

Zenon SZYPCIO<sup>1</sup>

## POCZĄTKOWA FAZA SEDYMENTACJI W ANALIZIE AREOMETRYCZNEJ GRUNTU

W pracy analizowano trudności interpretacji wyników badań analizy areometrycznej w początkowej fazie sedymentacji. W początkowej fazie sedymentacji dynamika procesu ma istotny wpływ na wyniki badań. Gęstość zawiesiny gruntowej jest zmienna w czasie sedymentacji. Dynamika zmian gęstości zależy od składu granulometrycznego gruntu. Areometry są kalibrowane w roztworach o stałej gęstości, zatem gęstość zawiesiny zależy od kształtu areometru, w szczególności od położenia środka ciężkości, kształtu bańki areometru i średnicy szyjki. Po włożeniu areometru do zawiesiny opadające cząstki gruntu znajdują się pomiędzy bańką areometru a ścianką cylindra. Gęstość zawiesiny gruntowej zmienia się nie tylko na głębokości, ale również w przekroju poprzecznym. Wraz z upływem czasu sedymentacji dynamika procesu znacząco maleje, zmiany te nie mają jednak istotnego wpływu na pomiar gęstości zawiesiny gruntowej. W pracy, rozważając teoretyczne zależności zmiany gęstości zawiesiny w czasie w przekroju pionowym i poziomym, znaleziono wartości współczynnika korekcyjnego dla dwóch przykładowych gruntów. Wartość współczynnika korekcyjnego znacząco zależy od składu granulometrycznego gruntu. Minimalne wartości współczynnika korekcyjnego otrzymano dla 15 s czasu sedymentacji. Po upływie 900 s wartość współczynnika korekcyjnego jest bliska jedności. Z wystarczającą dla praktyki inżynierskiej dokładnością skład granulometryczny może być określany z pominięciem 4-5 min początkowej fazy sedymentacji, przyjmując wartość współczynnika korekcyjnego równą jedności.

**Słowa kluczowe:** grunty, skład granulometryczny, analiza areometryczna

### 1. Wprowadzenie

Właściwości (szczególnie te fizyczne) gruntu znacząco zależą od jego składu granulometrycznego [6, 7]. Dla gruntów zawierających więcej niż 10% cząstek drobnych  $d_i < 0,063$  mm (0,075 mm) skład granulometryczny jest określany na podstawie analizy sitowej i areometrycznej [6, 7]. Na prędkość opadania cząstek gruntu ma wpływ lepkość roztworu zależna od temperatury [9]. Roztworem może być woda destylowana dla gruntów niekoagulujących lub woda destylowana z dodatkiem dyspergentu (pirofosforanu sodu lub heksametafosforanu so-

<sup>1</sup> Zenon Szypcio, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok, tel. 797995977, z.szypcio@pb.edu.pl

du) dla zawiesin podlegających koagulacji [6]. Największy wpływ na prędkość opadania ma jednak średnica cząstki gruntu [5, 9, 10]. W początkowej fazie sedymentacji proces charakteryzuje się dużą dynamiką. Przy powierzchni zawiesiny gruntowej w cylindrze sedymentacyjnym w bardzo krótkim czasie liczba cząstek gruntu jest bardzo mała, a zawiesina ma gęstość zbliżoną do gęstości roztworu. W niższych poziomach na miejsce cząstek, które opadły, pojawiają się cząstki, które opadły z górnej części zawiesiny. Liczba cząstek gruntu na tych poziomach maleje więc znacznie wolniej niż w wyższych partiach cylindra sedymentacyjnego. Najwolniej proces zmniejszania się ilości cząstek gruntu w jednostce objętości zachodzi w dolnych partiach cylindra sedymentacyjnego. Zatem podczas sedymentacji gęstość zawiesiny gruntowej w cylindrze sedymentacyjnym nie jest stała i wzrasta nieliniowo wraz z głębokością.

Areometr jest cechowany w roztworach o stałej gęstości [2, 6, 7, 10]. Pomierzona gęstość zawiesiny gruntowej jest przypisywana gęstości zawiesiny na poziomie środka wyporu areometru [1, 3, 6, 7, 8, 10]. W fazie sedymentacji, gdy niejednorodność gęstości zawiesiny gruntowej jest duża, niejednorodność ta ma wpływ na wyniki badań. Wpływ ten jest analizowany w dalszej części pracy dla prostego teoretycznego kształtu areometru i dwóch krzywych uziarnienia gruntu. Inne zagadnienia mające wpływ na niepewności pomiarów w analizie areometrycznej [4, 10] nie będą analizowane.

## 2. Rozkład gęstości zawiesiny gruntowej w cylindrze sedymentacyjnym

Prędkość opadania cząstki w roztworze zależy od jej średnicy zastępczej ( $d_i$ ), lepkości roztworu ( $\eta$ ), gęstości właściwej cząstki ( $\rho_s$ ) oraz gęstości roztworu ( $\rho_r$ ) i może być określona zgodnie z prawem Stokesa wzorem:

$$v = \frac{\rho_s - \rho_r}{\eta} \left( \frac{d_i}{c} \right)^2 \quad (1)$$

gdzie:  $v$  – prędkość opadania cząstki [mm/s],  
 $\rho_s$  – gęstość właściwa cząstki gruntu [ $\text{g/cm}^3$ ],  
 $\rho_r$  – gęstość roztworu [ $\text{g/cm}^3$ ],  
 $\eta$  – lepkość dynamiczna roztworu [mPas],  
 $d_i$  – średnica zastępcza cząstki [mm],  
 $c$  – współczynnik przeliczeniowy [-].

Dla wody destylowanej  $c = 0,04284$  [1, 5]. Wykres zależności prędkości opadania od średnicy zastępczej w skali log-log jest linią prostą (rys. 1.).

Uważa się, że cząstki o średnicy mniejszej niż 0,001 mm opadają zbyt wolno i metoda sedymentacyjna nie powinna być stosowana do analizy granulometrycznej [8]. Maksymalna średnica zastępcza cząstki gruntu zgodnie z normą [6] wynosi 0,063 mm. Dla tej średnicy ( $d_i$ ) prędkość opadania jest równa 25 mm/s,

zatem środek wyporu typowego areometru ( $H_r = 16$  cm) cząstka będąca przy powierzchni zawiesiny osiąga zaledwie w ciągu 6,4 s. W związku z tym proces sedymentacji w początkowej fazie jest bardzo dynamiczny.

Mając krzywą uziarnienia gruntu, gęstość właściwą szkieletu gruntowego ( $\rho_s$ ), lepkość roztworu ( $\eta$ ) oraz masę gruntu ( $m$ ) użytego do przygotowania zawiesiny gruntowej, można łatwo policzyć masę cząstek ( $m_s$ ), które znajdują się poniżej głębokości ( $z$ ), i gęstość zawiesiny gruntowej ( $\rho_m$ ) na głębokości ( $z$ ):

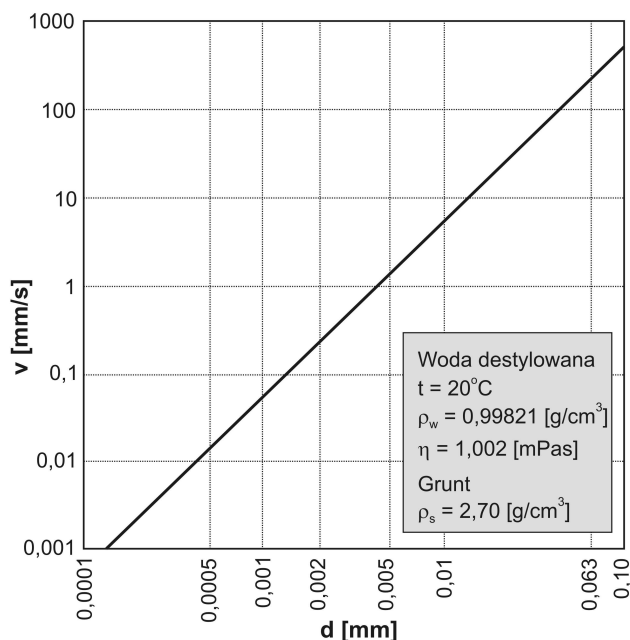
$$\rho_m = \rho_r + m_s \left( 1 - \frac{\rho_r}{\rho_s} \right) 0,001 \quad (2)$$

gdzie:  $\rho_m$  – gęstość zawiesiny gruntowej [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ],

$m_s$  – masa cząstek gruntu znajdujących się na głębokości większej od  $z$  [g],

$\rho_s, \rho_r$  – gęstość właściwa gruntu i roztworu [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ].

Przykładowy rozkład gęstości zawiesiny gruntowej dla różnych czasów sedymentacji pokazano na rys. 2.

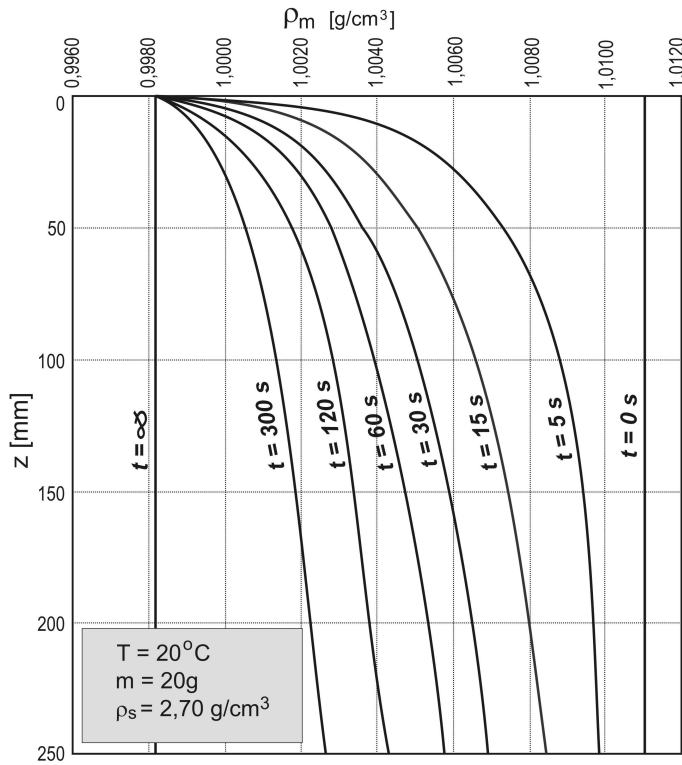


Rys. 1. Zależność prędkości opadania cząstki od jej średnicy zastępczej

Fig. 1. Particle velocity dependence of equivalent diameter

Na początku procesu sedymentacji ( $t = 0$  s) gęstość zawiesiny jest jednorodna i może być policzona ze wzoru (2), przyjmując, że  $m = m_s$ . Niezwykle

ważne jest prawidłowe wymieszanie gruntu, gdyż ma to istotny wpływ na  $\rho_m$ . Jeżeli zawiesina jest źle przygotowana, to część większych cząstek gruntu nie będzie się znajdować w zawieszynie, w rezultacie czego początkowa jej gęstość może być znacznie mniejsza niż ta uwzględniona w analizie areometrycznej. Na ten fakt zwraca się dużą uwagę w normach i literaturze [1, 3, 4, 6, 7, 8, 10]. Po bardzo krótkim czasie, teoretycznie nawet ułamku sekundy, bezpośrednio przy powierzchni ( $z = 0$ ) nie znajdują się cząstki gruntu,  $\rho_m = \rho_r$ . Nie jest to w pełni prawdą, gdyż w każdym gruncie znajdują się cząstki koloidalne o małej średnicy tworzące zawiesinę. Zdaniem autora z praktycznego punktu widzenia można przyjmować, że cząstki te to cząstki o średnicy zastępczej mniejszej od 0,001 mm.



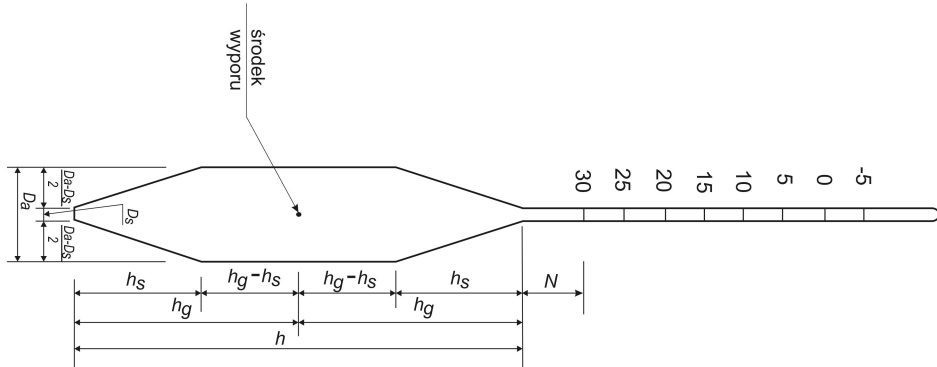
Rys. 2. Rozkład gęstości w cylindrze sedymentacyjnym

Fig. 2. Density distribution in a sedimentation cylinder

Dla długiego czasu sedymentacji, teoretycznie  $t = \infty$  wszystkie cząstki opadną na dno cylindra, a gęstość zawiesiny będzie równa gęstości roztworu. Dla czasów sedymentacji  $t = 5, 15, 30, 60, 120, 300$  s rozkład gęstości jest niejednorodny. Niejednorodność na głębokości środka wyporu nurnika areometru dla  $z$  w granicach 8-20 cm jest największa dla  $t \approx 15, 30$  s.

### 3. Rozkład parć na areometr

Celem pracy jest uwzględnienie niejednorodności rozkładu gęstości zawiesiny gruntowej na wyniki analizy areometrycznej. Dla ułatwienia obliczeń przyjęto, że areometr ma kształt prosty (rys. 3.).



Rys. 3. Areometr przyjęty do analizy

Fig. 3. Hydrometer accepted for the analysis

Areometr ma symetryczną bańkę i jest zbliżony kształtem do areometrów stosowanych w laboratoriach geotechnicznych w Polsce. Charakterystyczne wymiary areometru podano w tab. 1. Zależność gęstości kalibrowanej areometru  $\rho_{mk}$  od głębokości położenia środka wyporu bańki areometru  $H$ , pokazano na rys. 4.

Tabela 1. Charakterystyczne wymiary areometru

Table 1. Characteristic hydrometer measurements

$D_a$ [mm]	$D_s$ [mm]	$h$ [mm]	$h_g$ [mm]	$h_s$ [mm]	$N$ [mm]	$W_a$ [kN]
30	5	140	70	40	20	$6,5179 \cdot 10^{-9}$

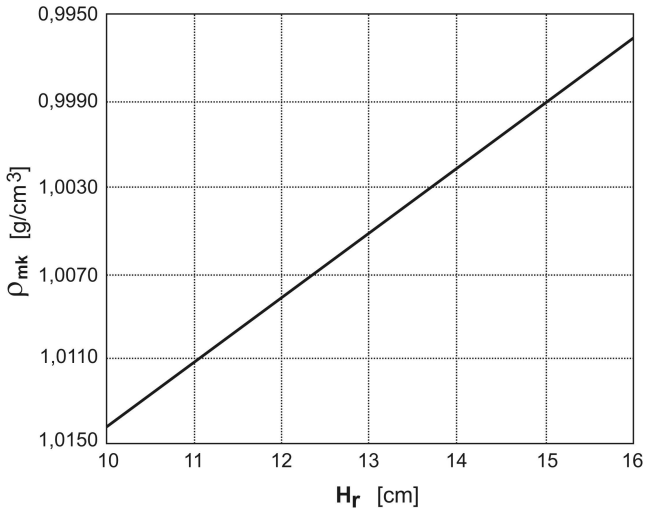
Wartości  $\rho_{mk}$  otrzymano przy założeniu, że roztwór (zawiesina gruntowa) jest jednorodny. Zgodnie z prawem Archimidesa:

$$\rho_{mk} = \frac{W_a}{gV_a} 100 \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (3)$$

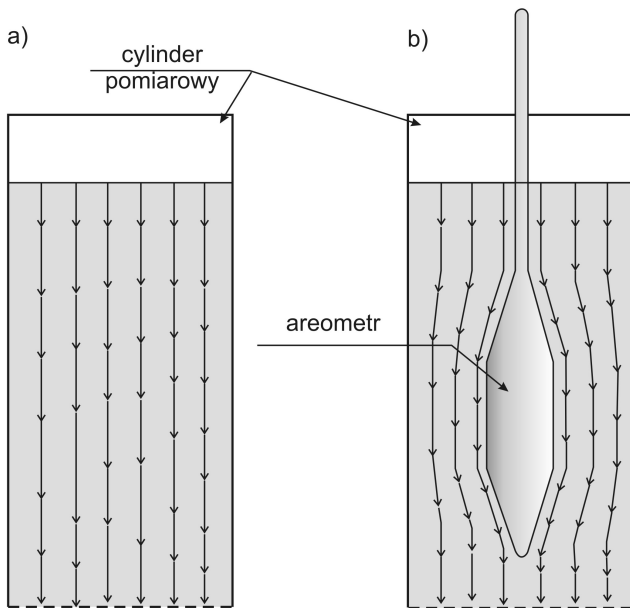
gdzie:  $W_a = 6,5179 \cdot 10^{-9}$  kN – ciężar areometru,

$V_a$  – objętość części areometru zanurzonej w roztworze (jednorodnej zawiesziny gruntu) [cm<sup>3</sup>],

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$  – przyspieszenie ziemskie.

Rys. 4. Zależność  $\rho_{mk}$  od  $H_r$ Fig. 4.  $\rho_{mk} - H_r$  dependence

Gdy w cylindrze sedimentacyjnym nie ma areometru, to cząstki opadają po linii prostej (rys. 5.), po włożeniu zaś do zawiesiny areometru cząstki gruntu opadające muszą się zmieścić pomiędzy ścianką wewnętrzną cylindra a ścianką areometru (rys. 5.).



Rys. 5. Tory opadających cząstek

Fig. 5. Sinking particle streamlines

Przyjmując zatem jednorodność rozkładu cząstek w płaszczyźnie poziomej na głębokości  $z$ , gęstość zawiesiny jest większa niż odpowiednia gęstość zawiesiny w tym samym czasie na tej samej głębokości w cylindrze sedymentacyjnym bez areometru. Oznaczając jako  $\rho_m^*$  gęstość zawiesiny na głębokości  $z$ , można zapisać:

$$\rho_m^* = \rho_r + m_s \left( 1 - \frac{\rho_r}{\rho_s} \right) \left( \frac{1}{\frac{A_c - A_a}{A_c}} \right) \quad (4)$$

lub

$$\rho_m^* = \rho_r + m_s \left( 1 - \frac{\rho_r}{\rho_s} \right) \left( \frac{1}{1 - \left( \frac{D}{D_c} \right)^2} \right) \quad (5)$$

gdzie:  $A_a$  – pole przekroju areometru na głębokości  $z$  [ $\text{cm}^2$ ],

$A_c$  – pole przekroju powierzchni wewnętrznej cylindra na głębokości  $z$  [ $\text{cm}^2$ ],

$D$  – średnica areometru na głębokości  $z$  [mm],

$D_c$  – średnica wewnętrzna cylindra [mm].

W cylindrze bez areometru na głębokości  $z$  ciśnienie jest równe:

$$p(z) = \int_0^z \gamma_m(z) dz \quad (6)$$

Gdy areometr jest na stałe włożony do zawiesiny gruntowej, to w zawiesinie na głębokości  $z$  ciśnienie jest równe:

$$p^*(z) = \sum_0^z \gamma_m^*(z) dz \quad (7)$$

gdzie

$$\gamma_m^*(z) = \rho_m^*(z) g \quad (8)$$

Dla areometrów o dużej średnicy ( $D_a$ ) i małej średnicy wewnętrznej cylindra pomiarowego  $\gamma_m^*(z)$  może być ono znacznie większe od  $\gamma_m(z)$ . Stąd w normach i praktyce do badań dobiera się cylinder, tak aby  $D_c/D_a \geq 2$  [6, 7, 10].

W badaniach po włożeniu areometru do zawiesiny i po ustabilizowaniu jego pozycji jest wykonywany odczyt. Czas stabilizacji zależy od kształtu areometru i doświadczenia laboranta. Powinien to być jak najkrótszy czas, tak aby areometr nie zmienił znacząco gęstości zawiesiny.

Po włożeniu areometru poziom zawiesiny w cylindrze wzrasta. Przyjmuje się, że głębokość zanurzenia środka wyporu bańki areometru ( $H_r$ ) jest mierzona od poziomu przed włożeniem areometru [1, 3, 5, 6, 7, 10].

Na głębokości  $z$  ciśnienie jest równe:

$$p(z) = \int_0^z \gamma_m(z) dz \quad (9)$$

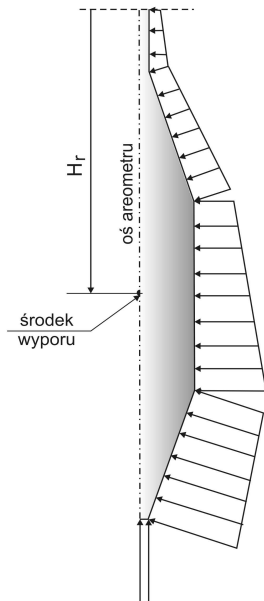
gdy cząstki gruntu opadają swobodnie.

W przypadku włożenia areometru do zawiesiny:

$$p^*(z) = \int_0^z \gamma_m^*(z) dz \quad (10)$$

W początkowej fazie sedymentacji proces jest tak dynamiczny, że pomiary powinny być wykonywane z ciągle włożonym areometrem, co ma wpływ na wyniki pomiarów. W dalszej części pracy przyjmuje się rozkład ciśnień w zawieszynie gruntowej obliczony z równania (9), tzn. że czas włożenia areometru i czas stabilizacji jest krótki i nie wpływa znacząco na wyniki pomiarów.

Zawieszina gruntowa wywołuje parcie na ściany zanurzonego w niej areometru. Przykładowy rozkład parć dla przyjętego areometru pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Przykładowy rozkład parć na ścianę areometru

Fig. 6. An example diagram of a hydrometer wall pressure

#### 4. Współczynnik korekcyjny

Składowa pionowa parć na ściany areometru jest skierowana do dołu na powierzchniach ściany areometru powyżej środka wyporu i do góry na powierzchniach ściany areometru poniżej środka wyporu. Na powierzchniach pionowych składowa pionowa parć jest równa zeru.

Wypór areometru może być obliczony z równania:

$$W = \int_0^{H_r+h_g} p(z) r(z) \tan(\alpha) dz + p_0 \frac{\pi D_s^2}{4} \quad (11)$$

gdy  $p(z)$  jest wyznaczone z równania (9)

$$W^* = \int_0^{H_r} p^*(z) r(z) \tan(\alpha) dz + p_0^* \frac{\pi D_s^2}{4} \quad (12)$$

gdy  $p^*(z)$  jest obliczone z równania (10),  $p_0$  i  $p_0^*$  są zaś wartościami ciśnienia na ścianie dolnej areometru dla  $z = H_r + h_g$ .

Dla przyjętego do analizy areometru (rys. 3.)

$$a = 0 \text{ dla } z < H_r - h_g \text{ i } H_r - h_g + h_s \leq z \leq H_r + h_g - h_s,$$

$$\alpha = -\arctan\left(\frac{D_a - D_s}{2h_s}\right) \text{ dla } H_r - h_g \leq z < H_r - h_g + h_s \quad (13)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{D_a - D_s}{2h_s}\right) \text{ dla } H_r + h_g - h_s \leq z \leq H_r + h_g,$$

natomiast

$$r(z) = \frac{D_s}{2} \text{ dla } z \leq H_r - h_g,$$

$$r(z) = \frac{D_s}{2} + 0,5(z - H_r - h_g)(D_a - D_s) \text{ dla } H_r - h_g \leq z \leq H_r - h_g + h_s,$$

$$r(z) = 0,5D_a \text{ dla } H_r - h_g + h_s \leq z \leq H_r + h_g - h_s \quad (14)$$

$$r(z) = 0,5D_a - 0,5(z - H_r - h_g + h_s)(D_a - D_s),$$

$$r(z) = 0,5D_s \text{ dla } z = H_r + h_g - h_s.$$

Jeżeli jest znana krzywa uziarnienia gruntu, to dla każdego czasu sedymentacji można znaleźć teoretycznie rozkład gęstości ( $\rho_m$ ) i ( $\rho_m^*$ ),  $p$  i  $p^*$  oraz  $W$  i  $W^*$ . Wypór musi być równy ciężarowi areometru  $W_a$ . Zatem dla każdej krzywej uziarnienia i czasu sedymentacji można znaleźć głębokość zanurzenia środka wyporu bańki areometru i gęstość na poziomie środka wyporu bańki areometru, oznaczając je odpowiednio przez  $H_r$  i  $H_r^*$ . Wartość  $H_r$  odpowiada głębokości zanurzenia, gdy gęstości są liczone bez areometru włożonego do zawiesiny i gdy jest spełniony warunek:

$$W = W_a \quad (15)$$

$H_r^*$  odpowiada głębokości zanurzenia, gdy w rozkładzie gęstości jest uwzględnione zakłócenie wywołane ciągłym pobycem areometru w zawieszynie i gdy jest spełniony warunek:

$$W^* = W_a \quad (16)$$

Ponieważ  $H_r^* \leq H_r$ , to  $\gamma_m^* \geq \gamma_m$  i  $W^* \geq W$ . Dalej jest analizowana tylko sytuacja, gdy areometr jest bardzo szybko wkładany do zawiesiny i gdy jest wykonywany odczyt. Można wówczas przyjąć, że rzeczywisty wypór zawiesiny jest równy  $W$ . Dla tak określonej wartości  $H_r$  otrzymano gęstość zawiesiny ( $\rho_m$ ) na poziomie środka wyporu areometru i gęstość teoretyczną zawiesiny o jednorodnym rozkładzie gęstości ( $\rho_{mk}$ ) odczytaną z wykresu na rys. 4. lub obliczoną z równania (3).

Dla każdego areometru i gęstości zawiesiny można znaleźć równoważny odczyt areometru [6]:

$$R_h = (\rho - 1)1000 \quad (17)$$

Zatem

$$R_{hmk} = (\rho_{mk} - 1)1000 \quad (18)$$

$$R_{hm} = (\rho_m - 1)1000 \quad (19)$$

W roztworze odniesienia

$$R_0 = (\rho_0 - 1)1000 \quad (20)$$

W analizie jako roztwór odniesienia przyjęto wodę destylowaną. Dla obliczonych wartości  $R_{hmk}$  i  $R_{hm}$  można znaleźć zmodyfikowane odczyty areometru oznaczone odpowiednio jako:

$$R_{dmk} = R_{hmk} - R_0 \quad (21)$$

$$R_{dm} = R_{hm} - R_0 \quad (22)$$

Frację mniejszą niż średnica zastępcza należy obliczyć ze wzoru [6]:

$$K = \frac{100\rho_s}{m(\rho_s - 1)} R_d \quad (23)$$

Zatem dla danego zagłębienia środka wyporu areometru można obliczyć odpowiednie wartości  $K$  z równania (23) przy założeniu, że zawiesina jest jednorodna ( $\rho_{mk}$ ) i zawiesina ma zmienną gęstość ( $\rho_m$ ). Można więc napisać wzory:

$$K_{mk} = \frac{100\rho_s}{m(\rho_s - 1)} R_{dmk} \quad (24)$$

$$K_m = \frac{100\rho_s}{m(\rho_s - 1)} R_{dm} \quad (25)$$

W pracy współczynnik korekcyjny zdefiniowano jako:

$$\alpha = \frac{K_m}{K_{mk}} \quad (26)$$

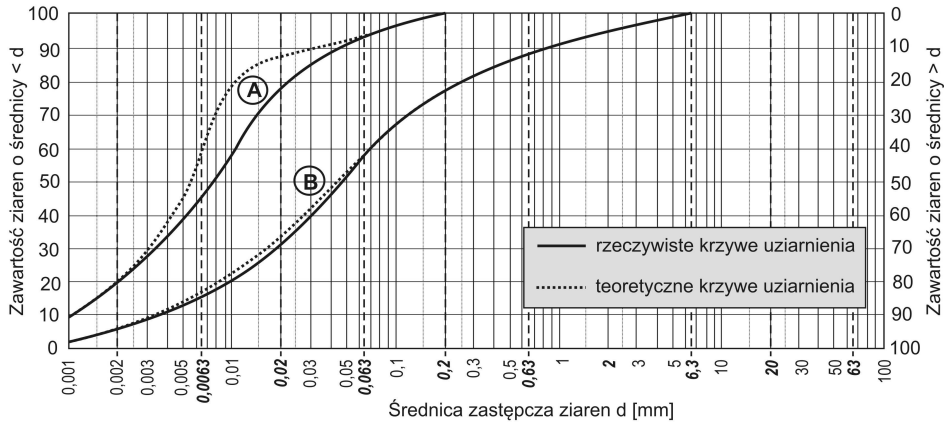
Ponieważ  $\rho_m \leq \rho_{mk}$ , to  $R_{dm} \leq R_{dmk}$  i  $K_m \leq K_{mk}$ , zatem  $\alpha \leq 1$ .

Teoretycznie wartość współczynnika  $\alpha = 1$  dla jednorodnej zawiesiny w chwili początku sedymentacji ( $t = 0$ ) i w chwili zakończenia sedymentacji ( $t = \infty$ ). Z wykresów zmian gęstości w czasie sedymentacji (rys. 2.) wynika, że minimalne wartości współczynnika korekcyjnego  $\alpha$  występuje dla czasu sedymentacji  $t \approx 15$  s.

## 5. Przykład

W celu zobrazowania przedstawionej analizy obliczono teoretyczne wartości współczynnika korekcyjnego  $\alpha$  dla gruntów A i B, których rzeczywiste krzywe uziarnienia pokazano linią ciągłą na rys. 7.

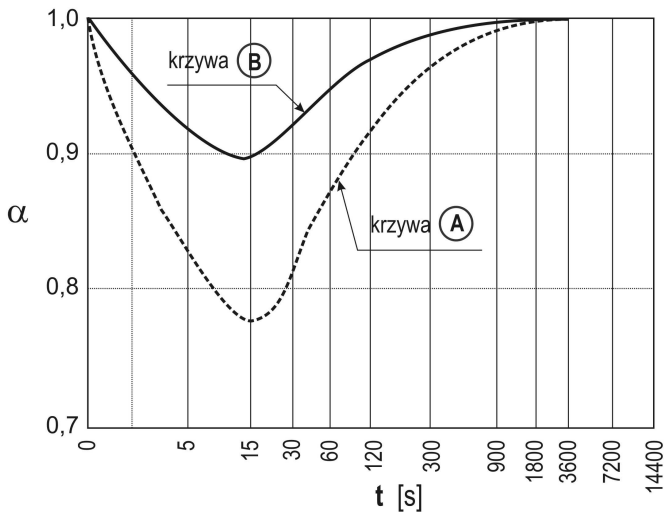
Przyjęto, że zawiesinę wykonano w roztworze wody destylowanej, biorąc 20 g szkieletu gruntowego do wykonania zawiesiny. Gęstość właściwa szkieletu gruntowego  $\rho_s = 2,7 \text{ g/cm}^3$ . Badania wykonano w temperaturze  $20^\circ\text{C}$ , zatem  $\rho_r = 0,9982 \text{ g/cm}^3$  i  $\eta = 1,002 \text{ mPas}$  [6]. Areometr przyjęto o kształtach pokazanych na rys. 3.



Rys. 7. Rzeczywiste i teoretyczne krzywe uziarnienia

Fig. 7. Real and theoretical grain-size distribution curves

Zgodnie z wcześniej omówioną procedurą obliczono wartości współczynnika korekcyjnego  $\alpha$  dla czasów sedymentacji: 5, 15, 30, 60, 120, 300 i 900 s. Otrzymane wartości współczynnika korekcyjnego  $\alpha$  i aproksymowane krzywe zależności wartości współczynnika  $\alpha$  od czasu sedymentacji pokazano na rys. 8. Można stwierdzić, że dla czasu sedymentacji dłuższego od 900 s wartość współczynnika korekcyjnego jest równa 1. Średnica zastępcza cząstek odpowiadająca czasowi sedymentacji 900 s wynosi ok. 0,002 mm.

Rys. 8. Zależność  $\alpha$  od czasu sedymentacjiFig. 8.  $\alpha$  dependence on sedimentation time

Znając krzywą uziarnienia, można obliczyć teoretyczne procentowe zawartości ziaren o średnicy mniejszej niż  $d_i$ :

$$K_k^* = \frac{K^*}{\alpha} \quad (27)$$

gdzie  $K_k^*$  jest procentową teoretyczną zawartością ziaren o średnicy  $< d_i$  z uwzględnieniem współczynnika korekcyjnego,  $K^*$  zaś rzeczywistą procentową zawartością ziaren. Dla gruntu A teoretyczna krzywa uziarnienia znacząco się różni od krzywej uziarnienia rzeczywistej dla  $0,002 < d_i \leq 0,063$  mm. Dla gruntu B o mniejszej zawartości cząstek drobnych i innym kształcie krzywej uziarnienia różnice są znacznie mniejsze. Współczynnik redukcji przedstawia różnicę pomiędzy rzeczywistym niejednorodnym rozkładem gęstości zawiesiny w cylindrze sedymentacyjnym a odpowiadającą temu zagłębieniu areometru gęstością jednorodnej zawiesiny.

Rozważania teoretyczne przyjęto dla prostego kształtu areometru o małym opływowym kształcie. Dla bardziej opływowego areometru o innych parametrach wartość współczynnika korekcyjnego  $\alpha$  będzie inna.

Zauważmy, że podczas wykonywania analizy areometrycznej nie jest znana rzeczywista krzywa uziarnienia gruntu, lecz krzywa otrzymana z badań. Aby realnie przeprowadzić analizę, należy zastosować procedurę iteracyjną.

W pierwszym kroku iteracji jako krzywą rzeczywistą należy przyjąć krzywą otrzymaną z badań oraz znaleźć przybliżone położenie rzeczywistej krzywej uziarnienia. W następnym kroku należy tę krzywą przyjąć jako rzeczywistą i otrzymać teoretyczne położenie krzywej uziarnienia. Procedurę należy powtarzać do chwili, gdy krzywa uziarnienia uzyskana z badań będzie pokrywała się z krzywą teoretyczną otrzymaną z obliczeń według procedury przedstawionej w pracy. Należy zauważyć, że procedura znalezienia współczynnika korekcyjnego  $\alpha$  jest bardzo pracochłonna i wymaga dużej dokładności obliczeń.

## 6. Wnioski

W początkowej fazie sedymentacji proces jest bardzo dynamiczny i gęstość zawiesiny gruntowej jest znacząco niejednorodna. Maksymalną niejednorodność otrzymuje się w 15-20 s sedymentacji. Niejednorodność zależy od masy gruntu użytej podczas badań, lepkości roztworu i gęstości właściwej szkieletu gruntowego. Ze względu na to, że areometry są kalibrowane w roztworach o jednorodnej gęstości, a zawiesina gruntowa jest niejednorodna możliwe jest uwzględnienie tego faktu, stosując współczynnik korekcyjny.

Procedurę obliczeń współczynnika korekcyjnego dla teoretycznej krzywej uziarnienia i teoretycznego areometru przedstawiono w pracy. Wartość współczynnika korekcyjnego maleje wraz z upływem czasu sedymentacji i praktycz-

nie można przyjąć, że  $\alpha \approx 1$  dla czasu sedymentacji 300 s. Cząstki o średnicy zastępczej  $d < 0,001$  mm mogą być traktowane jako zawiesiny i rzeczywista niejednorodność gęstości będzie nieco mniejsza.

Autor jest w pełni świadom o teoretycznym charakterze rozważań, które powinny być potwierdzone w badaniach laboratoryjnych i analizach teoretycznych.

## Literatura

- [1] Bardet J.P.: Experimental soil mechanics. Prentice Hall, New Jersey 1997.
- [2] Dołżyk K., Chmielewska I.: Gęstości roztworów pirofosforanu sodu i heksametafosforanu sodu w wodzie. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, JCEEA, nr 4/2014, s. 55-63.
- [3] Geotechnical Engineering Bureau: Test method and discussion for the particle size analysis of soils by hydrometer method. New York State Department of Transportation, April 2007.
- [4] Gołębiewska A., Hyb W.: Ocena niepewności wyników pomiarów w analizie areometrycznej gruntu. Geoinżynieria. Drogi Mosty Tunele, nr (4) 2008, s. 30-35.
- [5] Kalinski M.E.: Soil mechanics. Lab manual. John Wiley&Sons, USA 2011.
- [6] PKN-CEN ISO/TS 17892-4: Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 4: Oznaczanie składu granulometrycznego. PKN, Warszawa 2009.
- [7] PN-88/B-04481: Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- [8] Smolczyk W. (ed.): Geotechnical Engineering Handbook. Volume 1. Fundamentals. Ernst&Sohn, A Wiley Company, 2002.
- [9] Szypcio Z., Dołżyk K.: Lepkość roztworów pirofosforanu sodu i heksametafosforanu sodu w wodzie destylowanej. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, z. 64 (4/14), s. 239-249.
- [10] Verwaal W.: Soil mechanics. Laboratory manual. Geotechnical Laboratory of DGM. Thimphu Bhutan, February 2004.

## THE INITIAL PHASE OF SEDIMENTATION IN HYDROMETER ANALYSIS OF SOIL

### Summary

The paper has analyzed the difficulty of interpretation of hydrometer analysis results in the initial phase of sedimentation. In the initial phase of sedimentation the dynamics of the process has a crucial influence on the analysis results. The suspension density varies during sedimentation. Dynamics of changes in density depends on the soil particle size composition. Hydrometers are calibrated in solutions of constant density, so that the density of the suspension is dependent on the shape of the hydrometer, and in particular the position of the gravity center, hydrometer's bulb shape and the diameter of the pipe.

After inserting the hydrometer into the suspension, descending particles of the soil suspension are located between the bulb and the cylinder wall of the hydrometer, thus density of the soil suspension varies not only due to the depth but also in cross section. With time of the sedimentation the process dynamics is significantly reduced, and the changes have no material

impact on the measurement of the density of the soil suspension. In the study, considering the theoretical density changes in time in vertical and horizontal sections there have been found correction factor values for two exemplary soils. The value of the correction factor significantly depends on the soil particle size composition. The minimum value of the correction factor was obtained for 15 seconds of sedimentation time. After 900 seconds the value of the correction factor is close to unity. With sufficient accuracy for engineering practice the size distribution can be determined by neglecting the first 4-5 minutes of the initial phase of sedimentation assuming the correction factor is equal to unity.

**Keywords:** soils, grain-size distribution, hydrometer analysis

*Przesłano do redakcji: 10.10.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 02.12.2014 r.*

DOI:10.7862/rb.2014.139

