

Filtracja wody przez spoiste grunty zwałowe oraz ich zdolności izolacyjne na przykładzie odkrywkowej kopalni siarki w Machowie

Stanisław Rybicki*, Henryk Woźniak*, Paweł Lenduszek*

W projekcie likwidacji odkrywkowej kopalni siarki w Machowie przewiduje się utworzenie zbiornika wodnego w miejscu dotychczasowego wyrobiska. Ma on powstać w wyniku napełnienia wyrobiska wodą pobraną z Wisły. Samoczynne wypełnianie się wyrobiska wodami złożowymi, z wapieni siarkonośnych nie jest tu brane pod uwagę z powodu ich wysokiego zmineralizowania (do ok. 15 g/dm³), a zwłaszcza zawartości toksycznego siarkowodoru w ilości ok. 300 mg/dm³. Aby zapobiec mieszaniu się wody napełniającej zbiornik z obecnie depresjonowanymi wodami złożowymi, niezbędne jest uszczelnienie zarówno dna, jak i boków czynnego wyrobiska. Do tego celu jest przewidywane użycie iłów krakowieckich z nadkładu złoża oraz zgromadzonych na zwałowisku wewnętrznym odkrywki. Warstwa izolacyjna iłów ma podlegać tylko samoczynnemu uszczelnieniu pod własnym ciężarem bez dodatkowych zabiegów zagęszczających. Powstał więc problem oceny przepuszczalności gruntu tej warstwy w zależności od jej obciążenia (grubości warstwy) w warunkach oddziaływania wody zawartej w zbiorniku. Prezentowane poniżej wyniki badań, chociaż dotyczą tylko rozdrobnionych iłów krakowieckich jako gruntu zwałowego, mogą być ekstrapolowane na inne spoiste grunty zwałowe o podobnym charakterze.

Krótką charakterystyka iłów krakowieckich

Trzeciorzędowe iły krakowieckie tworzą w rejonie kopalni Machów około 40–60 m grubości nadkład wapieni siarkonośnych. Pod względem litologicznym są reprezentowane przez laminowane i warstwowane iłowce oraz mułowce o stosunkowo małym stopniu diagenety. Laminacja zaznacza się zmianami barwy oraz składu granulometrycznego tych gruntów (laminy ilaste, pylaste i pylasto-piaszczyste o zmiennej zawartości substancji organicznej). Dolna część serii iłów krakowieckich charakteryzuje się zwiększoną zawartością węglanów (wkładki margli), górna zaś wykazuje większe zapiaszczenie.

Pod względem granulometrycznym iły krakowieckie są reprezentowane głównie przez iły (ok. 66%), iły pylaste (ok. 20%) i różne odmiany glin, a zwłaszcza gliny pylaste związane (ok. 14%). Zawartość frakcji piaszczystej w iłach krakowieckich waha się w granicach 1–33% (średnio ok. 9%), frakcji pylastej 36–65% (średnio 48%), a ilastej 26–61% (średnio 43%). Wskazuje to, że iły krakowieckie są gruntami wyraźnie spoistymi, a ich zróżnicowanie granulometryczne w profilu pionowym jest ogólnie niewielkie [1].

Ważną cechą decydującą o przepuszczalności rozdrobnionych iłów krakowieckich (i uszczelniających właściwościach) jest ich współdziałanie z wodą. W warunkach naturalnych iły te pozostają w zwartym i półzwartym stanie konsystencji, lokalnie tylko twardoplastycznym. Wilgotność naturalna iłów waha się od ok. 10 do ok. 30%, wynosząc najczęściej ok. 21–23%. Granica plastyczności i

płynności wynosi odpowiednio 28–33% (średnio 30%) oraz 40–74% (średnio 60%). W kontakcie z wodą iły krakowieckie o wilgotności naturalnej umiarkowanie pęcznią. Objętościowy wskaźnik pęcznienia waha się od 1 do ok. 21% (średnio 6,9%), a po spęcznieniu wilgotność iłów wynosi najczęściej 24–28%. Rozmakanie iłów krakowieckich o wilgotności naturalnej jest niewielkie. Po zamoczeniu ulegają one spekowaniu i rozwarstwieniu, bez wyraźnego lasowania się materiału. Ta stosunkowo mała wrażliwość iłów krakowieckich, w stanie wilgotności naturalnej, na działanie wody wynika głównie ze zwiększonego stopnia ich zdiagenezowania i obecności wapniowego kompleksu sorpcyjnego, zmniejszającego hydrofilność minerałów ilastych. Iły krakowieckie w stanie powietrznosuchym pęcznią znacznie bardziej (objętościowy wskaźnik pęcznienia wynosi 15,8–38%) oraz dość gwałtownie rozmakają wykazując rozpad płytkowy, rzadziej agregatowy.

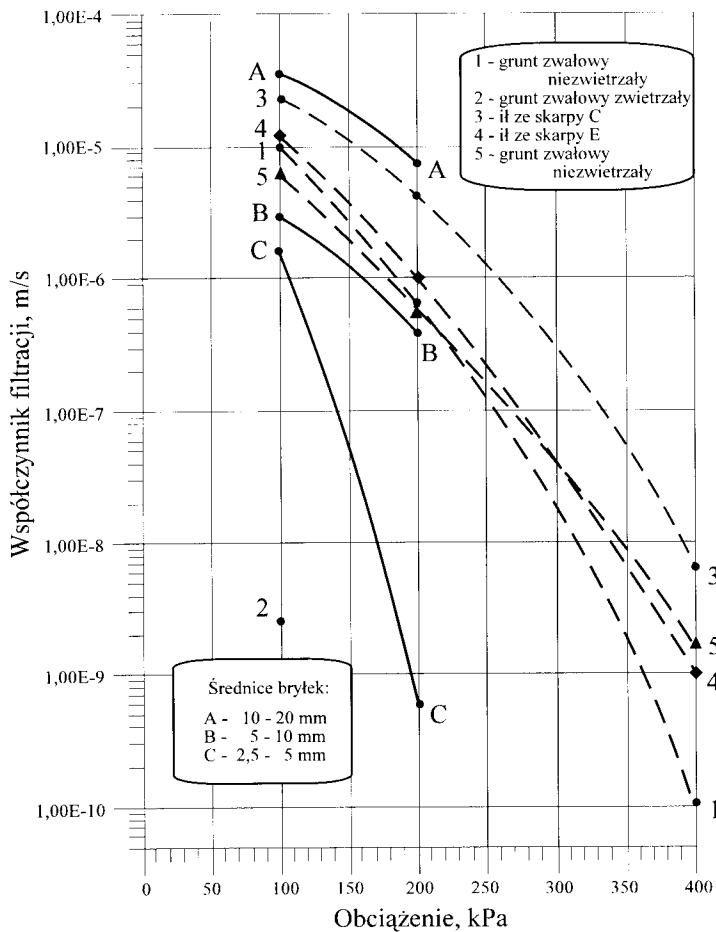
Iły krakowieckie, składowane już od kilkunastu lat na zwałowisku wewnętrznym kopalni Machów, mają zmienione właściwości w stosunku do iłów z nadkładu złoża. Ich wilgotność jest tu nieco większa i waha się od ok. 13 do ok. 43%. W strefach przypowierzchniowej i dolnej zwału, grubości kilku metrów, wilgotność iłów wynosi odpowiednio ok. 25% i ok. 33,6%, w strefie zaś środkowej zwału — o grubości kilkunastu metrów — ok. 22,8% [2]. Podwyższona wilgotność, zwłaszcza w strefie dolnej, jest wynikiem przenikania wód z ciśnieniowego horyzontu złożowego w spąg zwałowiska. W zwałowisku, a zwłaszcza w jego górnej części, iły krakowieckie są częściowo zwietrzałe i ogólnie, przy większej wilgotności, mają większy stopień plastyczności.

Zależność współczynnika filtracji rozdrobnionych iłów krakowieckich od ich zagęszczenia pod obciążeniem

Badaniu poddano rozdrobnione iły krakowieckie z nadkładu złoża oraz z przypowierzchniowej strefy zwałowiska wewnętrznego. Próbkę rozdrobnionych iłów miały nieco zróżnicowaną wilgotność początkową w granicach 23,3–26,2%. Ponadto iły ze zwałowiska wykazywały różny stopień zwietrzzenia i rozlasowania. Wyniki badania przedstawiono na ryc. 1. Można tu zauważyć bardzo wyraźne zmniejszanie się współczynnika filtracji rozdrobnionych iłów wraz ze wzrostem obciążenia, a zatem i zagęszczenia (próbki 1–5). Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego badanych próbek wzrastała bowiem od ok. 1,30–1,50 t/m³, przy obciążeniu 100 kPa, do 1,45–1,58 t/m³, przy obciążeniu 400 kPa (w warunkach zaważnienia po zakończeniu badań filtracji). Należy nadmienić, że gęstość objętościowa szkieletu gruntowego iłów krakowieckich w naturalnym złożu wynosi 1,7–1,8 t/m³.

Różnice współczynnika filtracji przy danej wielkości obciążenia zależą głównie od początkowej wilgotności (konsystencji) oraz stopnia rozdrobnienia (zwietrzzenia) badanych próbek. Wpływ tego ostatniego czynnika był dodatkowo określony na próbkach iłów rozkruszonych o

*Katedra Geologii Inżynierskiej i Geotechniki Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

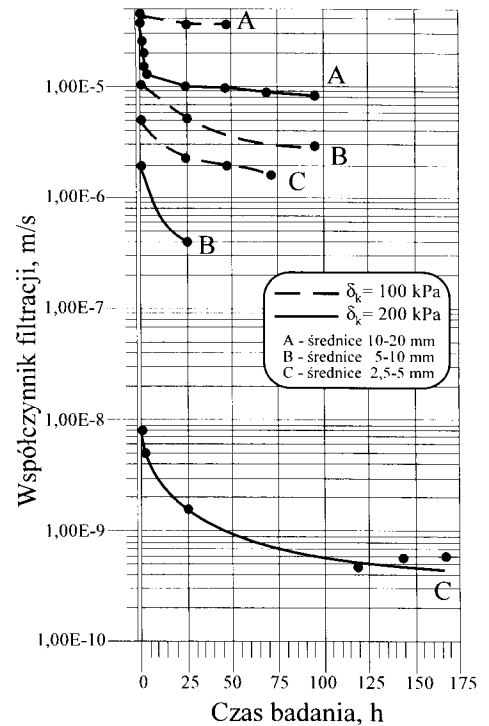


Ryc. 1. Zależność współczynnika filtracji rozdrobnionych ilów krakowieckich od ich zagęszczenia pod obciążeniem

zblizonej wilgotności w granicach ok. 24–26%, lecz o zróżnicowanych wymiarach bryłek i okruchów w zakresie 10–20 mm, 5–10 mm i 2,5–5 mm (próbki A, B, C — ryc. 1). Im mniejsze wymiary bryłek i okruchów iltu, tym mniejszy jest współczynnik filtracji gruntu. Wynika to ze zmniejszania się porowatości efektywnej w miarę zmniejszania wymiarów bryłek iltu, ponieważ gęstość objętościowa wszystkich próbek po zakończeniu badania filtracji była zbliżona.

Warto zauważyć, że w badaniach próbek zaznaczył się wyraźnie wpływ czasu na zmniejszanie się współczynnika filtracji przy tym samym obciążeniu próbek (ryc. 2). Wynika to z nietrwałej struktury gruntu rozdrobnionego (zwałowego) i postępującego procesu rozmakania oraz konsolidacji tego gruntu w trakcie badania współczynnika filtracji. Można więc mówić o doraźnej wartości tego współczynnika w warunkach nie zakończonej konsolidacji oraz o wartości trwałej po całkowitym zakończeniu procesu konsolidacji w danych warunkach obciążenia.

Uzupełnieniem i rozszerzeniem badań laboratoryjnych były badania na zwałowisku wewnętrznym kopalni Machów. Wykop o wymiarach 5 x 5 m i głębokości 1 m, wykonany w gruncie zwałowym, zalewano wodą, mierząc czas i ilość wody infiltrującej w zwał przez dno i boki wykopu. Przed zalewaniem z dna wykopu odwiercono otwór Z-1 o głębokości 15 m i pobrano z niego próbki o nienaruszonej strukturze. Na próbkach oznaczano niektóre początkowe właściwości gruntu zwałowego (ryc. 3). Po zalewaniu wykopu, odwiercono drugi otwór Z-2 do tej samej głębokości jak otwór pierwszy i pobrano próbki o nienaruszonej strukturze, poddając je tym samym badaniom

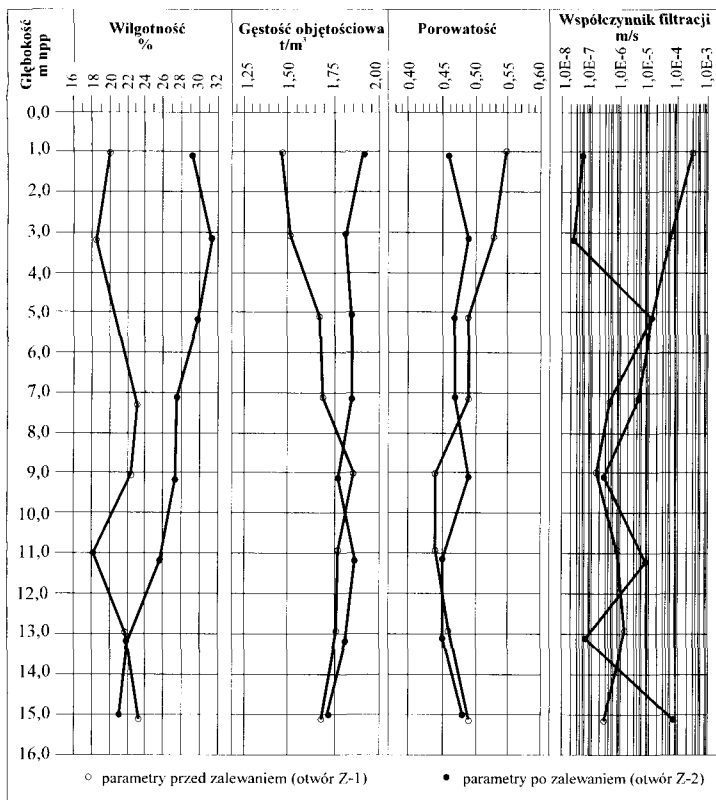


Ryc. 2. Wpływ czasu na wartość współczynnika filtracji rozdrobnionych ilów krakowieckich

co próbki z otworu Z-1 (ryc. 3). Sumaryczny czas efektywnego zalewania wykopu wynosił 117 dni, a łączna ilość wlanej do niego wody wyniosła 175,5 m³.

W wyniku badań próbek z obu otworów, stwierdzono że głębokość przenikania wody w zwał, który w miejscu badania miał staż ok. 2 lata, wynosiła około 13 m, na co wskazywała wyraźna różnica wilgotności gruntu w obu otworach. Zmiana wilgotności i w ślad za tym konsystencji oraz wytrzymałości gruntu zwałowego spowodowała jego konsolidację pod własnym ciężarem, wzrost gęstości objętościowej i zmniejszenie porowatości. Zmiany te zaznaczyły się jednak tylko do głębokości ok. 7,5–8,5 m. Na tej głębokości wilgotność gruntu zwałowego zbudowanego z iltów krakowieckich wzrosła po zalewaniu wykopu do ok. 27–28%, co odpowiada w przybliżeniu ich wilgotności na granicy plastyczności. Zatem przy wilgotności mniejszej od ok. 27–28%, tj. na głębokości poniżej ok. 8 m, iltu krakowieckie w zwał pozostawały w stanie półzwarłym i ich podatność na odkształcenia (zagęszczanie się), mimo pewnego wzrostu wilgotności w stosunku do stanu początkowego, nie była na tyle duża, ażeby spowodować zauważalne zmiany gęstości objętościowej i porowatości. Z ryc. 3 wynika, że porowatość, decydująca o przepuszczalności gruntu zwałowego, zmniejszyła się istotnie tylko do głębokości ok. 5 m i w tej strefie nastąpiło wyraźne zmniejszenie się współczynnika filtracji.

Przy ogólnym zmniejszaniu się współczynnika filtracji gruntu zwałowego z głębokością, zwraca jednak uwagę jego duża zmienność w profilu pionowym, większa po zalewaniu gruntu wodą niżeli przed zalewaniem. Świadczy to o dużym przypadkowym zróżnicowaniu uziarnienia gruntu (wymiarów brył) oraz jego zagęszczenia w zwałowisku, zwiększającym się jeszcze wskutek rozmakania i uplastycznienia gruntu pod wpływem infiltracji wody. Średnią wartość współczynnika filtracji gruntu zwałowego, po zawodnieniu w strefie do głębokości 13 m, obliczono jako średnią ważoną



Ryc. 3. Zmiany niektórych parametrów iłów krakowieckich w zwałowisku w wyniku zalewania próbnego wykopu

w stosunku do miąższości stref przyjętych w połowie odległości między punktami poboru próbek do badań współczynnika filtracji. Wynosi ona:

$$k_{sr} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{\frac{m_1}{k_1} + \frac{m_2}{k_2} + \dots + \frac{m_n}{k_n}} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s} \quad (1)$$

Obliczenie tego współczynnika ze wzoru uwzględniającego miąższość strefy przesiąkania wody ($h = 13 \text{ m}$), czas przesiąkania ($t = 1,5 \cdot 10^7 \text{ s}$), porowatość efektywną ($n_e = 0,45$) i spadek hydrauliczny ($i = 1$) wg wzoru:

$$k_{sr} = \frac{k \cdot n_e}{t \cdot i} = 3,9 \cdot 10^{-7} \text{ m/s} \quad (2)$$

wykazało, że jest on tu bardzo zbliżony do obliczonego ze wzoru (1). Ten średni współczynnik filtracji jest zbliżony do jego wartości doraźnej i zapewne może ulegać jeszcze zmniejszeniu w czasie, wskutek wzrostu wilgotności, rozmakania i konsolidacji gruntu zwałowego w warunkach stałego dostępu wody wypełniającej zbiornik. Wydaje się jednak, że dwie pierwsze od góry próbki gruntu zwałowego (ryc. 3), najbardziej rozmoczone, o współczynniku filtracji rzędu $2,8\text{--}4,6 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, reprezentują trwałe lub zbliżone do nich wartości współczynnika filtracji gruntu zwałowego, zbudowanego z iłów krakowieckich.

Zalewany wodą grunt zwałowy wykazywał znaczne osiadania. Na podstawie pomiarów geodezyjnych stwierdzono, że całkowite osiadania zwału w miejscu zalewania wodą wynosiły zależnie od reperu 40–50 cm. Biorąc pod uwagę, że grubość strefy zmian porowatości i gęstości objętościowej wyniosła ok. 8 m, wartość osiadania dodatkowego wskutek oddziaływania wody wynosi ok. 5–6,2% grubości tej strefy. Pomierzona wartość osiadania dodatko-

wego dobrze odpowiada tej, jaką można wyznaczyć ze wzoru:

$$\Delta h = \frac{(e_0 - e) \cdot h_0}{1 + e_0} \quad (3)$$

gdzie: Δh — osiadanie (m),
 h_0 — miąższość badanej strefy (m),
 e_0 — wskaźnik porowatości gruntu przed zalaniem wodą,
 e — wskaźnik porowatości gruntu po zalaniu wodą.

Biorąc pod uwagę faktycznie oznaczone na próbkach wskaźniki porowatości z otworów Z-1 i Z-2 w strefie głębokości 8 m (ryc. 3) $\Delta h = 0,63 \text{ m}$, co jest wartością zbliżoną do pomierzonej geodezyjnie. Względna wartość osiadania dodatkowego wynosi tu 7,9%. Osiadania zwału pod wpływem zawodnienia świadczą o jego nietrwałej (makroporowatej) i niestabilnej strukturze, a jednocześnie powodują zmniejszanie się współczynnika filtracji, co poprawia izolacyjne właściwości iłu krakowieckiego, który ma być użyty jako warstwa uszczelniająca dno i boki wyrobiska.

Wnioski

1. W spoistym gruncie zwałowym, zbudowanym z rozdrobnionych iłów krakowieckich, następuje znaczne zmniejszenie się współczynnika filtracji wraz ze wzrostem jego zagęszczenia (skonsolidowania) w wyniku obciążania. Na wartości współczynnika filtracji wpływa ponadto stopień rozdrobnienia gruntu zwałowego warunkujący jego porowatość efektywną.

2. Zawodnienie spoistego gruntu zwałowego powoduje zmianę konsystencji i rozmakanie jego brył i okruchów, co prowadzi do wzrostu zagęszczenia gruntu przy danym obciążeniu i dalszego zmniejszenia się współczynnika filtracji. Proces ten jest rozłożony w czasie. Można więc mówić o doraźnej i trwałej wartości współczynnika filtracji w gruncie zwałowym. Ta ostatnia ustala się po całkowitym zakończeniu procesu konsolidacji tego gruntu w danych warunkach obciążenia.

3. Zawadniany spoisty grunt zwałowy osiada dodatkowo w wyniku przekształcania się jego struktury niestabilnej w bardziej stabilną. Ma on więc cechy gruntu makroporowatego. Wartość dodatkowego osiadania gruntu zwałowego zależy od jego początkowego zagęszczenia (obciążenia), jakie występowało przed zawodnieniem. Dodatkowe osiadanie gruntu zwałowego zbudowanego z iłów krakowieckich osiąga ok. 5–8% przy grubości warstwy zawodnionej ok. 10 m.

4. Spoisty grunt zwałowy z kopalni siarki w Machowie nadaje się do uszczelniania dna wyrobiska odkrywkowego, osiągając odpowiednio małe współczynniki filtracji rzędu $1 \cdot 10^{-7}\text{--}1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ w warunkach zawodnienia, przy grubości warstwy izolacyjnej ok. 20 m, zapewniającej odpowiednie samoskonsolidowanie się tego gruntu.

Literatura

- GLAZER Z. z zespołem, 1966 — Badania inżyniersko-geologiczne w strefie filara ochronnego kombinatu w Machowie. Zakł. Prac Geol. UW, Warszawa (nie publ.).
- KACZYŃSKI R. z zespołem, 1982 — Wpływ wysokich ciśnień i obciążeń dynamicznych na właściwości fizyczno-mechaniczne iłów krakowieckich i gruntów zwałowych kop. Machów. Ibidem.