w pierścionkach ($d = 7,5 \text{ cm}$, $h = 1,9 \text{ cm}$) przy wilgotności optymalnej do uzyskania wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,95$. Próbkę były konsolidowane przy następujących stopniach obciążenia: 12,5, 25, 50, 100, 200 i 400 kPa, następnie odciążane do 12,5 kPa i ponownie obciążane do 400 kPa. Przeprowadzono również badanie na próbkach przygotowanych jak wyżej podano, lecz nawodnionych przed obciążeniem.

Wskaźnik nośności oznaczano zgodnie z [17], przy obciążeniu 22,0 N, na próbkach bezpośrednio po zagęszczeniu oraz po 4 dobach nasycania wodą. W celu określenia wpływu czasu pielęgnacji oraz działania niskich temperatur, wartości wskaźnika nośności oznaczono również po 7 i 28 dobach pielęgnacji próbek bez zamrażania oraz po cyklach zamrażania – odmrażania. Próbkę prze-

znaczone do badań zagęszczane były w cylindrach ($d = 15,0$ cm, $h = 17,5$ cm), a następnie poddawane pielęgnacji zgodnie z tabelą 1. W przypadku pielęgnacji bez cykli zamrażania – odmrażania w czasie ostatnich 4 dób (dla 7-dobowej pielęgnacji) lub 15 dób (dla 28-dniowej pielęgnacji) prowadzono pomiar wysokości próbek w celu oznaczenia pęcznienia.

Tabela 1. Opis pielęgnacji próbek przeznaczonych do badania wskaźnika nośności

Table 1. Samples caring before the bearing ratio test

Parametr	Pielęgnacja próbek
CBR_7	3 doby w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, 1 doba zanurzone 1 cm w wodzie, 3 doby zanurzone całkowicie w wodzie
CBR_7^{Z-O}	3 doby w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, 1 doba zanurzone całkowicie w wodzie, 3 cykle*) zamrażania i odmrażania
CBR_{28}	13 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, 1 doba zanurzone 1 cm w wodzie, 14 dób zanurzone całkowicie w wodzie
CBR_{28}^{Z-O}	13 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, 1 doba zanurzone całkowicie w wodzie, 14 cykli*) zamrażania i odmrażania

*) jeden cykl to 8-godzinne zamrażanie w temperaturze -23°C i 16-godzinne odmrażanie w wodzie w temperaturze pokojowej

4. Wyniki badań i ich analiza

Skład granulometryczny oraz wartości parametrów geotechnicznych poszczególnych próbek osadów przedstawiono na rysunku 2 i w tabeli 2. Na podstawie uziarnienia badane osady można sklasyfikować jako grunty spoiste odpowiadające pyłom oraz pyłom ilastym.

Pyły charakteryzowały się zawartością frakcji piaskowej od około 5 do 16%, pyłowej od 79 do 86 %, a ilowej od około 6% do 10%. Wskaźnik różnoziarnistości wynosił od 7 do 13, średnio ponad 10, zatem można określić badany materiał jako kilkufrakcyjny. W przypadku próbek osadów sklasyfikowanych jako pyły ilaste zawartość frakcji piaskowej wynosiła od 3 do 8%, pyłowej około 77-87%, a ilowej od około 10 do 16%. Wskaźnik uziarnienia wynosił około 11, zatem jest to również materiał kilkufrakcyjny.

Gęstość właściwa szkieletu wahała się od $2,47$ do $2,70\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, dla pyłów wyniosła średnio $2,6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, natomiast dla pyłów ilastych była nieco wyższa i wyniosła średnio $2,63\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Zawartość części organicznych oznaczona metodą utleniania wahała się od 2,2 do 3,5% i nie wykazywała zależności od rodzaju gruntu. Wyższe wartości uzyskano z oznaczenia strat prażenia, od około 2,8 do 5,0% i podobnie jak w przypadku metody utleniania nie stwierdzano znaczących różnic w zależności od rodzaju gruntu. Ze względu na podwyższoną

wartość omawianego parametru ($>2\%$) badane materiały zalicza się do gruntów organicznych.

Wilgotność naturalna była wysoka i wynosiła od 70 do 86% dla pyłów, średnio ponad 79% oraz od 83 do 88% dla pyłów ilastych, średnio 85%. Wskaźnik konsystencji wszystkich próbek wynosił znacznie poniżej 0,25, były zatem w stanie płynnym.

Tabela 2. Parametry geotechniczne osadów dennych Zbiornika Rzeszowskiego

Table 2. Geotechnical parameters of bottom sediments from Rzeszowski Reservoir

Parametr	Wartość dla osadów o uziarnieniu			
	pyłów		pyłów ilastych	
	przedział	średnia	przedział	średnia
Zawartość frakcji [%]:				
- piaskowej, S_a 2–0,063 mm	4,5–15,5	9,2	3,0–8,0	6,16
- pyłowej, S_i 0,063–0,002 mm	79,0–86,5	83,4	76,6–85,0	81,5
- iłowej, C_l $<0,002$ mm	5,5–9,5	7,4	9,5–15,5	12,3
Zawartość cząstek [%]:				
- $<0,075$ mm	89,0–97,0	94,0	94,0–98,0	95,7
- $<0,02$ mm	39,5–49,5	44,0	54,5–64,5	60,5
Wskaźnik różnoziarnistości, C_u	7,0–13,0	10,7	11,0–11,5	11,3
Nazwa gruntu wg [19]	S_i		$clSi$	
Wilgotność naturalna, w_n [%]	70,3–86,1	79,16	83,0–87,6	85,07
Gęstość właściwa szkieletu, ρ_s [$g \cdot cm^{-3}$]	2,47–2,70	2,60	2,62–2,66	2,63
Straty prażenia, I_z [%]	2,88–4,15	3,56	2,80–4,95	3,87
Zawartość części organicznych, I_{om} [%]	2,36–3,32	2,80	2,20–3,51	2,83
Granica płynności, w_L [%]	42,3–50,4	45,00	48,9–53,2	51,17
Granica plastyczności, w_p [%]	27,4–32,1	29,14	28,7–33,5	31,43
Wskaźnik plastyczności, I_p [%]	14,8–18,3	15,86	17,9–21,1	19,73

Rys. 2. Krzywe uziarnienia poszczególnych próbek osadów dennych Zbiornika Rzeszowskiego

Fig. 2.. Granulation curves of each bottom sediment sample from Rzeszowski Reservoir

Granica płynności pyłów wynosiła od ponad 42 do 50%, średnio 45%, natomiast granica plastyczności od ponad 27 do 32%, średnio ponad 29%. W przypadku pyłów ilastych wartości te wyniosły odpowiednio od około 49 do ponad 53%, średnio ponad 51% oraz od około 29 do 34%, średnio ponad 31%. Wskaźnik plastyczności pyłów wynosił od około 15 do ponad 18%, średnio około 16%, natomiast w przypadku pyłów ilastych był nieco większy – od prawie 18 do ponad 21%, średnio około 20%.

Podsumowując można stwierdzić, że osady dennie Zbiornika Rzeszowskiego pod względem geotechnicznym odpowiadają gruntem spoistym o granulacji pyłów i pyłów ilastych, z przewagą pyłów, kilkufrakcyjnych, nisko organicznych. W przypadku wykorzystania osadów do celów budownictwa ziemnego istotne są parametry geotechniczne próby uśrednionej, gdyż w trakcie wydobycia, transportu i składowania osadów nastąpi ich przemieszanie, stąd w dalszej części pracy przedstawiono charakterystykę próby uśrednionej, która powstała przez zmieszanie wszystkich próbek osadów.

4.1. Właściwości fizyczne uśrednionej próby osadów dennych

Uziarnienie próby uśrednionej osadów dennych Zbiornika Rzeszowskiego odpowiadało pyłom o zawartości frakcji piaskowej wynoszącej 8,5%, pyłowej 83% oraz iłowej 8,5% (tab. 3). Wartość wskaźnika różnoziarnistości wynosiła powyżej 13, można je więc określić jako kilkufrakcyjne. Wartość gęstości właściwej wyniosła $2,53 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ i była typowa dla tego rodzaju gruntu.

Tabela 3. Parametry geotechniczne uśrednionej próby osadów dennych

Table 3. Geotechnical parameters of the bottom sediments averaged material

Parametr	Wartość
Zawartość frakcji [%]: - piaskowej, S_a 2-0,063 mm - pyłowej, S_i 0,063 – 0,002 mm - ilowej, C_l <0,002 mm	8,5 83,0 8,5
Nazwa gruntu wg [19]	Si (pył)
Wskaźnik różnoziarnistości, C_u	13,3
Gęstość właściwa szkieletu, ρ_s [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	2,53
Straty prażenia, I_z [%]	4,67
Zawartość części organicznych, I_{om} [%]	3,33
Wilgotność optymalna, w_{opt} [%]	24,8
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, ρ_{ds} [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1,445
Współczynnik filtracji, k_{10} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] przy: - $I_s=0,90$ - $I_s=1,00$	$1,05 \cdot 10^{-8}$ $1,12 \cdot 10^{-9}$
Kapilarność bierna, H_{kb} [cm]	137,1
Powierzchnia właściwa, St [$\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$]	52,44
Odczyn pH	7,30
Zawartość węgla wapnia [%]	4,68
Granica płynności, w_L [%]	40,6
Granica plastyczności, w_p [%]	26,8
Wskaźnik plastyczności, I_p [%]	13,8
Wskaźnik pęcznienia, E_p [%]	26
Pęcznienie swobodne, FS [%]: - wg metody Gibbsa i Holtza - wg metody Sohby'ego.	5 14

Straty prażenia były wysokie i wyniosły prawie 5%, natomiast zawartość części organicznych ponad 3%, przez co osady te należy zakwalifikować do gruntów nisko-organicznych. Substancja organiczna charakteryzuje się wysoką hydrofilnością, przez co wpływa na zwiększenie ściśliwości, plastyczności, właściwości pęczniących, a zmniejszenie wytrzymałości.

Wilgotność optymalna wyniosła prawie 25%, a maksymalna gęstość objętościowa szkieletu – $1,45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Współczynnik filtracji zmniejszał się od $1 \cdot 10^{-8}$ do około $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wraz ze zwiększaniem wskaźnika zagęszczenia od 0,90 do 1,00.

Kapilarność bierna wyniosła prawie 1,4 m. Według klasyfikacji Wiluna [2000] służącej do określania przydatności gruntu jako podłoża nawierzchni drogowych, na podstawie wartości kapilarności biernej osady Zbiornika Rzeszowskiego należy uznać za grunty wysadzinowe. Obecnie do klasyfikacji gruntów pod względem wysadzinowości najczęściej stosowana jest klasyfikacja podana w normie [17] (tab. 4). Podstawowym kryterium jest tu zawartość drobnych cząstek gruntów, a dodatkowymi stosowanymi w przypadkach wątpliwych, wskaźnik piaskowy i kapilarność bierna. Porównując wartości uzyskane dla osadów Zbiornika Rzeszowskiego należy je również określić jako wysadzinowe.

Tabela 4. Klasyfikacja osadów pod względem wysadzinowości

Table 4. Bottom sediments classification considering frost heave

Parametr	Grupy gruntów [17]			Osady denne
	niewysadzinowych	wątpliwych	wysadzinowych	
Zawartość cząsteczek [%]:				
- <0,075 mm	< 15	15-30	> 30	95,0
- <0,02 mm	< 3	3-10	> 10	48,0
Kapilarność bierna, H_{kb} [m]	< 1,0	$\geq 1,0$	> 1,0	1,37
Wskaźnik piaskowy, WP [%]	> 35	25 - 35	< 25	-

Wielkości powierzchni właściwej była niska i wynosiła ponad $52 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Niskie wartości powierzchni właściwej są rezultatem małej zawartości frakcji ilowej, gdyż to głównie minerały ilaste, jako główny składnik kompleksu sorpcyjnego, wpływają na wartość zarówno pojemności sorpcyjnej, jak i powierzchni właściwej.

Odczyn wyniósł około 7,3 można więc określić go jako obojętny, typowy dla osadów dennych zbiorników wodnych.

Zawartość węglanu wapnia była mała i wyniosła 4,7%. Granica płynności wyniosła około 41%, natomiast plastyczności około 27%, stąd materiał cechował się wskaźnikiem plastyczności wynoszącym blisko 14%. Aktywność wg Skempton, wg [20] określona jako wskaźnik aktywności (I_a) wyniosła 1,62, uzyskano zatem wysoką wartość w porównaniu do wartości typowych dla gruntów mineralnych (0,75-1,25) [6].

Wskaźnik pęcznienia oznaczony w aparacie Wasiliewa wyniósł 26%, natomiast swobodne pęcznienie w zależności od metody – 5% i 14%, odpowiednio według metody Gibbsa i Holtza oraz Sohby'ego. Pęcznienie zachodzi w gruntach spoistych ze względu na obecność minerałów ilastych, które charakteryzują się silną hydrofilnością. Badane osady zawierają ponad 8% frakcji ilowej, jest to stosunkowo mała zawartość, zatem uzyskane wartości pęcznienia można uznać za wysokie.

4.2. Wytrzymałość na ścinanie

Wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie badanych osadów były zależne od wilgotności i zagęszczenia (tab. 5). W przypadku osadów o wilgotności optymalnej kąt tarcia wewnętrznego zwiększał się od 23° do prawie 34° odpowiednio do zwiększania wskaźnika zagęszczenia od 0,90 do 1,00. Najwyższą wartość spójności, prawie 43 kPa, uzyskano przy $I_s=0,95$. W przypadku osadów o wilgotności optymalnej, nawodnionych przed ścinaniem (przy $I_s=0,95$) wartość kąta tarcia wewnętrznego (ponad 24°) była nieznacznie większa niż osadów nienawodnionych, natomiast spójności (ponad 17 kPa) znacznie mniejsza (ponad 2-krotnie) niż osadów nienawodnionych.

Tabela 5. Parametry wytrzymałości na ścinanie uśrednionej próby osadów dennych

Table 5. Shear strength parameters of the bottom sediments averaged material

Wskaźnik zagęszczenia	Kąt tarcia wewnętrznego	Spójność
[-]	[°]	[kPa]
$I_s=0,90$	23,1	33,1
$I_s=0,95$	22,3	42,7
$I_s=1,00$	33,5	35,8
$I_s=0,95$ nawodniona	24,3	17,3

4.3. Ścisłość

Czas konsolidacji nienawodnionych osadów pod obciążeniem pierwotnym wynosił 43 doby, w przypadku osadów nienawodnionych, a w przypadku osadów nawodnionych był dużo dłuższy i wynosił 63 doby (tab. 6). Czas konsolidacji pod obciążeniem wtórnym wynosił 15 dób, w przypadku nienawodnionych oraz 22 doby w przypadku osadów nawodnionych. W celu przeprowadzenia analizy parametrów ścisłości osadów nienawodnionych i nawodnionych wartości osiadań całkowitych odniesiono do początkowej wysokości próbek (odkształcenie względne w procentach), natomiast wartości modułów ścisłości podano dla całego zakresu obciążenia: 0 – 0,40 MPa w przypadku mo-

dułów ścisłości pierwotnej oraz 0,0125 – 0,40 MPa w przypadku modułów ścisłości wtórnej. W wyniku analizy stwierdzono, że w zakresie obciążeń pierwotnych odkształcenia osadów zarówno nawodnionych jak i nienawodnionych były duże – ponad 10%. Odkształcenia w zakresie obciążeń wtórnych były dużo mniejsze – 2,7% (osady nienawodnione) oraz 1,7% (osady nawodnione). Wartości modułów ścisłości pierwotnej wyniosły prawie 4 MPa, a modułów ścisłości wtórnej były ponad 5-krotnie większe – rzędu 20 MPa i nie wykazały istotnych różnic między osadami nawodnionymi i nienawodnionymi.

Tabela 6. Parametry ścisłości uśrednionej próby osadów dennych

Table 6. Compressibility parameters of the bottom sediments averaged material

Czas konsolidacji przy obciążeniu [doby]		Odkształcenie przy obciążeniu [%]		Moduł ścisłości [MPa]	
pierwotnym	wtórnym	pierwotnym	wtórnym	pierwotny M_0	wtórny M
osady nienawodnione					
43	15	10,4	2,7	3,86	18,61
osady nawodnione					
61	22	10,5	1,7	3,89	21,80

4.4. Wskaźnik nośności

Wskaźnik nośności oznaczony bezpośrednio po zagęszczeniu próbek, przy wilgotności w strefie penetracji trzpienia około 24%, wyniósł średnio prawie 8% (tab. 7). Po 4-dobowym czasie nasiąkliwości wilgotność zwiększyła się o około 8%, a wskaźnik nośności zmniejszył się do około 3%. Pęcznienie liniowe wynosiło 1,7%. Po 7 dobach pielęgnacji wskaźnik nośności wyniósł około 6%, a pęcznienie 0,5%. Po 7 i 28 cyklach zamrażania – odmrażania wartości wskaźnika nośności były bardzo małe i wyniosły odpowiednio 1,5 i 1%. Po 28-dobowej pielęgnacji wartość wskaźnika nośności wyniosła 8%, a pęcznienie liniowe ponad 0,5%.

Tabela 7. Parametry nośności i pęcznienia uśrednionej próby osadów dennych

Table 7. Bearing ratio and swelling of the bottom sediments averaged material

Parametr	Wilgotność w strefie penetracji trzpienia [%]	Wskaźnik nośności [%]	Pęcznienie liniowe [%]
CBR	23,69	7,7	-
CBR ₄	31,91	3,2	1,72
CBR ₇	31,41	5,7	0,48
CBR ₂₈	27,83	8,0	0,53
CBR ₇ ^{Z-O}	37,61	1,5	-
CBR ₂₈ ^{Z-O}	37,71	1,0	-

Cykle zamrażania i odmrażania miały istotny wpływ na zmianę wartości wskaźnika nośności osadów. W celu określenia zmian wskaźnika nośności w wyniku procesu zamrażania i odmrażania obliczono wskaźnik mrozoodporności [Gruchot 2006] zgodnie z wzorem:

$$n_{CBR}^x = \frac{CBR_x^{Z-O}}{CBR_x} [-] \quad (1)$$

gdzie: CBR_x – wskaźnik nośności po x dobach pielęgnacji bez cykli zamrażanie – odmrażanie (Z-O),

CBR_x^{Z-O} – wskaźnik nośności po x dobach pielęgnacji z cyklami zamrażanie – odmrażanie (Z-O).

Wartość wskaźnika mrozoodporności próbek po 7 dobach pielęgnacji (3 cykle Z-O) wynosiła 0,26. Wydłużenie czasu pielęgnacji do 28 dób (14 cykli Z-O) spowodowało 1,6-krotne zmniejszenie wartości wskaźnika mrozoodporności.

5. Podsumowanie

Osady denne Zbiornika Rzeszowskiego sklasyfikowano pod względem geotechnicznym jako grunty spoiste, kilkufrakcyjne, w stanie płynnym. Wydzielono dwa rodzaje osadów – pyły oraz pyły ilaste. Dominacja frakcji pylastej w osadach dennych związana jest z kilkoma czynnikami - położeniem zbiornika w dolnym biegu rzeki, występowaniem Zbiornika Besko w górnym biegu rzeki Wisłok, który zatrzymuje grubsze frakcje oraz małymi prędkościami przepływu, typowymi dla rzek i zbiorników nizinnych, gdzie transportowane jest głównie rumowisko unoszone. Materiał uśredniony sklasyfikowano jako pył kilkufrakcyjny, bardzo mało przepuszczalny o podwyższonej zawartości części

organicznych. Przy wilgotności optymalnej i dużym zagęszczeniu ($I_s = 1,00$) odznacza się on stosunkowo dużymi wartościami parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie oraz (przy $I_s = 0,95$) bardzo dużą ściśliwością.

Literatura

- [1] Bednarczyk S., Jarzębińska T., Mackiewicz S., Wołoszyn E. 2006. Vademecum ochrony przeciwpowodziowej. Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej. Gdańsk www.kzgw.gov.pl
- [2] Gruchot A. 2006. Wpływ stabilizacji wybranych popiołów na wartość wskaźnika nośności. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budownictwo. Zeszyt 28, tom 1, 99-108
- [3] Koś K., Zawisza E. 2012. Ocena przydatności osadów dennych Zbiornika Rzeszowskiego do budowy uszczelnień w składowiskach odpadów komunalnych. Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 11 (4), 49-60
- [4] Krzanowski S. 2000. Wpływ retencji zbiornikowej na wybrane elementy środowiska, ze szczególnym uwzględnieniem zmian reżimu przepływów w rzece poniżej zbiornika. Zeszyty Naukowe AR, 259, 28-32.
- [5] Madeyski M., Michalec B., Tarnawski M. 2008. Zamulanie małych zbiorników wodnych i jakość osadów dennych. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, monografia, nr 11, Polska Akademia Nauk. Kraków
- [6] Myślińska E. 1998. Laboratoryjne badania gruntów. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
- [7] Rzętała M. A. 2003. Procesy brzegowe i osady denne wybranych zbiorników wodnych w warunkach zróżnicowanej antropopresji. Katowice. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego
- [8] Ochrona przed powodzią. 1975. Praca zbiorowa NOT. Dział Szkolenia i Wydawnictw. Warszawa
- [9] Wiłun Z. 2000. Zarys geotechniki. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa
- [10] Witek T., Koter M. Mapa glebowo-rolnicza Polski w skali 1:1000000. Wyd. Geolog., Warszawa 1975.
- [11] Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo. 2010 Zadanie 8: Przeciwdziałanie degradacji polskich zbiorników retencyjnych. Raport syntetyczny z prac wykonanych w 2009 r. Koordynator zadania E. Sieński. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Państwowy Instytut Badawczy. www.klimat.imgw.pl
- [12] www.krakow.rzgw.gov.pl. [data dostępu: 11 luty 2013 r.]
- [13] www.wrotapodkarpackie.pl. [data dostępu: 13 lipiec 2013 r.]
- [14] www.tvp.pl/rzeszow. [data dostępu: 13 styczeń 2014r.]
- [15] www.rzeszow.pl. [data dostępu: 11 luty 2013 r.]
- [16] PN-B-04481: 1988 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- [17] PN-S-02205: 1998 Drogi samochodowe. Roboty zimne. Wymagania i badania.

- [18] PN-ISO 10693: 2002 Jakość gleby -- Oznaczanie zawartości węglanów -- Metoda objętościowa
- [19] PN-EN-ISO 14688: 2004 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów.
- [20] PN-EN-ISO TS 17892: 2009 Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów.

GEOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF BOTTOM SEDIMENTS FROM RZESZOWSKI RESERVOIR

S u m m a r y

The paper presents geotechnical parameters of bottom sediments from Rzeszowski Reservoir. Tested sediments samples were taken from the backwater area, below and above the Strug stream mouth and near the dam. Sediments were classified as silty organic material in a liquid state. The averaged material, which was created by mixing all the sediments samples, was classified as silt; it had a low permeability, high organic matter content, relatively high shear strength parameters and high compressibility.

Keywords: dam reservoirs, bottom sediments, geotechnical characteristics

Przesłano do redakcji: 3.02.2014

Przyjęto do druku: 1.12.2015

DOI: 10.7862/rb.2015.150