

21

OCENA WPŁYWU WYBRANYCH FIZYCZNYCH WŁAŚCIWOŚCI MIESZANIN POPIOŁOWO-WODNYCH DO WYPEŁNIANIA PŁYTKICH PUSTEK PODZIEMNYCH NA STAN ZAGROŻENIA WYSTĘPOWANIEM NIECIĄGŁYCH DEFORMACJI POWIERZCHNI TERENU

21.1 WSTĘP

Mieszaniny popiołów lotnych i wody, z ewentualnym dodatkiem środków wiążących, dzięki swoim właściwościom fizycznym są powszechnie stosowane do wypełniania pustek podziemnych związanych z działalnością górniczą. Dla uzyskania oczekiwanych rezultatów prac związanych z ich użyciem należy określić szereg ich właściwości fizycznych, których zakres i sposoby pomiaru zawarte są w normie PN-G-11011:1998.

Właściwości te można podzielić ze względu na fazę procesu wypełniania pustek na [9]:

- istotne dla hydraulicznego transportu mieszaniny z miejsca wytwarzania do wypełnianej pustki (gęstość, i lepkość),
- zachowanie się mieszaniny w wypełnionej pustce w okresie zestalania (ilość wody nadosadowej, czasy wiązania i tężenia),
- własności zestalanej mieszaniny w wypełnionej pustce (wytrzymałość na ściskanie, rozmakalność i ściśliwość).

Wartości wymienionych parametrów zależą od składu mieszaniny, rodzaju użytego popiołu, koncentracji części stałych oraz upływu czasu od chwili wytworzenia mieszaniny. Pomijając właściwości związane z ich przepływem w rurociągach i otworach iniekcyjnych, wszystkie pozostałe wpływają na geomechaniczne właściwości górotworu otaczającego wypełnioną pustkę a w szczególności na stan równowagi skał w jej nadkładzie. W przypadku płytkich pustek podziemnych, stan równowagi warstw tworzących strop pustki podziemnej przekłada się bezpośrednio na zagrożenie powierzchni terenu występowaniem deformacji nieciągłych,

objawiających się w postaci lejów i zapadłisk powstających w wyniku zawału stropu płytkich pustek podziemnych i ich samopodsadzenia [13].

21.2 WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE MIESZANIN POPIOŁOWO-WODNYCH

Norma PN-G-11011:1998 zaleca pomiar lepkości mieszanin podsadzki zestalanej za pomocą wiskozymetrii rotacyjnej.

W badaniach fizycznych właściwości mieszanin popiołowo-wodnych wykorzystuje się także rozlewność mierzoną według PN-85/G-02320. Parametr rozlewności stosuje się zwykle do pogładowej oceny właściwości transportowych mieszanin popiołowo-wodnych. Biorąc pod uwagę zależności zawarte w pracach [5, 17] na podstawie rozlewności mieszaniny można ustalić wartość jej granicy płynięcia. Na podstawie licznych doświadczeń przyjęto, że do wypełniania pustek podziemnych, dobiera się najczęściej mieszaniny o rozlewności w zakresie od około 160 do 240 mm.

Mieszaniny popiołowo-wodne, których właściwości wykorzystano do analizy zostały sporządzone z popiołu fluidalnego o gęstości 2606 kg/m^3 pochodzące ze spalania węgla kamiennego z wybranej elektrowni. Podstawowe parametry badanych mieszanin popiołowo-wodnych przedstawiono w tabeli 21.1.

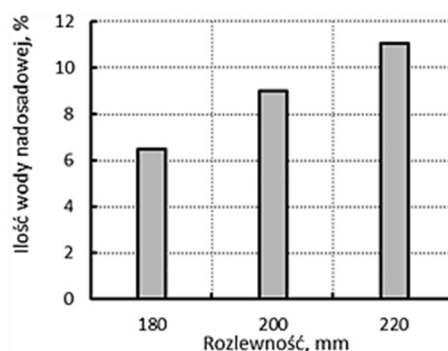
Tabela 21.1 Parametry badanych mieszanin popiołowo-wodnych

Lp.	Proporcja wody do popiołu	Gęstość mieszaniny ρ_m , kg/m^3	Rozlewność R, mm	Zawartość wody ¹⁾ , %	Zawartość popiołu, kg/m^3
1.	0,81	1526	180	68,3	842,9
2.	0,88	1497	200	70,1	796,4
3	0,97	1462	220	72,2	740,3

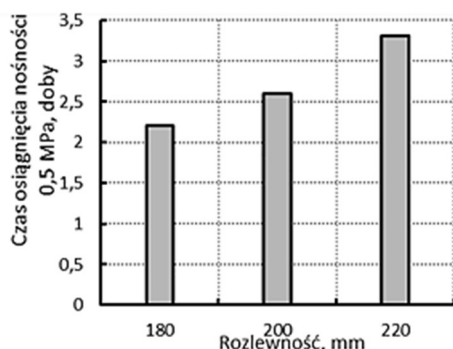
¹⁾ Procentowa zawartość wody w 1 m^3 mieszaniny

21.2 WŁAŚCIWOŚCI MIESZANIN POPIOŁOWO-WODNYCH W OKRESIE ZESTALANIA

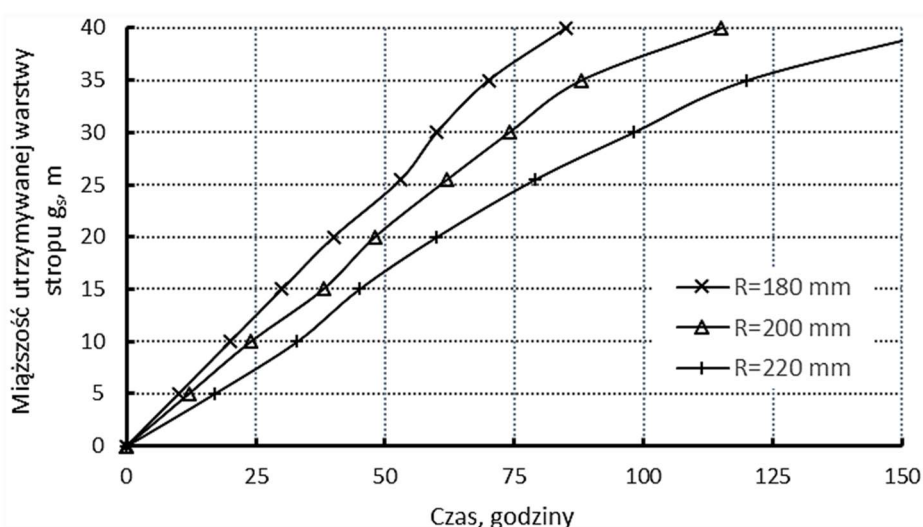
Zachowanie się mieszaniny popiołowo-wodnej w okresie od jej wprowadzenia do zestalania opisują trzy parametry: ilość wody nadosadowej, czas tężenia i czas wiązania. Ilość wody nadosadowej oraz czas tężenia przedstawiają rys. 21.1 i 21.2. Przebieg procesu wiązania ilustruje rys. 21.3.



Rys. 21.1 Ilość wody nadosadowej w zależności od rozlewności mieszaniny



Rys. 21.2 Czas osiągnięcia nośności 0,5 MPa w zależności od rozlewności mieszanki



Rys. 21.3 Wpływ czasu sezonowania na miąższość podtrzymywanej warstwy nadkładu (nośność mieszanki) w zależności od rozlewności mieszanki

Pojawienie się warstwy sklarowanej wody nad powierzchnią mieszanki jest skutkiem sedymentacji części stałych. Po rozpoczęciu procesu wiązania, woda nadosadowa bierze udział w reakcjach chemicznych zachodzących w tężącej mieszance. Ilość wody nadosadowej w mieszankach o rozlewności od 180 do 220 mm, w zależności od rodzaju popiołu może wynosić od 0 do około 14%, (6,5-11% w przypadku mieszanki sporządzonych z popiołu z kotłowni fluidalnych z Elektrowni „X”). Jeżeli w wypełnionej pustce podziemnej może nastąpić spływ wody nadosadowej, po oddzieleniu się wody pod stropem pustki może pozostać niewypełniona przestrzeń o wysokości odpowiadającej wysokości warstwy wody nadosadowej. W przypadku badanych mieszanki, w wyrobisku o wysokości 2,0 może w ten sposób pozostać pustka podstropowa o wysokości od około 0,13 do 0,22 m.

Mieszanki popiołowo-wodne w okresie tężenia wykazują zdolność do przyjmowania obciążeń ze strony stropu wyrobiska pomimo nie zakończonego procesu wiązania. Z punktu widzenia stateczności stropu zalegającego nad płytką pustką podziemną, wzrost nośności odpowiada zwiększającej się grubości warstwy nadkładu, którą tężąca mieszanka może skutecznie podeprzeć. Z wykresu na rys. 21.3 można odczytać, jakiej miąższości nadkład może zostać podparty przez

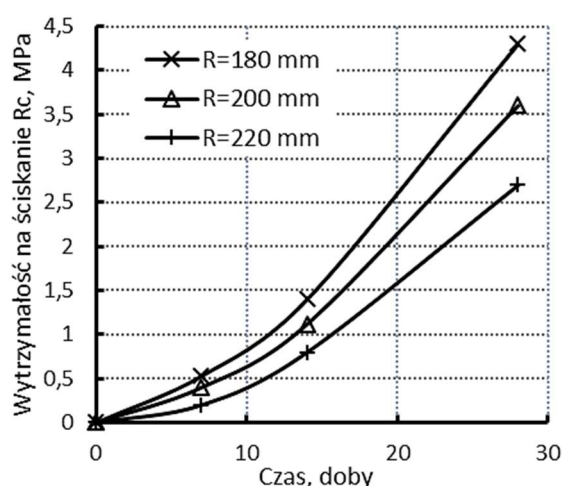
mieszaninę w ciągu pierwszych dni od wypełnienia pustki w zależności od rozlewności mieszanki popiołowo-wodnej. Przyjęto, że średnia gęstość warstw nadkładu wynosi 2000 kg/m^3 . Nośności normowej $0,5 \text{ MPa}$ odpowiada zatem obciążenie warstwą nadkładu o miąższości $25,5 \text{ m}$. Przykładowo, wyrobisko (pustka) znajdująca się na głębokości 20 m zostanie zabezpieczona przed zawałem stropu po około 26 godzinach od wypełnienia mieszanką o rozlewności 180 mm oraz po 49 i 62 godzinach w przypadku mieszanki o rozlewności wynoszącej odpowiednio 200 i 220 mm .

Nośność mieszanki wypełniającej uzyskiwana w krótkim czasie po wypełnieniu pustki zapewnia podparcie stropu w płytkich pustkach charakteryzujących się wysokim prawdopodobieństwem samozasypania lub także w pustkach, w których zaobserwowano częściowe przemieszczenia warstw nadkładu i ich wypełnienie ma na celu szybkie zabezpieczenie powierzchni terenu przed rozwojem deformacji nieciągłych.

21.3 WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI FIZYKO-MECHANICZNE ZESTALONYCH MIESZANIN POPIOŁOWO-WODNYCH

21.3.1 Wytrzymałość na ściskanie

Jako wytrzymałość charakterystyczną dla mieszanki popiołowo-wodnych podaje się wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie po 28 dobach sezonowania [13]. W zależności od rodzaju użytego popiołu, wytrzymałość materiału wypełniającego pustki zmienia się w zakresie, od 0 (materiał plastyczny) do około 7 MPa . Wartości wytrzymałości uzyskane dla mieszanki rozpatrywanych w niniejszej analizie można zaliczyć do wysokich w porównaniu do mieszanki sporządzanych z różnych rodzajów popiołów lotnych. Mieszanki te osiągają wytrzymałość na ściskanie po 28 dobach sezonowania w zakresie od $2,7$ do $4,3 \text{ MPa}$. (rys. 21.4).



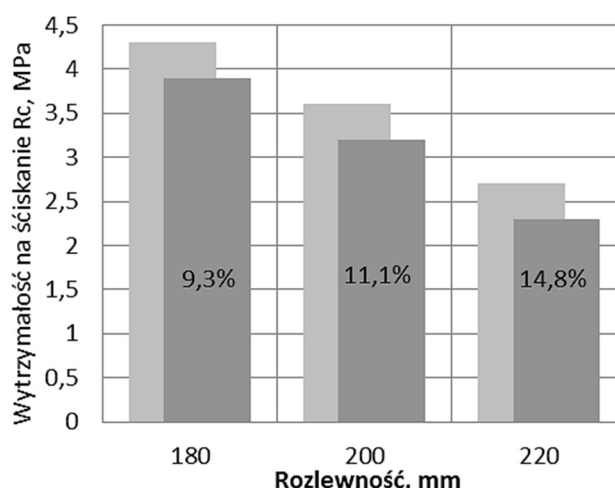
Rys. 21.4 Wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie mieszanki w zależności od czasu sezonowania i rozlewności mieszanki

Przyjmując gęstość skał górotworu równą 2600 kg/m^3 , wytrzymałość na ściskanie badanych mieszanki pozwala na utrzymanie stropu wypełnionego wyrobiska

do gęłokości od około 106 m do 169 m w zaleźności od rozlewności mieszanki, co przekracza gęłokość występowania pustek podziemnych przez większość autorów określanych jako płytkie. Należy jednak mieć na uwadze, że mieszanki sporządzone z innych rodzajów popiołoów lotnych po zestaleniu mogą nie być w stanie przejść obciążęń ze strony stropu w pustkach zlokalizowanych nawet na gęłokości rzędu 10÷20 m.

21.3.2 Rozmakalność

Innym czynnikiem wpływającym na właściwości materiału wypełniającego pustkę podziemną jest jego odporność na oddziaływanie wód podziemnych. Parametrem opisującym deteriorację zestalonych mieszanin popiołowo-wodnych pod wpływem wody jest rozmakalność mierzona jako procentowy spadek wytrzymałości na ściskanie próbek mieszanin po 28 dobach sezonowania zanurzonych w wodzie na okres 24 godzin, w stosunku do próbek nie poddanych namakaniu [13]. Wyniki pomiaru rozmakalności badanych mieszanin popiołowo-wodnych przedstawiono na rys. 21.5.



Rys. 21.5 Rozmakalność zestalonej mieszanki w zaleźności od rozlewności

Spadek wytrzymałości na ściskanie badanych mieszanin poddanych rozmakaniu w warunkach laboratoryjnych wynosi od 9,3 do 14,8%, co stawia je w rzędu stosunkowo mało odpornych w porównaniu z innymi rodzajami popiołoów lotnych. Rzeczywisty spadek wytrzymałości materiału znajdującego się trwale w środowisku zawodnionym może być znacznie większy, zwłaszcza w przypadku stałego dopływu wód lub infiltracji wód z powierzchni. Pogorszenie się właściwości wytrzymałościowych zestalonych popiołoów lotnych może być między innymi skutkiem pęknięć struktury materiału wskutek tworzenia się i narastania kryształoów ettringitu w obecności wapnia i jonoów siarczanowych oraz wody [2], a także wypłukiwania i unoszenia ziaren popiołu.

21.4 ŚCIŚLIWOŚĆ ZESTALONYCH MIESZANIN POPIOŁOWO-WODNYCH ORAZ POPIOŁÓW SUCHYCH I WILGOTNYCH

Według normy PN-G-11011:1998 ściśliwość materiałów podsadzkowych określa się przy ciśnieniu 25 MPa [13]. Mieszanki o rozlewności od 180 do 220 mm wytworzone z popiołów lotnych wykazujących korzystne właściwości wiążące, po zakończeniu procesu wiązania charakteryzują się ściśliwością w przedziale od około 5 do 15% przy ciśnieniu 15 MPa oraz od 10 do 20% przy ciśnieniu 25 MPa, co wielokrotnie przekracza zakres ciśnień panujących na głębokości do 100 m. Biorąc pod uwagę nośność mieszanin popiołowo-wodnych można przyjąć, że wyraża ona maksymalne ciśnienie, przy którym mieszanina nie wykazuje ściśliwości. Dla ciśnienia 0,5 MPa badane mieszaniny osiągają ten stan po upływie od 2 do 3 dób od wypełnienia pustki.

Z punktu widzenia technologii wypełniania pustek interesujące może być określenie ściśliwości popiołów w stanie suchym lub przy niskiej zawartości wody. Przy wypełnianiu pustek podziemnych popiołami suchymi, początkowa gęstość popiołów lotnych odpowiada ich gęstości nasypowej, ze względu na napowietrzenie masy popiołów wynikające ze sposobu ich dostarczania do pustki. Typowy zakres gęstości nasypowej popiołów lotnych świeżych wynosi od 800 do 1200 kg/m³. W stanie nasypowym zagęszczonym gęstość popiołów lotnych mieści się w przedziale od około 1500 do 1800 kg/m³ [12]. Wzrostowi gęstości objętościowej szkieletu ziaren w bryle popiołu towarzyszy spadek objętości przestrzeni międzyziarnowych, który odniesiony do jednostkowej objętości mieszaniny reprezentuje jego ściśliwość. Znając gęstość objętościową popiołu w stanie początkowym (nasypową) ρ_n i końcowym (nasypową po zagęszczeniu) ρ_n oraz gęstość właściwą popiołu ρ_s , ściśliwość można określić z zależności:

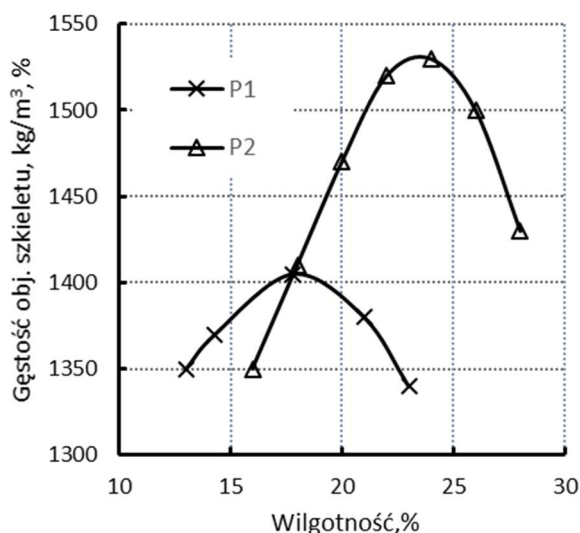
$$S = \frac{\rho_{nz} - \rho_n}{\rho_s - \rho_n} \quad (21.1)$$

Dla wyżej podanych zakresów gęstości nasypowej i nasypowej w stanie zagęszczonym, ściśliwość popiołów mieści się w zakresie od około 20 do 54%.

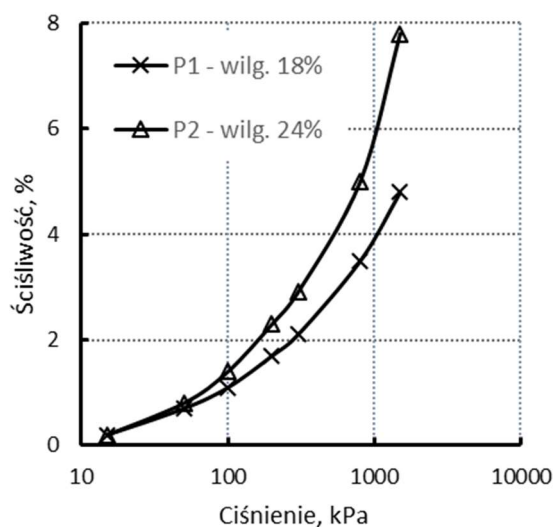
Z zależności (21.1) wynika, że ściśliwość popiołu jest tym mniejsza, im większa jest gęstość objętościowa szkieletu ziaren. Gęstość objętościowa popiołu w dużym stopniu zależy od jego wilgotności. W przypadku płynnych mieszanin popiołowo-wodnych, zawartość wody jest wystarczająco duża do podtrzymania ziaren popiołu w zawieszeniu a o ściśliwości decydują właściwości wytrzymałościowe tężejącej a następnie zestalanej mieszaniny. Przy mniejszych proporcjach wody do popiołu, materiał do wypełniania pustek podziemnych stanowi ciało stałe lub plastyczne a gęstość szkieletu ziaren zależy od jego wilgotności. Zależność gęstości objętościowej szkieletu ziaren od wilgotności przykładowego rodzaju popiołu lotnego ilustruje rys. 21.6. Pomiary stopnia zagęszczenia popiołów w zależności od ich wilgotności wykazują obecność pewnej maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu skalnego przy wilgotności określanej w mechanice gruntów jako wilgotność optymalna [16].

Dalszy wzrost wilgotności popiołu zmierza stopniowo do powstania mieszaniny popiołowo-wodnej.

Najmniejszą ściśliwość popioły lotne uzyskują przy wilgotności optymalnej określonej w toku pomiaru konsolidacji metodą Proctora (ASTM D2435 ~1996) [16]. Na rys. 21.6 przedstawiono wyniki badania zależności gęstości szkieletu ziarnowego od wilgotności popiołu, dla dwóch popiołów fluidalnych o gęstości właściwej 2300 kg/m^3 – P1 i 2810 kg/m^3 – P2 [6]. Wilgotność optymalna popiołu o gęstości właściwej 2300 kg/m^3 wynosi 18% a popiołu o gęstości 1810 kg/m^3 24%. Na rys. 21.7 przedstawiono wyniki pomiarów ściśliwości popiołów lotnych P1 i P2 przy wilgotności optymalnej. Dla ciśnienia równego 0,5 MPa, występującego na głębokości 25,5 m przy średniej gęstości nadkładu wynoszącej 2000 kg/m^3 , ściśliwość popiołów fluidalnych przy optymalnej wilgotności wynosi około 3÷4%. Z uwagi na sposób przeprowadzania pomiarów ściśliwości, do wartości przedstawionych na wykresie na rys. 21.7 należy dodać stałą wartość 5%.



Rys. 21.6 Gęstość szkieletu ziaren w zależności od wilgotności według [6]



Rys. 21.7 Ściśliwość mieszanin popiołowo-wodnych według [6]

Największą ściśliwość wykazują popioły świeże (suche), lokowane w pustkach podziemnych przy użyciu sprężonego powietrza. Ich ściśliwość wynosi od około 20 do ponad 50% już przy niewielkim ciśnieniu. Popioły o wilgotności optymalnej, która w zależności od rodzaju popiołu wynosi od kilkunastu do około 30%, wykazują ściśliwość rzędu 8÷12% przy ciśnieniu 0,5 MPa. Mieszanki popiołowo-wodne są w stanie zapewnić zerową ściśliwość dla ciśnienia 0,5 MPa po okresie sezonowania rzędu 2-3 dób, przy czym mieszanki sporządzone z innych rodzajów popiołów lotnych mogą wykazywać wartości znacznie różniące się od podanych. W popiołach lotnych, zarówno suchy jak i wilgotnych, sezonowanych w warunkach niedoboru wody niezbędnej do prawidłowego przebiegu zestalania zachodzi zjawisko skurczu prowadzące do powstania porowatej, spękanej struktury wypełnienia [11] lub bryły, w której pod zestaloną warstwą wierzchnią znajduje się sypanki popiołu. Przy odpowiednim stosunku wody do części stałych w mieszaninach popiołowo-wodnych unika się destrukcyjnego wpływu skurczu na wytrzymałość zestalonego wypełnienia.

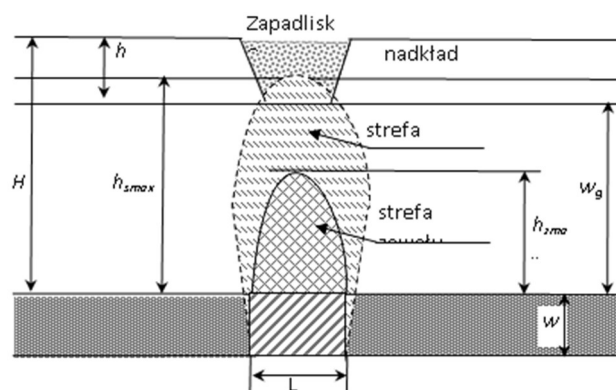
21.5 WPŁYW ŚCIŚLIWOŚCI MATERIAŁU WYPEŁNIAJĄCEGO NA STABILNOŚĆ STROPU PŁYTKICH PUSTEK PODZIEMNYCH

Podstawowym czynnikiem wpływającym na prawdopodobieństwo wystąpienia zawału stropu pustki podziemnej prowadzące do powstania deformacji nieciągłej na powierzchni terenu jest relacja między wysokością stref zawału i spękań a miąższością warstwy skały macierzystej zalegającej nad stropem pustki [1, 15]. Jednym ze sposobów oceny prawdopodobieństwa wystąpienia deformacji nieciągłej jest metoda zaproponowana przez Janusza i Jarosza [10]. Założono w niej, że pustka podziemna o szerokości L i wysokości w znajduje się w pobliżu stropu skał zwięzłych, ponad którym zalega warstwa luźnego nadkładu o miąższości h sięgająca powierzchni terenu, rys. 21.8. Maksymalna wysokość zawału, jaki powstanie w wyniku całkowitego samopodsadzenia h_{zmax} wynosi [17]:

$$h_{zmax} = w \left[\frac{6}{\pi(k_r - 1)} + 0,25 \right] \quad (21.2)$$

gdzie:

k_r – współczynnik rozluźnienia skał w zawałe.



Rys 21.8 Schemat powstawania zapadliska w wyniku zawału płytkiej pustki podziemnej
Źródło: [1]

Wartości współczynnika rozluźniania skał k_r dla płytkiej eksploatacji podziemnej wynoszą od 1,46 do 1,74 dla skał karbońskich i od 1,10 do 1,25 [1] dla wapieni triasowych [9].

W przypadku gdy wysokość maksymalna strefy zawału h_{zmax} jest większa od miąższości górotworu związłego wg ($h_{zmax} > w_g$), na powierzchni terenu może powstać zapadlisko. Zapadlisko może także wystąpić w przypadku kiedy wysokość strefy spękań tworząca się w otoczeniu strefy zawału będzie większa niż miąższość górotworu związłego nad stropem pustki ($h_{zmax} > w_s$). Przyjmuje się, że wysokość strefy spękań h_s wynosi maksymalnie 1,5 wysokości zawału [10]. Dla wyrobiska o stosunkowo dużej szerokości, maksymalna wysokość strefy zawału osiąga wartość końcową:

$$h_{zmax(końcowa)} = \frac{4w}{\pi(k_r - 1)} \quad (21.3)$$

W przypadku małej szerokości pustki podziemnej L , zamiast zapadliska może powstać deformacja nieciągła typu liniowego.

Na podstawie doświadczeń W. Janusz i A. Jarosz [10] stwierdzili, że w przypadku, kiedy $h_{zmax} < w_g$ i $h_{smax} > w_g$ tj. gdy ponad strop górotworu związłego przenika tylko strefa spękań, nie powstają zapadliska charakteryzujące się nagłym rozwojem procesu deformacyjnego. Mogą natomiast występować deformacje w postaci stopniowo rozwijających się zagłębień powierzchni terenu, spowodowane sufozyjnym zmywaniem luźnego nadkładu do gruzowiska zawałowego. W zależności od stosunku wysokości sklepienia ciśnień ($h_{smax} + w/2$) do wysokości stropu górotworu związłego określa się następnie prawdopodobieństwo wystąpienia deformacji nieciągłych.

W opisanej metodzie, a także w metodach opracowanych przez innych autorów [3, 4, 7] rozmiar strefy zawału, strefy spękań i rozmiary powstającego zapadliska zależą od wymiarów pustki podziemnej. Pomijając wpływ długości i szerokości pustki podziemnej, na rozwój procesu deformacyjnego ma wpływ jej wysokość, którą można ograniczyć przez ułożenie w niej materiału wypełniającego (podsadkowego).

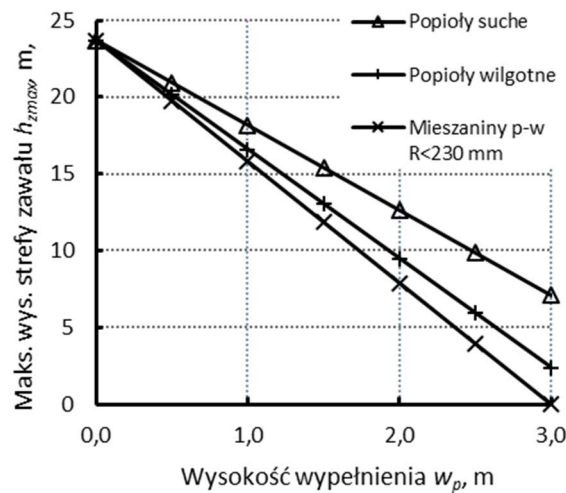
Po wypełnieniu pustki podziemnej początkowa wysokość w zmniejsza się o wysokość, do której pustka została wypełniona (w_p), powiększoną o spadek grubości warstwy wypełnienia wynikający ze ściśliwości materiału wypełniającego (w_s). Końcowa wysokość pustki, która może ulec samopodsadzeniu i wywołać deformacje na powierzchni terenu wynosi:

$$w_k = w - w_p + w_s \quad (21.4)$$

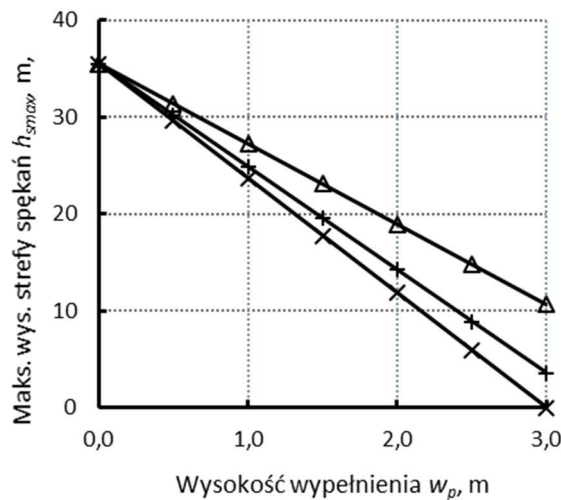
gdzie:

w_k – wysokość końcowa pustki po wypełnieniu.

Na wykresie na rys. 21.9 przedstawiono zależność maksymalnej wysokości strefy zawału h_{zmax} w zależności od końcowej wysokości pustki w_k dla poszczególnych analizowanych rodzajów materiałów wypełniających. Analogicznie na rys. 21.10 przedstawiono zależność maksymalnej wysokości strefy spękań h_{smax} .



Rys. 21.9 Maksymalna wysokość strefy zawału nad pustką o wysokości 3 m w zależności od stopnia jej wypełnienia i rodzaju materiału



Rys. 21.10 Maksymalna wysokość strefy spękań nad pustką o wysokości 3 m w zależności od stopnia jej wypełnienia i rodzaju materiału

W obliczeniach przyjęto, że pierwotna wysokość pustki podziemnej wynosi $w = 3,0$ m, a współczynnik rozluźnienia zawału k_r jest równy 1,25. Ponadto założono, że ciśnienie pionowe ze strony stropu wynosi 0,5 MPa a poszczególne materiały wypełniające charakteryzują się ściśliwością wynoszącą odpowiednio:

- 30% dla popiołów suchych,
- 10% dla popiołów wilgotnych,
- 0% dla mieszanin popiołowo-wodnych, po osiągnięciu nośności min. 0,5 MPa.

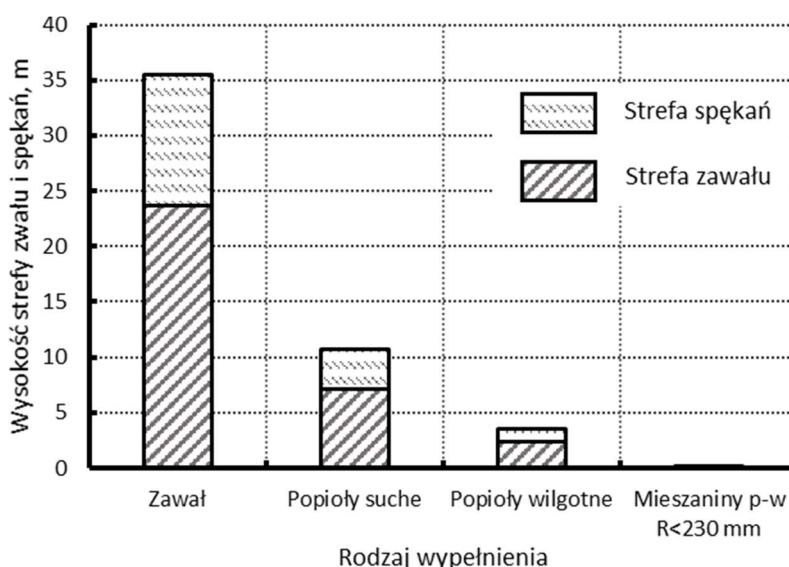
W wyniku całkowitego zawału pustki o wysokości 3,0 m powstanie nad nią gruzowisko zawałowe o wysokości 23,7 m a strefa spękań sięgać będzie do wysokości 35,5 m. W sytuacji kiedy w częściowo lub całkowicie wypełnionej pustce następuje opad skał stropowych (obejmujący zarówno bryły zawału skały zwięzłej jak i ewentualnie skały sypkie z nadkładu) na powierzchnię wypełnienia zacznie

oddziaływać ciśnienie wywołujące zaciśnięcie materiału wypełnionego w skali odpowiadającej ściśliwości materiału przy danej wartości ciśnienia.

W rozpatrywanym przypadku, wartości maksymalnej wysokości zawału zmniejszają się proporcjonalnie do stopnia wypełnienia pustki od 23,7 m do 7,1 m dla wypełnienia popiołami na sucho, 2,4 m dla popiołów w stanie wilgotnym i 0,0 m dla mieszaniny popiołowo-wodnej o nośności wynoszącej co najmniej 0,5 MPa. Końcowa wysokość strefy spękań wynosi odpowiednio 10,7 m, 3,6 m i 0 m w zależności od rodzaju materiału wypełniającego.

W przypadku, gdy wysokość strefy zawału przekracza wysokość stropu skały zwięzłej, w zależności od wysokości pustki, poziomu wypełnienia i rodzaju materiału wypełniającego, może nastąpić jej obniżenie poniżej wysokości stropu skały zwięzłej, którego rezultatem jest zmniejszenie skali ewentualnych zmian deformacyjnych na powierzchni terenu. W przypadku kiedy wypełnienie pustki podziemnej prowadzi do obniżenia maksymalnej wysokości strefy spękań poniżej strefy spękań, co prowadzi do eliminacji zagrożenia wystąpienia deformacji powierzchni ze strony rozpatrywanej pustki podziemnej.

Czynnikiem decydującym o wielkości obniżenia wysokości maksymalnej strefy zawału i spękań jest rodzaj materiału wypełniającego, co ilustruje wykres na rys. 21.11, sporządzony dla przypadku, w którym następuje całkowite wypełnienie pustki. Z przedstawionej na wykresie zależności widać, że z uwagi na ściśliwość poszczególnych rodzajów materiałów wypełniających, wypełnienie pustki popiołami lotnymi w stanie suchym zwiększa zasięg pionowy strefy spękań około 3,5 razy, a popiołami lotnymi wilgotnymi 10 razy w stosunku do wypełnienia mieszaniną popiołowo-wodną. Zastosowanie mieszanin popiołowo-wodnych praktycznie eliminuje zmiany ciągłości warstw stropowych.



Rys 21.11 Wysokości strefy zawału i spękań dla pustki o wysokości 3 m całkowicie wypełnionej w zależności od rodzaju materiału wypełniającego

W przypadku wypełniania pustek podziemnych popiołami w stanie plastycznym (wilgotnym), dodatkowym problemem uniemożliwiającym uzyskanie szczelnego wypełnienia są wysokie opory ruchu, ograniczające zasięg wypełniania z pojedynczego otworu i zdolność do wypełnienia pustek o małych przekrojach w porównaniu do mieszanin popiołowo-wodnych.

21.6 PODSUMOWANIE

Popioły lotne znajdują szerokie zastosowanie do wypełniania pustek podziemnych między innymi z takich względów, jak łatwość ich dostarczenia do wypełnianych przestrzeni za pomocą rurociągów i otworów wiertniczych czy korzystne właściwości mechaniczne po ich zestaleniu. W obydwu przypadkach najlepsze rezultaty zapewnia użycie mieszanin popiołów lotnych i wody. Z uwagi na złożoność czynników wpływających na właściwości fizyczne mieszanin popiołowo-wodnych w stanie płynnym, plastycznym i po zestaleniu, charakterystykę ich właściwości istotnych z punktu widzenia wypełniania pustek podziemnych omówiono na przykładzie wybranego rodzaju popiołu lotnego, reprezentatywnego dla szerokiej gamy produktów ubocznych spalania węgla kamiennego. Analiza wyników badań laboratoryjnych mieszanin popiołowo-wodnych przeprowadzonych zgodnie z normą PN-G-11010:1998 została skoncentrowana na ich przydatności do wypełniania płytkich pustek podziemnych w celu eliminacji zagrożenia występowaniem nieciągłych deformacji powierzchni terenu. Najistotniejszym czynnikiem wpływającym na skuteczność prac zabezpieczających jest nośność i ściśliwość materiału wypełniającego pod działaniem ciśnienia stosunkowo cienkiej warstwy skał stropowych. Zastosowanie mieszanin popiołowych zapewnia uzyskanie znacznie lepszej ochrony stropu płytkiej pustki podziemnej niż w przypadku wypełniania jej popiołami w stanie suchym lub wilgotnym, W korzystnych warunkach, wypełnienie pustki mieszaniną popiołowo-wodną może zapewnić pełne i nieściśliwe wypełnienie.

LITERATURA

1. M. Chudek. *Mechanika górotworu z podstawami zarządzania ochroną środowiska w obszarach górniczych i pogórnicych*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2010, pp. 293-307.
2. M. Gawlicki, J. Małolepszy. „Wykorzystanie odpadów przemysłowych w drogownictwie – zagrożenia,” XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna Awaryjne budowlane 2013, Szczecin, 2013, pp. 24-38.
3. A. Goszcz. „Możliwości i ograniczenia w przywracaniu użyteczności terenom górniczym,” Mat. Symp. Warsztaty 2001 nt. Przywracanie wartości użytkowych terenom górniczym, Kraków, 2001, pp. 95-108.
4. A. Goszcz. „Powstawanie zapadłisk i innych deformacji nieciągłych powierzchni na obszarach płytkiej eksploatacji górniczej,” Mat. Szkoła Eksploatacji Podziemnej'96, Kraków, 1996, pp. 119-137.
5. A. Gram, B. Lagerblad. „Obtaining Rheological Parameters from Slump Flow for Self-Compacting Concrete,” International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, Japan, 2013, paper e244.

6. B. Kim, M. Prezzi, R. Salgado. „Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 131(7), pp. 914-924, 2005.
7. A. Kotyrba, A. Tyrała, J. Michalak. „Płytko eksploatacja złóż węgla kamiennego i rud cynkowo-olowiowych oraz metody eliminacji jej wpływu na warunki geologiczno-inżynierskie województwa katowickiego,” *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, seria Konferencje, VII Konferencja Problemy geologii w ekologii w górnictwie podziemnym*, vol. 24, 1988.
8. „Materiały do podszadki zestalonej i doszczelniania zrobów. Wymagania i badania.” PN-G-11011:1998.
9. E. Popiołek, J. Ostrowski, W. Janusz, S. Barycz, W. Wójcik. „Zasady ochrony terenów górniczych w warunkach olkuskiego zagłębia rud Zn-Pb.” *Zeszyty Naukowe AGH, Sozologia i sozotechnika*, nr 1368, z. 32, pp. 77-98, 1990.
10. J. Palarski, P. Pierzyna, G. Strozik. „Zastosowanie ubocznych produktów spalania w technologiach górnictwa węgla kamiennego,” *Międzynarodowa Konferencja EuroCoalAsh, Warszawa*, 2008, pp. 315-331.
11. W. Raczkiewicz. „Skurcz betonu – cechy istotne ze względu na projektowanie konstrukcji z betonu.” *Przegląd Budowlany*, nr 2, pp. 44-46, 2012.
12. L. Sear (Ed.). *The Properties and Use of Coal Fly Ash*. London: Thomas Telford Publishing, 2011, pp. 119-185.
13. G. Strozik. *Wypełnianie pustek podziemnych w górotworze naruszonym eksploatacją górniczą*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2015, pp. 115-121.
14. G. Strozik, R. Jendruś, A. Manowska, M. Popczyk. „Mine Subsidence as a Post-Mining Effect In Uppers Silesia Coal Basin.” *Pol. J. Environ. Stud.*, vol. 25, no. 2, pp. 777-785, 2016.
15. P. Strzałkowski. *Zarys ochrony terenów górniczych*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2010, pp. 142-150.
16. A. Szymański. *Mechanika gruntów*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW, 2007, pp. 38-43.
17. W. Tu, B. Zand, M.A. Ajlouni, T. Butalla, W.E. Wolfe. „The Consolidation Characteristics of Impounded Class F Fly Ash – A Case History,” *Workshop of Col Ash, Northern Kentucky, USA*, 2007, pp. 1-14.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 10.2016

Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 03.2017

dr inż. Grzegorz Strozik

Politechnika Śląska,

Wydział Górnictwa i Geologii

Instytut Eksploatacji Złóż

ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska

e-mail: grzegorz.strozik@polsl.pl

OCENA WPŁYWU FIZYCZNYCH WŁAŚCIWOŚCI MIESZANIN POPIOŁOWO-WODNYCH DO WYPEŁNIANIA PŁYTKICH PUSTEK PODZIEMNYCH NA STAN ZAGROŻENIA WYSTĘPOWANIEM NIECIĄGŁYCH DEFORMACJI POWIERZCHNI TERENU

Streszczenie: Płytkie pustki podziemne stanowią potencjalne źródło zagrożenia występowaniem deformacji nieciągłych, zwłaszcza zapadlisk, którym można zapobiec przez wypełnienie pustek odpowiednio dobranymi materiałami. Aby uniemożliwić opad skał stopowych i samozasypanie pustki luźnymi skałami nadkładu, użyty do wypełnienia materiał musi być nieściśliwy, odporny na rozmakanie i spełniać inne kryteria wymagane dla mieszanin przeznaczonych do wypełniania pustek podziemnych. W artykule dokonano oceny sedimentacji, czasu tężenia i wiązania, wytrzymałości na ściskanie, rozmakalności i ściśliwości wybranych rodzajów mieszanin popiołowo-wodnych na przebieg procesu wypełniania pustek podziemnych i stabilizacji warstw nadległych, z uwzględnieniem wpływu czasu na zmianę wartości tych parametrów. Następnie dokonano porównania ściśliwości mieszanin popiołowo-wodnych i popiołów w stanie suchym oraz wilgotnym. Na tej podstawie określono wpływ rodzaju materiału wypełniającego na wysokość stref zawалу i spękań nad pustką podziemną, których położenie względem stropu skały zwieszłej i powierzchni ziemi decydujące o wystąpieniu nieciągłej deformacji powierzchni terenu.

Słowa kluczowe: Wypełnianie pustek podziemnych, ochrona powierzchni terenu, deformacje nieciągłe, mieszaniny popiołowo-wodne, właściwości fizyczne drobnofrakcyjnych mieszanin wiążących

ASSESSMENT OF IMPACT OF PHYSICAL PROPERTIES OF FLY ASH – WATER MIXTURES USED FOR FILLING OF SHALLOW MINE VOIDS ON THE DISCONTINUOUS GROUND DEFORMATION HAZARD

Abstract: Shallow underground voids represent potential source of discontinuous deformations, especially sinkholes, which it is possible to prevent through the filling of the voids with appropriately selected materials. In order to make the fall of rocks and backfilling of the void with loose overburden rocks impossible, material applied for the filling must be incompressible, waterproof, and fulfil other criteria required for mixtures intended to fill underground voids. In the article an assessment of impact of such properties as sedimentation, set and binding time, compressive strength, soak resistance and compressibility of chosen kinds of ash-water mixtures on the process of filling and stabilization of overlying rocks has been conducted, including the influence of the time on the change of the value of these parameters. Next the compressibility of ash-water mixtures and ashes in the dry and humid state have been compared. On this base an influence of a kind of fill material on the height of caving and fractured zones over a void has been determined, which position in relation to the hard rock roof and ground surface are essential for appearing of discontinuous ground deformation.

Key words: Filling of underground voids, protection of ground surface, discontinuous deformations, fly ash – water mixtures, physical properties of stabilized backfill