

Struktura i geotechniczne właściwości wybranych gruntów antropogenicznych

Stanisław Rybicki¹, Henryk Woźniak¹



S. Rybicki

H. Woźniak

Structure and geotechnical properties of selected anthropogenic soils. Prz. Geol., 58: 926–932.

Abstract. Among the anthropogenic soils an distinguish group are dump soils originating mainly from both the open pit and underground mining operations. Dump soils are stored as a spoil banks of height up to 200 m and area up to several square kilometers. As gigantic earthen structures they must be designed and built accurately in order to assure their stability and safety of surrounding terrain. In order to attain this purpose geotechnical parameters of dump soil must be determined, particularly shear strength, compressibility and collapse settlement potential. In the following paper the results of studies on mentioned above parameters are presented and the relationships between structural type of dump soil, load, time and geotechnical parameters are discussed. Features of dump soils differ from those of natural soils. Their structure is initially loose and, in the case of cohesive dump soil, it consists of various-size lumps and pieces of clayey natural soils. Such soil reveal a double porosity including inter-lumps and intra-lump

porosities. Loading and external factors such as rainfalls, weathering processes etc., cause permanent changes of this structure and, consequently, changes the geotechnical parameters of dump soil, as illustrated below by a set of diagrams.

Keywords: spoil banks, stability of spoil banks, geotechnical parameters of dump soil

Zainteresowanie właściwościami gruntów antropogenicznych pojawiło się stosunkowo niedawno i wiąże się głównie z dwoma kwestiami. Pierwszą z nich jest szybki przyrost ilości tych gruntów, które wytwarzane są zwłaszcza przez takie gałęzie przemysłu jak górnictwo, budownictwo, hutnictwo czy energetyka. Drugą jest możliwość wykorzystania gruntów antropogenicznych jako podłoża budowlanego lub materiału konstrukcyjnego – zwłaszcza w budownictwie ziemnym. Nie bez znaczenia pozostaje również niekorzystne oddziaływanie niektórych rodzajów gruntów antropogenicznych na środowisko naturalne.

Szczególnym, wyróżniającym się ilościowo rodzajem gruntów antropogenicznych są tzw. grunty zwałowane, powstające niejako przy okazji prowadzenia prac górniczych. Składają się one głównie ze skał płonnych, które stanowią otoczenie – w górnictwie podziemnym – lub w przypadku górnictwa odkrywkowego – nadkład złóż eksploatowanych. Grunty te, zwłaszcza w górnictwie odkrywkowym, są w większości składowane na zwałowiskach kopalnianych, będących budowlami ziemnymi o wysokości przekraczającej niekiedy 200 m i powierzchni dochodzącej do kilku kilometrów kwadratowych. Odpowiednie formowanie zwałowisk i zapewnienie im stateczności warunkuje bezpieczeństwo prac górniczych oraz terenu otaczającego zwałowiska.

Zwałowiska, jako budowle ziemne, wymagają szczególnego traktowania. Wynika to z zasadniczo odmiennych, w stosunku do gruntów rodzimych, właściwości materiału, z którego są zbudowane – gruntów zwałowanych. Grunty te w wyniku zniszczenia ich pierwotnej, naturalnej struktury stają się nowym rodzajem ośrodka gruntowego, którego zachowanie często znacznie odbiega od zachowania gruntów rodzimych i nie podlega prawom klasycznej mechaniki gruntów. Procesy urabiania, transportu i zwałowania sprawiają, że grunty zwałowane wykazują dużą niestabilność cech strukturalno-teksturalnych i właściwości fizyczno-mechanicznych. Ośrodek taki cechuje bardzo wysoka

podatność na czynniki oddziaływania zewnętrznego. W trakcie długotrwałego i złożonego procesu dochodzi w nim do radykalnych zmian struktury i właściwości.

Przebudowa niestabilnej struktury gruntów zwałowanych, będąca jedną z najbardziej specyficznych cech tego ośrodka, jest bezpośrednią i naturalną przyczyną ich znacznych osiadań i zaburzeń stateczności. Proces ten jest złożony, długotrwały i wielofazowy. Zapoczątkowany zostaje już podczas zwałowania, a następnie z różną intensywnością rozwija się w kolejnych fazach prac górniczo-technologicznych związanych z formowaniem, rekultywacją i zagospodarowywaniem zwałowiska.

Znajomość zasad rządzących ścisłością i osiadań gruntów zwałowanych oraz zmianami innych cech fizyczno-mechanicznych (zwłaszcza wytrzymałości na ścinanie) spełnia bardzo ważną rolę w rozwiązywaniu zagadnień geotechnicznych związanych z budową i zagospodarowaniem zwałowisk. Szczególnie istotne są w tym przypadku:

- ocena stateczności skarp zwałowisk, zarówno w ujęciu globalnym (całego zwałowiska), jak i lokalnym;
- racjonalne wymiarowanie geometrii zwałowisk i wyznaczanie pojemności, w tym ocena zmienności ciężaru objętościowego w funkcji obciążenia, co jest podstawą oszacowania współczynnika rozluźwienia niezbędnego do oceny pojemności zwałowiska;
- ocena zróżnicowania osiadań, która stanowi kryterium możliwości wykorzystania wierzchołków zwałowisk do budowy składowisk odpadów lub innych obiektów;
- podejmowanie prawidłowych decyzji dotyczących sposobu i kierunków rekultywacji oraz zagospodarowania terenów poeksploatacyjnych;
- prognozowanie deformacji powstających w wyniku odbudowy zwierciadła wód gruntowych – mogą one wystąpić również po zakończeniu rekultywacji czy nawet po zagospodarowaniu terenu zwałowiska.

¹Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; rybicki@geol.agh.edu.pl, hwozniak@geol.agh.edu.pl

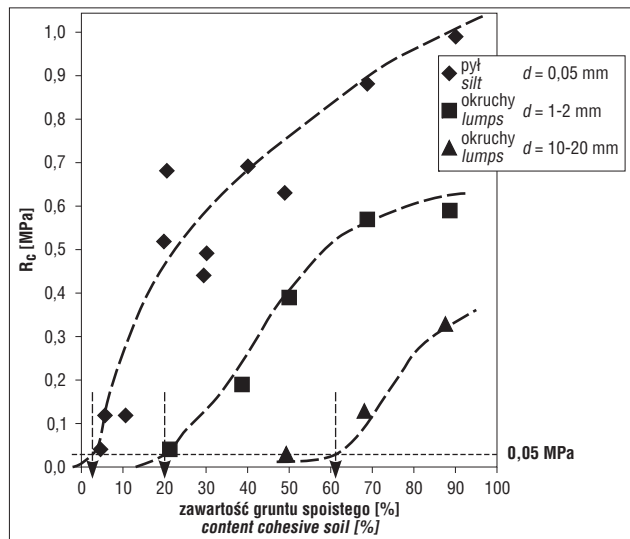
W niniejszym artykule opisano niektóre właściwości strukturalno-geotechniczne gruntów zwałowanych, pochodzących z kopalni odkrywkowych węgla brunatnego w Bełchatowie i Turowie oraz z byłej odkrywkowej kopalni siarki w Machowie. Badania właściwości prowadzono na próbkach odpowiednio komponowanych ze składników tworzących nadkład złóż lub na próbkach gruntów pobieranych wprost ze zwałowisk.

Typy litologiczno-strukturalne gruntów zwałowanych z kopalni odkrywkowych

Skład litologiczny gruntów zwałowanych pochodzących z wyżej wymienionych kopalni odkrywkowych determinowany jest litologią utworów występujących w nadkładzie eksploatowanych złóż, a także stosunkami ilościowymi (miąższościowymi) poszczególnych warstw gruntowych nadkładu. W przypadku wszystkich trzech kopalń są to grunty formacji trzecio- i czwartorzędowej. Utwory czwartorzędowe reprezentowane są przez gliny zwałowe, mułki zastoiskowe oraz różnego rodzaju piaski i żwiry, utwory trzeciorzędowe natomiast – głównie przez ilaste utwory miocenu i pliocenu z domieszką piasków i żwirów. Generalnie można podzielić je na typowe utwory spoiste (gliny zwałowe, ility mioceni i plioceni, częściowo utwory zastoiskowe) i sypkie (piaski i żwiry). W gruncie zwałowanym, z uwagi na zmienność składu litologicznego utworów występujących w różnych częściach zwałowiska, spotyka się partie zbudowane wyłącznie ze składników pochodzących z gruntów spoistych lub wyłącznie z gruntów sypkich, a także z ich mieszaniny (w różnej proporcji ilościowej). W związku z tym grunty zwałowane mogą mieć ogólnie charakter ośrodka spoistego lub sypkiego (ze spójnością lub bez), podobnie jak grunty rodzime, przy czym kryteria tego podziału są tu inne niż dla gruntów rodzimych, gdzie do spoistych zalicza się grunty o zawartości frakcji iltowej $\geq 2\%$. Grunt zwałowany składający się wyłącznie z brył i okruchów rodzimych gruntów spoistych jest jednoznacznie ośrodkiem spoistym (po pewnym czasie i przy pewnych wartościach obciążeń na grunt). Podobnie grunt zwałowany składający się wyłącznie z gruntów rodzimych sypkich jest jednoznacznie ośrodkiem sypkim bez spójności. Sprawy komplikują się w przypadku często występujących mieszanin brył i okruchów gruntu spoistego i sypkiego. O ogólnej spoistości nie decyduje wtedy zawartość frakcji iltowej, którą moglibyśmy otrzymać z analizy granulometrycznej gruntu zwałowanego, lecz stopień rozproszenia lub inaczej wielkość powierzchni rozwiniętej materiału spoistego w mieszaninie z gruntem sypkim. Tak więc spoistość zależy od wymiarów (średnicy) brył i okruchów materiału spoistego i od jego procentowego udziału w mieszaninie. Potwierdzają to laboratoryjne badania modelowe mieszanin iltu mioceni z zwałowiska kopalni siarki w Machowie rozdrobionego do różnych frakcji (ryc. 1) i średnioziarnistego piasku z czwartorzędowego nadkładu złoża. Subiektywnie, jako kryterium uzyskania spoistości przez dany rodzaj mieszaniny, przyjęto wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie większą od 0,05 MPa po konsolidacji w warunkach zawilgocenia (Rybicki, 1986). Przy dużym rozdrobieniu materiału ilastego (frakcja o średnicy $d = 0,05$ mm) mieszanina uzyskuje cechy gruntu spoistego przy około 3–4% zawartości tego materiału. Przy większej średnicy okruchów iltu ilość materiału spoistego niezbędna do nadania cech spoistości mieszaninie wzrasta do około 22–24% przy średnicach okruchów $d = 1–2$ mm i odpowiednio do około 62–63% przy średnicach $d = 10–20$

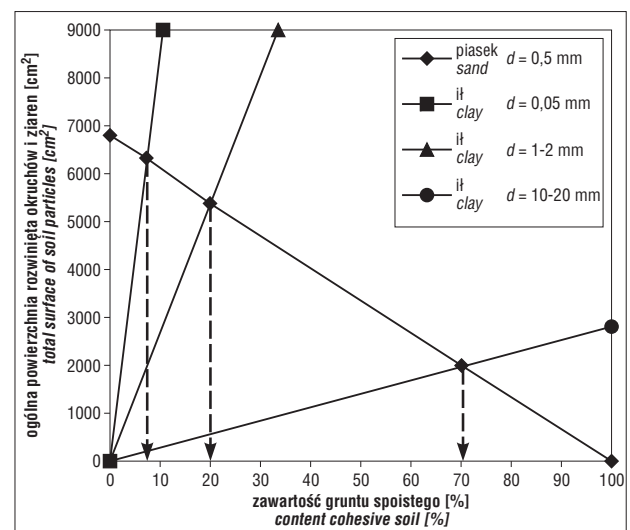
mm. Uzyskanie początkowych cech spoistości przez mieszanie okruchów iltu z piaskiem następuje w sytuacji, gdy ogólna powierzchnia rozwinięta danej frakcji rozdrobionego iltu zrównuje się z powierzchnią rozwiniętą danej procentowej domieszki piasku (ryc. 2). Dochodzi wówczas do możliwości wzajemnego styku okruchów iltu, będącego materiałem spajającym.

Warto zauważyć, że punkty przecięcia linii reprezentującej zmiany powierzchni rozwiniętej ziaren piasku z liniami powierzchni rozwiniętej różnych frakcji bryłek iltu (ryc. 2) odpowiadają w przybliżeniu wartościom procentowej zawartości gruntu spoistego (o tej samej średnicy okruchów) nadającego cechy spoistości (ryc. 1). Stopień rozproszenia materiału kohezywnego (średnica okruchów) i jego procentowa zawartość w mieszaninach z materiałem sypkim (niekohezywnym) wpływa w efekcie na inne cechy geotechniczne gruntu zwałowanego (ściśli-



Ryc. 1. Zależność pomiędzy wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie a procentowym udziałem iltu mioceni w mieszaninie z piaskiem średnioziarnistym

Fig. 1. Relationship between unconfined compression strength and percentage of Miocene clay in mixture with medium-grained sand



Ryc. 2. Zależność ogólnej powierzchni rozwiniętej bryłek i ziaren mieszaniny gruntowej od ich procentowej zawartości w mieszaninie

Fig. 2. Relationship between total surface of soil particles and their percentage content in mixture

wość, wytrzymałość na ścinanie, podatność na osiadanie zapadowe itp.).

Niestabilność struktury i cech geotechnicznych gruntu zwałowanego

Pod pojęciem struktury gruntu zwałowanego należy rozumieć przestrzenny układ ziaren gruntów sypkich oraz brył gruntów spoistych lub rzadziej odłamków i okruchów gruntów skalistych i kamienistych. Strukturę można też interpretować jako układ wszystkich wyżej wymienionych elementów w postaci mieszaniny o różnym składzie i proporcjach. Jak wspomniano wcześniej, cechą charakterystyczną takich mieszanin jest ich wysoka niestabilność, czyli podatność na czynniki zewnętrzne, głównie obciążenie, przepływ i przesiąkanie wody oraz wietrzenie, które powodują ich długotrwałą, stopniowo zanikającą w czasie przebudowę.

Struktura gruntu zwałowanego i proces jej stabilizacji w znacznym stopniu zależy od rodzaju elementów, z których zbudowany jest dany grunt. Można wydzielić trzy zasadnicze strukturalne modele gruntu zwałowanego:

- model ośrodka sypkiego,
- model ośrodka spoistego,
- model ośrodka sypko-spoistego.

Ośrodek sypki może składać się z piasków, żwirów, pospółek i otczaków, niezmiennych pod względem składu w stosunku do gruntu rodzimego, z którego powstały, a różniących się od niego jedynie zagęszczeniem i zniszczeniem pierwotnej tekstury. Składniki tego gruntu można uznać za nieodkształcalne podlegające prawom klasycznej mechaniki ośrodków rozdrobnionych. Ośrodek spoisty jest natomiast złożony w całości z okruchów i brył gruntu spoistego, często o różnym charakterze litologicznym (ryc. 3). Charakterystyczną jego cechą jest tzw. piętrowa podwójna struktura – struktura wewnętrzna brył podobna do gruntu rodzimego (mezostruktura) oraz makrostruktura utworzona przez zespół brył i okruchów. Bryły i

okruchy posiadają w tym przypadku ograniczoną wytrzymałość i nie można ich uznawać za nieodkształcalne. Nie jest to więc ośrodek gruntowy rozdrobniony w rozumieniu klasycznej mechaniki gruntów. Trzeci model strukturalny – sypko-spoisty – jest najbardziej skomplikowany, a jego zachowanie oraz cechy spoistości (lub ich brak) zależą od wspomnianych wcześniej proporcji ilościowych składników sypkich i spoistych oraz od stopnia rozdrobnienia tych ostatnich.

W zasadzie, z wyjątkiem sypkiego modelu strukturalnego gruntu zwałowanego, ośrodki te są bardzo podatne na działanie takich czynników jak obciążenie od ciężaru własnego lub obciążenie zewnętrzne, zmiany zawilgocenia (infiltracja opadów atmosferycznych lub przenikanie wód gruntowych), procesy wietrzenia. Powoduje to dość istotne zmiany nie tylko struktury gruntu (przestrzenny układ brył i okruchów, zacieranie się konturów brył, odbudowa sił spójności pomiędzy bryłami materiału spoistego itp.), lecz przede wszystkim cech fizyczno-mechanicznych (geotechnicznych) tych gruntów w czasie.

Opis wybranych właściwości geotechnicznych poszczególnych typów gruntu zwałowanego

Ścisłość. Zarówno co do wartości parametrów, jak i postaci charakterystyk materiałowych, zależy ona przede wszystkim od strukturalnego modelu gruntu. Najbardziej zbliżone do zachowań gruntów rodzimych są charakterystyki gruntów modelu sypkiego, do których, jak zaznaczono to już uprzednio, można stosować prawa klasycznej mechaniki gruntów odnoszące się do ośrodków rozdrobnionych. Istotne różnice dotyczą natomiast wartości odpowiednich parametrów, które mogą być nawet kilkakrotnie niższe niż w przypadku gruntów rodzimych. Na większą ścisłość gruntów zwałowanych wpływa głównie znaczne rozluźnienie i wzrost porowatości, które mają miejsce w procesie urabiania i transportu. Nie bez znaczenia może być również wpływ zniszczenia elementów pierwotnej tek-



Ryc. 3. Grunt zwałowany złożony z rodzimych gruntów spoistych. Fot. A. Borecka.

Fig. 3. View of dump soil composed of lumps and pieces of cohesive natural soil. Photo by A. Borecka

stury (warstwowanie, laminacja, rozfrakcjonowanie) oraz zniszczenie ewentualnej niewielkiej spójności, głównie o charakterze cementacyjnym.

Na podstawie badań laboratoryjnych (Woźniak, 2009) stwierdzono, że wartości edometrycznych modułów ścisłości ogólnej wahają się w granicach 2–8 MPa dla piasków drobnych i średnich oraz 2–10 MPa dla żwirów i pospółek. Natomiast podczas badań polowych przeprowadzonych na zwałowisku zewnętrznym KWB Bełchatów, wykonanych dylatometrem Marchetti'ego (DMT), otrzymano większe wartości (Kaczyński i in., 2004). Moduł ścisłości występujących tam piasków drobnych (w stanie średnio zagęszczonym) z reguły wahał się od 3 do 10 MPa na głębokościach 5–10 m oraz od 10 do nawet 30 MPa na głębokościach 10–25 m.

Całkowicie odmienne zachowanie w warunkach obciążenia prezentują grunty modelu spoistego. Przyczyną tego zróżnicowania jest wysoka niestabilność piętrowej struktury, charakteryzującej się dużymi przestrzeniami porów międzybryłowych, co czyni ją układem niezwykle wrażliwym i podatnym na oddziaływanie czynników zewnętrznych. Oddziaływania te – głównie obciążenie, zmiany wilgotności i procesy wietrzeniowe – uruchamiając długotrwały proces przebudowy struktury, pociągają za sobą ciągłą zmianę właściwości fizycznych i mechanicznych. Istotny wpływ na zakres przeobrażeń strukturalnych spoistych gruntów zwałowanych i na kształtowanie się ich właściwości mają również cechy samego gruntu zwałowanego, a więc skład litologiczny i bryłowy, wilgotność początkowa oraz początkowy stan zagęszczenia.

Krzywą ścisłości pierwotnej $e-\sigma'$ gruntów zwałowanych modelu spoistego charakteryzuje – w odróżnieniu od krzywej ścisłości gruntów rodzimych o nienaruszonej strukturze – zdecydowanie większy przedział zmienności wskaźnika porowatości oraz bardziej stromy przebieg w początkowym zakresie obciążeń, co wskazuje na względnie duże odkształcenia już przy stosunkowo niewielkich obciążeniach. Z badań przeprowadzonych na zwałowanych iltach krakowieckich pobranych z nadkładu odkrywkowej kopalni siarki w Machowie (Woźniak i in., 1999) wynika, że edometryczny moduł ścisłości ogólnej dla zakresu obciążeń 30–600 kPa jest aż od 4 do 7 razy większy od tego modułu dla zakresu obciążeń 30–60 kPa. W pierwszym przypadku wartości tego parametru, w zależności od

składu bryłowego i wilgotności, wahały się w granicach 1,3–2,4 MPa, w drugim odpowiednio od 0,3 do 0,4 MPa.

Ścisłość najbardziej złożonego modelu gruntu zwałowanego – modelu sypko-spoistego – jest mocno uzależniona od relacji ilościowej obu składowych komponentów (ryc. 4). W najbardziej ogólnym przybliżeniu można przyjąć, że w zależności od wzajemnej proporcji gruntów sypkich do spoistych odpowiednie charakterystyki będą w mniejszym lub większym stopniu zbliżone do charakterystyk modelu sypkiego lub spoistego. Wykorzystując prosty model sypko-spoistego gruntu zwałowanego (ryc. 5) o zmiennych odpowiadających procentowej zawartości obu komponentów wykazano, że wzrost udziału gruntu sypkiego, który stanowi wypełniacz porów międzybryłowych, wywołuje spadek całkowitej porowatości układu, aż do momentu, w którym objętość gruntu sypkiego zrównoważy objętość porów międzybryłowych gruntu spoistego (Woźniak, 2009). Przy dalszym wzroście udziału gruntu sypkiego mogą następować już tylko niewielkie zmiany całkowitej porowatości, która – zależnie od wzajemnej relacji pomiędzy porowatymi obu jego elementów składowych – może się albo nadal zmniejszać albo też nieznacznie zwiększać. Wzrost zawartości gruntu sypkiego, który wypełniając pory międzybryłowe „usztynia” strukturę całego układu, generuje odpowiedni wzrost modułów ścisłości.

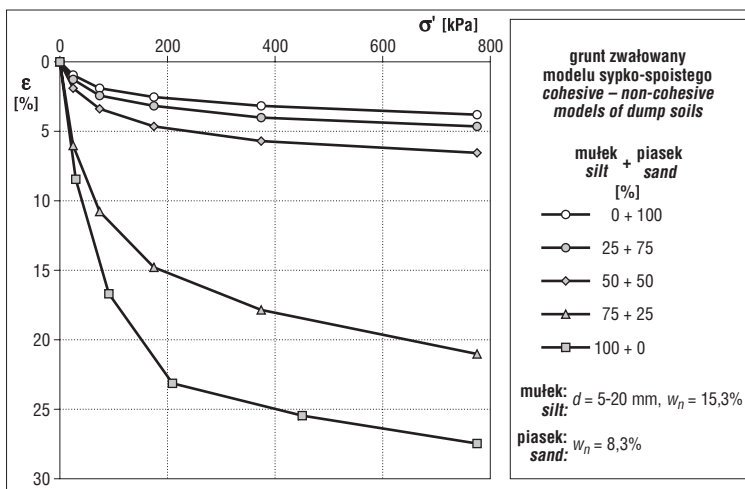
Osiadanie zapadowe. Jest to osiadanie wywołane wzrostem wilgotności przy niezmiennym obciążeniu, które stanowi istotny składnik osiadań, jakim podlegają grunty zwałowane w procesie stabilizacji ich struktury i formowania właściwości.

Szczególnie duże rozmiary zjawisko to przybiera w gruntach modelu spoistego oraz sypko-spoistego z przeważającą zawartością gruntów spoistych. W obu ośrodkach proces zachodzi w wyniku ich rozluźnionej, niestabilnej struktury bryłowej, która w efekcie wzrostu wilgotności, a także związanego z nim rozmarania brył i narastania odkształceń plastycznych, ulega daleko posuniętej przebudowie. Zewnętrznie zjawisko to przejawia się w postaci znacznych, szybko narastających osiadań, często o charakterze zapadowym.

Główne czynniki kształtujące wielkość i przebieg procesu osiadania zapadowego można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej należą czynniki związane z rodzajem i właściwościami gruntu, wśród których wyróżnić można, poza modelem strukturalnym, skład litologiczny, odporność na rozmaranie i działanie wody oraz obecność międzybryłowych i międzyziarnowych wiązań. Drugą grupę stanowią powiązane ze sobą czynniki oddziaływania zewnętrznego. Zalicza się do nich zagęszczenie początkowe, czyli zagęszczenie gruntu przed jego nasyceniem, wilgotność początkową i historię jej zmian, a także obciążenie jakiemu grunt został poddany przed nasyceniem oraz historię jego przebiegu.

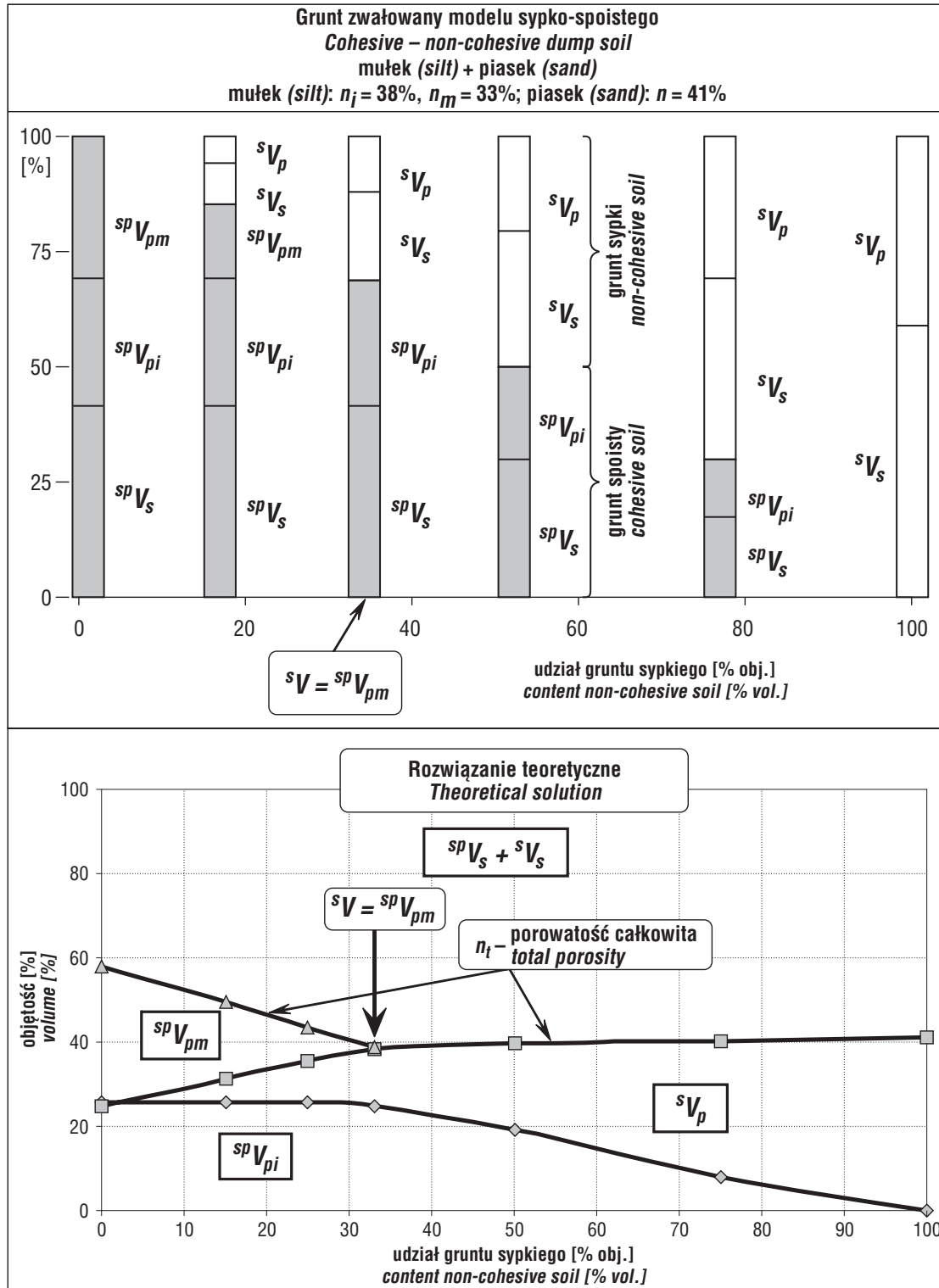
Spośród szeregu parametrów charakteryzujących podatność gruntów na proces osiadania zapadowego w literaturze światowej powszechnie stosowany jest potencjał osiadania zapadowego CP określony wzorem:

$$CP = \frac{h_{us} - h_s}{h_0}, \text{ gdzie:}$$



Ryc. 4. Krzywe ścisłości gruntów zwałowanych modelu sypkiego, spoistego i sypko-spoistego

Fig. 4. Compressibility curves of noncohesive, cohesive and cohesive-noncohesive structural models of dump soils



Ryc. 5. Zmienność relacji pomiędzy porowatością całkowitą sypko-spoistego gruntu zwałowanego a porowatością jego elementów składowych: spV_s – objętość szkieletu gruntu spoistego, spV_{pi} – objętość porów intragranularnych gruntu spoistego, spV_{pm} – objętość porów międzybryłowych gruntu spoistego, n_t – porowatość całkowita, sV_s – objętość szkieletu gruntu sypkiego, sV_p – objętość porów gruntu sypkiego, sV – objętość gruntu sypkiego, n_i – porowatość intragranularna, n_m – porowatość międzybryłowa

Fig. 5. Variability of dependence between overall void ratio of cohesive-noncohesive structural model of dump soil and void ratio of its components: spV_s – volume skeleton of cohesive soil, spV_{pi} – volume intragranular pores of cohesive soil, spV_{pm} – volume intergranular pores of cohesive soil, n_t – total porosity, sV_s – volume skeleton of non-cohesive soil, sV_p – volume pores of non-cohesive soil, sV – volume of non-cohesive soil, n_i – intragranular porosity, n_m – intergranular porosity

- h_{us} – wysokość próbki po umownym zakończeniu osiadań przed nasyceniem jej wodą,
 h_s – wysokość próbki przy tym samym obciążeniu, po całkowitym nasyceniu wodą i umownym zakończeniu osiadań,
 h_0 – wysokość początkowa próbki nieobciążonej.

Najniższe wartości potencjału osiadania zapadowego wykazują grunty modelu sypkiego, najwyższe (nawet 10 razy przekraczające wartość graniczną dla gruntów o strukturze trwałej $CP=0,02$) grunty zaliczane do modelu spoistego. Dla gruntów sypko-spoistych wartość potencjału osiadania zapadowego jest zależna od zawartości gruntu sypkiego, który wypełniając przestrzeń między bryłami gruntu spoistego wpływa istotnie na zmniejszenie tego potencjału. Szczególnie wyraźnie wpływ ten zaznacza się w przedziale, w którym zawartość gruntu sypkiego jest mniejsza od porowatości międzybryłowej.

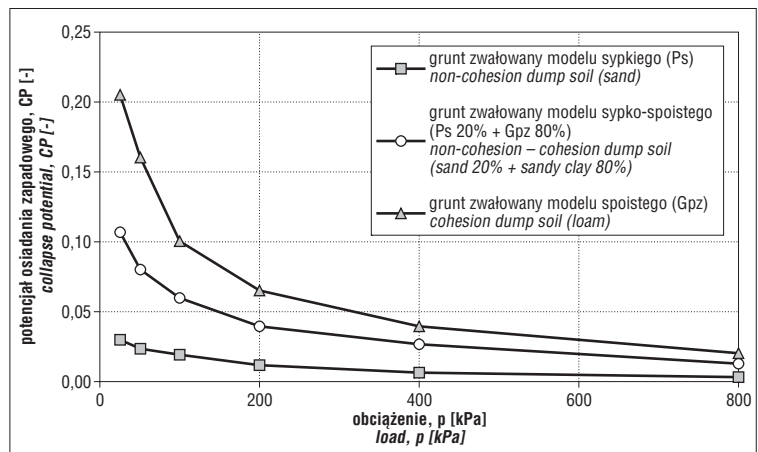
Zależność potencjału osiadania zapadowego od obciążenia, któremu poddany jest grunt, nie ma charakteru liniowego. Wysokie wartości potencjału występujące już przy niewielkim obciążeniu systematycznie maleją z jego wzrostem, szczególnie wyraźnie w zakresie do 200 kPa, a przy naprężeniu ok. 800 kPa zbliżają się do wartości granicznej dla gruntów o strukturze trwałej (ryc. 6). W przeciwieństwie do tej, wyraźnie krzywoliniowej zależności, bardzo dobrą korelację liniową obserwuje się pomiędzy spadkiem potencjału a wzrostem zagęszczenia początkowego (ryc. 7).

Istotnym czynnikiem wpływającym na wartość potencjału CP jest wilgotność początkowa (wilgotność przed zawodnieniem). W szczególności dotyczy to gruntów modelu spoistego, w których wzrost wilgotności sprzyja deformowaniu brył i zaciskaniu porów międzybryłowych,

prowadząc w rezultacie do wzrostu zagęszczenia początkowego i spadku potencjału.

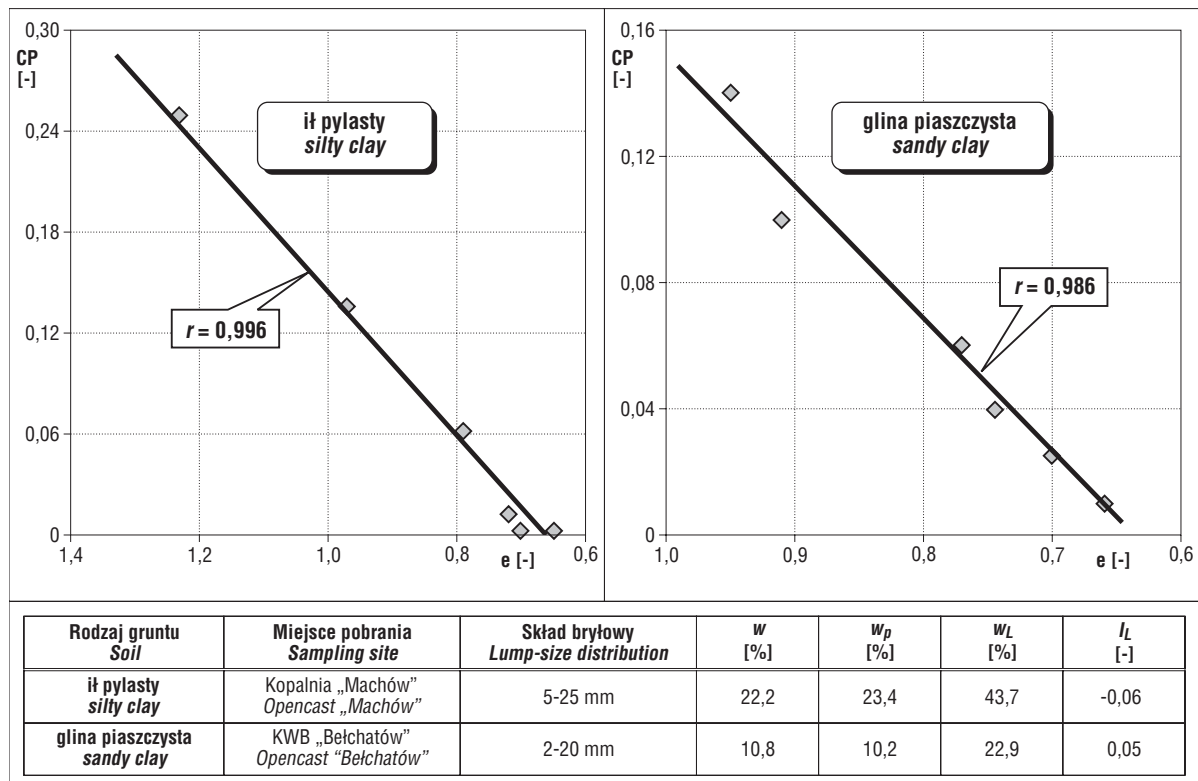
Mimo że obciążenie nie jest warunkiem koniecznym do wystąpienia osiadania zapadowego w gruntach zwałowanych, to pozostaje ono czynnikiem, który w znacznym stopniu generuje przebieg tego procesu. Obciążenie, któremu grunt zostaje poddany przed dostępem wody, szczególnie w przypadku gruntów spoistych, prowadzi do powstania odpowiednio dużych deformacji, a tym samym do wzrostu zagęszczenia i znacznego zredukowania możliwości dalszego zagęszczenia w warunkach dopływu wody (ryc. 8).

Niezwykle istotne role, jakie w osiadaniu zapadowym odgrywają wilgotność początkowa i obciążenie (przy założeniu, że zagęszczenie jest funkcją obydwu wymienionych czynników) pozwoliły na sformułowanie tezy wiążącej



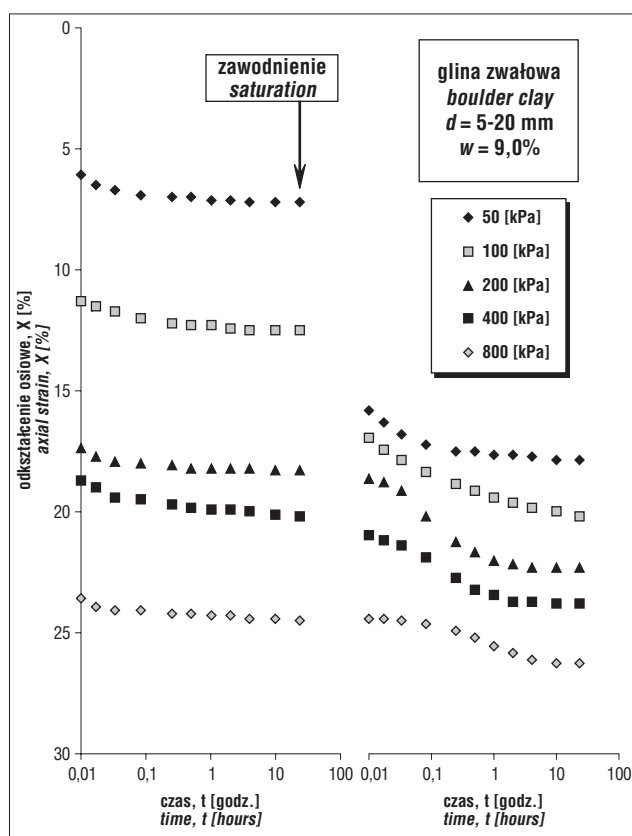
Ryc. 6. Zależność potencjału osiadania zapadowego od obciążenia dla gruntów różnych modeli strukturalnych

Fig. 6. Relationship between collapse settlement potential and loading for different structural models of dump soil



Ryc. 7. Zależność potencjału osiadania zapadowego od zagęszczenia początkowego

Fig. 7. Relationship between collapse settlement potential and initial density of soil



Ryc. 8. Zależność potencjału osiadania zapadowego gruntu zwałowanego modelu spoiстого od obciążenia początkowego

Fig. 8. Relationship between collapse settlement potential and initial density of cohesive dump soil

przyczynę procesu osiadania z uwolnieniem energii sprężystej, zgromadzonej na powierzchniach styku bryłek gruntu, w wyniku doprowadzenia wody (Woźniak i in., 1997; Woźniak, 2009). Energia, która zostaje przekazana próbce przez jej obciążenie przed doprowadzeniem wody, zostaje zużytkowana na odkształcenia trwałe i sprężyste materiału. W dwupiętrowej strukturze gruntu zwałowanego odkształcenia trwałe zaznaczają się zarówno we wzajemnym przemieszczeniu poszczególnych brył, jak i w nieodwracalnej zmianie ich kształtu. Energia wywołująca odkształcenia sprężyste zostaje natomiast zgromadzona na kontaktach brył. Taki stan równowagi energetycznej zostaje zachowany do momentu doprowadzenia wody. Zawadnienie powoduje zachwianie równowagi i uwolnienie energii odkształceń sprężystych, która zostaje spożytkowana na dalsze odkształcenia plastyczne.

Wytrzymałość na ścinanie. Charakterystyki wytrzymałościowe gruntów zwałowanych modelu sypkiego, jako klasycznych ośrodków rozdrobnionych, nie odbiegają od odpowiednich charakterystyk niespoistych gruntów rodzimych. Znaczne rozluźnienie i zwiększenie porowatości w trakcie urabiania i transportu jest jednak przyczyną kilkustopniowego zmniejszenia wartości kątów tarcia wewnętrznego względem odpowiednich gruntów rodzimych. Duża porowatość ośrodka sypkiego w warunkach nasycenia wodą czyni go również bardzo podatnym na strefowe upłynięcie, które może być przyczyną bardzo niebezpiecznego procesu rozplywu zwałowiska.

Grнты modelu spoiстого cechują się odmienną zależnością oporu na ścinanie od naprężenia normalnego. Pod wpływem działania różnych czynników – a zwłaszcza wzra-

stającego obciążenia – dochodzi do zwiększania powierzchni kontaktowych pomiędzy bryłami i okruchami na skutek ich plastycznej deformacji oraz do stopniowej odbudowy sił spójności. Powoduje to ciągłą zmianę właściwości ośrodka – od cech typowych dla gruntów sypkich (niespoistych) do zachowań odpowiadających grątom spoiстым. Niestabilność ośrodka sprawia, że zależność oporu na ścinanie od naprężenia normalnego ma charakter krzywoliniowy. Przy niewielkich obciążeniach, gdy styki między bryłami są jeszcze stykami punktowymi, o oporze ścinania decyduje opór tarcia, co na wykresie obrazującym zależność wytrzymałości i naprężenia normalnego przejawia się w postaci największej krzywizny. Przy większych obciążeniach, w miarę zagęszczania i rozwoju powierzchni stykowych, w oporze ścinania stopniowo wzrasta udział spójności (koszt tarcia wewnętrznego). Na wykresie odpowiada to systematycznie malejącej, zmierzającej do zera, krzywiźnie – spójność i kąt tarcia wewnętrznego osiągają wartości stałe. Tego rodzaju praca gruntu prowadzi w konsekwencji do zmiany kąta tarcia wewnętrznego i spójności, wraz ze zmianą naprężenia normalnego. Dla aproksymacji zależności oporu ścinania od naprężenia normalnego Dmitruk (1965) zaproponował zastosowanie funkcji potęgowej o postaci $\tau_f = a\sigma^b$, w której współczynnik a charakteryzuje rodzaj gruntu, a współczynnik b jego stan.

Charakter zależności wytrzymałości na ścinanie od naprężenia normalnego w grątach zwałowanych modelu sypko-spoistego zależy przede wszystkim od wzajemnego udziału obydwu składowych komponentów. Proporcja ta w mniejszym lub większym stopniu będzie zbliżać badany ośrodek do charakterystyk modelu sypkiego lub spoiстого. Jednak na ostateczny charakter gruntu w znaczącym stopniu wpływać będą również takie czynniki jak rodzaj gruntu spoiстого i jego stan oraz stopień przeobrażeń i zmian, jakim uległ on w procesie powstawania. Zaobserwowano również (Rybicki & Sajda, 1987; Woźniak, 1988), że dla każdej proporcji obu składników wytrzymałość na ścinanie jest większa od wytrzymałości każdego ze składników z osobna. Należy to uznać za cechę charakterystyczną modelu sypko-spoistego.

Literatura

- DMITRUK S. 1965 – Zadania mechaniki gruntów w wymiarowaniu zwałowisk. Zesz. Nauk. Polit. Wroc., 116: 3–117.
- KACZYŃSKI R., KRAUŻLIŚ K., ZAWRZYKRAJ P. & PORZEŻYŃSKI S. 2004 – Wykonanie sondaży statycznych i dylatometrycznych na zwałowisku zewnętrznym KWB Bełchatów. Uniwersytet Warszawski (materiały niepublikowane).
- RYBICKI S. 1986 – Structure and physico-mechanical properties of dump soil. 5th Inter. IAEG Congress, Buenos Aires: 1019–1027. Balkema, Rotterdam.
- RYBICKI S. & SAJDA L. 1987 – Wytrzymałość na ścinanie gruntu grubookruchowego (mieszany grątom). Prz. Geol., 11: 571–574.
- WOŹNIAK H. 1988 – Właściwości fizyczno-mechaniczne grątom zwałowych z uwzględnieniem zawadnienia na przykładzie KWB Bełchatów. Rozprawa doktorska. AGH, Kraków.
- WOŹNIAK H. 2009 – Osiadanie grątom zwałowanych w świetle badań modelowych. Wyd. IGSMiE PAN Kraków, seria SRM, 149: 162.
- WOŹNIAK H., HERZIG J. & RZESZUT P. 1997 – Collapse subsidence in dump soils of unstable structure. 2nd Int. Green Symp. on Geotechnics and the Environment, Theme: Contaminated and Derelict Land.: 184–191, Kraków.
- WOŹNIAK H., RYBICKI S., HERZIG J. & LENDUSZKO P. 1999 – Właściwości deformacyjne i filtracyjne zwałowanych grątom spoiстых z uwzględnieniem procesu konsolidacji w aspekcie ich budowlanego wykorzystania. AGH (materiały niepublikowane).

Praca wpłynęła do redakcji 24.06.2010 r.

Po recenzji akceptowano do druku 26.07.2010 r.