

Jerzy SEK, Anna STOPCZYK, Tomasz BROWARSKI

e-mail: jerzysek@p.lodz.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej, Wydział Inżynierii Procesowej, Politechnika Łódzka, Łódź

## Badanie procesu przesiąkania wody przez warstwy ziarniste w warunkach nieustalonych

### Wstęp

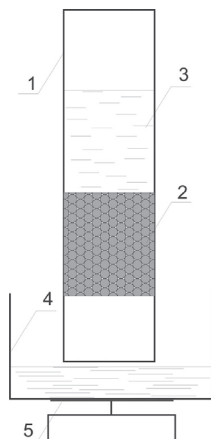
Przemieszczanie się wody w strukturach ziarnistych jest jednym z elementów warunkujących przebieg licznych procesów geologicznych i hydrologicznych. Ruch wody w powierzchniowych warstwach gruntu – glebach decyduje także o zachodzących tam procesach biologicznych. Migrujące w głąb warstw gruntu wody powierzchniowe są także czynnikiem powodującym przemieszczanie się wszelkiego rodzaju zanieczyszczeń chemicznych powodujących skażenie środowiska glebowego oraz wód podziemnych [1].

Zagadnienie przebiegu procesów przesiąkania wody w głąb porowatych struktur gruntu jest w literaturze przedmiotu traktowane zazwyczaj jako proces ustalony zachodzący w warstwie porowatej o nieskończonej wysokości przy ciągłym, stałym napływie wody zapewniającym całkowitą saturację przestrzeni międzyziarnowych. Znacznie mniej prac poświęcono zagadnieniom przepływu nieustalonego zachodzącego przy rosnącym stopniu nasycenia takich struktur.

### Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne nad zagadnieniem nieustalonego przepływu cieczy przez warstwę ziarnistą o skończonej wysokości wykonano korzystając z aparatury, której budowę przedstawiono na schemacie (Rys. 1), [2]. Przyrząd składał się z pionowej rury o średnicy 9 cm i wysokości 32 cm umieszczonej w statywie. Kolumna była zamknięta od dołu stalową siatką zabezpieczającą przed wysypywaniem się wypełnienia. Kolumnę napełniano materiałem ziarnistym do określonej wysokości. Pod kolumną umieszczone było naczynie do którego sphywała przesiąkająca ciecz. Istniała możliwość pomiaru masy wypływającej cieczy za pomocą wagi elektronicznej.

Materiał ziarnisty w postaci piasku kwarcowego umieszczano w kolumnie jako warstwę o stałej wysokości wynoszącej w czasie każdego pomiaru 5 cm. Badania procesu przesiąkania wykonano dla trzech frakcji badanego materiału, o rozmiarach ziaren wynoszących 200–250  $\mu\text{m}$ , 250–400  $\mu\text{m}$ , 400–630  $\mu\text{m}$ , wydzielonych za pomocą analizy sitowej. Przed umieszczeniem w kolumnie suchy piasek mieszano z wodą tak, aby wstępna zawartość wody w materiale wynosiła 10, 15 i 20 procent.



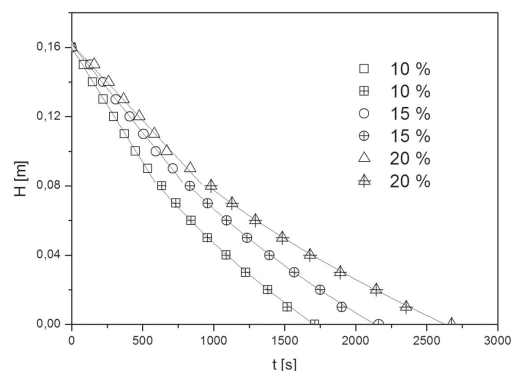
Rys. 1. Stanowisko badawcze; 1 – cylindryczna kolumna, 2 – warstwa porowata, 3 – warstwa płynu, 4 – naczynie zbierające ciecz, 5 – waga elektroniczna

Nad próbkę materiału ziarnistego nalewano wodę do wysokości 16 cm i śledzono zmiany jej poziomu w czasie trwania procesu przesiąkania.

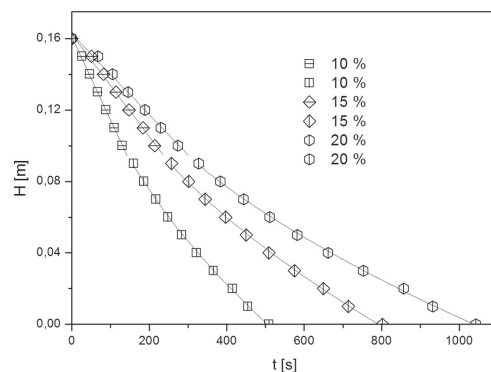
### Wyniki badań i ich analiza

Wyniki pomiarów przebiegu procesu przesiąkania dla próbek piasku kwarcowego o różnej granulacji i różnej początkowej zawartości wilgoci przedstawiono na wykresach rys. 2–4.

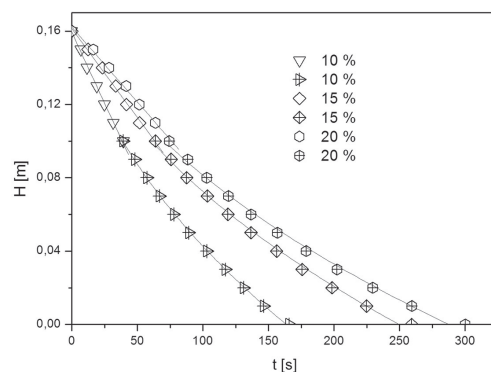
Bezpośrednia analiza przedstawionych wykresów pozwala stwierdzić, że opory przepływu przez badane warstwy piasku są bezpośrednio zależne od jego granulacji. Czasy przesiąkania tej samej ilości wody



Rys. 2. Wykres zależności  $H = f(t)$  dla warstwy porowatej o uziarnieniu 200–250  $\mu\text{m}$  przy różnych zawartościach wilgoci



Rys. 3. Wykres zależności  $H = f(t)$  dla warstwy porowatej o uziarnieniu 250–400  $\mu\text{m}$  przy różnych zawartościach wilgoci



Rys. 4. Wykres zależności  $H = f(t)$  dla warstwy porowatej o uziarnieniu 400–630  $\mu\text{m}$  przy różnych zawartościach wilgoci

dla frakcji o mniejszych ziarnach są dłuższe. Można również zauważyć, że dla danej frakcji czas przesiąkania wzrasta wraz ze wzrostem początkowej zawartości wilgoci w badanym materiale. W mniejszej pracy skupiono się jednak na obserwowanym fakcie, że dla każdego badanego przypadku można wyróżnić dwa etapy procesu przesiąkania wody przez warstwę ziarnistą. Etap pierwszy tego procesu obejmuje przedział czasu w trakcie którego następuje stopniowe nasączenie złoża spływającą cieczą. Można zauważyć, że zależność  $H = f(t)$  ma tym zakresie czasu charakter liniowy we wszystkich badanych przypadkach. Nasączenie odbywa się więc ze stałą prędkością i ze względu na stały przekrój kolumny ze stałym natężeniem przepływu. Stwierdzono na drodze obserwacji wizualnych, że etap ten ulega zakończeniu w momencie, gdy po nasączeniu złoża rozpoczyna się wypływ przez jego dolną powierzchnię.

Linie proste, za pomocą których przybliżono punkty doświadczalne dla pierwszego etapu pokazane na rys. 2–4 opisane mogą być następującą zależnością:

$$H = H_0 - v_1 t \quad (1)$$

gdzie:

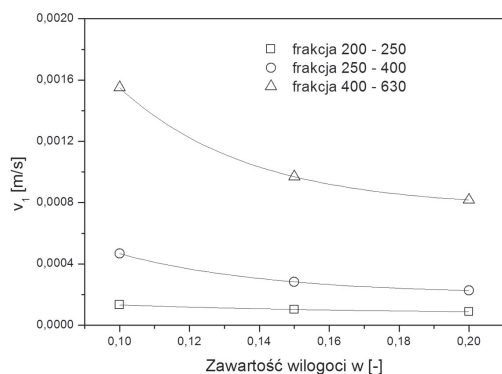
$H_0$  – początkowa wysokość warstwy wodnej,

$H$  – aktualna wysokość warstwy wodnej,

$v_1$  – prędkość przesiąkania,

$t$  – czas.

Wartości wyznaczonych w ten sposób prędkości  $v_1$  przedstawiono na wykresie w funkcji zawartości wilgoci (Rys. 5).



Rys. 5. Wykres zależności  $v_1$  w funkcji zawartości wilgoci w badanych warstwach

Punkty doświadczalne przybliżono zależnością

$$v_1 = a_0 - a_1 \exp(-w/a_3) \quad (2)$$

gdzie:

$w$  – początkowa zawartość wilgoci w badanym materiale.

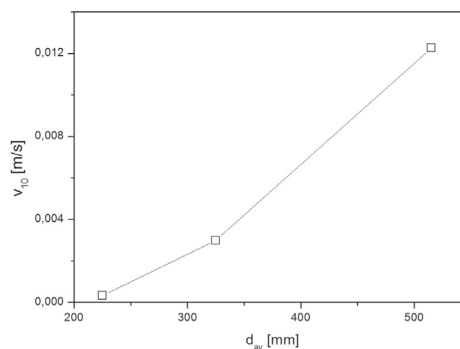
Zastosowanie równania (2) do opisu danych doświadczalnych pozwala na wyznaczenie prędkości  $v_{10}$  w czasie pierwszego okresu nasiąkania dla warstwy ziarnistej o zerowej zawartości wilgoci. Parametr ten można uznać za wielkość charakteryzującą strukturę samego złoża pozbawionego wilgoci. Wyznaczenie tej wielkości w warunkach laboratoryjnych wymaga suszenia materiału doświadczalnego, a w warunkach pozalaboratoryjnych jest w zasadzie niemożliwe. Dla zbadanych przypadków zależność  $v_{10}$  jako funkcję średniej średnicy ziaren dla danej frakcji przedstawiono na wykresie rys. 6.

Dane wyróżnione jako etap drugi badanego procesu dotyczą przesiąkanie wody przez złożo ziarniste przy pełnej jego saturacji, w warunkach malejącej wysokości warstwy wodnej czyli w warunkach nieustalonych. W literaturze przedmiotu [3, 4] zależność pomiędzy wysokością warstwy wodnej a czasem trwania procesu jest zazwyczaj opisywana za pomocą zależności, która dla kolumny o stałej średnicy ma następującą postać:

$$\ln \frac{H_1}{H_2} = k_D \frac{t_H}{l} \quad (3)$$

gdzie:

$H_1, H_2$  – odpowiednio początkowa i końcowa wysokość warstwy wodnej,



Rys. 6. Wykres zależności  $v_{10}$  w funkcji średniej średnicy ziaren w stosowanych materiałach ziarnistych

$t_H$  – czas trwania pomiaru,

$l$  – wysokość warstwy ziarnistej,

$k_D$  – współczynnik filtracji.

Zależność (3) jest postacią prawa Darcy'ego dla nieustalonego przepływu przez warstwę ziarnistą. W niniejszej pracy podjęto próbę opisu danych doświadczalnych przy założeniu, że proces jest rozpatrywany jako grawitacyjny wypływ cieczy ze zbiornika. Warstwę ziarnistą można tutaj uznać jako opór stawiany wypływającej cieczy przez otwór wylotowy.

Punkty doświadczalne dotyczące drugiego etapu procesu przesiąkania – rys. 2–4 przybliżono za pomocą następującej zależności:

$$H = H_0 - \varphi t^b \quad (4)$$

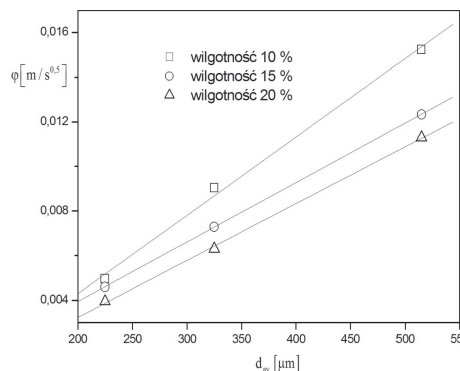
gdzie:

$\varphi$  – współczynnik oporów wypływu,

$b$  – parametr

Dla wszystkich badanych przypadków uzyskano bardzo dobry opis punktów doświadczalnych dla wartości parametru  $b$  równego 0,5. Odpowiada to zależnościom dotyczącym wypływu z cylindrycznego zbiornika, którym jest niewątpliwie używana w badaniach kolumna.

Zależność wartości współczynnika oporów wypływu dla przepływu przez warstwy piasku od jego wilgotności i różnych granulacji przedstawiono na wykresie (Rys. 7).



Rys. 7. Zależność współczynnika oporów wypływu od średniej średnicy ziaren wypełnienia

Punkty doświadczalne na wykresie (Rys. 7) przybliżono za pomocą linii prostych. Wartości rzędnych tych linii dla  $d_{av} \rightarrow 0$  są bardzo bliskie zeru. Odpowiada to złożu o bardzo małej przepuszczalności, a tym samym o dużych wartościach oporów przepływu.

#### LITERATURA

- [1] P. Moldrup: Wat. Res. 30, 1471 (1996).
- [2] T. Browarski: Badanie procesów migracji jonów w glebach, Pol. Łódźka, Łódź 2010.
- [3] J. Bear, Y. Corapcioglu: Advances in transport phenomena in porous media. Martinus Nijhoff, Boston 1987.
- [4] T. Strzelecki, St. Kostecki, St. Żak: Modelowanie przepływów przez ośrodki porowate. DWE, Wrocław 2008.