粒状性フィルター材の透水性挙動の評価

杉井俊夫*，山田公夫*，Buddhima Indraratna**

Permeable Behavior of Granular Filter with a Linear Particle Size Distribution

Toshio SUGII*, Kimio YAMADA* and Buddhima INDRARATNA**

(Received August 30, 2008)

This paper discusses a new method of evaluating the permeable behavior of a granular filter with a linear particle size distribution using Kenny's "Controlling Construction Size". The base soil particles that penetrate into the filter were evaluated first in the interface of base soil and filter by this method, and further evaluated inside the filter. Several infiltration tests were conducted in order to verify this evaluation method. Moreover, in this experiment, the measurement of the filter's porosity that influences permeability during a filtration test was applied by inserting a dielectric constant type soil moisture sensor (Amplitude Domain Reflectometry Method) into the saturated filters material. The results clarified that the measurement of porosity is possible and that this method can explain permeable behavior.

Key Words : Filter, Permeability, Controlling constriction size, Particle size distribution, mixed layer

1．まえがき

ダムや堤防などのフィルターの設計基準はこれまでいくつか提案されてきているが，経験データに基づく原土材とフィルターの特定粒径をもとにした粒度比による基準であった (Bertram[1], USACE[2], US Army[3])．その後，統計的な考え方が Honjo and Veneziano[4]によって示され，フィルターの間隙径などが考慮されるようになり，現在では，間隙のくびれ径をもとにした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[5]は，良く締まったフィルター内部の安定・不安定，すなわちフィルター内部の洗い出しについて間隙くびれ径をもとにフィルター材料としての判定基準を示した．

一方，フィルター内部の時間に依存する粒子移動について実験的報告は少ない．時間に依存するフィルター間隙内で生じる変化のデータ計測などが困難であることや，局所的に変化が生ずる現象を定量的に捉えることが困難なためである．こうしたフィルター内部の時間に依存する粒子移動について，Indraratna ら[6]は解析モデルを使ったフィルター内部の粒子移動をモデル化し，時間的依存性について検討を行っている．

本研究は，フィルターの有効性の判断のみでなく，フィルターの透水性挙動を定量的に評価することを目

*都市建設工学科(Department of Civil Engineering)
**University of Wollongong (Australia, NSW)

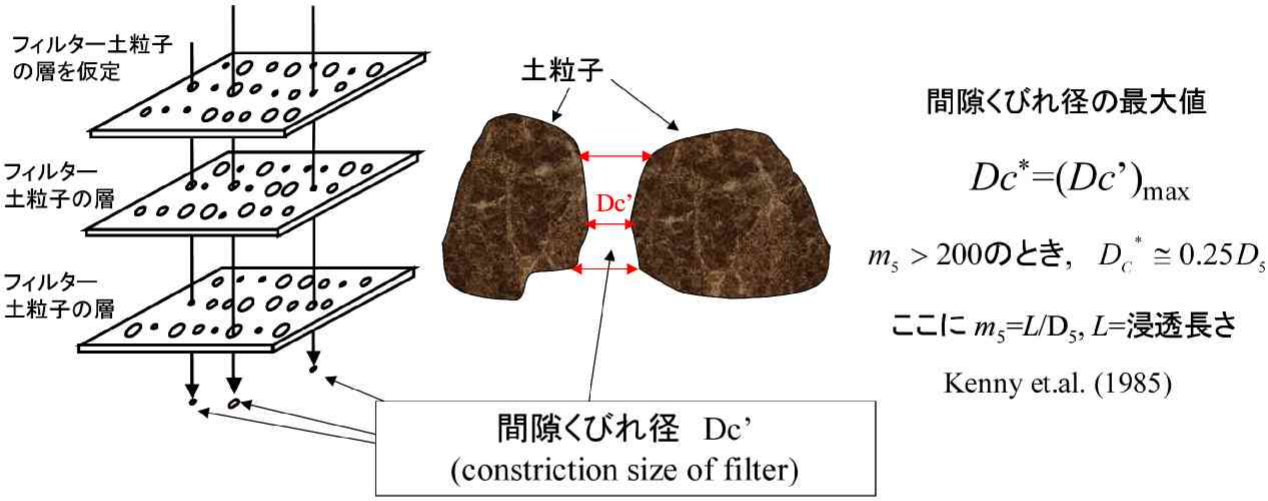

図 1　　Kenny の間隙くびれ径 [7]

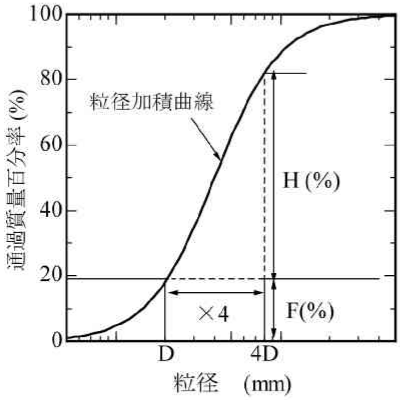

図 2(a)　Kenny の H/F 指標の定義

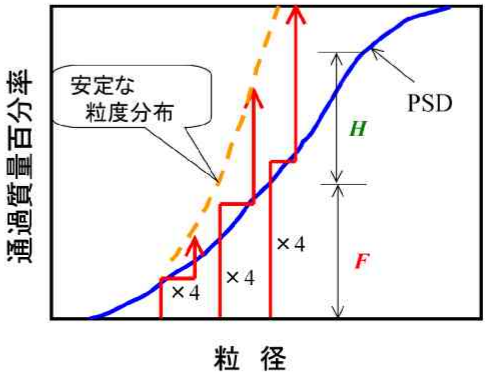

図 2(b)　安定な粒度分布

的としており，フィルター試験時の透水性とリアルタイムに間隙率の計測を行い，フィルターの透水性挙動について説明するものである．なお，ここで用いたフィルター材料は，基礎データを得るために，線形粒度分布を有する砂を用いている．

2．Kenny らの安定条件を用いた目詰まり基準の提案

2.1　Kennyらのフィルター安定条件

Kenny ら[7]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粒子径を「間隙くびれ径」（Constriction size of filter）：*Dc'*とし，その最大の間隙くびれ径を「Controlling Constriction Size」：*Dc**と定義するとともに，浸透長さLが*Dc**の200倍を超えると，*Dc**は最小粒径の約0.25倍に等しくなることを得た．この*Dc**を用いることにより，**図2(a)**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，対象となる粒径*D*の4倍粒径４*D*の粒子質量含有率（H）が，粒径*D*の質量通過百分率（F）以上存在する必要があることを示した.すなわち，「H/F≧１」のときには安定，「H/F＜１」のときは不安定，とフィルターの内部安定性を判断する指標を提案した．すべてのフィルターの粒子が安定であるには**図2(b)**のようにある勾配以上の粒度分布であることが必要となる．なお，H+F≦１であるため，Fは最大50%までを検討すればよい．

2.2 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信の安定性についてであるが，著者らは，この考えをフィルターの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材は**図 3** に示すように，その境界において２つの粒度分布が接触し，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原土材による混合層の混合粒度分布を考えることとした（**図 4**）．この混合粒度分布を C－PSD（Combined

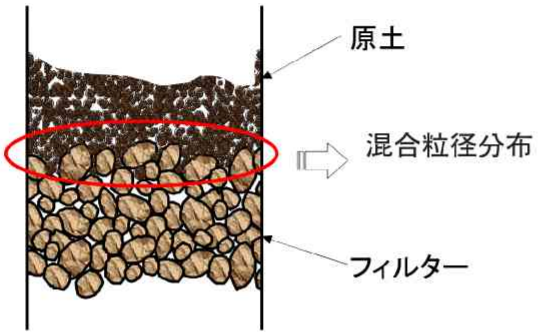

図３　混合層における混合粒径分布

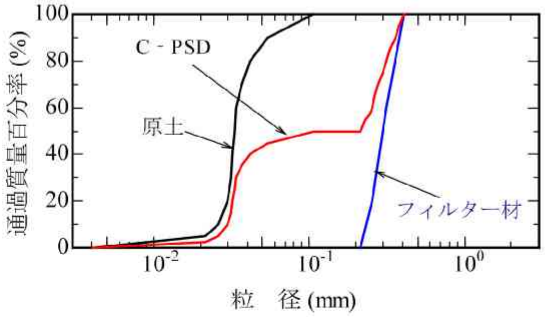

図４　混合層の C-PSD

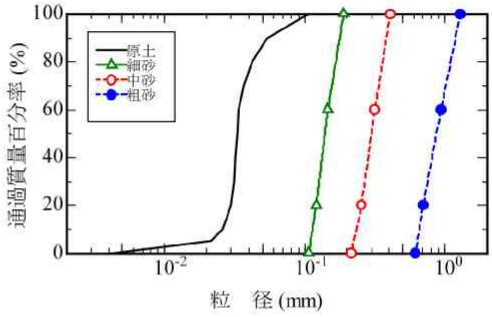

図５　Indraratna らのフィルター試験試料 [6]

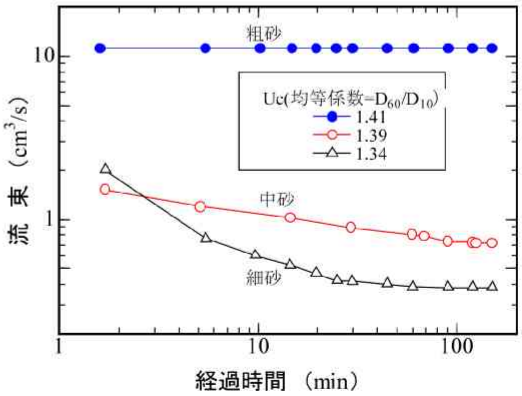

図６　フィルター試験における流束の低下

Particle Size Distribution）と呼ぶことにする．すなわち，この C－PSD から Kenny の式を使って混合層が安定か不安定化かを判定するのである．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．また，Kenny らの安定条件が適用できる条件は，L（試料長さ）と D_5（5%粒径）の比が 200 以上であることから，フィルター材と原土材が質量比を仮に 1:1 の割合とした混合粒径分布（C－PSD）では，5%粒径の 200 倍以上の層厚が必要となる．D_5＝0.01mm のとき，混合層厚は最低 2mm 以上と試算でき，原土材とフィルター材間の混合層にも適用できると判断した．

H/F>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なく，フィルター層のみに浸透していくことになる．このときには，フィルター材の Controlling constriction size　Dc^*以下の粒子径はそのままフィルターを通って流出され，Dc^*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になると考えることができる．

Indraratna ら[6]によるフィルター試験の結果を取り挙げて説明する．**図5**は原土材にLateitic soil を，フィルター材に３種類の粒度の異なる砂を用いて実験を行っている．その結果，**図6**のような流束の経時変化を得ている．細砂は20minまでに低下し一定となっている一方，粗砂は全くの流束の低下は生じていない．また中砂は，流束の低下が見られるがその割合はゆっくり継続しており，目詰まりの可能性も考えられる．そこで，これらのフィルターに対して先に述べた混合層の概念を用いて調べたのが**図7 (a)－(c)** である．今回，原土材とフィルター材の境界面での質量比を１：１に仮定して計算を行っており，C-PSDを実線で表した．Kennyらの指標のH/Fのイメージが分かりやすいように原土材粒径に相当する範囲のC-PSDの4分の１の粒径分布を破線で示している．**図7(a)**の細砂では，H/Fはすべての粒径に対してH/F≧1を満たしており，フィルターの混合層の中に原土土粒子は保持されることがわかり，実験結果の安定なフィルターを形成していることが説明できる．一方，**図7 (b)** の粗砂は，0.03mm以上の粒径でH/F<1となっており，混合層では維持されないことが判断される．また，すべて原土材の粒径は，フィルター材のControlling constriction size　Dc^*以下であるのでフィルター材から流出し，実験結果の透水性の低下が生じないことも一致する．**図7 (c)** の中砂は0.03mm以上でH/F＜１となっており，混合層からの流出するが，Controlling constriction size　Dc^*以上の粒子がフィルター内部に留まることになるため，フィルターの粒度の再構成が生じることが判断できる．また，フィルター材と原土材が質量比1:1の割合が異なるこ

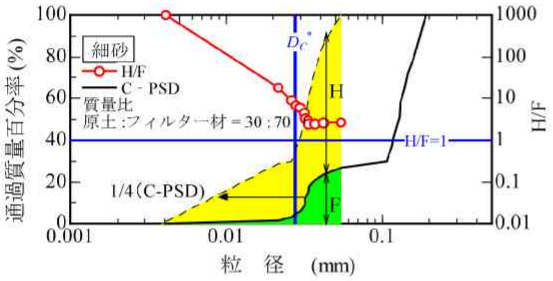

図 7(a)　C-PSD（細砂）の H/F 推定結果

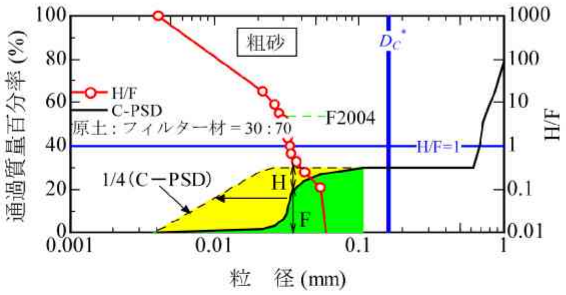

図 7(b)　C-PSD（粗砂）の H/F 推定結果

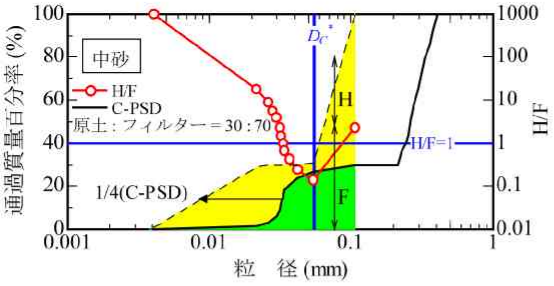

図 7(c)　C-PSD（中砂）の H/F 推定結果

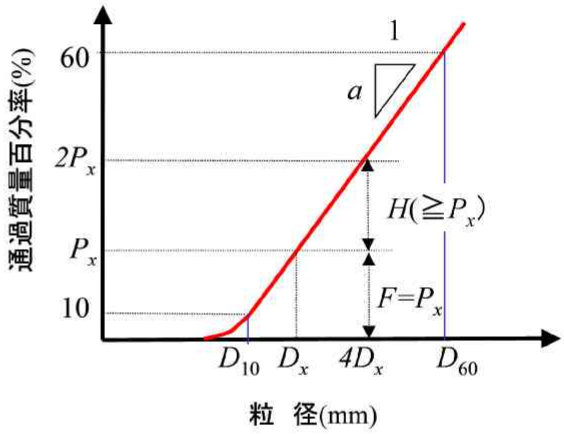

図 8　安定なフィルター条件

Table Ⅰフィルターの物理量

	D_5 mm	D_{10} mm	D_{max} mm	D_c* mm	Uc	ρ_d g/cm^3
F300	0.150	0.164	0.300	0.041	1.36	1.51
F425	0.156	0.169	0.425	0.042	1.61	1.56
F600	0.158	0.175	0.600	0.044	1.98	1.45
F1180	0.166	0.187	1.180	0.047	2.74	1.61
F2360	0.174	0.200	2.236	0.050	3.91	1.42

※Gs=2.650, D_0=0.150mm

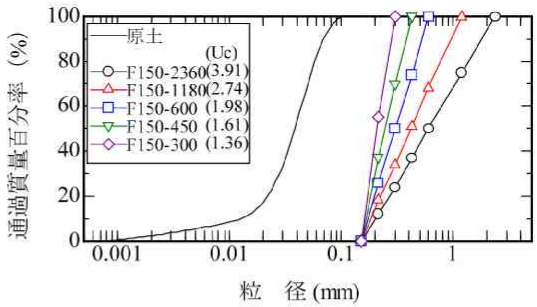

図 9　試験用フィルター材と原土

とにより，原土材の大きい粒子の保持が異なり，粒度分布の再構成にも影響を与えるので，両者の質量比が重要になる．これらから，Kennyらの指標を援用することによりフィルターの透水性挙動を評価することの適用性を調べるため，次に実験を行うこととした．

3．原土とフィルター材

原土材には，河川岸から採取したシルトを使用した．おもに粗いシルト（Gs＝2.558, W_L＝37.1％, W_P＝28.6％, D_{60}, D_{10}＝42.6, 14.0μm, U_c＝3.06）からなっている．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なるため，Kenny らの指標から判断することとした．均等係数 Uc（＝D_{60}/D_{10}）である線形粒度分布を有するフィルター材の勾配 a は，D_x＝x%粒径，P_x＝質量百分率 x%であるとすると式(1)となる．

$$a = \frac{60-10}{\log D_{60} - \log D_{10}} = \frac{50}{\log Uc} \qquad (1)$$

また，**図 8** 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．

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

式(1)は式(2)よりも大きくなるから，

$$\frac{50}{\log Uc} \geq \frac{P_x}{\log 4} \qquad (3)$$

なお，Kenny らの指標[7]は H+F=＜1 であるためは最大 50%粒径までを検討するればよく，式(3)の P_x に 50%を代入すると，線形粒度分布を有する安定なフィルターの Uc を式(4)として求めることができる．

$$Uc \leq 4 \qquad (4)$$

したがって，今回はUc＜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9**に，フィルターの特性を**表 1** に示す．今回の原土材の D_{10}で0.014mmであるので，フィルター材と原土材が質量比1:1の割合としたC-PSDのD_5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．

4．試験装置と試験の概要

4.1 試験方法

試験装置の概要を**図10**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原土材の境界面に設置できるようになっている．さらに，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．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．なお，透水係数の温度補正のために，排水側では水温を計測している．透水管の底に 3 cm厚でφ20～30mmのペブルを敷き，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，100-120 k Paとした．試験開始とともに流速，温度，間隙水圧に加えて間隙率を示すことになる土壌水分計の出力信号を4時間程度の計測を行った．

4.2 間隙率の測定

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（Gaskin and Miller,1996）[8]．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，式(5)に示すように今回は飽和土（飽和度 Sr=100%）に対して体積含水率（θ）を用いることで，体積含水率の定義から飽和土の間隙率(n)を計測することになる．著者ら[9]はこれまでに液状化モデル実験で飽和砂の間隙率の変化を計測してきた．なお，誘電率式土壌水分計は製造元から鉱物，有

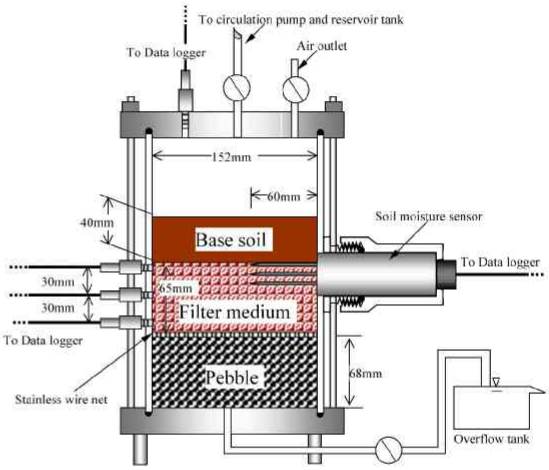

図 10 試験装置の概要図

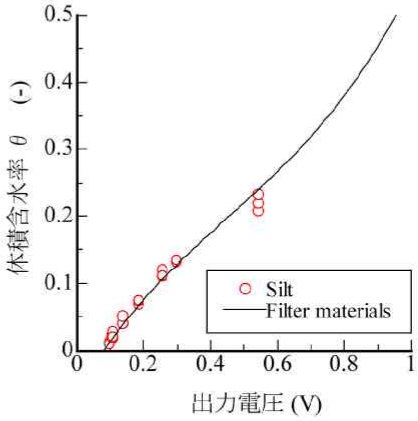

図 11 ADR センサーの校正曲線

$$\theta = \frac{n \cdot Sr}{100} = n \quad (\because Sr = 100\%) \qquad (5)$$

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，フィルター材と原土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11**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することにした．

5．試験結果

5.1 透水性の変化

フィルターの透水係数と時間の関係を**図 12** 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

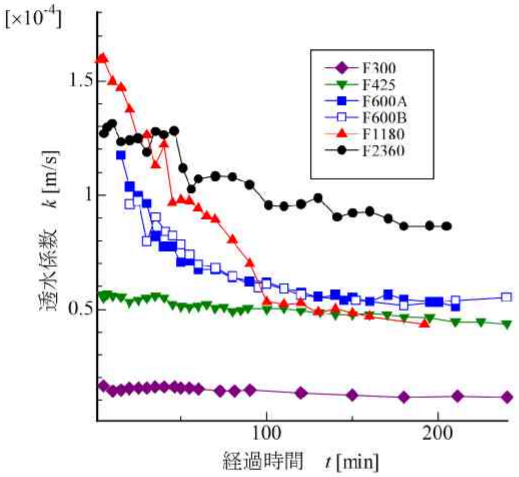

図 12　フィルターの透水係数変化

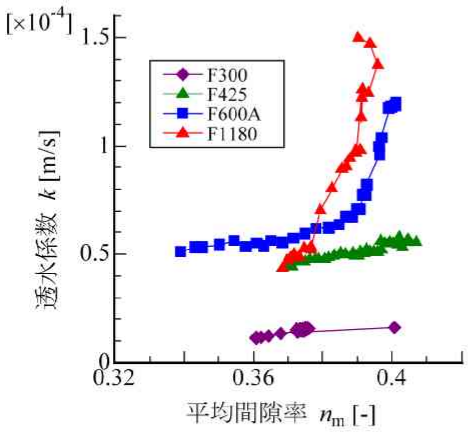

図 13　透水係数と平均間隙率

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 5.0×10^{-4}cm/s に漸近していく様子が現れている．

5.2 間隙率の変化

今回，フィルターと原土の境界での間隙率計測を行ったが正しく測られているか，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 13** 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係数が小さくなる傾向（左下がり）が得られている．一方，F600B，F2360 については相関が得られなかったため，ここには示していない．これより，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 14** 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．F2360 はその粒径から判断しても，計測された初期の間隙率が他と比べても小さいことから，試料セット時にフィルター材への原土の流入が既に起こっており，透水開始とともに 100min 程まで粒子が流出し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，次に間隙率変化を考慮した整理を検討した．

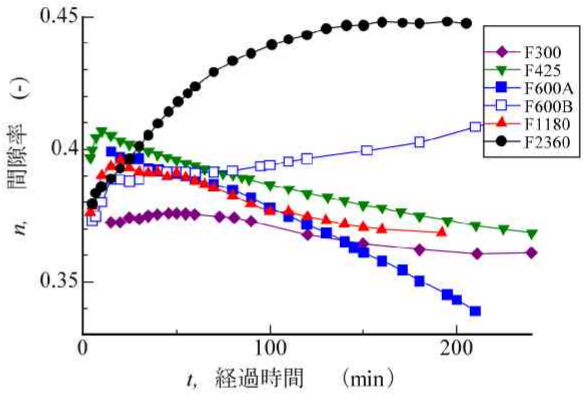

図 14　間隙率の時間変化

5.3 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低下が生じているか，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とした．

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

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（$Ds^2\times\gamma/\mu\times C$）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 Ds 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 15** 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

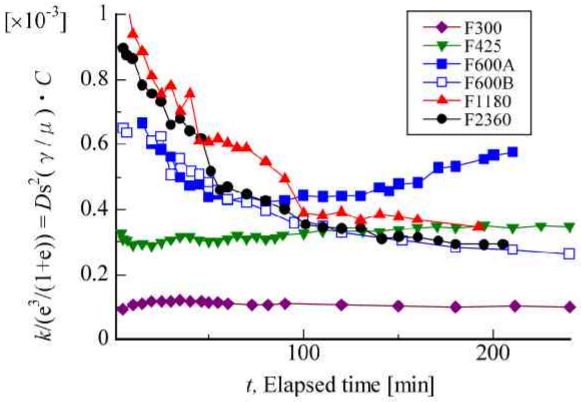

図 15　間隙率の影響を考慮した透水係数変化

侵入は発生しておらず，**図 14** 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 *Ds* が小さく変化していくことが推察され，すなわち *Ds* 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 *Ds* 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 *Ds* が小さくなっていき，F425,F600B, F1180 と同じ値に低下していく様子がわかる．

6．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，2.2 で提案したフィルターの透水性挙動の評価を行った．**図 16 (a)－(f)** に混合粒径分布を用いた解析結果を示す．**図 16 (a)** の F300，**図 16 (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原土材は保持されることが判断でき，先の試験結果である **図 15** とも一致する．**図 16 (c)** の F600A，**図 16 (d)** の F600B については，*Dc**以上の粒径で H/F＜1（混合層からの流出）となるところが存在し，フィルター層へ流入するが，*Dc**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 16 (e)** の F1180 については，同じく H/F＜1 の粒径が存在（混合層からの流出）するが，F600A,B に比べて原土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 16 (f)** の F2360 では混合層から流出し，D_c* よりも小さな土粒子が若干見られ，それらのフィルター材流出が予測されるが，ほとんどが *Dc**よりも大き

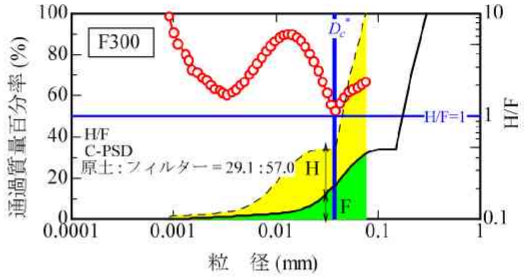

図 16 (a)　フィルター評価（F300）

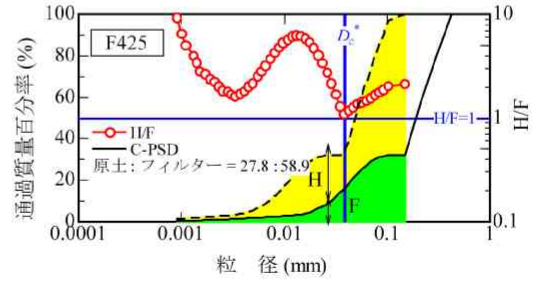

図 16 (b)　フィルター評価（F425）

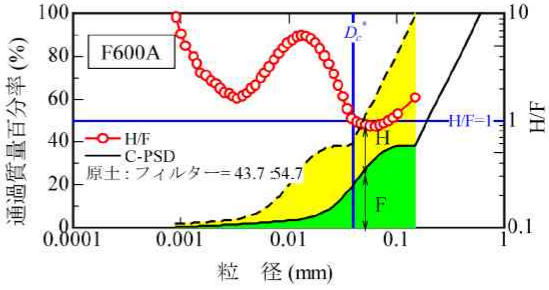

図 16 (c)　フィルター評価（F600A）

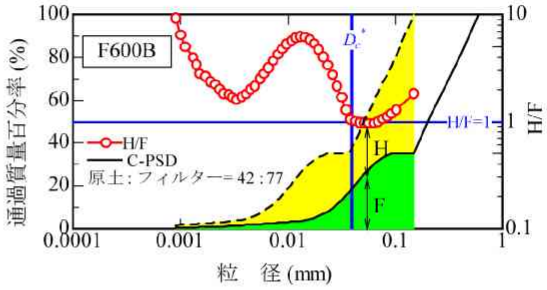

図 16 (d)　フィルター評価（F600B）

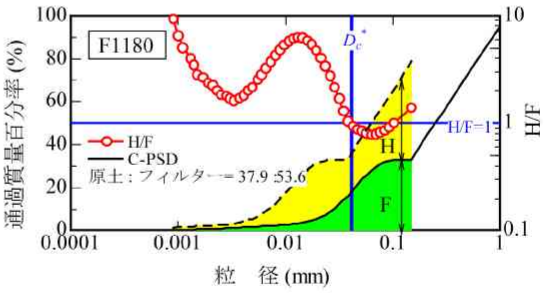

図 16 (e)　フィルター評価（F1180）

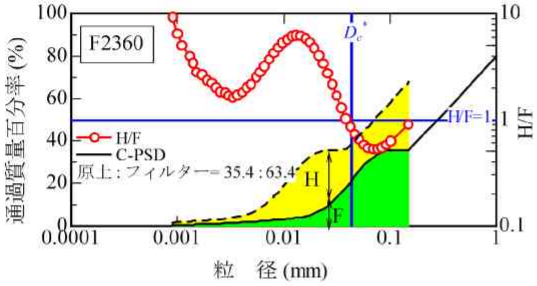

図 16(f)　フィルター評価(F2360)

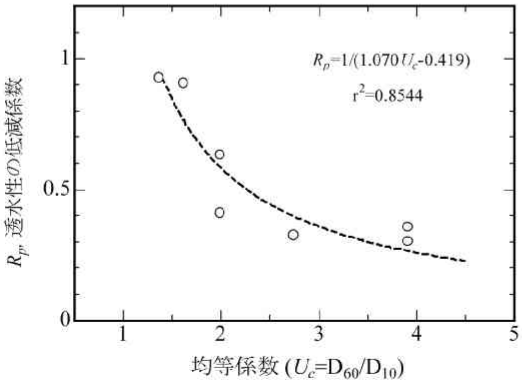

図 17　透水性の低減係数

く，その割合も多いため，F600A,B,F1180 と同様にフィルター内に捕捉されて透水性が低下することが判断でき，**図 15** の試験結果とも一致している．

初期の$Ds^2\times\gamma/\mu\times C$に対する最終の$Ds^2\times\gamma/\mu\times C$ の比をとって原土材混入による透水係数の低減係数 Rp とみなし，均等係数 *Uc* との関係で表したのが**図 17** である．フィルターと原土材の粒径比を考慮してはいないが，原土材がフィルター内に混入・捕捉されフィルターの代表粒径が小さくなることにより，透水性低下の割合の傾向を示している．均等係数 *Uc* が 4 以上のフィルターは用いていないが，式(4)でも示したように線形粒度分布を有するフィルターの場合には，フィルター材自体が不安定で流出するために透水性の低減係数の最小値は約 0.2 程度になることが予測される．さらにその最小値についてはフィルターと原土材の粒径比の関係を含めた検討が必要と思われる．

フィルターの透水性の挙動は，①F300 や F425 のようにフィルターと原土材の境界で形成される混合層の C-PSD で安定と判断される（原土材が捕捉される）場合には，フィルターの透水性は変化しないが，②混合層が不安定と判断される(原土材が流出される)場合，フィルター内に捕捉されるか，フィルター内から流出する場合に分かれる．前者のフィルター内に捕捉される場合の透水性は，均等係数が大きいほど透水性低下に時間を要し，最終的に原土材の代表径に透水性が依存する（一定値に収束する）に可能性が強いことが推察できる．また，フィルターと原土材の粒径比の関係を考慮することにより透水性の低減係数は透水係数の大まかな推定に役立つと考えられる．

7．あとがき

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．

1）線形粒度分布を有するフィルター材自身が安定となる条件として均等係数が 4 以下であることを明らかにした．

2）土壌水分計を用いて，リアルタイムでフィルター層の間隙率計測が可能であることを示した．

3）フィルター試験において，間隙率測定と Kozeny－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原土材粒子の捕獲による透水性の低下を区別することを可能にした．

4）フィルターと原土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．

5）原土材とフィルター材によって構成される混合層での C-PSD が安定と判断される（原土材が捕捉される）場合には，フィルターの透水性は不変であることを実験により確認した．

6）混合層から流出しフィルター内に留まる場合には，透水性は低下し，その時間はフィルターの均等係数が大きくなるにつれ長く，最終的にフィルターによらず一定値に収束し，原土材の透水性に依存する．

7）線形粒度分布を有する粒状フィルターの最終的な透水性を予測する透水性の低減係数を提案した．

謝　辞：本実験は，University of Wollongong で行われた結果である．ここに，実験の遂行に当り，お手伝いいただいた Alan Grant，Ian Liard 両氏に感謝の意を示します．

参 考 文 献

1)Bertram G.E.(1940)：　An experimental investigation of

protective filters, Harvard University Publication, No.267, Vol.6.

2) USACE.(1955) : Drainage and erosion control –subsurface drainage facilities for airfields. Engineering Manual, Military Construction, Part XIII, ch.2, Washington DC.

3)Us Army.(1971) : Dewatering and groundwater control for deep excavations. Technical Memorandom (April), TM 5-818-5, ch.6.

4)Honjo Y. and Veneziano D. (1989) : Improved filter criterion for cohesionless soils, J. Geotech. Engng,ASCE, 115,No.1, 75-94.

5)Kenny T.C. and Ofoegbu G.I.(1984) : Permeability of compacted granular materials, Canadian Geotech.Engng, 21, 726-729.

6) Indraratna B., Vafai F. and Dilema E.L.G(1996) : An experimental study of the filtration of a lateritic clay slurry by sand filters, Proc. Instn Civ. Engrs Geotech Engng, 1996, 119, 75-83.

7)Kenny T.C. and Lau D.(1985) : Internal stability of granular filters. Canadian Geotech. J., 22, 215-225.

8)G.J.Gaskin and J.D. Miller (1966): Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique, J. Agr. Engng. Res. , 153-160.

9) 杉井俊夫・山田公夫・倉橋　弘明(2002)：模型実験による液状化時の密度の常時計測,土木学会中部支部研究発表会講演集, pp.281-282.