

OSIADANIE GRUNTÓW ZWAŁOWANYCH W POEKSPLOATACYJNYM WYROBISKU ODKRYWKOWYM W WYNIKU ODBUDOWY ZWIERCIADŁA WODY GRUNTOWEJ

Settlement of dump soil deposited in an inactive open pit

Henryk WOŹNIAK, Aleksandra BORECKA
& Robert KACZMARCZYK

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Zakład Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej; al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: hwozniak@geolog.geol.agh.edu.pl, oborecka@geol.agh.edu.pl,
rkaczmar@op.pl*

Treść: Powszechnie stosowanym sposobem likwidacji poeksploatacyjnych wyrobisk odkrywkowych jest częściowe lub całkowite wypełnienie ich gruntem zwałowanym pochodzącym z usuniętego nadkładu. Jednym z problemów związanych z tym sposobem likwidacji wyrobisk jest duże osiadanie składowanych gruntów spowodowane ich wysoką ściśliwością. Znajomość ściśliwości i wielkości osiadania pozwala na prawidłowe zaprojektowanie pożądanej i docelowej wysokości nasypu oraz na przeprowadzenie bilansu wymaganej i dysponowanej objętości zwałowanych mas gruntowych. W pracy zaproponowano metodę obliczania osiadania nasypu z gruntu zwałowanego zdeponowanego w likwidowanym wyrobisku odkrywkowym obejmującą osiadanie od obciążenia własnego oraz osiadanie zapadowe spowodowane rekonstrukcją zwierciadła wody gruntowej. W proponowanej metodzie oparto się na rozwiązaniu przedstawionym w pracy Nwabuokei & Lovell (1985) dotyczącym osiadania nasypów z gruntów zagęszczanych. Przykładowe obliczenia przeprowadzono, wykorzystując parametry ściśliwości i potencjału osiadania zapadowego wyznaczone na podstawie własnych badań autorów.

Słowa kluczowe: grunt zwałowany, zwałowisko nadkładowe, osiadanie od obciążenia własnego, osiadanie zapadowe, potencjał osiadania zapadowego

Abstract: Common remediation method of inactive open pits is a partial or complete infilling with dump soil derived from removed overburden. A problems which rises during such remediation is a significant settlement of soils caused by its high compressibility. Recognition of compressibility and settlement enables the proper design of both required and final depths of the fill and allows to balance the required and existing volumes of dumped material. Authors proposed a calculation method for settlement of dumped fill deposited in an inactive open pit, which includes self-weight settlement and collapse settlement caused by recovery of groundwater table. The proposed calculation is based upon solution given by Nwabuokei & Lovell (1985) for settlement of fills composed of compacted soil. Examples of calculations are presented in which both the compressibility and collapse potential parameters were determined from authors' own studies.

Key words: dump soil, overburden dump, self-weight settlement, collapse settlement, collapse potential

WPROWADZENIE

Często stosowanym sposobem likwidacji poeksploatacyjnych wyrobisk odkrywkowych jest częściowe lub całkowite wypełnienie ich gruntem zwałowanym pochodzącym z usuniętego nadkładu. Grunty takie, a w szczególności grunty zwałowane spoiste, charakteryzuje bardzo wysoka niestabilność struktury i właściwości spowodowana ich wysoką porowatością intergranularną (międzybryłową). Ta specyficzna cecha gruntów zwałowanych jest przyczyną ich znacznych osiadań, które zapoczątkowane zostają już podczas zwałowania, a następnie, z różną intensywnością, rozwijają się w czasie formowania i rekultywacji zwałowiska oraz w długotrwałym procesie kształtowania się właściwości zdeponowanego materiału w wyniku oddziaływania różnorodnych czynników zewnętrznych.

Umiejętność prognozowania i szacowania wielkości osiadań odgrywa bardzo ważną rolę w rozwiązywaniu zagadnień geotechnicznych związanych z budową i zagospodarowaniem zwałowisk. Jest niezbędna do oceny stateczności skarp, zarówno w ujęciu globalnym (całego zwałowiska), jak i lokalnym (miejscowym), pozwala na prawidłowe zaprojektowanie pożądanej i docelowej wysokości nasypu oraz na przeprowadzenie bilansu wymaganej i dysponowanej objętości zwałowanych mas gruntowych. Osiadanie, a w szczególności zróżnicowanie osiadań, ma wreszcie niezwykle ważne znaczenie przy wykorzystaniu wierzchowin zwałowisk do budowy składowisk, na przykład składowisk odpadów komunalnych.

Spośród kilku składowych całkowitego osiadania duże znaczenie w przypadku gruntów zwałowanych ma osiadanie zapadowe, zwane również osiadaniem dodatkowym, spowodowane wzrostem wilgotności. Osiadanie to szczególnie intensywnie rozwija się na zwałowisku wewnętrznym po zaprzestaniu odwadniania odkrywki i rozpoczęciu procesu rekonstrukcji zwierciadła wody gruntowej.

Wielkość osiadania zapadowego jest funkcją kilku czynników (Woźniak 1988, 1999, Lawton *et al.* 1989). Najważniejszym z nich jest rodzaj gruntu, rozumiany w kategoriach gruntu spoistego (złożonego z brył gruntu spoistego), sypkiego (piaski, żwiry, pospółki, rumosze skalne) lub mieszaniny obydwu tych rodzajów. W tym ostatnim przypadku bardzo ważną staje się wzajemna proporcja udziału poszczególnych składników. Z pozostałych czynników na szczególną uwagę zasługuje stan zagęszczenia (wskaźnik porowatości gruntu przed jego zawodnieniem) oraz, szczególnie w przypadku gruntów spoistych, wilgotność. W wypadku danego rodzaju gruntu i jego wilgotności wartość wskaźnika porowatości przed zawodnieniem, a także jego zmiana w wyniku wzrostu wilgotności jest funkcją naprężenia od obciążenia własnego. Prawidłowe prognozowanie osiadania zapadowego musi być zatem oparte o znajomość zależności zmian wskaźnika porowatości od naprężenia przed zawodnieniem i po zawodnieniu danego gruntu i musi być poprzedzone obliczeniami zmiany naprężeń z głębokością. W przypadku gruntów zwałowanych, cechujących się bardzo dużą ściśliwością, ustalenie zmiany naprężeń z głębokością powinno uwzględniać, bardzo istotną w tym przypadku, zmianę stanu zagęszczenia (zmianę wskaźnika porowatości) spowodowaną obciążeniem własnym. Uwzględnienie tego faktu wymaga zastosowania specjalnej metody obliczeniowej opartej na rachunku iteracyjnym.

W pracy zaproponowano metodę obliczania osiadania nasypu z gruntu zwałowanego zdeponowanego w likwidowanym wyrobisku odkrywkowym obejmującą osiadanie od obciążenia własnego oraz osiadanie zapadowe spowodowane rekonstrukcją zwierciadła wody

gruntowej. W proponowanej metodzie oparto się na rozwiązaniu przedstawionym w pracy Nwabuoeki & Lovell (1985) dotyczącym osiadania nasypów z gruntów zagęszczanych. Przykładowe obliczenia przeprowadzono, wykorzystując parametry ściśliwości i potencjału osiadania zapadowego wyznaczone na podstawie własnych badań autorów. Podane parametry oraz przytoczone charakterystyki spoistych gruntów zwałowanych (Fig. 1–3) zostały oznaczone na próbkach o modelowanym składzie bryłowym, który polegał na rozdrobieniu brył na kilka frakcji o wymiarach 2–20 mm, a następnie zmieszaniu ich w równych proporcjach wagowych.

ZMIENNOŚĆ PARAMETRÓW FIZYCZNYCH GRUNTÓW ZWAŁOWANYCH POD OBCIĄŻENIEM WŁASNYM

W wyniku naprężeń od ciężaru własnego w gruntach zwałowanych dochodzi do szeregu procesów powodujących daleko idące zmiany strukturalne, a w ślad za nimi – zmiany parametrów właściwości fizycznych i mechanicznych. Rodzaj i zakres zachodzących procesów zależy od rodzaju i właściwości zwałowanych gruntów oraz wielkości przykładowych obciążeń. Stosunkowo najmniejsze zmiany mają miejsce w gruntach sypkich. Sprowadzają się one niemal wyłącznie do wzrostu zagęszczenia, które pociąga za sobą wzrost ciężaru objętościowego i spadek porowatości (Fig. 1A, B).

Dużym zmianom strukturalnym podlegają natomiast grunty złożone z brył gruntów spoistych (Woźniak 2007). Wysoka niestabilność struktury, spowodowana odkształcalnością brył oraz bardzo wysoką porowatością międzybryłową, sprzyja rozwojowi szeregu wzajemnie nakładających się procesów, takich jak: przegrupowywanie i kruszenie poszczególnych okruszków i brył, zgniatanie i plastyczne deformowanie, kontaktowe zlepianie oraz konsolidacja. Partycypacja poszczególnych procesów w globalnej zmianie struktury i właściwości determinowana będzie rodzajem i właściwościami, szczególnie wilgotnością (stopniem plastyczności) danego gruntu oraz wielkością wywieranego obciążenia (Fig. 1A, B, C).

Osobliwymi właściwościami charakteryzuje się trzeci strukturalny typ gruntu zwałowanego – grunt sypko-spoisty stanowiący układ ziaren gruntów sypkich i brył gruntów spoistych. Ten rodzaj ośrodka gruntowego jest najmniej poznany, a równocześnie wydaje się być najbardziej złożony. W pierwszym przybliżeniu można przyjąć, że jest to ośrodek, którego od zwałowanego gruntu sypkiego różni większa ściśliwość, a od spoistego mniejsza porowatość i większa sztywność. Generalnie wzrost udziału komponentu sypkiego powoduje spadek wskaźnika porowatości na skutek wypełniania dużych porów międzybryłowych z reguły znacznie drobniejszymi i łatwo przemieszczającymi się ziarnami gruntu sypkiego (Fig. 1D). Prawidłowość ta jest zresztą zgodna ze znanym zjawiskiem natury fizycznej – lepszego upakowania elementów bardziej zróżnicowanych wymiarowo. Warto tutaj jednak zwrócić uwagę na jeden szczególny przypadek. Przy zawartości gruntu sypkiego w granicach około 75% porowatość całego układu jest mniejsza od porowatości obu jego składników. Zjawisko to, szczególnie wyraźnie widoczne przy wyższych wartościach obciążeń i wyższych stopniach plastyczności, jest rezultatem wypełniania przez grunt spoisty drobnych porów pomiędzy ziarnami gruntu sypkiego.

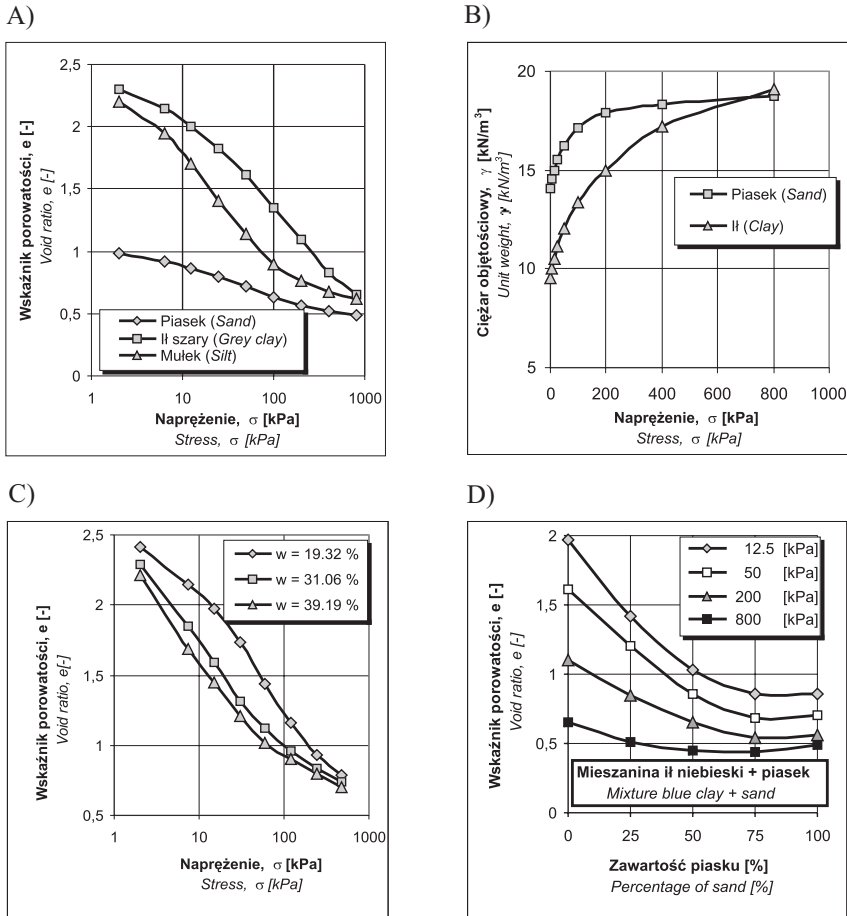


Fig. 1. Zmienność parametrów fizycznych gruntów zwałowanych pod obciążeniem własnym: A) zależność wskaźnika porowatości od napężenia – grunty z kop. „Bełchatów”; B) miana ciężaru objętościowego ze wzrostem napężenia dla piasku i łu z kop. „Bełchatów”; C) zależność wskaźnika porowatości od napężenia – ły krakowieckie o różnych wilgotnościach; D) zmiany wskaźnika porowatości mieszaniny il – piasek poddanej różnym obciążeniom

Fig. 1. Variability of physical parameters of dump soils due to self-weight: A) relation between void ratio and stress – soils from opencast “Bełchatów”; B) change of unit weight with stress for sand and clay from opencast “Bełchatów”; C) relation between void ratio and stress – water content for Krakowice clays; D) changes void ratio of mixture clay – sand subject to different loading

ZMIANA PARAMETRÓW FIZYCZNYCH GRUNTÓW ZWAŁOWANYCH W WYNIKU WZROSTU WILGOTNOŚCI

Wzrost wilgotności gruntu zawsze powoduje powstanie odpowiednich deformacji objętościowych. Mogą one dotyczyć zarówno wzrostu objętości, jak i jej zmniejszania. Pierwszy z procesów związany jest ze zjawiskiem pęcznienia, drugi z osiadaniami, które ze

względu na często gwałtowny przebieg nosi nazwę osiadania zapadowego. W gruntach zwałowanych procesem bezwzględnie dominującym jest proces osiadania zapadowego. Szczególnie duże znaczenie ma on w gruntach zwałowanych spoistych, w których w wyniku wzrostu wilgotności następuje rozmakanie brył i narastanie odkształceń plastycznych prowadzące do znacznej przebudowy pierwotnej, rozluźnionej i niestabilnej struktury bryłowej, głównie w postaci zaniku porów międzybryłowych i wzrostu zagęszczenia. Udział osiadania zapadowego w całkowitym osiadaniu gruntu zwałowanego zmniejsza się bardzo wyraźnie ze wzrostem obciążenia.

W przypadku zwałowanego gruntu złożonego z brył gliny zwałowej z nadkładu złoża węgla brunatnego w Bełchatowie (Fig. 2), osiadanie zapadowe przy obciążeniu 30 kPa stanowi 64% całkowitego osiadania, przy obciążeniu 120 kPa jego udział zmniejsza się do 34%, a przy obciążeniu 800 kPa spada do zaledwie 5%.

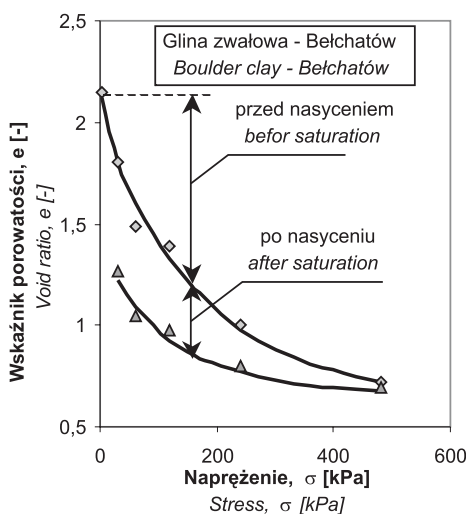


Fig. 2. Wpływ wzrostu wilgotności na osiadanie gruntów zwałowanych

Fig. 2. Influence of increase water content on the settlement of dump soils

Parametrem osiadania zapadowego gruntów nasypanych, w tym gruntów zwałowanych, jest potencjał osiadania zapadowego CP , definiowany jako stosunek zmiany wskaźnika porowatości przed zawodnieniem i po zawodnieniu pod danym obciążeniem do wartości pierwotnego wskaźnika porowatości (wskaźnika porowatości gruntu bezpośrednio ze zwałowanego). Na figurze 3 przedstawiono wartości potencjału osiadania zapadowego trzech przebadanych próbek. Z zamieszczonych danych wynika, że wartość wskaźników osiadania zapadowego bardzo szybko zmniejsza się ze wzrostem napężenia. Szczególnie duży spadek obserwuje się w zakresie niewielkich obciążeń (do około 200 kPa). Obciążenia te są bowiem zbyt małe, aby doprowadzić do odpowiednio dużych deformacji plastycznych brył gruntu zwałowanego, a tym samym – do ich zagęszczenia i zredukowania wysokiej porowatości międzybryłowej. Dopływ wody powoduje uaktywnienie procesu zagęszczania, który w tym przypadku przybiera znaczne rozmiary i przebiega gwałtownie.

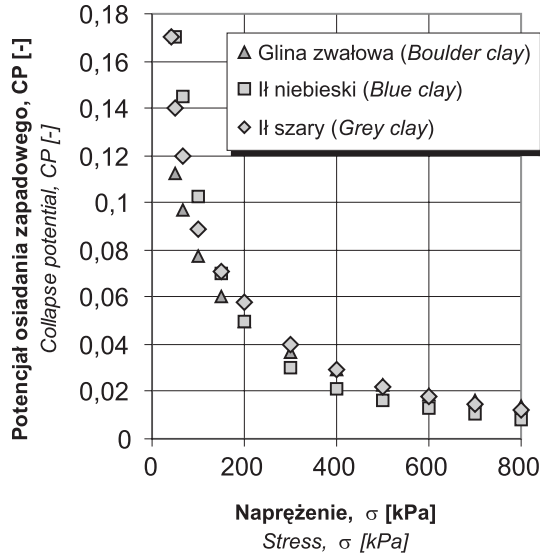


Fig. 3. Zależność potencjału osiadania zapadowego od naprężenia: glina zwałowa – Bełchatów, ił niebieski – Bełchatów, ił szary – Machów

Fig. 3. Relation between collapse potential and stress: boulder clay – Bełchatów, blue clay – Bełchatów, grey clay – Machów

OPIS ZASTOSOWANEJ METODY OBLICZENIOWEJ

Wyznaczanie naprężeń i osiadań od obciążenia własnego

W celu określenia wielkości naprężeń od obciążenia własnego w określonych punktach zwałowiska zbudowanego z jednorodnego gruntu, wygodnie jest początkowo przyjąć, że rozpatrywane zwałowisko o wysokości H_0 składa się z n warstw o takiej samej początkowej miąższości h_0 , z których każda zagęszczona jest do takiej samej wartości początkowego wskaźnika porowatości e_0 i posiada ten sam początkowy ciężar objętościowy γ_0 .

Naprężenie pionowe na poziomie środka pierwszej warstwy ($i = 1$) będzie równe:

$$\sigma_{v1}^{(n)} = 0.5 \cdot h_0 \cdot \gamma_0 + (n-1) \cdot h_0 \cdot \gamma_0 \quad (1)$$

warstwy drugiej ($i = 2$):

$$\sigma_{v2}^{(n)} = 0.5 \cdot h_0 \cdot \gamma_0 + (n-2) \cdot h_0 \cdot \gamma_0 \quad (1a)$$

a zatem ogólny wzór na naprężenie na poziomie środka każdej z warstw będzie miał postać:

$$\sigma_{vi}^{(n)} = 0.5 \cdot h_0 \cdot \gamma_0 + (n-i) \cdot h_0 \cdot \gamma_0 \quad (2)$$

Naprężenie σ_v pochodzące od obciążenia własnego wywołuje w kolejnych warstwach zwałowiska odpowiednie odkształcenia pionowe ε_v . Odkształcenie i -tej warstwy będzie wynosić:

$$\varepsilon_{vi}^{(n)} = \frac{\Delta h_i^{(n)}}{h_0} = \frac{\Delta e_i^{(n)}}{1 + e_0} \quad (3)$$

a jej osiadanie odpowiednio:

$$\Delta h_i^{(n)} = h_0 \cdot \varepsilon_{vi}^{(n)} = h_0 \cdot \frac{\Delta e_i^{(n)}}{1 + e_0} \quad (4)$$

Zatem osiadanie całego zwałowiska spowodowane naprężeniami od obciążenia n warstwami wyniesie:

$$S^{(n)} = \sum_{i=1}^n \Delta h_i^{(n)} = \sum_{i=1}^n h_0 \cdot \varepsilon_{vi}^{(n)} = \sum_{i=1}^n h_0 \cdot \frac{\Delta e_i^{(n)}}{1 + e_0} \quad (5)$$

Osiadanie od obciążenia własnego $S^{(n)}$, które w zdecydowanej większości zachodzi w trakcie wznoszenia zwałowiska, sprawia, że jego wysokość nie jest równa H_0 , jak zostało to początkowo przyjęte, lecz wynosi $H_0 - S^{(n)}$. Aby uzyskać założoną wysokość równą H_0 , konieczne jest „nadsypanie” dodatkowych p warstw (do łącznej liczby $m = n + p$ warstw) spełniających warunek:

$$(p - 1) \cdot h_0 + h_m = S^{(n)} \quad (6)$$

oraz:

$$h_m < h_0$$

gdzie h_m – miąższość warstwy $i = m$.

„Nadsypanie” kolejnych p warstw powoduje zmianę stanu naprężenia w całym zwałowisku. Obecnie naprężenie pionowe na poziomie środka każdej warstwy od $i = 1$ do $i = m - 1$ będzie równe:

$$\sigma_{vi}^{(n)} = 0.5 \cdot h_0 \cdot \gamma_0 + (m - i) \cdot h_0 \cdot \gamma_0 + h_m \cdot \gamma_0 \quad (7)$$

a jej odkształcenie:

$$\varepsilon_{vi}^{(m)} = \frac{\Delta h_i^{(m)}}{h_0} = \frac{\Delta e_i^{(m)}}{1 + e_0} \quad (8)$$

Natomiast naprężenie w środku warstwy $i = m$ będzie równe:

$$\sigma_{vm}^{(m)} = 0.5 \cdot h_m \cdot \gamma_0 \quad (9)$$

a jej odkształcenie:

$$\varepsilon_{vm}^{(m)} = \frac{\Delta h_m^{(m)}}{h_m} = \frac{\Delta e_i^{(m)}}{1 + e_0} \quad (10)$$

Zatem osiadanie każdej warstwy od $i = 1$ do $i = m - 1$ będzie równe:

$$\Delta h_i^{(m)} = h_0 \cdot \varepsilon_{vi}^{(m)} = h_0 \cdot \frac{\Delta e_i^{(m)}}{1 + e_0} \quad (11)$$

a warstwy $i = m$:

$$\Delta h_i^{(n)} = h_m \cdot \varepsilon_{vm}^{(m)} = h_m \cdot \frac{\Delta e_m^{(m)}}{1 + e_0} \quad (12)$$

Osiadanie od obciążenia własnego całego zwałowiska złożonego z m warstw będzie natomiast wynosić:

$$S^{(m)} = \sum_{i=1}^{m-1} \Delta h_i^{(m)} + \Delta h_m^{(m)} = \sum_{i=1}^{m-1} h_0 \cdot \varepsilon_{vi}^{(m)} + h_m \cdot \varepsilon_{vm}^{(m)} = \sum_{i=1}^{m-1} h_0 \cdot \frac{\Delta e_i^{(m)}}{1 + e_0} + h_m \cdot \frac{\Delta e_m^{(m)}}{1 + e_0} \quad (13)$$

Osiadanie warstw od $i = 1$ do $i = m$ w wyniku ich dociążenia „nadsypaniem” p warstw oraz osiadanie pod obciążeniem własnym „nadsypanych” p warstw sprawia, że obecna wysokość równa $H_0 - S^{(m)}$ będzie nadal niższa od założonej wysokości H_0 . Wymagało to będzie powtórzenia opisanego procedury, a więc „nadsypania” kolejnych q warstw (do łącznej ilości $l = n + p + q = m + q$ warstw) spełniających warunek:

$$(q - 1) \cdot h_0 + h_l = S^{(m)} \quad (6a)$$

oraz:

$$h_l < h_0$$

i obliczenia osiadania od obciążenia własnego zwałowiska złożonego z l warstw według wzoru:

$$S^{(l)} = \sum_{i=1}^{l-1} \Delta h_i^{(l)} + \Delta h_l^{(l)} = \sum_{i=1}^{l-1} h_0 \cdot \varepsilon_{vi}^{(l)} + h_l \cdot \varepsilon_{vl}^{(l)} = \sum_{i=1}^{l-1} h_0 \cdot \frac{\Delta e_i^{(l)}}{1 + e_0} + h_l \cdot \frac{\Delta e_l^{(l)}}{1 + e_0} \quad (13a)$$

Iteracyjny proces obliczeń należy powtarzać tak długo, dopóki różnica pomiędzy założoną wysokością H_0 nasypu a kolejnym obliczonym osiadaniem $S^{(n)}$, $S^{(m)}$, $S^{(l)}$ będzie akceptowalnie mała.

Obliczanie osiadań wywołanych wzrostem wilgotności

Osiadanie w wyniku wzrostu wilgotności zwałowiska zbudowanego z N warstw o sumarycznej miąższości H_0 będzie równe:

$$S_{sr}^{(N)} = \sum_{i=1}^N \Delta h_{sri}^{(N)} \quad (14)$$

gdzie $\Delta h_{sri}^{(N)}$ – osiadanie i -tej warstwy w wyniku wzrostu wilgotności.

W zależności od rodzaju posiadanych parametrów osiadanie i -tej warstwy w wyniku wzrostu wilgotności można alternatywnie obliczyć ze wzorów:

$$\Delta h_{sri}^{(N)} = h_i^{(N)} \cdot \varepsilon_{vsri}^{(N)} = h_i^{(N)} \cdot \frac{\Delta e_{sri}^{(N)}}{1 + e_{vi}} \quad (15)$$

lub:

$$\Delta h_{sri}^{(N)} = h_0 \cdot \frac{\Delta e_{sri}^{(N)}}{1 + e_{vi}} = h_0 \cdot CP \quad (15a)$$

gdzie:

- $h_i^{(N)}$ – miąższość i -tej warstwy spośród N warstw analizowanego zwałowiska,
- $\varepsilon_{vsri}^{(N)}$ – odkształcenie wywołane wzrostem wilgotności,
- $\Delta e_{sri}^{(N)}$ – zmiana wskaźnika porowatości wywołana wzrostem wilgotności.

Miąższości $h_i^{(N)}$ poszczególnych warstw nasypu określa wzór:

$$h_i^{(N)} = h_0 - \Delta h_i^{(N)} \quad (16)$$

gdzie $\Delta h_i^{(N)}$ – ostateczne osiadanie i -tej warstwy (po dostatecznie wystarczającej liczbie iteracyjnych procesów obliczeń determinowanych „nadsypywaniem” dodatkowych warstw).

Niezależnie od zastosowanego wzoru należy zawsze pamiętać, że wszystkie parametry charakteryzujące zmianę odkształcenia w wyniku wzrostu wilgotności ($\varepsilon_{vsri}^{(N)}$, $\Delta e_{sri}^{(N)}$ oraz CP) są funkcją naprężenia na poziomie środka wydzielonej warstwy. Wartość tego naprężenia można obliczyć ze wzoru (7), uwzględniając w nim konieczną liczbę iteracyjnych powtórzeń.

Stosując powyższy schemat obliczeniowy, należy jednak pamiętać, że odkształcenie w wyniku wzrostu wilgotności w ogólnym przypadku może mieć zarówno znak dodatni – zmniejszenie objętości (osiadanie zapadowe), jak też ujemny – wzrost objętości (pęcznienie).

Uwzględnienie dodatkowego naprężenia od ciężaru wody porowej

Przedstawiona powyżej procedura obliczeniowa nie uwzględnia oddziaływania wody gruntowej – wzrostu ciężaru objętościowego w wyniku nasycenia wodą oraz działania siły wyporu. W celu uwzględnienia wzrostu ciężaru objętościowego w wyniku nasycenia wodą, a tym samym – wzrostu naprężeń pionowych przy równoczesnym braku działania sił wyporu (brak ciągłego horyzontu wodonośnego), do obliczania naprężeń pionowych należy zastosować formułę:

$$\sigma_{vi}^{(N)} = 0.5 \cdot \gamma_{sri}^{(N)} \cdot h_i^{(N)} + \sum_{i+1}^N \gamma_{sri}^{(N)} \cdot h_i^{(N)} \quad (17)$$

gdzie $\gamma_{sri}^{(N)}$ – ciężar objętościowy gruntu i -tej warstwy po zawodnieniu.

Ciężar objętościowy gruntu każdej z warstw po zawodnieniu równy jest:

$$\gamma_{sri}^{(N)} = \gamma_{di}^{(N)} + \frac{e_i^{(N)}}{1 + e_i^{(N)}} \cdot \gamma_w \quad (18)$$

gdzie:

$$\gamma_{di}^{(N)} \quad \text{– ciężar objętościowy szkieletu gruntowego } i\text{-tej warstwy } \gamma_{di}^{(N)} = \frac{100 \cdot \gamma_i^{(N)}}{100 + w_0},$$

$$e_i^{(N)} \quad \text{– wskaźnik porowatości } i\text{-tej warstwy } e_i^{(N)} = e_0 - \varepsilon_{vi}^{(N)} \cdot (1 + e_0).$$

Jeżeli grunt znajduje się poniżej swobodnego zwierciadła wody gruntowej, to obliczając wartość naprężeń $\sigma_{vi}^{(N)}$, należy we wzorze (17) ciężar objętościowy $\gamma_{sri}^{(N)}$ zastąpić ciężarem objętościowym z uwzględnieniem wyporu $\gamma_i^{\prime(N)}$ według zależności:

$$\gamma_i^{\prime(N)} = \gamma_{sri}^{(N)} - \gamma_w \quad (19)$$

WYNIKI PRZYKŁADOWYCH OBLICZEŃ

Wykorzystując zaproponowaną metodę, dokonano przykładowych obliczeń osiadań gruntu zwałowanego od obciążenia własnego oraz osiadania zapadowego. Obliczenia przeprowadzono dla zwałowiska o wysokości $H_0 = 50$ m zbudowanego z urobionych niebieskich iłów płoceńskich z nadkładu KWB „Belchatów”. Wymagany procedurą obliczeniową podział masywu zwałowiska na warstwy został przeprowadzony arbitralnie; przyjęto podział na $n = 25$ warstw elementarnych o takiej samej początkowej miąższości $h_0 = 2$ m. Parametry fizyczne zwałowanego gruntu: początkowy wskaźnik porowatości e_0 i jego zmianę z obciążeniem, początkowy ciężar objętościowy γ_0 oraz potencjał osiadania zapadowego CP ustalono w oparciu o wyniki przeprowadzonych badań (Fig. 1A, B oraz Fig. 3). Dobierając ich wartości, kierowano się zasadą, że zanik porowatości, jaki ma miejsce w procesie zwałowania, odpowiada w przybliżeniu zmianom, jakie zachodzą przy obciążeniu statycznym równym 30 kPa (Chwastek 1972, Woźniak 1988). Stąd też za początkowy wskaźnik porowatości e_0 przyjęto wartość równą 1.33, a za początkowy ciężar objętościowy γ_0 – wartość 10.15 kN/m³.

Ostateczne wyniki obliczeń (po dokonaniu trzech iteracyjnych powtórzeń) przedstawiono w tabeli 1 i zobrazowano na diagramach (Fig. 4A, B oraz Fig. 5).

Tabela (Table) 1
Obliczenia osiadania zapadowego
Calculations of collapse settlement

Nr warstwy Number of layer <i>i</i>	$\sigma_{vi}^{(N)}$ [kPa]	$e_i^{(N)}$ [-]	$\varepsilon_{vi}^{(N)} = \frac{\Delta e_{vi}^{(N)}}{1 + e_{vi}}$ [-]	$\Delta h_i^{(N)}$ [m]	$\sum_{i=1}^i \Delta h_i^{(N)}$ [m]	$CP = \frac{\Delta e_{sri}^{(N)}}{1 + e_{vi}}$ [-]	$\Delta h_{sri}^{(N)}$ [m]	$\sum_{i=1}^i \Delta h_{sri}^{(N)}$ [m]
1	659.75	0.645	0.2940	0.59	0.59	0.0120	0.02	0.02
2	639.45	0.645	0.2940	0.59	1.18	0.0125	0.03	0.05
3	619.15	0.650	0.2918	0.58	1.76	0.0130	0.03	0.08
4	598.85	0.650	0.2918	0.58	2.34	0.0135	0.03	0.11
5	578.55	0.655	0.2897	0.58	2.92	0.0140	0.03	0.14
6	558.25	0.655	0.2897	0.58	3.50	0.0145	0.03	0.17
7	537.95	0.660	0.2876	0.58	4.08	0.0150	0.03	0.20
8	517.65	0.660	0.2876	0.58	4.65	0.0160	0.03	0.23
9	497.35	0.665	0.2854	0.57	5.22	0.0165	0.03	0.26
10	477.05	0.670	0.2833	0.57	5.79	0.0175	0.04	0.30
11	456.75	0.675	0.2811	0.56	6.35	0.0180	0.04	0.34
12	436.45	0.700	0.2833	0.57	6.92	0.0190	0.04	0.38
13	416.15	0.680	0.2790	0.56	7.48	0.0200	0.04	0.42
14	395.85	0.685	0.2768	0.55	8.03	0.0210	0.04	0.46
15	375.55	0.690	0.2747	0.55	8.58	0.0230	0.05	0.51
16	355.25	0.695	0.2725	0.55	9.12	0.0245	0.05	0.56
17	334.95	0.700	0.2704	0.54	9.67	0.0260	0.05	0.61
18	314.65	0.705	0.2682	0.54	10.20	0.0280	0.06	0.67
19	294.35	0.705	0.2682	0.54	10.74	0.0310	0.06	0.73
20	274.05	0.710	0.2661	0.53	11.27	0.0340	0.07	0.80
21	253.75	0.725	0.2597	0.52	11.79	0.0385	0.08	0.88
22	233.45	0.730	0.2575	0.52	12.31	0.0410	0.08	0.96
23	213.15	0.740	0.2532	0.51	12.81	0.0470	0.09	1.05
24	192.85	0.750	0.2489	0.50	13.31	0.0525	0.11	1.06
25	172.55	0.765	0.2425	0.48	13.79	0.0570	0.11	1.17
26	152.25	0.780	0.2361	0.47	14.27	0.0700	0.14	1.31
27	131.95	0.800	0.2275	0.45	14.72	0.0785	0.16	1.47
28	111.65	0.825	0.2167	0.43	15.16	0.0980	0.20	1.67
29	91.35	0.860	0.2017	0.40	15.56	0.0108	0.22	1.89
30	71.05	0.900	0.1845	0.37	15.93	0.1400	0.28	2.17
31	50.75	0.965	0.1567	0.31	16.24	0.1700	0.34	2.51
32	30.45	1.070	0.1116	0.22	16.46	0.1850	0.37	2.88
33	10.15	1.220	0.0472	0.09	16.56	0.2100	0.42	3.30

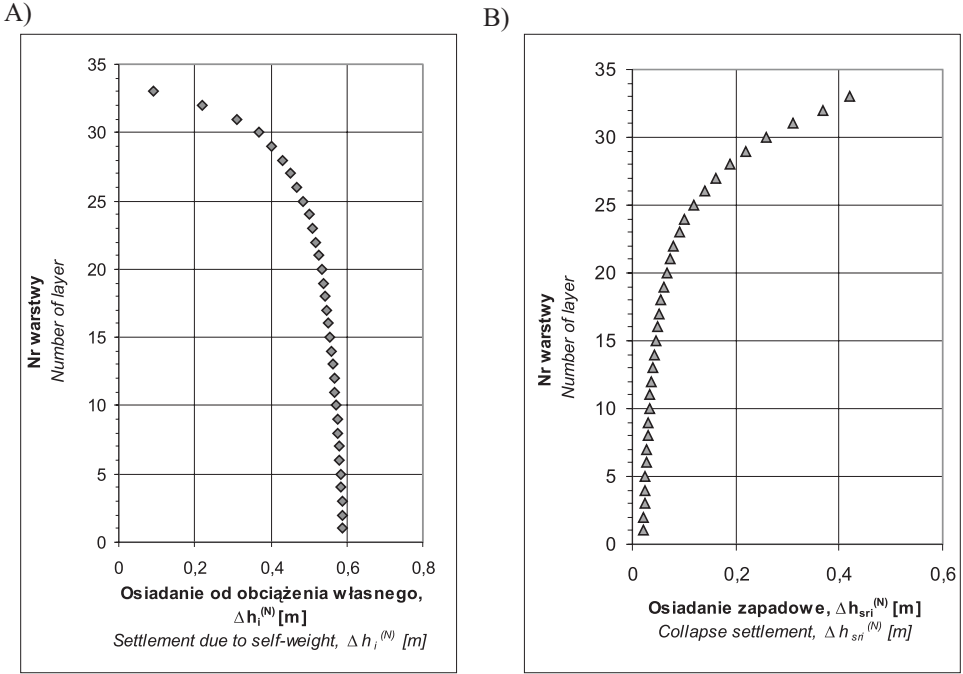


Fig. 4. Wartości osiadań kolejnych warstw zwałowiska: A) od obciążenia własnego; B) w wyniku wzrostu wilgotności – osiedlenie zapadowe

Fig. 4. Settlement following layers of dump: A) due to self-weight; B) due to collapse – collapse settlement

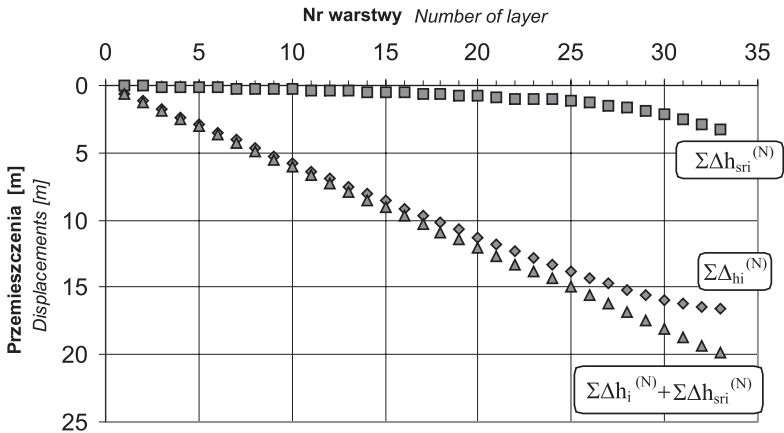


Fig. 5. Przemieszczenia środków warstw: $\Sigma \Delta h_i^{(N)}$ – przemieszczenia od obciążenia własnego, $\Sigma \Delta h_{sri}^{(N)}$ – przemieszczenia od osiadania zapadowego, $\Sigma \Delta h_i^{(N)} + \Sigma \Delta h_{sri}^{(N)}$ – przemieszczenia sumaryczne

Fig. 5. Displacements of midpoint layers: $\Sigma \Delta h_i^{(N)}$ – displacements due to self-weight settlements, $\Sigma \Delta h_{sri}^{(N)}$ – displacements due to collapse settlements, $\Sigma \Delta h_i^{(N)} + \Sigma \Delta h_{sri}^{(N)}$ – total displacements

ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ

Przeprowadzone obliczenia wskazują, że osiadanie świeżo zwałowanego gruntu, który po zakończonym osiadaniu pod obciążeniem własnym tworzy bryłę zwałowiska o miąższości 50 m (dokładnie 49.44 m), osiąga wartość 16.56 m. Ekwiwalentnym jego odpowiednikiem byłoby zatem wymaginowane zwałowisko o wysokości 66 m (33 warstwy o miąższości $h_0 = 2$ m) ze świeżo zwałowanego gruntu o takim samym początkowym wskaźniku porowatości e_0 równym 1.33. Rozkład osiadań z głębokością jest niejednorodny i przebiega zgodnie ze zmianami wskaźnika porowatości, które są funkcją wzrostu naprężeń od ciężaru własnego gruntu. Osiadanie pierwszej, najniższej leżącej warstwy, wynosi 0.59 m, co oznacza, że jej osiadanie pod ciężarem wszystkich nadległych warstw analizowanego zwałowiska sięga 29.5% jej pierwotnej wysokości. Osiadanie ostatniej, 33. warstwy, leżącej bezpośrednio przy wierzchołku zwałowiska, wynosić będzie natomiast tylko 0.09 m, czyli 4.5% pierwotnej wysokości.

Rozkład osiadań zapadowych, spowodowanych wzrostem wilgotności (zawodnieniem), jest w ogólnym przypadku odwrotny do rozkładu osiadań od obciążenia własnego (por. Fig. 4A, B). Obserwowana prawidłowość jest całkowicie logiczna – im większe osiadanie od obciążenia własnego, tym mniejsza porowatość międzybryłowa, a zatem również mniejsza możliwość dalszych deformacji objętościowych w wyniku rozmakania brył w warunkach swobodnego dostępu wody. Całkowite obliczone osiadanie zapadowe gruntu zwałowanego, którego miąższość po zakończonym osiadaniu pod obciążeniem własnym wynosiła 49.44 m, osiągnęło wartość 3.30 m, wahając się od 0.02 m w warstwie pierwszej do 0.42 m w warstwie 33.

Należy również zauważyć, że na skutek wzrostu naprężeń z głębokością, a tym samym – wzrostu zagęszczenia pod obciążeniem własnym, wraz ze wzrostem miąższości zwałowiska udział osiadania zapadowego w całkowitym osiadaniu będzie się systematycznie zmniejszał. W analizowanym gruncie zwałowanym będzie on wynosił: 32% dla zwałowiska o wysokości 20 m, 22.7% w wypadku zwałowiska o wysokości 36 m oraz 16.5% przy wysokości zwałowiska równej 50 m.

PODSUMOWANIE

Wysoka porowatość międzybryłowa gruntów zwałowanych sprawia, że grunty te charakteryzują się dużą niestabilnością struktury i bardzo dużymi osiadaniami tak od obciążeń własnych, jak i w wyniku wzrostu wilgotności. Prawidłowe prognozowanie osiadań tego ośrodka wymaga uwzględnienia znacznych zmian właściwości fizycznych, głównie porowatości, w profilu głębokościowym zwałowiska. Takie podejście wymaga zastosowania specjalnej metody obliczeniowej.

Zaprezentowana metoda oparta na rachunku iteracyjnym pozwala, w odniesieniu do zwałowiska o dowolnej wysokości i znanym profilu, prognozowanie wielkości osiadań od obciążeń własnych oraz osiadań zapadowych. Rezultaty takiego prognozowania mają duże znaczenie przy projektowaniu docelowej wysokości zwałowisk oraz bilansowaniu dysponowanej i wymaganej objętości zwałowanych mas gruntowych.

LITERATURA

- Chwastek J., 1972. Ochrona i rekultywacja powierzchni w górnictwie odkrywkowym. *Górnictwo*, XIII, 3–156.
- Lawton E.C., Fragaszy R.J. & Hardcastle J.H., 1989. Collapse of compacted clayey sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115, 9, 1252–1267.
- Nwabuokeyi S.O. & Lovell C.W., 1986. Compressibility and settlement of compacted fills. W: Yong R.N. & Townsend F.C. (eds), *Consolidation of soils: Testing and evaluation*, ASTM, STP 892, Philadelphia, 184–202.
- Woźniak H., 1988. *Właściwości fizyczno-mechaniczne gruntów zwałowanych z uwzględnieniem zawodnienia na przykładzie KWB „Bełchatów”*. AGH, Kraków (dysertacja doktorska, niepublikowana).
- Woźniak H., 1999. *Właściwości deformacyjne i filtracyjne zwałowanych gruntów spoistych z uwzględnieniem procesu konsolidacji w aspekcie ich budowlanego wykorzystania*. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN nr 9 T12 B 008 10. AGH, 1–112 (maszynopis).
- Woźniak H., 2007. Osiadanie spoistych gruntów zwałowanych pod obciążeniem własnym – opis procesu w świetle badań modelowych. *Geologos*, 11, 401–409.
- Woźniak H., Herzig J. & Rzeszut P., 1997. Collapse subsidence in dump soils of unstable structure. *2nd International Green Symposium on Geotechnics and the Environment*, Kraków, 184–191.

Praca została wykonana w ramach badań własnych ZHiGI AGH, nr umowy 10.10.140.452.

Summary

High porosity of dump soils causes their high settlement. Among several, very important components of the settlement (particularly for cohesive dump soils), one is the collapse settlement caused by increased moisture. This type of settlement process readily develops in dumps located in inactive pits when mine drainage system is off and the restitution of groundwater table starts.

Studies on collapse settlement (Woźniak 1988, 1999, Lawton *et al.* 1989) revealed that, besides the soil type, the factor important for the amount of settlement is the compaction of soil, which is directly correlated with the values of stress resulting from the self-weight (Fig. 2). The proper prognosis of collapse settlement requires the recognition of changes in void ratio before and after saturation with water, and must be preceded by calculations of stress changes with the depth. In the case of dump soils, which show high instability of structure, physical and mechanical properties (Fig. 1) the determination of stress changes with the depth requires the application of specialized calculation method based upon iterations.

In the following paper the calculation method is proposed for settlement of a dump soil deposited in a closed and remediated open pit mine. The calculations include the stress from self-weight (formulae (5), (13) and (13a)) and the collapse settlement caused by resti-

tution of groundwater table (formulae (14) and (17)). The proposed calculation method is based upon the solution presented by Nwabuokei & Lovell (1985) for settlement of embankments built of compacted soils.

The advantage of proposed solution is that calculations of stress include changes in compaction of dumped soil under the self-weight. Another advantage is the iteration method, which enables the calculation of stresses for presumed heights of a dump, despite the progressing settlement (formulae (7)–(9)).

The proposed method was applied for case calculations based upon compressibility and collapse potential parameters, determined from samples of modelled lump size (Figs 2, 3). Calculations were run for a dump of height $H_0 = 50$ m, composed of Pliocene clays stripped from the overburden of the brown-coal deposit at the “Bełchatów” Mine. The results demonstrate that the self-weight settlement of newly dumped soil forming 50-meters-thick body reaches 16.56 m (Tab. 1, Fig. 5). Distribution of settlement values with the depth is inhomogenic and remains in accordance with the changes of porosity index, which, in turn, are a function of increasing stress resulting from self-weight of soil (Fig. 4A). Total collapse settlement of dumped soil of initial thickness (after self-weight settlement) reaching 49.44 m was 3.30 m and its distribution was generally reverse to that of self-weight settlement (Fig. 4B).

The prognoses based upon the proposed method are of vital importance for designing the final height of dumps and for balancing of true and required volumes of dumped soils.