

EDYTA MALINOWSKA, MAŁGORZATA HYB

Katedra Geoinżynierii, SGGW w Warszawie

Department of Geotechnical Engineering, Warsaw Agricultural University – SGGW

Wyznaczanie współczynnika filtracji na podstawie badań laboratoryjnych

Determination of permeability coefficient in laboratory tests

Wstęp

Niektóre budowle inżynierskie służące do ochrony środowiska, jak na przykład składowiska odpadów, oczyszczalnie ścieków, a także inne obiekty inżynierskie, służące do magazynowania i dystrybucji paliw płynnych, stanowią źródło zanieczyszczenia środowiska wodno-gruntowego. Dlatego powinny być lokalizowane na podłożu, w którym występują warstwy gruntów uznanych za bariery hydrauliczne, które to ograniczają możliwość migracji zanieczyszczeń w środowisku wodno-gruntowym.

Rozwój gospodarczy niekiedy wymusza przeznaczanie pod budownictwo obszarów, na których występują grunty o słabej nośności. Dlatego też budowle inżynierskie służące ochronie przeciwpowodziowej, kształtowaniu środowiska bądź mające cele ważne dla gospodarki, jak np.: obwałowania rzek, zapory ziemne zbiorników wodnych, małe budowle

melioracyjne lub nasypy drogowe często muszą być lokalizowane na terenach o tzw. małej przydatności dla budownictwa. Tereny te często podmokłe, charakteryzują się występowaniem w podłożu gruntów organicznych.

W artykule przedstawiono metodykę określania współczynnika filtracji wraz z wynikami badań, w warunkach laboratoryjnych przeprowadzonych na gruntach organicznych pochodzących z poligonu doświadczalnego Katedry Geoinżynierii SGGW, które mogą być wykorzystane do określenia uprzywilejowanych dróg przepływu, identyfikacji barier hydraulicznych lub wielkości występujących zanieczyszczeń.

Metodyka określania współczynnika filtracji

Metody wyznaczania parametrów przepływu, które są stosowane w geo-

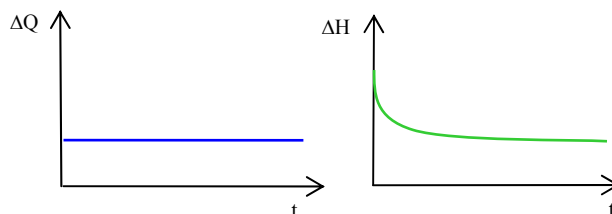
technice możemy podzielić na trzy grupy: obliczenia oparte na wzorach, zarówno analitycznych, jak i empirycznych; modelowania numeryczne, matematyczne i fizyczne przepływu wody w gruncie oraz badania terenowe i laboratoryjne gruntu.

Znaczne różnice pomiędzy współczynnikami filtracji gruntów spoistych i niespoistych wymagają stosowania innych metod i innej aparatury badawczej. Metody badań współczynnika filtracji w warunkach laboratoryjnych powinny modelować także główne kierunki przewidywanego przepływu wody w warunkach naturalnych. Zależnie od warunków wodno – gruntowych przepływ wody w gruncie jest możliwy w kierunku pionowym, poziomym i ukośnym.

Bezpośrednie badania laboratoryjne współczynnika filtracji wody w gruntach sprowadzają się do metod stało – i zmiennie-gradientowych.

Charakterystyka metod badań ze stałym gradientem

W metodzie stało-gradientowej zadaje się wartość stałą naporu hydraulicznego na dolną powierzchnię próbki.



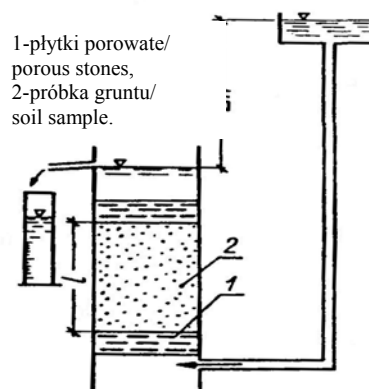
RYSUNEK 1. Charakterystyka zmian zależności przepływu i gradientu w czasie, w metodzie stało-gradientowej.

FIGURE 1. Relationship between discharge capacity and hydraulic gradient in constant-gradient methods.

Różnica ciśnień przechodząca przez próbkę zmniejsza się w czasie aż do osiągnięcia stanu równowagi natężenia.

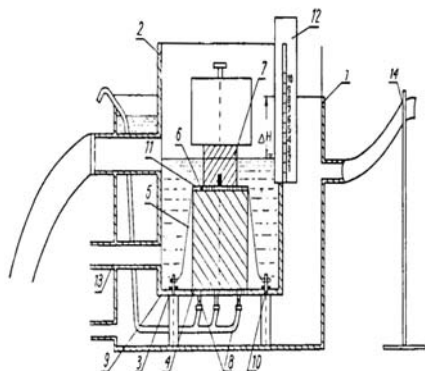
Podstawowym aparatem do oznaczania współczynnika filtracji w gruntach niespoistych metodą gradientu stałego jest schemat pomiarowy przedstawiony na rys.2.

Współczynnik filtracji można także wyznaczyć laboratoryjnie za pomocą aparatu Wiłuna, przedstawionego na rys.3.



RYSUNEK 2. Schemat aparatu do oznaczania współczynnika filtracji w gruntach niespoistych.

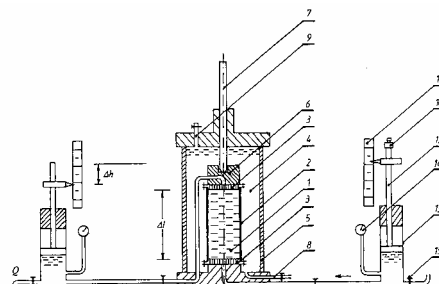
FIGURE 2. Scheme of apparatus for permeability test in uncohesive soils.



1-cylinder zewnętrzny/outer cylinder; 2-cylinder wewnętrzny/inner cylinder; 3-podstawa/base; 4-filtr dolny i siatka 0,1mm lower filter & mesh; 5-pierścień/ring; 6-filtr górny/upper filter; 7-obciążnik/dead load; 8-końcówki i rurki gumowe odpowietrzające spód próbki/dearing tubings; 9-nakrętka/nut; 10-uszczelka gumowa/rubber sealing; 11-siatka o oczkach 0,2mm/mesh; 12-podziałka milimetrowa/milimeter scale; 13-dopływ wody/water supply; 14-przelew/over fall.

RYSUNEK 3. Aparat Wiłuna do badania współczynnika filtracji.
FIGURE 3. Wiłun's cell for permeability test.

Bardziej zaawansowanym technologicznie w badaniu przepuszczalności gruntu jest wykorzystanie przystosowanego w tym celu aparatu trójosiowego ściskana (rys.4).



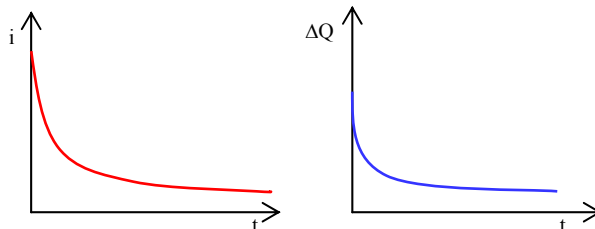
1-próbka gruntu/soil sample, 2-cylinder wewnętrzny/inner cylinder, 3-podkładka przepuszczalna/pressure cell, 4-komora wysokich ciśnień/cell, 5 -cylinder zewnętrzny/outer cylinder, 6-głowica/top cap, 7-tłok/piston, 8-doprowadzenie wody/water supply, 9-odpowietznik/deair, 10-obciążnik/load, 11-podziałka/scale, 12-tłok/piston, 13-cylinder/cylinder, 14-manometr/manometr, 15-zawór/valve.

RYSUNEK 4. Aparat trójosiowy przystosowany do badania filtracji wg Wysokińskiego i Łukasika (1996).
FIGURE 4. Triaxial cell adapted for permeability test, after Wysokiński and Łukasik (1996).

Charakterystyka metod badań ze zmiennym gradientem hydraulicznym

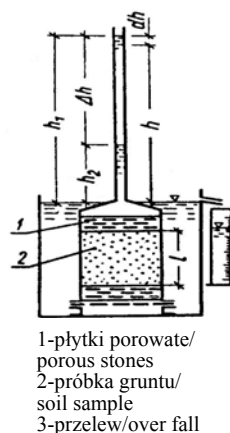
W metodzie zmiennie-gradientowej gradient hydrauliczny zmniejsza się wraz z upływem czasu zbliżając się asymptotycznie do określonego poziomu (rys.5).

Świadczy to o tym, że siła przepływu wody maleje w czasie trwania doświadczenia.



RYSUNEK 5. Charakterystyka zmian zależności gradientu i przepływu w czasie, w metodzie zmiennie-gradientowej.
FIGURE 5. Relationship between discharge capacity and hydraulic gradient in nonconstant-gradient methods.

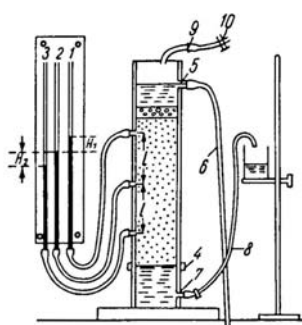
Podstawowym aparatem do oznaczania współczynnika filtracji w gruntach spoiwystych metodą gradientu zmiennego jest schemat przedstawiony na rys.6.



1- płytki porowate/
porous stones
2- próbka gruntu/
soil sample
3- przelew/over fall

RYSUNEK 6. Schemat aparatu do wyznaczenia współczynnika filtracji w gruntach spoiwystych.

FIGURE 6. Scheme of apparatus for permeability test in cohesive soils.



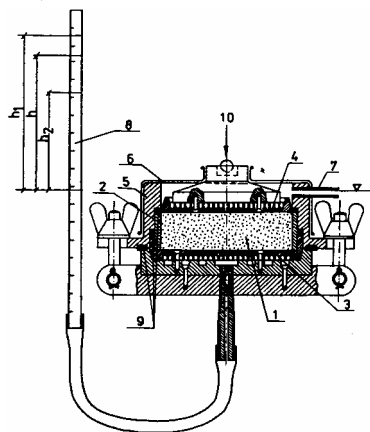
1, 2, 3 – szklane rurki, spełniające rolę piezometrów/ piezometers; 4 – siatka/mesh; 5 – otwór/slot; 6 – rurka/tube; 7 – odpływ/outflow; 8 – rurka służąca do całkowitego nasycenia/burette; 9 – dopływ/water supply; 10 – zacisk/clamp.

RYSUNEK 7. Aparat Kamińskiego do badania współczynnika filtracji.

FIGURE 7. Kamiński's cell for permeability test.

Nieco bardziej skomplikowany w budowie jest aparat Kamińskiego, zwany także rurką Kamińskiego (rys.7).

W praktyce badań laboratoryjnych współczynnik filtracji dla gruntów spoiwystych najlepiej jest wyznaczyć w przystosowanych do tego celu edometrach (rys.8).



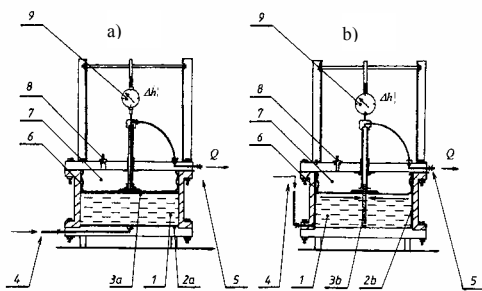
1 - próbka gruntu/soil sample, 2 - pierścień/ring, 3 - filtr dolny/lower filter, 4 - filtr górny/upper filter, 5 - pierścień dociskowy/holder ring, 6 - osłona gumowa/rubber membrane, 7 - odprowadzenie wody/outflow, 8 - rurka szklana z podziałką (piezometr)/piezometer, 9 - uszczelki gumowe/rubber sealings, 10 - obciążenie/load.

RYSUNEK 8. Schemat edometru przystosowanego do wyznaczenia współczynnika filtracji, typ ITB-ZW.

FIGURE 8. Scheme of oedometer adapted for permeability test, type ITB-ZW.

Bardzo zaawansowanym technologicznie oraz umożliwiającym wyznaczenie współczynnika filtracji w dwóch kierunkach: pionowym k_v i poziomym k_h jest aparat Rowe'a, zwany także komorą Rowe'a (rys.9).

Aparat Rowe'a umożliwia eksperymentalne wyznaczenia współczynnika filtracji w czterech kierunkach: dwóch



1 – badana próbka gruntu/soil sample, 2a – przepuszczalna podstawa/permeability base, 2b – przepuszczalna ściana boczna/permeability ring; 3a – przepuszczalny tłok/permeability piston, 3b – walcowy dren/drain, 4 – dopływ (odpływ) wody /inflow(outflow), 5 – odpływ (dopływ) wody/outflow(inflow), 6 – membrana gumowa/rubber membrane, 7 – ciśnieniowa komora wodna/pressure cell, 8 – zawór/valve, 9 – miernik nacisku konsolidującego próbkę/manometr.

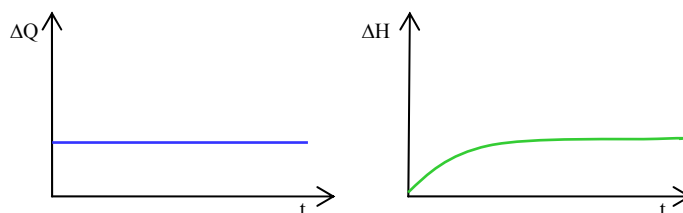
RYSUNEK 9. Aparat Rowe'a według Ossowskiego (1985).

FIGURE 9. Rowe's cell after Ossowski (1985).

pionowych (na dół lub do góry) i dwóch poziomych (do centrum i od centrum).

Charakterystyka metod badań współczynnika filtracji ze stałym przepływem wody w próbce gruntu

W metodzie badania ze stałym wymuszonym przepływem wymusza się stałą prędkość przepływającej przez



RYSUNEK 10. Charakterystyka zmian zależności przepływu i gradientu w czasie, w metodzie ze stałym przepływem.

FIGURE 10. Relationship between discharge capacity and hydraulic gradient in constant-flow methods.

próbkę wody (rys.10).

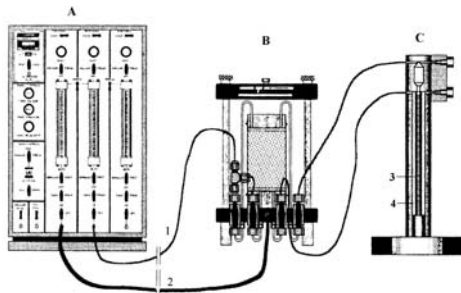
Dla danego badania mierzy się napór hydrauliczny ΔH na wlocie i na wylocie próbki, aż do osiągnięcia momentu, gdy przepływ stanie się ustalony i wówczas można obliczyć współczynnik filtracji ze wzoru:

$$k = \frac{Q \cdot l}{F \cdot t \cdot \Delta h} = \frac{Q}{F \cdot t \cdot i} [cm / s]$$

W celu przeprowadzenia badań ze stałym wymuszonym przepływem można zastosować System Trautwain (rys.11), który składa się z trzech zasadniczych elementów: tablicy pomiarowej, służącej do zadawania i kontrolowania ciśnienia oraz pomiaru zmian objętości próbki gruntu i przepływu wody; komory, pozwalającej wymuszać ciśnienie oraz permometru, umożliwiającego przyspieszenie badań poprzez wymuszenie jednakowego dopływu i odpływu wody.

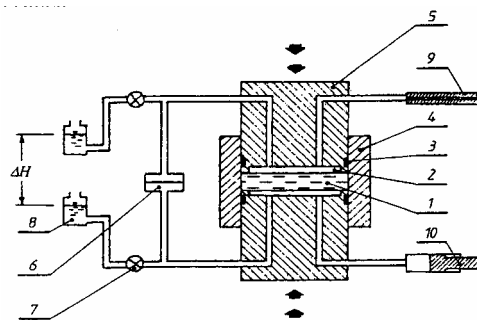
W 1966 roku H.Olsen zaproponował aparat własnej konstrukcji do badania filtracji w gruntach spoistych (rys. 12).

Dopiero w latach osiemdziesiątych tego typu technikę pomiarową zastosowano praktycznie na większą skalę w zagranicznych laboratoriach geotechnicznych. Podstawy teoretyczne rozwi-



A-tablica pomiarowa/ measurement panel, B-komora/cell, C - permometr/permometer, 1-układ ciśnienia wyrównawczego / back pressure, 2-układ ciśnienia w komorze/system of pressures, 3- pipeta/pipette, 4-annulus.

RYSUNEK 11. System Trautwain do badań przepuszczalności hydraulicznej gruntów.
FIGURE 11. Trautwain scheme for permeability test.



1 - badana próbka gruntu w komorze/soil sample, 2 - przepuszczalny dysk ceramiczny/permeability ceramic disc, 3 - pierścień uszczelniający/sealing ring, 4 - pierścień stalowy/steel ring, 5 - tłok stalowy/piston steel, 6 - rejestrator różnicy ciśnienia /differential pressure transducer, 7 - zawór/valve, 8 - naczynia/vessel, 9 - kalibrowana kapilara pomiarowa/burette, 10 - kalibrowana pompa tłokowa/pump.

RYSUNEK 12. Aparat Olsena wg Olsena (1966).
FIGURE 12. Olsen's cell after OLSEN (1966).

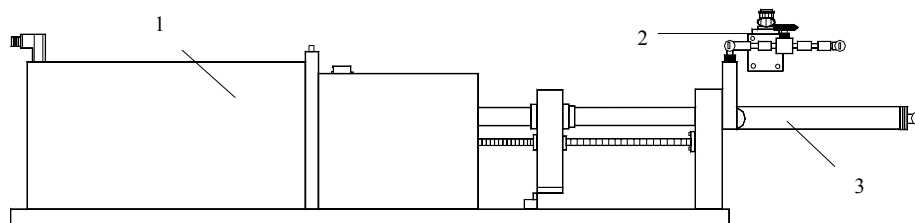
nęli i podali Morian i Olsen w 1987 roku (Esaki i in., 1996). Wówczas powstał udoskonalony aparat Olsena, flow – pump (rys. 13).

Metoda ta polega na zadawaniu stałego przepływu wody przez próbkę gruntu, a nie jak to występuje w klasycznym badaniu współczynnika filtracji, gdzie punktem wyjściowym jest gradient hydrauliczny.

Wyniki przeprowadzonych badań

Badania przepływu wody w gruntach organicznych zostały wykonane dla próbek torfu i gytii pobranych z poligonu doświadczalnego Katedry Geoinżynierii SGGW w Antoninach.

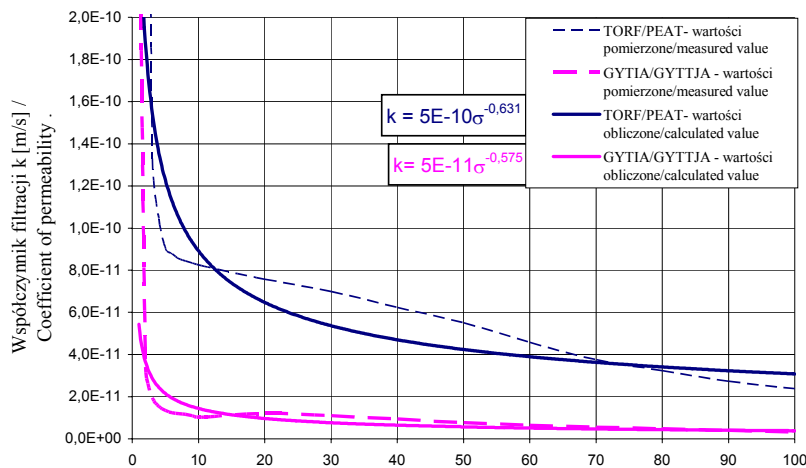
Badania zostały wykonane w edometrze, metodą zmiennego gradientu hydraulicznego. Ruch wody w ośrodku



1- silnik krokowy, o zmiennej prędkości/changeable velocity engine; 2- czujnik różnicowy ciśnienia/pressure demodulator; 3- komora tłoczna/ flow cell.

RYSUNEK 13. Aparat do wyznaczenia współczynnika filtracji metodą flow-pump, typ VRDM 397/50 LWC.

FIGURE 13. Scheme of apparatus for permeability test by flow-pump, type VRDM 397/50 LWC.



RYSUNEK 14. Zmiana współczynnika filtracji k w zależności od naprężenia σ' dla badań edometrycznych, wyznaczona z metod pośrednich.

FIGURE 14. Relationship between coefficient of permeability k and stress σ' in oedometer test, calculated by indirect method.

gruntowym zależy od jego uziarnienia, porowatości, temperatury i lepkości wody oraz obciążeń, jakim jest poddawany. Wielkości prędkości filtracji wody w gruncie określił inżynier H. Darcy.

W ostatnich latach dowiedziono, że zastosowanie liniowego prawa filtracji możliwe jest dla ruchu laminarnego przy przepływach cieczy newtonowskich (Harder i Blumel 1990), przy czym zakres stosowności obowiązującego prawa Darcy jest ograniczony, a zależność pomiędzy prędkością filtracji a gradientem hydraulicznym zależy od:

- cech ośrodka porowatego
- rodzaju i cech filtrującej cieczy
- charakteru przepływu (warunków ruchu wody), Kollis (1961), Macioszczyk (1973), Wosiewicz (1986).

W pracy podjęto próbę opisu charakterystyki przepływu jako funkcji nieliniowej.

Już w 1960 i 1977 Hansbo wskazuje na nie-liniowy przepływ, który może

odnosić się do zależności potęgowej niskiego gradientu.

Charakterystyki przepływu wyznaczone z metod pośrednich układają się w zależności przedstawione na rys.14.

Uzyskane z metod pośrednich charakterystyki przepływu przedstawiają nie-liniową zmianę współczynnika filtracji w zależności od naprężenia.

Dobór zależności empirycznych opisujących przepływ wody w gruncie

Uzyskane z badań laboratoryjnych wartości współczynnika filtracji k , naprężenia σ' i wskaźnika porowatości e , poddano szczegółowej analizie statystycznej w celu wyznaczenia funkcji regresji (modelu), która bezpośrednio opisze zależność

$$k = f(\sigma', e).$$

W opracowaniu ostatecznej postaci proponowanych zależności wykorzystano metodę analizy regresji nieliniowej. Dla zapewnienia porównywalności miar zgodności poszczególnych punktów pomiarowych wykorzystano następujące miary:

- współczynnik korelacji,
- maksymalny błąd względny (MRD),
- średni błąd względny (MRE),
- odchylenie standardowe błędów względnych.

W tab. 1 zaprezentowano wyniki analizy statystycznej dla modelu liniowego z tradycyjną miarą dopasowania, jaką jest współczynnik korelacji R. Otrzymano wówczas wysokie błędy względne, które przekraczają nawet 1000% (dla torfu).

Współczynniki modelu (1):

Torf:

$$\hat{k} = (0,184 \cdot \sigma + 13,487 \cdot e - 57,037) \cdot 10^{-9}$$

Gytia:

$$\hat{k} = (0,015 \cdot \sigma + 3,801 \cdot e - 8,978) \cdot 10^{-9}$$

W związku z powyższym postanowiono przyjąć jako miarę dopasowania modelu do danych empirycznych minimalizację średniego błędu względ-

$$MRE \cdot 100 \% = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{k_i - \hat{k}_i}{k_i} \right| \cdot 100 \%$$

nego:

gdzie:

k_i – pomierzony współczynnik filtracji;

$\hat{k}_i = f(\sigma_i, e_i)$ – współczynnik filtracji obliczony za pomocą danego modelu.

Poddano analizie kilka modeli, w tym model liniowy (wyniki w tab. 2), dla którego wyniki są znacząco lepsze w zakresie błędów względnych, ale gorsze, jeśli chodzi o współczynnik korelacji.

Współczynniki modelu (2):

Torf:

$$\hat{k} = (0,014 \cdot \sigma + 1,827 \cdot e - 6,096) \cdot 10^{-9}$$

Gytia:

$$\hat{k} = (0,007 \cdot \sigma + 2,215 \cdot e - 5,019) \cdot 10^{-9}$$

TABELA 1. Wyniki analizy statystycznej dla modelu $\hat{k} = a_1\sigma + a_2e + a_3$ (1).

TABLE 1. Results of statistical analysis of the model $\hat{k} = a_1\sigma + a_2e + a_3$ (1).

Model (1)	Oznaczenie	Torf	Gytia
Model (1)	Notation	Peat	Gyttja
Suma reszt	SSD	151,27	0,59
Sum of square deviation			
Współczynnik korelacji w %	R·100%	91,65	95,92
Correlation coefficient in %			
Średni błąd względny w %	MRE·100%	212,73	46,67
Mean relative error in %			
Maksymalny błąd względny w %	MRD·100%	1440,70	205,40
Maximal relative deviation in %			
Odchylenie standardowe bł. względnych	s	345,05	57,68
Standard deviation			
Mediana	Me	71,25	21,22
Median			

TABELA 2. Wyniki analizy statystycznej dla modelu $k = a_1\sigma + a_2e + a_3$ (2).

TABLE 2. Results of statistical analysis of the model $\hat{k} = a_1\sigma + a_2e + a_3$ (2).

Model (2)	Oznaczenie	Torf	Gytia
Model (2)	Notation	Peat	Gyttja
Suma reszt	SSD	880,30	1,67
Sum of square deviation			
Współczynnik korelacji w %	R·100%	34,43	88,04
Correlation coefficient in %			
Średni błąd względny w %	MRE·100%	35,74	21,37
Mean relative error in %			
Maksymalny błąd względny w %	MRD·100%	84,80	87,39
Maximal relative deviation in %			
Odchylenie standardowe bł. względnych	s	26,26	22,32
Standard deviation			
Mediana	Me	25,75	15,76
Median			

TABELA 3. Wyniki analizy statystycznej dla modelu $\hat{k} = a_1(\sigma + 1)^{a_2} e^{a_3}$ (3).

TABLE 3. Results of statistical analysis of the model $\hat{k} = a_1(\sigma + 1)^{a_2} e^{a_3}$ (3).

Model (3)	Oznaczenie	Torf	Gytia
Model (3)	Notation	Peat	Gyttja
Suma reszt	SSD	4,52	0,06
Sum of square deviation			
Współczynnik korelacji w %	R·100%	99,76	99,62
Correlation coefficient in %			
Średni błąd względny w %	MRE·100%	15,20	11,34
Mean relative error in %			
Maksymalny błąd względny w %	MRD·100%	52,50	25,36
Maximal relative deviation in %			
Odchylenie standardowe bł. względnych	s	17,92	8,76
Standard deviation			
Mediana	Me	9,10	13,06
Median			

Z modeli nieliniowych wybrano dwa dające najmniejsze błędy względne, a wyniki analizy statystycznej zamieszczono w tab. 3 i 4.

Współczynniki modelu (3):

Torf:
 $\hat{k} = 0,002 \cdot 10^{-9} \cdot (\sigma + 1)^{-0,193} e^{5,470}$

Gytia:
 $\hat{k} = 0,0009 \cdot 10^{-9} \cdot (\sigma + 1)^{-0,121} e^{7,636}$

Współczynniki modelu (4):

Torf:

$$a_1 = 3,972 \cdot 10^{-9}, a_2 = -0,055, \\ a_3 = 0,341$$

Gytia: $a_1 = 0,131 \cdot 10^{-9}, a_2 = -0,028, \\ a_3 = 0,983$

W obu przypadkach zależności nieliniowej otrzymano bardzo wysoki współczynnik korelacji R, ponad 99%, ale ze względu na średni i maksymalny zaproponować model potęgowej postaci:

TABELA 4. Wyniki analizy statystycznej dla modelu $k = a_1 \cdot \exp(a_2 \sigma + a_3 e)$ (4).

TABLE 4. Results of statistical analysis of the model $\hat{k} = a_1 \cdot \exp(a_2 \sigma + a_3 e)$ (4).

Model (4)	Oznaczenie Notation	Torf Peat	Gytia Gyttja
Suma reszt Sum of square deviation	SSD	0,84	0,05
Współczynnik korelacji w % Correlation coefficient in %	R·100%	99,96	99,68
Średni błąd względny w % Mean relative error in %	MRE·100%	33,27	21,04
Maksymalny błąd względny w % Maximal relative deviation in %	MRD·100%	99,14	84,28
Odchylenie standardowe bł. względnych Standard deviation	s	39,65	27,21
Mediana Median	Me	10,06	5,83

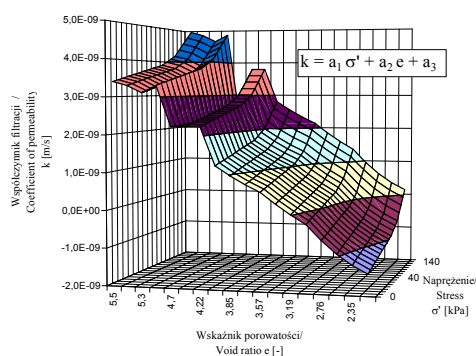
$$\hat{k} = a_1 (\sigma + 1)^{a_2} e^{a_3} \text{ (wyniki w tab. 3).}$$

Wyniki te są znacznie lepsze niż dla modelu liniowego w obu przypadkach (tab. 1 i 2).

Przemawia to za przyjęciem modelu nieliniowego dla zależności współczynnik filtracji od naprężenia i wskaźnika

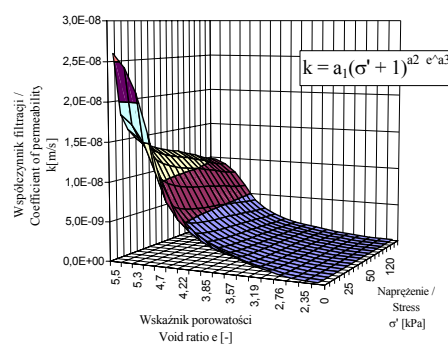
porowatości. Wówczas charakterystyki przepływu dla torfu wyznaczone z metod bezpośrednich układają się w zależności przedstawione na rys.15 i 16.

Podobne charakterystyki otrzymano dla gytii.



RYSUNEK 15. Zmiana współczynnika filtracji w zależności od naprężenia i wskaźnika porowatości dla torfu wyznaczona z metody bezpośredniej.

FIGURE 15. Relationship between coefficient of permeability, stress and void ratio for peat, calculated by direct method.



RYSUNEK 16. Zmiana współczynnika filtracji w zależności od naprężenia i wskaźnika porowatości dla torfu wyznaczona z metody bezpośredniej.

FIGURE 16. Relationship between coefficient of permeability, stress and void ratio for peat, calculated by direct method.

Podsumowanie

Poszukiwanie zależności funkcyjnej, która najlepiej opisywałaby charakterystykę przepływu wody w gruncie jest zagadnieniem trudnym i złożonym. Jednak koniecznym do realizacji ze względu na poprawną ocenę odkształceń konsolidacyjnych, na które wpływ ma min. przepływ wody w gruncie. Z przedstawionej powyżej analizy statystycznej należy wnioskować, że przyjęcie nieliniowej zależności współczynnika filtracji ma istotny wpływ na uzyskiwane wyniki. Wynika z niej, iż charakterystyka nieliniowa bardziej oddaje zmianę współczynnika filtracji, jaka zachodzi w gruncie na skutek przyłożonego obciążenia i zmian mechanicznych ośrodka.

Literatura

- ELANDT R.: *Statystyka matematyczna w zastosowaniu do doświadczeń rolniczego*. PWN, Warszawa 1964.
- GARBULEWSKI K.: *Dobór i badania gruntowych uszczelnień składowisk odpadów komunalnych*. Wyd. SGGW, Warszawa 200.
- KACZMAREK Z.: *Metody statystyczne w hydrologii I meteorologii*. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1970.
- PAZDRO Z., KOZERSKI B.: *Hydrogeologia ogólna*. Wyd. Geol. Warszawa 1990.
- PISARCZYK S., RYMSZA B.: *Badania laboratoryjne i polowe gruntów*. Warszawa 1993.
- SOBOLEWSKI M.: *Określanie charakterystyk przepływu wody w gruntach spoistych na podstawie badań IN SITU*. Rozprawa doktorska. SGGW, Warszawa 2002.

Summary

The paper presents some results of laboratory tests at organic soils which prevail in rivers valley. Special attention is drawn to peat which require special equipment for determination of mechanical parameters.

This paper contains results of permeability tests performed in oedometer apparatus. Selected test results together with statistical interpretation procedure are discussed in details and some suggestion are made with respect to the general methodology which should be applied when dealing with description of consolidation in organic soils.

Autor's adress:

Edyta Malinowska, Małgorzata Hyb

Katedra Geoinżynierii

Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska,
SGGW

02-787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 166

Poland