

粒状性フィルター材の透水性挙動予測に関する試み

中部大学工学部 国際会員 杉井俊夫 山田公夫
University of Wollongong B. Indraratna

1. はじめに

ダムや堤防などの粒状性フィルターは、経験データに基づくベース材（原土）とフィルター材の特定粒径をもとにした粒度比によって設計されてきた¹⁾。また、統計的な考え方²⁾やフィルターの間隙径などが考慮され、フィルター設計基準がいくつか提案されるようになった。Kennyらは³⁾、良く締まったフィルター内部の安定・不安定性の指標、すなわちフィルター内部の洗い出しについて間隙括れ径（細くなった間隙径）をもとにフィルター材料の安定性指標を示した。本研究は、フィルターの有効性の判断だけでなく、フィルターの透水性挙動を定量的に評価することを目的とし、フィルター試験時の透水性と間隙率変化の計測結果から、線形の粒度分布を有するフィルターの透水性挙動について考察をするものである。

2. Kenny らの条件を援用した目詰まり基準

(1) Kenny らのフィルター安定条件

Kenny³⁾はフィルターの間隙くびれ径をもとに、フィルター材の安定条件を提案した。図-1に示すようにフィルター層を通過してくる最大の粒子径を（限界間隙括れ径）Controlling constriction size D_c^* と定義するとともに、浸透長さ比 (L/D_5) が200を超える場合、 D_c^* は最小粒径の約0.25倍に等しくなることを得た。この D_c^* の値から、図-2.1に示すような粒度のフィルター材が内部侵食を起こさないためにはその粒径の4倍の径の粒子含有量とその含有量以上に含まれていることが必要であると、「 $H/F \geq 1$ 安定」、「 $H/F < 1$ 不安定」とフィルターの内部安定性を提案した。当初は $H/F \geq 1.3$ とされていたが、その後、 $H/F \geq 1$ と修正

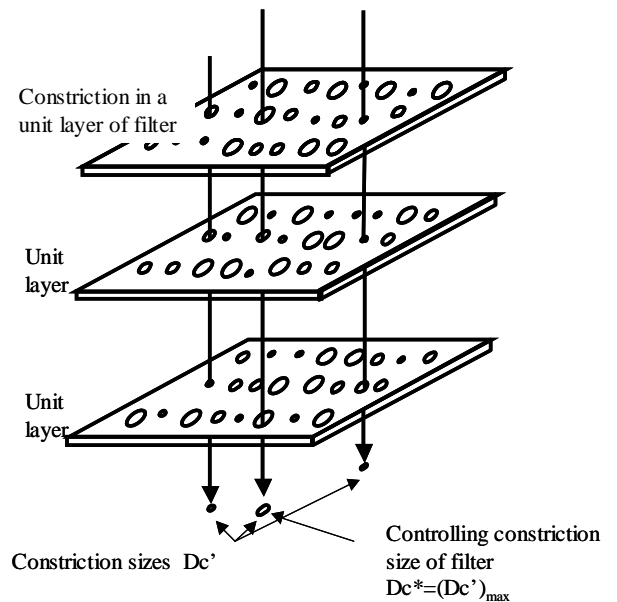


図-1 Kenny の限界間隙括れ径

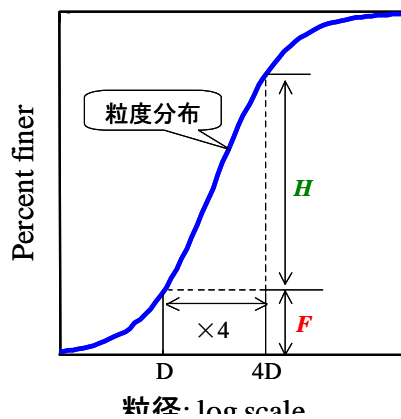


図-2.1 Kenny らの安定指標 H/F

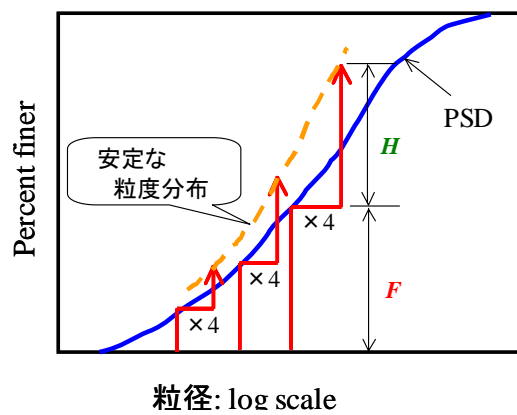


図-2.2 Kenny らの安定指標 H/F

された。すべてのフィルターの粒子が安定であるには図-2.2のようにある勾配以上である必要があることがわかる。

(2) 提案する目詰まり条件の考え方

Kennyらの指標はフィルター層自身の安定性を評価するが、著者らは、この考えをフィルターが目詰まりの判断に適用することを試みた。フィルター材と原土は図-3に示すように、その境界において2つの粒度分布が混合した非常に薄い混合層を形成することになる。そこで、この境界面においてフィ

ルター材とベース材による混合層の混合粒度分布を考えたこととした(図-4)。この分布を「混合粒度分布」(Combined PSD)と呼ぶことにする。すなわち、この混合粒度分布についてKennyの式を使って安定か不安定化を判定する。なお、この粒度分布は、境界面の非常に薄い層厚であるため、大きな粒径試料については適用できない。Kennyらのいう D_c^* は $0.25 \times D_5$ が適用できる浸透流れ長さ比 $L/D_5 > 200$ 以上であることから、フィルター材と原土の質量比の割合とした混合粒度分布の D_5 の200倍以上の層厚が必要となる($D_5 = 0.01\text{mm}$ のとき、混合層厚は最低2mmに相当)。 $H/F \geq 1$ を満たさない場合、その境界層では土粒子を捕捉することができず、フィルター層に流出していくことになる。このときには、フィルター材の「限界間隙括れ径」(Controlling constriction size)の D_c^* 以下の小さな粒子径はそのままフィルターを通して流出され、 D_c^* 以上の粒子径はフィルター材の中に留まることになり、新たな粒度分布を再構成することが推察される。

3. フィルター試験の概要

(1) 試験試料(原土とフィルター材)

原土には、河川岸から採取したシルト($G_s = 2.558$, $W_L = 37.1\%$, $W_P = 28.6\%$, D_{60} , $D_{10} = 42.6$, $14.0 \mu\text{m}$, $U_c = 3.06$)を使用した。フィルター材の選択には、フィルター自身が流出すると複雑になるため、Kennyらの指標から安定なフィルター粒度を判断することとした。均等係数 U_c を持つ線形粒度分布の勾配 a は、式(1)となる。

$$a = \frac{60 - 10}{\log D_{60} - \log D_{10}} = \frac{5}{\log U_c} \quad (1)$$

また、図-5より、Kennyらの指標 $H/F > 1$ を用いると、線形粒度分布を有する安定なフィルターの最小勾配は式(2)のようになる。ここに、 $D_x = x\%$ 粒径、 $P_x =$ 質量百分率 $x\%$ である。Kennyらの指標は $H + F \leq$ であるためは最大50%粒径までを検討するればよいことから、式(1)と式(2)より式(3)が得られ、式(3)の P_x に50%を代入し、線形粒度分布を有する安定なフィルターの U_c を式(4)として求められる。今回は $U_c < 4$ の5種類の線形粒度分布を持つ砂のフィルターを用いることとし、粒度分布を図-6に、フィル

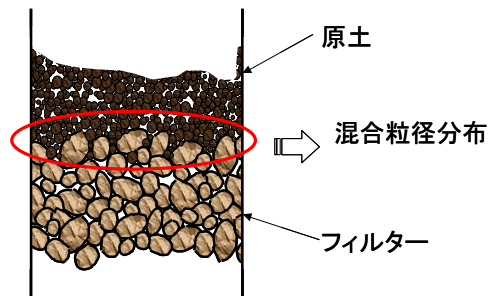


図-3 混合層における混合粒度

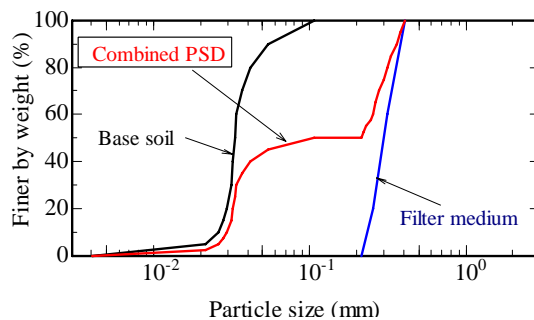
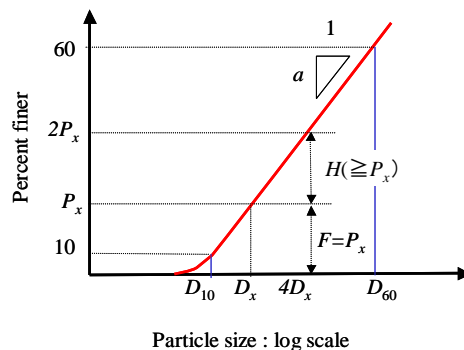


図-4 フィルター材と原土の混合層の粒径加積曲線



$H =$ mass fraction between D and $4D$

$F =$ mass fraction smaller than

図-5 線形粒度分布の勾配

$$a_{\min} = \frac{2P_x - P_x}{\log 4D_x - \log D_x} = \frac{P_x}{\log 4} \quad (2)$$

$$\frac{50}{\log U_c} \geq \frac{P_x}{\log 4} \quad (3)$$

$$U_c \leq 4 \quad (4)$$

ターの特性を表-1に示す。今回のベース材のD₁₀で0.014mmであるため、フィルター材と原土の質量比1:1の割合とした混合粒度分布のD₅でも約2.8mmの層厚となり、その適用できる長さになっているものと判断できる。

(2) 試験方法

試験装置の概要を図-7に示す。試験装置は、上部から循環ポンプを用いて高圧の水圧を負荷することができるようになっている。また、今回、間隙率計測のために後述する土壌水分計をフィルターとベース材の境界面に設置している。また、フィルター上部、中間部、下部に間隙水圧計が設置されており、間隙水圧および土壌水分計の出力信号はデータロガーを介してPCで記録されるようになっている。排水側は、水位一定境界としてメスシリンダーにより流量を計測する。透水管の底に3cm厚でφ20-30mmの粗礫を敷き、75μm開口のメッシュをのせ、乾燥したフィルター材を締め固めながら試料厚さ6.5cmとする。さらに、その上に粉末状のシルトを充填する。下部からゆっくりと浸水させ約12時間かけ飽和させる。負荷する水圧は、100-120kPaとした。試験開始とともに流速、温度、間隙水圧、間隙率を示す土壌水分計の出力信号の計測を行った。今回の試験装置の特徴である間隙率の測定は、ADR(Amplitude Domain Reflectometry)の誘電率式土壌水分計を用いた⁵⁾。通常、誘電率式土壌水分計は不飽和土の水分量を示す体積含水率を計測する装置であるが、今回は飽和土に対して体積含水率を用いることで、体積含水率の定義から飽和土の間隙率を計測することになる。

$$\theta = \frac{V_w}{V} = \frac{n \cdot Sr}{100} \quad (5)$$

誘電率式土壌水分計は製造元から鉱物、有機質土の2種のキャリブレーションカーブが与えられているが、今回、フィルター材とベース材の混合となるために、予め一つのキャリブレーションカーブが使用できるか、個別にキャリブレーションカーブの検証を行ったのが図-8である。これより、両者をひとつのキャリブレーションカーブで検討

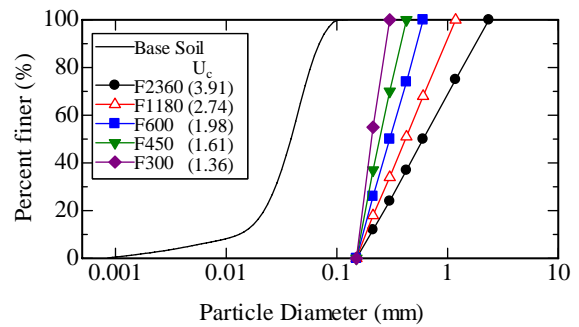


図-6 粒径加積曲線 (フィルター, 原土)

表-1 フィルター材と原土 (試験ケース)

	D ₅ mm	D ₁₀ mm	D _{max} mm	D _c * mm	Cu	ρ _d g/cm ³	原土 ρ _d g/cm ³
F300	0.152	0.164	0.300	0.041	1.36	1.51	0.81
F425	0.156	0.169	0.425	0.042	1.61	1.56	0.76
F600A	0.158	0.175	0.600	0.044	1.98	1.45	0.88
F600B						1.54	0.84
F1180	0.166	0.187	1.180	0.047	2.74	1.61	0.79
F2360	0.174	0.200	2.236	0.050	3.91	1.59	0.78

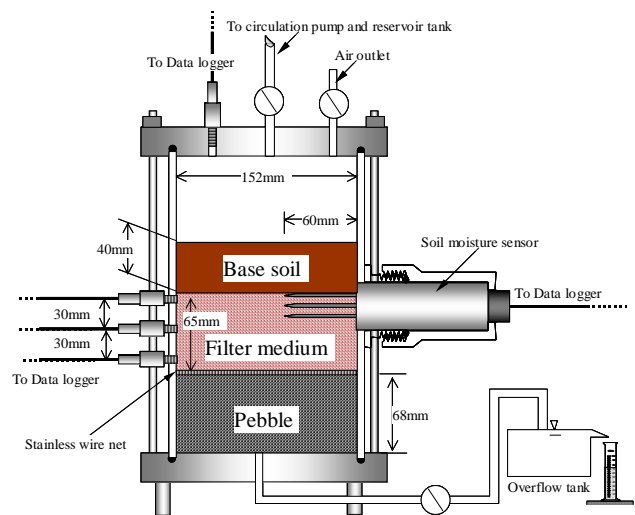


図-7 実験装置図

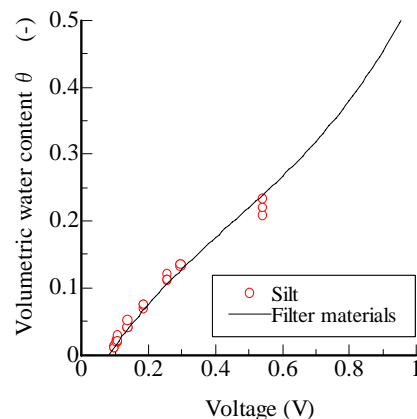


図-8 水分計の較正曲線 (原土とフィルター材)

することにした。

4. 試験結果

(1) 透水性の変化

フィルターの透水係数と時間の関係を図-9に示した。F2360とF1180の透水係数の大きさが、粒子径の大きさの順序になっていないが、試料セット時に既にフィルター材に原土が侵入してものと考えられる。概ね均等係数が大きいものほど透水性の低下が大きく、均等係数が小さいものほど透水性の低下が小さい。F300やF425では透水性の変化が少なく、混合層で原土材をしっかりと捕捉していることがわかる。F1180のケースがもっとも透水性の低下が大きいことがフィルター試験の結果から分かる。また、フィルターF600A及びBは乾燥密度が異なるが、同じ透水性挙動を示していること、また、F1180、F600A及びBとも低下後の透水係数がF425の透水係数と同じ $5.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ に漸近していく様子が現れている。

(2) 間隙率の変化

今回、フィルターと原土の境界の間隙率の計測を行ったが正しく計られているか、フィルターの透水性と間隙率の関係の相関を調べた。その結果を図-10に示す。F300, F425, F600A, F1180のフィルターでは間隙率が小さくなるほど透水性が小さくなる傾向（左下がり）が得られている。一方、F600B, F2360については右下がりの関係が得られ、間隙変化だけで透水性の挙動が説明できない結果となった。図-11には、時間的に変化する間隙率を示した。F300, F425, F600A及び

F1180は、多少の幅があるが減少していく傾向にある。一方、F600Aは100分辺りから、F2360は試験初期から、間隙率が増加しており、フィルター中に入った土粒子が流失している可能性が考えられた。先にも述べたがF2360はその粒径から判断して初期の間隙率が小さいことから、試料セット時に原土のフィルター材への流入が既に起こっていたものと考えられる。また、間隙率の現象は、上部からの原土材への水圧により圧縮されることに起因することも考えられる。

(3) 間隙率変化を考慮したアプローチ

原土がフィルターに侵入して透水性が生じているか、またはフィルター層の圧縮による透水性低下によるものか検討するために、式(6)に示すKozeny-Carman式を用いて調べることにした。

$$k = D_s^2 \frac{\gamma}{\mu} \frac{e}{1+e} C \quad (6)$$

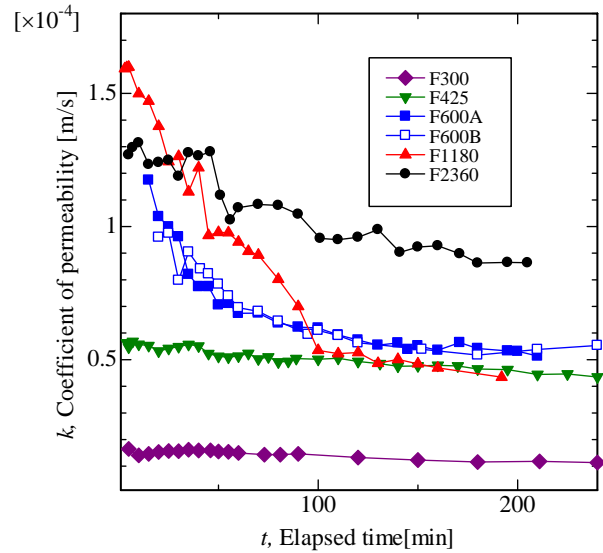


図-9 各フィルターの透水係数の変化

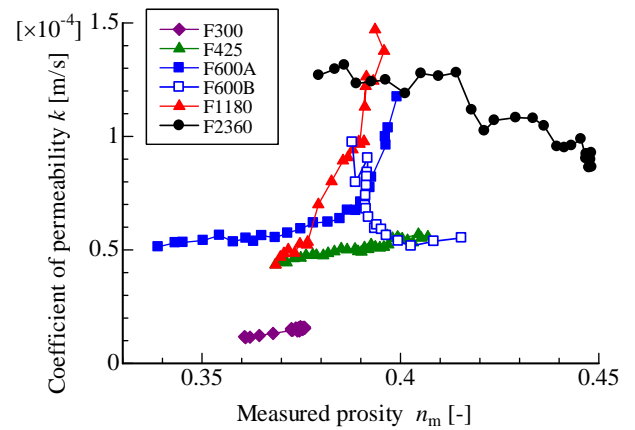


図-10 フィルターの透水係数と間隙率の変化

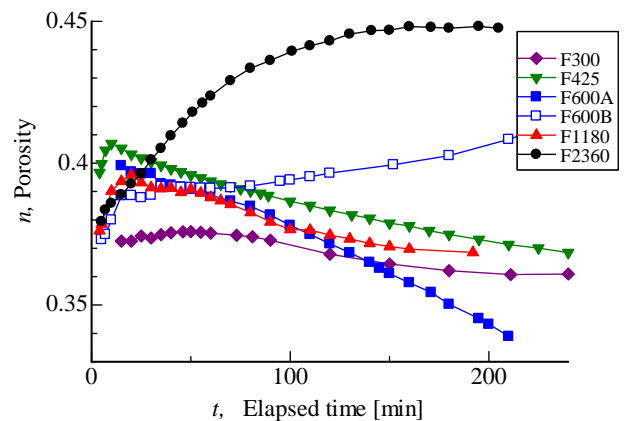


図-11 フィルターの間隙率の時間変化

ここに、 k = 透水係数、 γ = 液体の単位重量、 μ = 水の動粘性係数、 e = 間隙比、 C = 形状係数である。

もし原土が侵入せず、圧縮にのみを受ける場合は、式中の $(D_s^2 \times \gamma / \mu \times C)$ は一定のはずである。しかし、フィルター材に原土が捕捉され、粒度分布が変化したと考えるとその値は一定ではなくなる。このことを利用して、ADRで計測した間隙率を用いて $k / (e^3 / (1+e))$ と経過時間の関係を図-12 に示す。これより、F300とF425 はほぼ一定値を示しており、原土の侵入は発生しておらず、図-11 のわずかな間隙率の低下は圧縮による間隙の変化が生じているものと判断できる。F600A,B, F1180, F2360 は時間とともに小さくなっており、代表径 D_s が小さく変化していくことが推察され、すなわち D_s が小さくなりフィルター材に原土が侵入し、捕捉される傾向を示している。F600Bについては、一旦 D_s が減少していくが、100分当りより増加に転じており、捕捉された原土が流出し、初期の透水性に回復していくことが推察される。F2360 についても、代表径 D_s が小さくなっていくことが分かるが、図-11 の間隙率の上昇との原因の考察には至っていない。

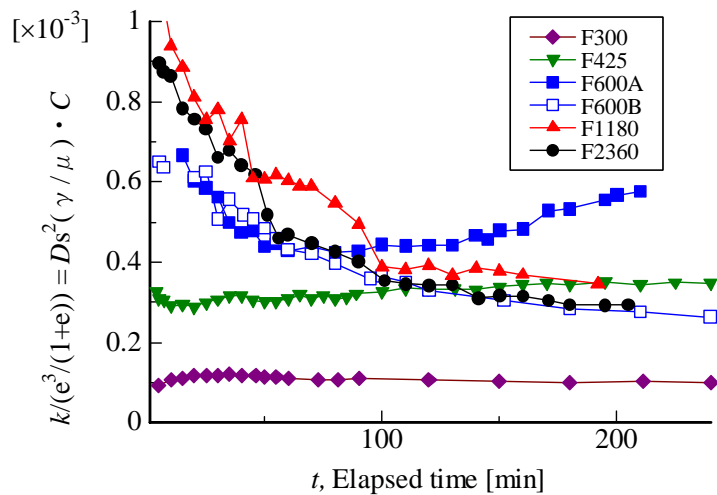


図-12 間隙関数で除した透水係数の時間変化

5. 提案する方法を用いたフィルターの透水性挙動

今回行った実験に対して、Kenny の限界間隙括れ径 (Controlling constriction size D_c^*) を用いたフィルターの透水性低下について検討を行った。図-13(a)-(f) に混合粒度分布を用いた解析結果を示す。図-13(a) の F300, (b) の F425 については、いずれの場合も $H/F > 1$ を満たしており、境界面に発生する薄い混合層内でベース材は保持されることが判断でき、先の試験結果である図-12 と一致する。図-13(c) の F600A, (d) の F600B については、 D_c^* 以上の粒径で $H/F < 1$ となる箇所が存在し、フィルター層へ流出するが、 D_c^* 以上の粒径であり、フィルター内に捕捉され粒度分布の再構成が生じ、透水性が時間的に低下していくものと思われる。図-13(e) の F1180 については、同じく $H/F < 1$ の粒径が存在するが、F600A,B に比べてベース材の大きな粒径まで混合層から流出するため、粒度分布の再構成に時間がかかり、透水性低下の割合が高いものと思われる。また、図-13(f) の F2360 ではさらにその傾向が強くなり、ベース材の最大粒径から混合層を流出するため一層顕著になることが推察される。

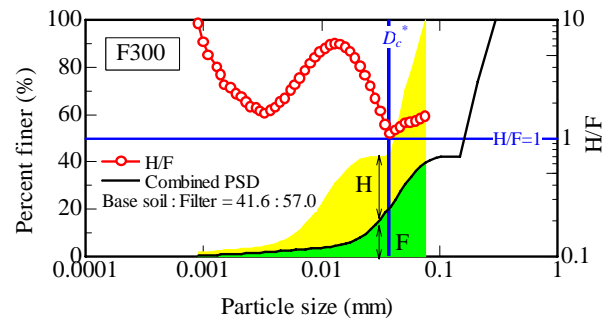


図-13(a) フィルター評価 (F300)

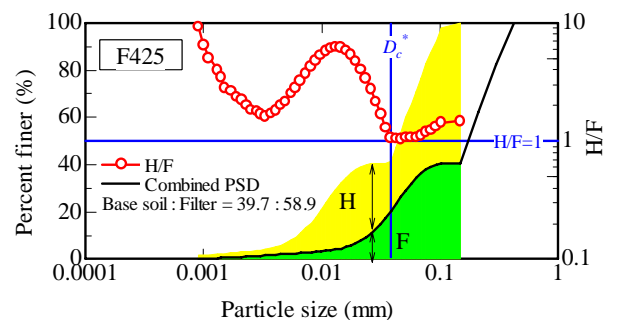


図-13(b) フィルター評価 (F425)

6. おわりに

線形粒度分布を有するフィルター材の透水試験を行うとともに、著者らの提案する透水性挙動を予測する方法の適用性を調べた結果、以下のことが得られた。

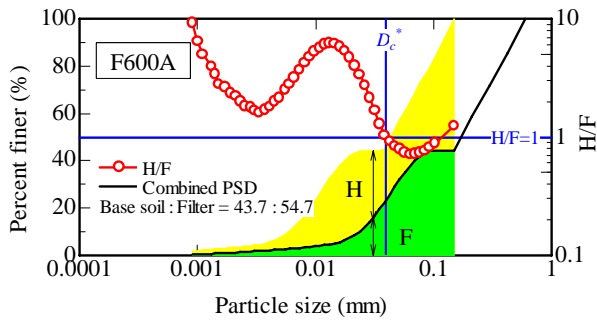


図-13(c) フィルター評価 (F600A)

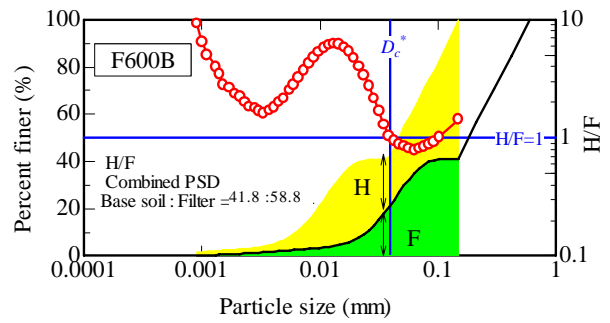


図-13(d) フィルター評価 (F600B)

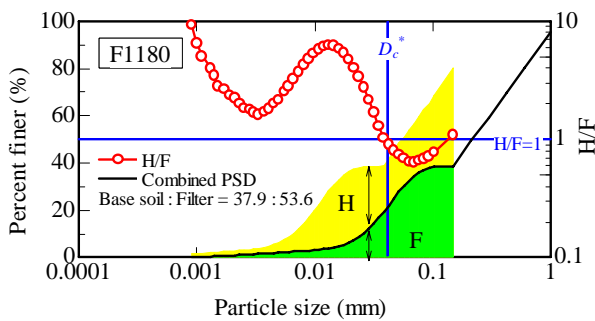


図-13(e) フィルター評価 (F1180)

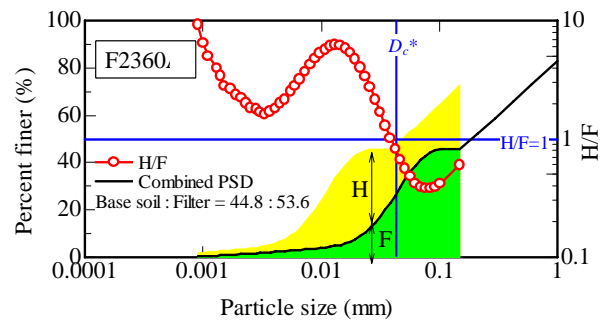


図-13(f) フィルター評価 (F2360)

- 1) 線形粒度分布を有すフィルター材が安定となる条件として均等係数が4以下であることを示した。
- 2) 土壌水分計を用いて、リアルタイムの間隙率計測が可能である。
- 3) フィルター試験において、間隙率測定と Kozenny-Carmann 式を用いて、フィルター自体の圧縮による透水性の低下とベース材粒子の捕獲による透水性の低下を区別することができた。
- 4) フィルターとベース材の境界面での混合粒度を考え、薄い境界の混合層、単独フィルター層に分けて Kenny らの Controlling constriction size の考え方を用いることで、境界層での保持、フィルターからの流出、フィルター内に保持されることによるフィルターの粒度分布の再編成を予測でき、透水性挙動を評価することができた。

【参考文献】

- 1) Bertram G.E., An experimental investigation of protective filters, Harvard University Publication, 1940, No.267, Vol.6.
- 2) Honjo Y. and Veneziano D. Improved filter criterion for cohesionless soils, J. Geotech. Engng, 1989, ASCE, 115, No.1, 75-94.
- 3) Kenny T.C. and Ofoegbu G.I., Permeability of compacted granular materials, Canadian Geotech. Engng, 1984, 21, 726-729.
- 4) Kenny T.C. and Lau D. Internal stability of granular filters. Canadian Geotech. J., 1985, 22, 215-225.
- 5) G.J. Gaskin and J.D. Miller, Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique, J. agr. Engng. Res. (1966) 153-160.