

Henryk Woźniak

## Osiadanie spoiстых gruntów zwałowanych pod obciążeniem własnym – opis procesu w świetle badań modelowych

Self-weight settlement of cohesive dump soils –  
description of the process based upon results of  
modelling

**Streszczenie:** Niejednorodność oraz wysoka niestabilność struktury spowodowana odkształcalnością brył, a także bardzo wysoką porowatością sprawia, że spoiisty grunt zwałowany w warunkach obciążenia zachowuje się odmiennie względem ośrodka rozdrobnionego w rozumieniu klasycznej mechaniki gruntów. Aby dokonać opisu zachowania się takiego ośrodka gruntowego, przeprowadzono na modelowanych próbkach zbrylonego gruntu spoiстого badania odkształcalności w jednoosiowym stanie odkształcenia. Otrzymane wyniki pozwoliły na ocenę zarówno wielkości osiadań, jak i ich postępu w czasie oraz na scharakteryzowanie procesów strukturalnych zachodzących w tym ośrodku w warunkach obciążenia. Rezultaty badań mogą być wykorzystane do prognozowania osiadania zwałowanych gruntów spoiстых pod obciążeniem własnym.

**Słowa kluczowe:** grunt zwałowany; struktura niestabilna; osiadanie pod obciążeniem własnym

**Abstract:** Inhomogeneity and high instability resulting from deformation of lumps together with very high porosity cause that, in terms of “classic” soil mechanics, the cohesive soils dumped under load show behaviour different from that of granular materials. In order to describe the behaviour of such material, the modelling was undertaken of deformation of lumped cohesive soil under confined compression conditions. The results enabled to evaluate the magnitude of settlement and its progress in time as well as to characterize structural processes proceeding within the material under load. The results can be applicable in prognosing of self-weight settlement of cohesive dump soils.

**Keywords:** dump soil; instable structure; self-weight settlement

## Wprowadzenie

Świeżo zezwałowany urobiony grunt spoisty jest szczególnym rodzajem ośrodka gruntowego. Jego specyfika jest wynikiem zniszczenia pierwotnej naturalnej struktury w procesie urabiania oraz dalszych zmian i przeobrażeń, jakie zachodzą podczas transportu i deponowania na zwałowisku. Ośrodek ten stanowi układ mniej lub bardziej powiązanych ze sobą nieregularnych, przypadkowo przemieszanych brył o bardzo zróżnicowanych wymiarach. Rezultatem tego jest jego wysoka niejednorodność oraz niestabilność struktury i właściwości fizyczno-mechanicznych.

Grunt ten, jakkolwiek posiadający pewne cechy ośrodka rozdrobnionego, nie spełnia istotnego dla tego ośrodka założenia sztywności szkieletu gruntowego – poszczególne bryły są bowiem odkształcalne i mają ograniczoną wytrzymałość. Dmitruk (1965) – autor modelu spoistego gruntu zwałowanego przyjął dla niego nazwę „ośrodka rozdrobnionego drugiego rodzaju o piętrowej strukturze”. Inni autorzy, m.in. Fedá i Bohac (1997) oraz Masin i in. (2005), używają terminu „grunt o podwójnej porowatości”, stosując odpowiednio nazwę porowatość intragranularna w odniesieniu do porowatości w obrębie brył oraz intergranularna – pomiędzy poszczególnymi bryłami.

Odmiennosc tego ośrodka w postaci wysokiej niestabilności struktury spowodowanej odkształcalnością brył oraz bardzo dużą porowatością intergranularną, zwykle przekraczającą wartość porowatości intragranularnej, jest przyczyną, dla której grunt ten w warunkach obciążenia zachowuje się odmiennie względem ośrodka rozdrobnionego w rozumieniu klasycznej mechaniki gruntów.

Próba opisu zachowania się takiego ośrodka gruntowego pod obciążeniem została podjęta w oparciu o wyniki dokładnych badań odkształcalności modelowanych próbek zbrylonego gruntu spoistego w warunkach jednoosiowego odkształcenia. Otrzymane wyniki pozwoliły na dokonanie oceny zarówno wielkości osiadań, jak ich charakteru i przebiegu w czasie i mogą być wykorzystane do prognozowania osiadania zwałowanych gruntów spoistych pod obciążeniem własnym.

## Opis przeprowadzonych badań

Badania zostały przeprowadzone na próbach rozdrobnionych ilów o modelowanym składzie bryłowym. Każda próba składała się z trzech frakcji o wymiarach: 5–10, 10–15 i 15–20 mm zmieszanych w równych proporcjach wagowych. Materiałem wyjściowym, z którego przygotowano próby, były bryły ilów krakowieckich o zachowanej pierwotnej strukturze, pobrane ze zwałowiska zewnętrznego zlikwidowanej odkrywkowej kopalni siarki w Machowie.

Obciążanie prób przeprowadzono w konsolidometrze hydraulicznym Rowe’a w komorze badawczej  $\varnothing = 151,4$  mm. Kolejne stopnie zadawanych obciążeń wynosiły: 30; 60; 120; 240 i 480 kPa. Pomiary odkształceń rejestrowane były z dokładno-

ścią do 0,001 mm w ściśle określonych odstępach czasu zadanych programem komputerowym automatycznej rejestracji wyników.

## Procesy strukturalne zachodzące w wyniku obciążenia

Osiadanie spoistych gruntów zwałowanych w masywie zwałowiska pod wpływem narastającego obciążenia od kolejno sypanych warstw i jego przebieg w czasie stanowi kompilację szeregu wzajemnie nakładających się na siebie procesów, głównie o charakterze strukturalnym. Do procesów tych należy zaliczyć:

- **Przegrupowywanie (przemieszczanie)** poszczególnych okruchów i brył w wyniku wzajemnych poślizgów i obrotów na płaszczyznach kontaktowych, prowadzące do zmiany ich pierwotnego, luźnego układu w układ bardziej stabilny o większym „upakowaniu”. Proces ten często ma charakter progresywny, polegający na nawet kilkakrotnym przechodzeniu przez kolejne stany chwilowej, nietrwałej równowagi o czym świadczą kolejne załamania struktury. Przemieszczeniom i poślizgom może towarzyszyć niewielka „obróbka” brył w postaci łamania ich naroży i ścierania nierówności. Czynnikiem sprzyjającym przegrupowywaniu jest niska wilgotność; przy wyższych wilgotnościach dochodzi bowiem do sklejanania brył, które utrudnia ich wzajemne przemieszczanie. Ostatecznym rezultatem przegrupowywania jest spadek porowatości intergranularnej (międzybryłowej), którego wartość zależy od początkowego zagęszczenia, wielkości przyłożonego obciążenia oraz stanu konsystencji.
- **Kruszenie okruchów i brył.** Proces ten podobny jest do kruszenia ziaren, z tym, że jego inicjacja następuje już przy stosunkowo niewielkich obciążeniach. Szczególnie wyraźnie jest to widoczne w przypadku brył o niewielkich wilgotnościach, ze względu na ich relatywnie niską wytrzymałość. Obecność wyższych obciążeń, koniecznych do zapoczątkowania procesu pęknięcia i kruszenia brył bardziej wysuszonych, sprzyja z kolei zmianie jego charakteru – z pęknięcia typu kruchego do pęknięcia typu kataklastycznego. Pomimo, że proces kruszenia zwiększa objętość kruszonego materiału, w gruntach zwałowanych proces ten skutkuje z reguły zjawiskiem odwrotnym – drobne okruchy skruszonych brył przemieszczają się bowiem do dużych przestrzeni międzybryłowych zwiększając zagęszczenie.
- **Zgniatanie i deformowanie plastyczne.** Proces ten dominuje w gruntach złożonych z brył o konsystencji plastycznej, które pod obciążeniem nie ulegają kruszeniu i dezintegracji, lecz plastycznemu deformowaniu. Modelem reologicznym tego procesu może być ciało Kelvina-Voigta, w którym skończonemu odkształceniu sprężyny odpowiada całkowite możliwe odkształcenie brył, ograniczone jedynie skończoną objętością międzybryłowej przestrzeni porowej, a opóźnienie odkształcenia jest wynikiem lepkości postaciowej materiału. W przeciwieństwie do poprzednio omawianych procesów ten ma charakter procesu długotrwałego, stopniowo zanikającego w czasie. Krzywa obrazująca to od-

kształcenie będzie zmierzać asymptotycznie do skończonej wartości odkształcenia, możliwego przy danym stopniu obciążenia.

- **Kontaktowe zlepianie (spajanie).** Proces ten jest wynikiem odbudowy spójności na powierzchniach kontaktowych brył, szczególnie o konsystencji plastycznej. Sprzyja temu wzrost obciążenia i czas jego trwania, wzrost (do pewnej optymalnej wartości) stopnia plastyczności oraz obecność minerałów ilastych (Rybicki, Woźniak, 1978). Proces zlepiania, utrudniając przegrupowywanie brył, wpływa na zmniejszenie ściśliwości.
- **Konsolidacja.** Przyrost obciążenia na grunt złożony z brył, którego pory są w mniejszym lub większym stopniu nasycone wodą, wywoła w ich obrębie proces konsolidacji – powstanie nadciśnienia wody porowej, a następnie jego rozpraszanie. W gruntach zwałowanych, m.in. ze względu na wysoką porowatość, obecność dużych porów międzybryłowych, niepełne nasylenie porów wodą, odkształcalność brył, proces ten będzie jednak znacznie bardziej złożony niż w nasyconych gruntach rodzimych, w których jego postęp opisany jest odpowiednimi równaniami teorii konsolidacji. Przykładowo, jeśli grunt zwałowany charakteryzuje duża porowatość międzybryłowa i dość dobra przepuszczalność gruntu, z którego zbudowane są poszczególne bryły, wówczas rozpraszanie nadciśnienia porowego przebiega szybko i przyrost odkształceń spowodowany przyrostem naprężeń efektywnych może być niezauważalny na tle odkształceń wywołanych omawianymi procesami. W przeciwnym wypadku przebieg odkształceń w czasie ulegnie wyraźnemu wydłużeniu, a na wykresie zaznaczy się on w postaci charakterystycznej krzywej konsolidacji (odwróconej litery „S”). Feda (1998) stwierdza, że taki kształt krzywej wskazuje, iż jest to proces, który w szerokim rozumieniu można zakwalifikować do procesów typu dyfuzyjnego i jego postęp, podobnie jak każdego innego procesu dyfuzyjnego, może być opisany za pomocą współczynnika  $c_k$  wyznaczanego podobnie jak współczynnik konsolidacji.
- **Pełzanie,** czyli proces bardzo powolnego narastania odkształceń w czasie w warunkach stałego, niezmiennego obciążenia. W odróżnieniu od odkształceń wywołanych wyżej wymienionymi procesami odkształcenie to dla danego gruntu i zadanego obciążenia nie ma wartości skończonej.

## Analiza krzywych $e = f(\lg t)$

Analiza przeprowadzonych badań wykazała, że najistotniejszym czynnikiem wpływającym na wielkość i przebieg w czasie osiadań gruntu zwałowanego, oprócz obciążenia, jest jego wilgotność (konsystencja). Celem uwzględnienia tego czynnika poniższą analizę oparto na wynikach uzyskanych z badań trzech prób o wyraźnie różniących się wilgotnościach, wynoszących kolejno: 19,32; 31,06 oraz 39,19%, co odpowiadało stopniom plastyczności  $I_L$  równym odpowiednio: 0,15; 0,28 i 0,58.

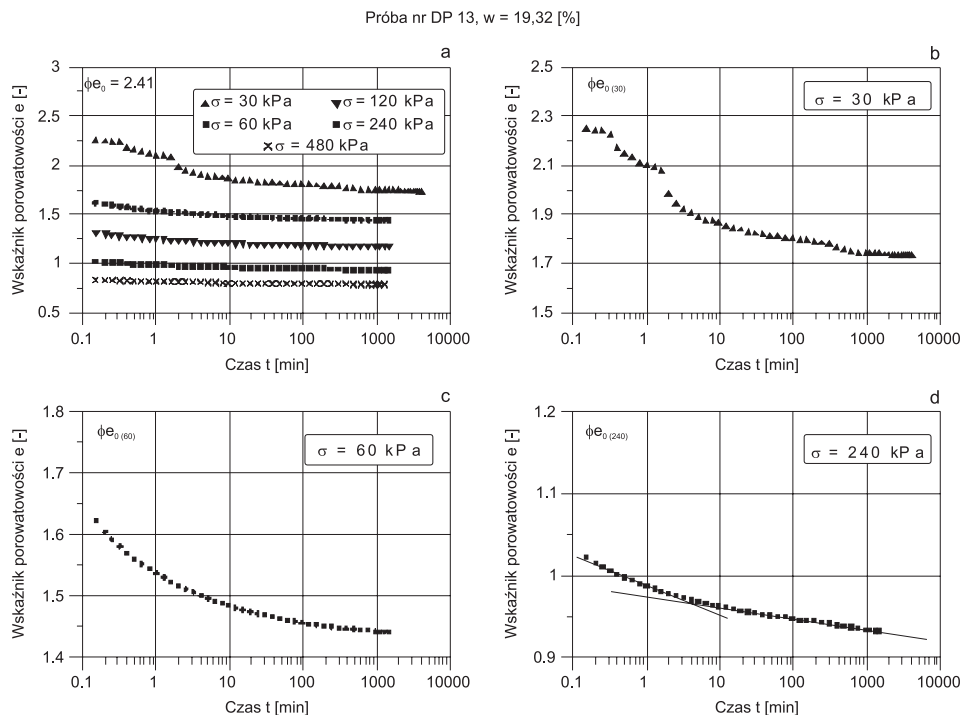
Wykresy krzywych  $e = f(\lg t)$  badanych prób przedstawiono na rycinach 1–3. Na każdym z nich znajduje się zbiorcze zestawienie krzywych dla wszystkich zadanych stopni obciążenia oraz trzy wybrane, charakterystyczne wykresy odrębnie

wyeksponowane. Wyeksponowanie wybranych krzywych w postaci odrębnych wykresów pozwala na przeprowadzenie bardziej wnikliwej analizy wpływu poszczególnych mechanizmów kształtujących złożony proces osiadania gruntu zwalowanego i dokonanie jego prawidłowego opisu.

### Próba nr DP 13

To próba złożona z brył o najniższej wilgotności ( $w = 19,32\%$ ). Przy pierwszym stopniu obciążenia, równym 30 kPa, krzywa odkształcenia po zakończonej fazie odkształcenia natychmiastowego wykazuje wyraźne kilkukrotne załamania (ryc. 1b).

Jest to wynik progresywnego przegrupowywania układu brył wskutek wzajemnych poślizgów i obrotów, czemu niewątpliwie sprzyja ich niska wilgotność (nie występowanie zjawiska zlepiania, które stanowi główną przeszkodę w przemieszczaniu się brył). Nie można jednak również wykluczyć, że obserwowane załamania są wynikiem procesu pęknięcia i kruszenia brył. Przy kolejnych stopniach obciążenia (ryc. 1c) zauważa się, że po wyraźnie zarysowanej fazie odkształcenia natychmiastowego, następuje dalsze odkształcanie, stopniowo wygasające, dla którego proponuje się nazwę odkształcenia opóźnionego, a którego postęp ilustruje odcinek krzywej zbliżającej się asymptotycznie do osi odciętych. Kształt tego odcinka wskazuje, że procesem dominującym w tym zakresie obciążeń jest plastyczne deformato-



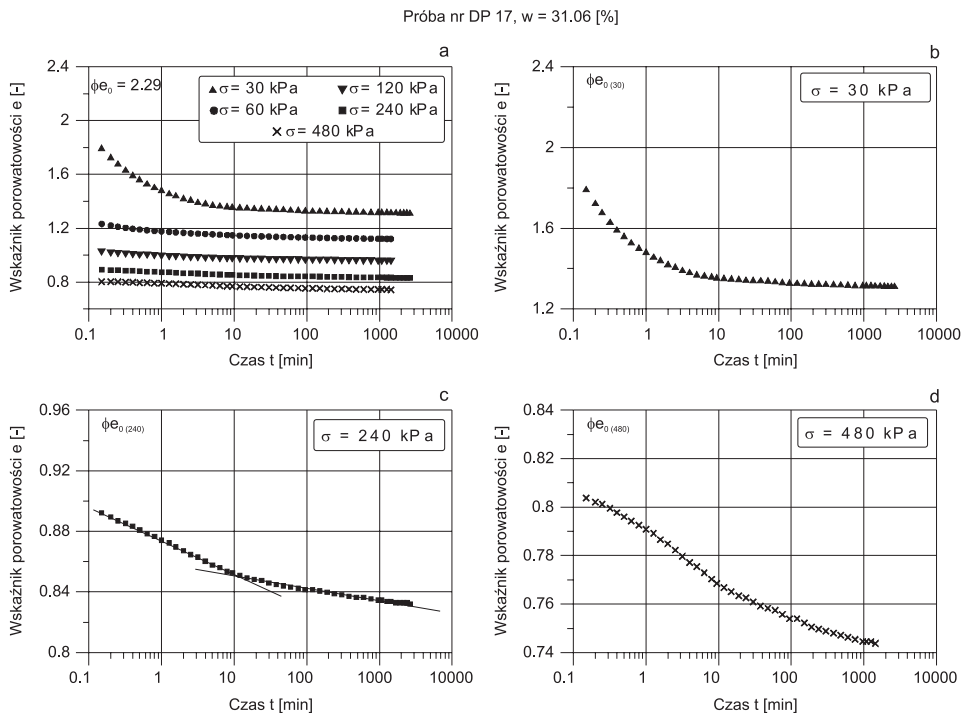
Ryc. 1. Krzywe  $e = f(\lg t)$ , próba nr DP 13  
Fig. 1.  $e - \lg t$  curves, sample No. DP13

wanie brył. Należy też podkreślić, że uzyskanie krzywoliniowych zależności, pomimo zastosowania logarytmicznej skali czasu, wskazuje na znaczną nieliniowość omawianych procesów.

Przy obciążeniach rzędu 240 i 480 kPa krzywa odkształcenia opóźnionego staje się coraz bardziej łagodna i stopniowo przechodzi w linię łamaną złożoną z dwóch prostoliniowych odcinków, odpowiednio o większym i mniejszym kącie nachylenia względem osi odciętych (ryc. 1d). Wskazuje to na dwa odmienne zachowania, warunkowane dwoma różnymi procesami. Można sądzić, że pierwszy z nich jest wynikiem dalszego zmniejszania się przestrzeni porowej wywołanego już nie tylko zmianami porowatości międzybryłowej, lecz również intragranularnej, których udział w całkowitej zmianie porowatości wzrasta w wyniku zmiany rozkładu naprężeń spowodowanej ujednorodnieniem gruntu. Zmianom porowatości intragranularnej może także lokalnie towarzyszyć rozpraszanie nadciśnienia porowego i wzrost naprężeń efektywnych. Drugim procesem jest natomiast proces długotrwałego odkształcania o charakterze reologicznym.

## Próba nr DP 17

Przy najniższym stopniu obciążenia (30 kPa) krzywa  $\epsilon = f(\lg t)$  nie wykazuje już załamań charakterystycznych dla próby DP 13 (ryc. 2b). W jej przebiegu można na-



Ryc. 2. Krzywe  $\epsilon = f(\lg t)$ , próba nr DP 17  
Fig. 2.  $\epsilon - \lg t$  curves, sample No. DP17

tomiast wyróżnić wyraźną fazę odkształcenia natychmiastowego oraz fazę odkształcenia opóźnionego, która stopniowo przechodzi w linię prostą obrazującą już kolejną fazę odkształcenia – fazę odkształcenia długotrwałego (reologicznego). Taki kształt krzywej wskazuje, że w tym zakresie obciążeń dominującym procesem nie jest proces przegrupowywania układu brył, lecz ich plastycznego deformowania. Wskazywałaby na to wysoka wilgotność próby równa 31,06%.

Podobny charakter odkształceń obserwuje się przy dwóch następnych stopniach obciążenia, równych odpowiednio 60 i 120 kPa, natomiast przy obciążeniu równym 240 kPa (ryc. 2c), podobnie jak w próbie DP13, przebieg odkształceń wyraża dwuodcinkowa linia łamana. Odmienne kształt krzywej odkształcenia, w fazie odkształcenia opóźnionego, obserwuje się natomiast przy obciążeniu równym 480 kPa (ryc. 2d). Jest to krzywa o kształcie zbliżonym do krzywej konsolidacji (krzywa o kształcie litery „S”), co wskazuje, że w tej fazie odkształcanie determinowane jest postępowaniem procesu konsolidacji. Przesłanką potwierdzającą taką interpretację jest stopień nasycenia całej próby, którego wartość przy tym wskaźniku porowatości szacowana jest na bliską jedności.

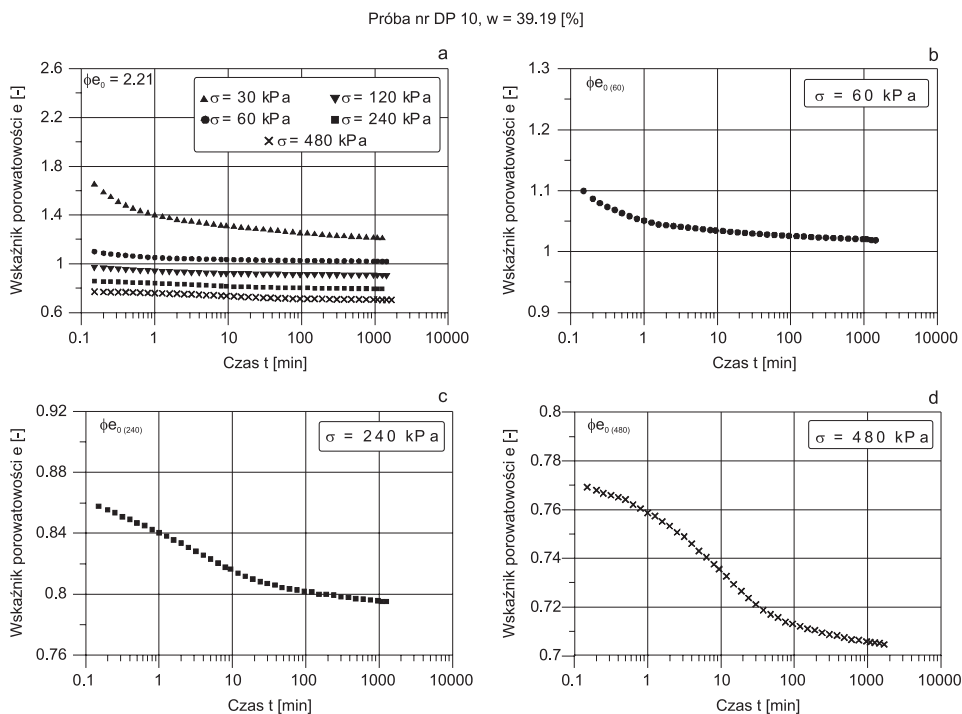
## Próba nr DP 10

W próbie tej po fazie odkształcenia natychmiastowego, zaznaczającej się bardzo wyraźnie przy wszystkich stopniach obciążenia, następuje faza odkształcenia opóźnionego w postaci krzywej zbliżającej się asymptotycznie do osi odciętych (ryc. 3b) lub krzywej konsolidacji (ryc. 3c i 3d). Brak trzeciej formy fazy odkształcenia – dwuodcinkowej linii łamanej – można tłumaczyć wysoką wilgotnością tej próby ( $w = 39,19\%$ ) i wysokim stopniem plastyczności ( $I_L = 0,58$ ). Parametry te sprawiają, że już przy obciążeniu 120 kPa proces plastycznego deformowania brył uległ zakończeniu, a dalszy postęp odkształceń, wywołany zmianami porowatości międzybryłowej i intragranularnej, wskazuje na znacząco wzrastającą w tym etapie rolę konsolidacji.

## Fazy procesu osiadania

Opisane procesy strukturalne i zaobserwowane prawidłowości pozwalają na podjęcie próby opracowania modelu obrazującego przebieg osiadania spoistych gruntów zwałowanych pod obciążeniem własnym. Niezależnie od wartości obciążenia i wilgotności (stopnia plastyczności) zwałowanych gruntów spoistych w procesie ich osiadania można wyróżnić trzy odrębne fazy: fazę osiadania natychmiastowego, opóźnionego i długotrwałego (reologicznego).

**Osiadanie natychmiastowe** to gwałtowne osiadanie o charakterze załamywania (zapadania), zachodzące w bardzo krótkim czasie, bezpośrednio po przyłożeniu obciążenia, wywołane głównie przegrupowywaniem, kruszeniem i plastycznym deformowaniem brył. W przypadku próbki laboratoryjnej zwykle zachodzi ono w czasie kilku sekund, w warunkach terenowych, w zależności od wysokości nasypu, w przedziale od kilku godzin do kilku dni. Vaughan (1995) na podstawie



Ryc. 3. Krzywe  $e = f(\lg t)$ , próba nr DP 10  
 Fig. 3.  $e - \lg t$  curves, sample No. DP10

własnych obserwacji stwierdził, że cechą charakterystyczną tego osiadania jest to, że ma ono charakter fali, której front przemieszcza się od stropu ku podstawie nasytu z prędkością  $2 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ . Udział tego osiadania w całkowitym osiadaniu może sięgać nawet 70%.

**Osiadanie opóźnione** obejmuje powolne, postępujące w czasie osiadanie, w trakcie którego dochodzi do dalszych istotnych zmian w strukturze gruntu w szczególności w wyniku wzrostu naprężeń efektywnych i którego przebieg w czasie może być ujęty w postaci określonej formuły matematycznej. W zależności od porowatości (zagęszczenia), wielkości zadanego obciążenia oraz rodzaju i wilgotności gruntu przebieg tego osiadania w logarytmicznej skali czasu może mieć kształt linii prostej, krzywej o kształcie zbliżonym do krzywej wykładniczej (krzywej zmierzającej asymptotycznie do osi odciętych) lub krzywej konsolidacji.

**Osiadanie długotrwałe (reologiczne)** jest wynikiem pełzania w warunkach stałego naprężenia efektywnego. Dla danego gruntu i zadanego obciążenia jest ono zatem zależne wyłącznie od czasu i w funkcji logarytmu czasu zachowuje stałą prędkość.

Praca została zrealizowana w ramach badań statutowych ZHiGI AGH, nr umowy 11.11.140.292.

## Literatura

- Dmitruk S., 1965. Zadania mechaniki gruntów w wymiarowaniu zwałowisk. Z. Nauk. P. Wrocl. 116, Budownictwo XXV.
- Feda J., 1998. Fragmentary clay – a difficult waste material. *Engineering Geology* 51: 77–88.
- Feda J., Bohac J., 1997. Collapsible behaviour of granulated clay. Fourteenth ISMFE, Hamburg, s. 287–290.
- Masin D. i in., 2005. Properties of double porosity clayfills and suitable constitutive models. 16 ICSMGE, Osaka, s. 827–830.
- Rybicki S., Woźniak H., 1978. Badania procesu odbudowy spójności w gruntach ilastych hałd i nasypów. V KKMGiF, Katowice, s. 147–151.
- Vaughan P.R., 1995. Criteria for the use of weak and weathered rocks for embankment fill and its compaction control. Proc. XIII ICSMFE, s. 195–206.

