

間隙径分布計測・粒子注入実験に基づく砂の間隙構造の考察

岐阜大学工学部 正会員 宇野尚雄 神谷浩二
 岐阜大学大学院 学生会員 今枝真澄 木村大介

1. はじめに

フィルダムのフィルター材や薬液注入工法における注入材を選定するには、フィルター層や地盤土の間隙構造を把握することが必要であると考えられる。本報告は、その基礎的研究として、筆者らが提案している「空気圧入法」により計測した砂の間隙径分布と粒度の関係を示すとともに、砂層中に球形粒子を空気流により注入する実験に基づいて、砂層の間隙径分布と侵入可能な注入粒子粒度との対比から砂の間隙構造について考察するものである。

2. 空気圧入法による間隙径分布計測

(1) 計測装置 間隙径分布を計測するための装置は、図-1に示すように、空気コンプレッサー、空気圧力調節器、空気流量計、マンメータ、試料部によって構成され、試料を充填する試料筒は、内径8cm、高さ $L=3\text{cm}$ の亚克力製の円柱体である。ある一定の空気圧力に調節した圧縮空気を試料部に送気し、空気を試料層に鉛直上向きに透過させる。そして、空気流量計と試料部を接続するチューブ内の空気流量 $Q_{ac}(\text{cm}^3/\text{s})$ を空気流量計により、試料層上下端の空気圧力水頭差 $h_a(\text{cm})$ 及び上述のチューブ内と試料層上端の空気圧力水頭差 $h_{ac}(\text{cm})$ をマンメータによりそれぞれ計測する装置である¹⁾。

この装置では、空気流量計により計測する空気流量 Q_{ac} は上述のチューブ内の空気流量であり、また、 h_{ac} は h_a よりかなり大きくなり、試料層下端の空気密度 $\rho_a(\text{g}/\text{cm}^3)$ はチューブ内の空気密度 $\rho_{ac}(\text{g}/\text{cm}^3)$ とはかなり異なる。圧縮空気に関する連続式は $\rho_{ac} Q_{ac} = \rho_a Q_a = \text{const.}$ であり、試料層を通るときの空気流量 $Q_a(\text{cm}^3/\text{s})$ は算出される。

(2) 計測原理及び整理法 乾燥試料層中の空気の流れに関して、空気圧力水頭 h_a と空気流量 Q_a の関係は、Darcy則より、次式によって表され、図-2の①のような原点を通る直線関係となる²⁾。

$$Q_a = k \frac{\rho_w g}{\eta_a} \frac{h_a}{L} A \cdot 10^{-1} = k_a \frac{h_a}{L} A, \quad k \frac{\rho_w g}{\eta_a} = k_a \quad (1)$$

ここに、 k : 固有透過度(cm^2)、 k_a : 透気係数(cm/s)

ρ_w : 水の密度(g/cm^3)、 g : 重力加速度(cm/s^2)

L : 試料層高さ(cm)、 A : 試料層断面積(cm^2)

η_a : 空気の粘性係数($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

次に、この乾燥試料を蒸留水で飽和し試料層上面を約10mm高さの蒸留水で覆った状態で底面から空気圧を与えると、空気圧が $h_{a,\min}$ になるときに空気が試料層中を鉛直上向きに流れ

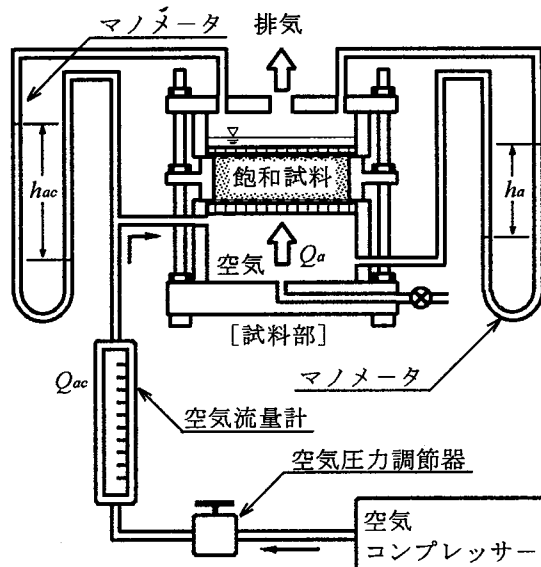


図-1 間隙径分布計測装置の全体概要図

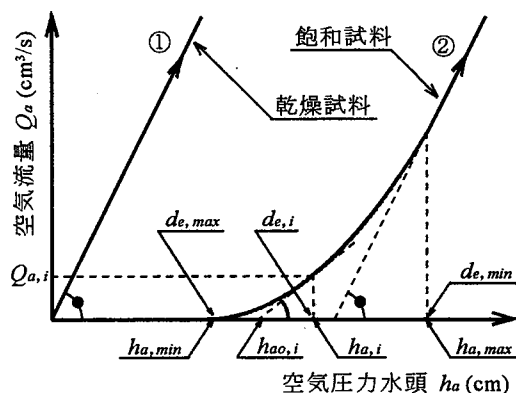


図-2 空気圧力水頭と空気流量の関係

始める。更に、空気圧を徐々に増加すると、 h_a と Q_a は、図-2の②のように、空気圧が $h_{a,min}$ から $h_{a,max}$ の範囲では曲線関係が得られ、 $h_{a,max}$ より大きくなるときは乾燥試料の関係①を h_a 軸方向に平行移動した関係と一致する。関係②において、ある空気圧 $h_{a,i}$ のときの固有透過度 k_i 及び透気係数 $k_{a,i}$ は次式によって表される。

$$k_i = \frac{\eta_a L}{\rho_w g A} \frac{Q_{a,i}}{h_{a,i} - h_{a0,i}} \cdot 10, \quad k_{a,i} = \frac{L}{A} \frac{Q_{a,i}}{h_{a,i} - h_{a0,i}} \quad (2)$$

ここに、 $h_{a0,i}$ (cm)は曲線関係②の $h_{a,i}$ の点での接線と h_a 軸との交点によって表される空気圧力水頭である。

ところで、飽和試料層中を空気が流れるには、空気圧が毛管圧を越えて間隙水を押し出さなければならない。「土の間隙部分は種々の大きさのまっすぐに連続した円形毛管の集合体である」と仮定すると、 $h_{a,i}$ を用いて間隙径 $d_{e,i}$ (mm)を次式によって求めることができる。

$$d_{e,i} = \frac{4\sigma}{\rho_w g h_{a,i}} \cdot 10^4 \quad (\sigma : \text{水の表面張力(N/m)}) \quad (3)$$

間隙径分布を表すには、式(3)より算出する間隙径に対して示す間隙体積を求める必要がある。Bearによって紹介されている種々の大きさの毛管の集合体の固有透過度を表す式に基づけば³⁾、空気圧 $h_{a,i}$ によって間隙水が押し出され空気が流れた間隙部分の間隙率 $n_{b,i}$ (累積間隙率と称する)は、式(2)から算出する k_i 、式(3)から算出する $d_{e,i}$ を用いて、次式により求めることができる。

$$n_{b,i} = \sum_{j=1}^i \Delta n_{b,j}, \quad \Delta n_{b,j} = \frac{32\Delta k_j}{(d_{e,j}/10)^2}, \quad \Delta k_j = k_j - k_{j-1} \quad (4)$$

ここに、 $\Delta n_{b,j}$ 、 Δk_j (cm²)は間隙径 $d_{e,j}$ の大きさを有する間隙部分の間隙率、固有透過度である。この $n_{b,i}$ を用いて、累積間隙体積百分率 $V_{b,i}$ (%)を次式により定義し算出する。

$$V_{b,i} = \left(1 - \frac{n_{b,i}}{n}\right) \cdot 10^2 \quad (5)$$

ここに、 n : 間隙率

間隙径分布は、式(3)から算出する間隙径 d_e と式(5)から算出する累積間隙体積百分率 V_b の関係によって表す。

(3) 計測結果 図-3は、空気圧力水頭 h_a と空気流量 Q_a の関係の一例(計測試料: 混合ガラスビーズ①)を示したものである。この関係より求めた間隙径分布を粒度と併せて示したのが図-4である。いずれの試料についても間隙径分布は粒度の3割程度以下の範囲に位置しており、また、間隙径は粒度に関係なく比較的均等な分布となる傾向にある。

3. 粒径と間隙径

空気透過法により体積基準の比表面積 S_v (cm²/cm³)を計測するために用いるKozeny-Carman式は次のように表される⁴⁾。

$$S_v = \sqrt{\frac{n^3}{5k(1-n)^2}} \quad (6)$$

この S_v を用いて、平均粒径 D_m (mm)、平均間隙径 d (mm)を次式によりそれぞれ算出することができる²⁾。

$$D_m = \frac{6}{S_v} \cdot 10 \quad (7)$$

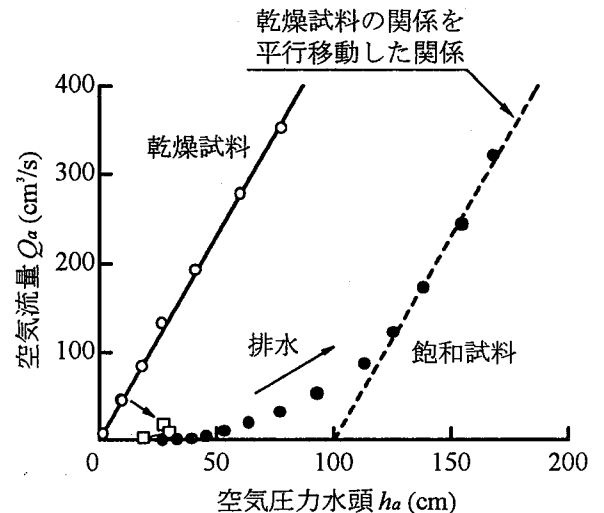


図-3 空気圧力水頭と空気流量(混合GB①, $n=0.295$)

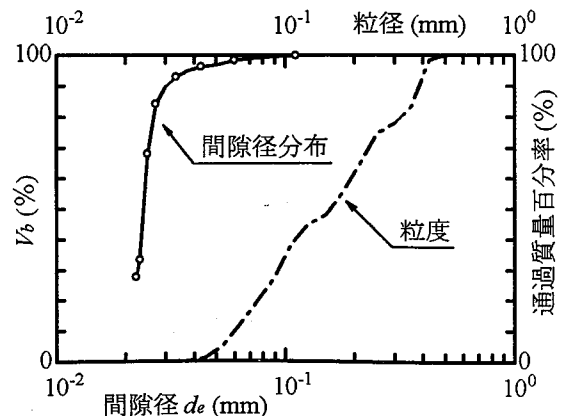


図-4 間隙径分布と粒度(混合GB①, $n=0.295$)

$$d = \frac{4e}{S_v} \cdot 10 \quad (8)$$

ここに、 e ：間隙比

式(6)は「土の間隙部分は平均間隙径 d の毛管の集合体である」とするHagen-Poiseuille式を、粒子形状や間隙のねじれ等の影響を考慮した係数5によって修正し拡張したものである。そのため、 S_v から求める D_m や d は間隙構造等の影響を含んだものであると考えられる²⁾。

一方、粒度から求める平均粒径 D_w (mm)、間隙径分布から求める平均間隙径 d_e^* (mm)をそれぞれ次式により定義する。

$$D_w = \frac{1}{\sum(P_i/D_i)} \quad (9)$$

ここに、 P_i は各ふるい間の中間径 D_i (mm)の試料の質量(各ふるいの残留質量) m_i (g)が全試料の質量 $\sum m_i$ に対して占める含有率である。なお、粒度試験に用いたふるい目の大きさは、0.850, 0.710, 0.600, 0.500, 0.425, 0.355, 0.300, 0.250, 0.212, 0.180, 0.150, 0.125, 0.106, 0.090, 0.075, 0.063, 0.053, 0.045, 0.038, 0.032(いずれも単位はmm)である。

$$d_e^* = \frac{\sum \Delta n_{b,i}}{\sum (\Delta n_{b,i}/d_{e,i})} \quad (10)$$

さて、式(7)と式(8)より、平均粒径 D_m と平均間隙径 d の理論的な関係は次のように表され、図-5(a)に破線で示す。

$$\frac{d}{D_m} = \frac{2}{3}e \quad (11)$$

これに対比して、 d を式(10)で求める d_e^* に置き換えてプロットしたのが図-5(a)であり、図中の実線のように、 d_e^* と D_m は実験的に次の関係が認められる。

$$\frac{d_e^*}{D_m} = \frac{1}{2}e \quad (12)$$

式(11)と式(12)を比較すると $d_e^* = (3/4)d$ である。先述のように、 d_e^* と d はいずれも間隙を毛管と仮定しているが、 d_e^* は間隙のねじれ等の影響を無視しているのに対して、 d は間隙径の分布を配慮していないものそれらの影響を考慮している。即ち、式(11)と式(12)のずれはこれら間隙構造の評価の違いにより生じていることが考えられる。

次に、 d_e^* と粒度から求められる平均粒径 D_w 、20%粒径 D_{20} (mm)との関係を調べたのが図-5(b)、(c)である。球形粒子のGB-C、GB-AC、混合GB①、混合GB②(い

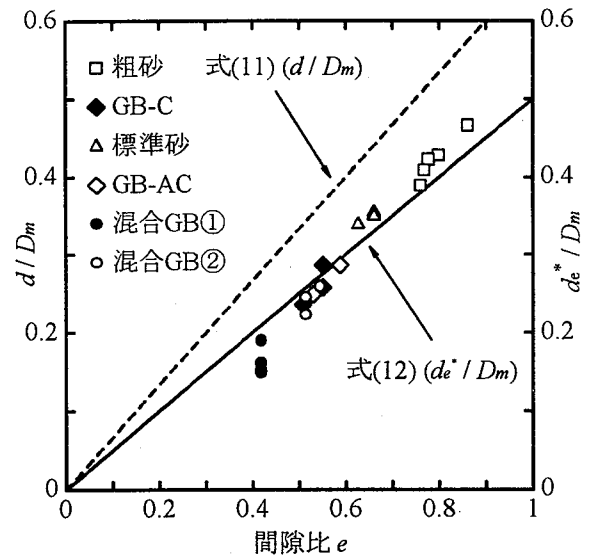


図-5(a) 平均粒径と平均間隙径の関係 I

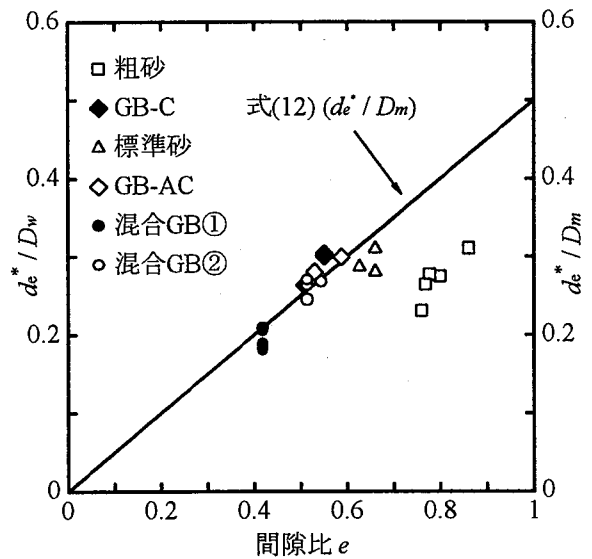


図-5(b) 平均粒径と平均間隙径の関係 II

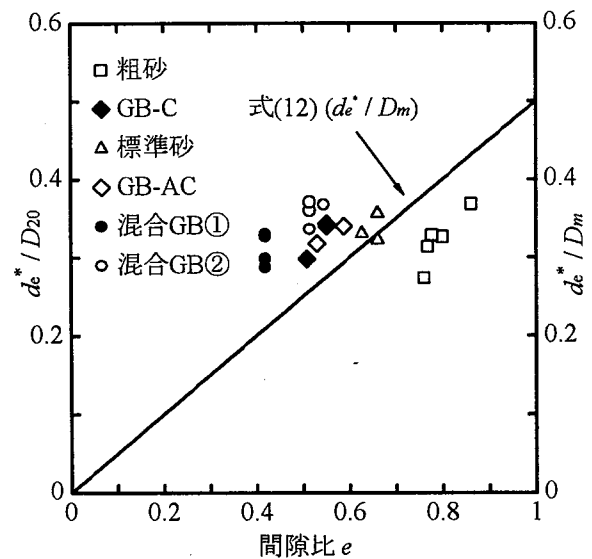


図-5(c) 20%粒径と平均間隙径の関係

れもガラスビーズ)では $D_m \doteq D_w \doteq D_{50}$ (50%粒径 (mm))であるが、粒子形状の角張っている粗砂、標準砂では $D_m < D_{20} < D_w \doteq D_{50}$ となる傾向にある²⁾。即ち、図-5(b)の d_e^*/D_w と式(12)の d_e^*/D_m との違いは粒子形状による影響であり、球形粒子では両者は一致し、角張った砂粒子では両者にずれが生じる。一方、図-5(c)においては、式(12)の関係に対して、 d_e^*/D_{20} の値は粒子形状及び間隙比に関係なくほぼ一定となり、間隙径は D_{20} 等の細粒分粒径の存在にかなり影響されることが考えられる。

4. 粒子注入実験

(1) 実験装置 実験装置は、装置の全体概要を示す図-6のように、空気圧力調節器、空気流量計、粒子供給器、試料部、マンメータ、排気タンクにより構成されており⁵⁾、試料を充填する試料筒は内径5cm(試料層断面積 $A=19.6\text{cm}^2$)、高さ $L=50\text{cm}$ の鉄製の円管であり、高さ方向に5分割(1分割あたり高さ $L_i=10\text{cm}$)できるものである。ある一定の空気圧力に調節した圧縮空气中に粒子供給器により注入粒子を分散させ、空気と粒子の混合流体を試料層上端に圧送し、試料層内に粒子を注入する。そして、そのときの空気流量 Q_{ac} (cm^3/s)を空気流量計により、試料層上下端及び試料層内の空気圧力水頭 h_a (cm)をマンメータによりそれぞれ計測する装置である。なお、先述の空気圧入法の装置と同様に、試料層を通るとき空気流量 Q_a (cm^3/s)は連続式 $\rho_a Q_{ac} = \rho_a Q_a = \text{const.}$ により算出している。

(2) 実験試料 実験試料には、注入対象砂として粗砂を、注入粒子としてGB-AC, GB-AE, GB-AG(いずれもガラスビーズ)の3種類をそれぞれ用いた。図-7には実験試料の粒度を示し、計測した粗砂の間隙径分布(間隙率 $n=0.431$)を併記した。また、表-1は各注入粒子の粒子密度 ρ_s (g/cm^3)、平均粒径 D_{gw} (mm)と粗砂の平均粒径 $D_w=0.554\text{mm}$ 、平均間隙径 $d_e^*=0.148\text{mm}$ に対する D_{gw} の比をそれぞれ示したものである。

(3) 実験方法 実験は、間隙径分布を計測したときと同じ間隙率になるように作成した炉乾燥状態の砂層に、炉乾燥した約20gの注入粒子を微量ずつ圧送しながら、空気圧力および空気流量の経時変化をそれぞれ計測する。また、実験終了後には、砂層を5分割し、その分割した各砂層の注入粒子の残留量 m_{fi} (g)及び排気タンク内の粒子残留量から注入粒子の試料層通過量をそれぞれ計測する。そして、5分割する各砂層の注入後の間隙率 n_i' を次式により定義し求める。

$$n_i' = \frac{V_{vi} - V_{fi}}{V_i} = \frac{V_{vi} - m_{fi}/\rho_s}{V_i} = n_i - \frac{m_{fi}/\rho_s}{V_i} \quad (13)$$

ここに、 V_{vi} :各砂層の注入前の間隙体積 (cm^3)

V_{fi} :各砂層内に残留した粒子体積 (cm^3)

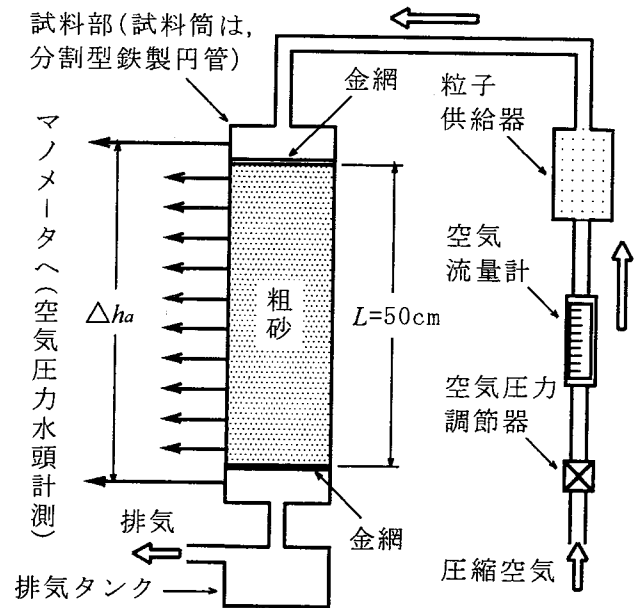


図-6 粒子注入実験装置の全体概要図

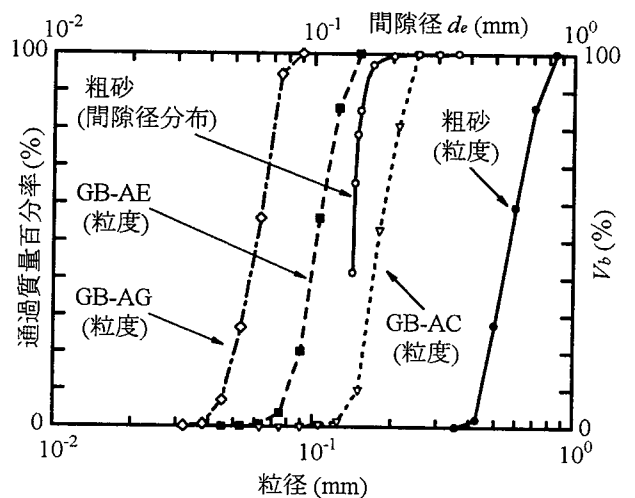


図-7 粒子注入実験試料の粒度及び間隙径分布

表-1 注入粒子の粒径と粗砂の粒径、間隙径

注入粒子	ρ_s (g/cm^3)	D_{gw} (mm)	D_{gw}/D_w	D_{gw}/d_e^*
GB-AC	2.496	0.178	0.32	1.20
GB-AE	2.495	0.102	0.18	0.69
GB-AG	2.486	0.0588	0.11	0.40

V_i : 各砂層の全体積 (cm^3)

n_i : 各砂層の注入前の間隙率 ($n_i = n$ とする)

また, ある範囲の試料層高さ ΔL_i (cm) における透気係数 k_{ai} (cm/s) は次式によって求められる.

$$k_{ai} = \frac{Q_a}{A} \frac{\Delta h_{ai}}{L_i} \quad (14)$$

ここに, Δh_{ai} : ある範囲の試料層高さ ΔL_i (cm) における空気圧力水頭差 (cm)

ところで, 炉乾燥状態の実験試料を用いるのは, 粒子の粗砂への付着性を低減させることにより, 粒子侵入状況から砂層の間隙の大きさと注入粒子粒度の関係を検討し易くするためである.

(4) 実験結果 図-8は5分割した各砂層の注入前の間隙率 n_i に対比して, 注入後の間隙率 n_i' の変化を示したものである. なお, 図中には実験開始時に試料層上下端に負荷した空気圧力水頭差 Δh_a (cm) を併記した. いずれの注入粒子も砂層下端まで侵入しており, 砂層通過量も若干ながら認められている. また, GB-AGによるときの間隙率の減少はGB-AC, GB-AEに較べて著しく, また, 各粒子の砂層内の総残留料 $\sum m_{fi}$ (g) は供給量に対してGB-ACでは約1%, GB-AEでは約4%, GB-AGでは約75%である.

図-9は注入粒子の残留量が比較的多い砂層上部と殆ど残留していない砂層部分における透気係数の経時変化をそれぞれ示したものである. GB-AC, GB-AEによるときの砂層上部, 中部とGB-AGによるときの砂層下部については, 注入前後で透気係数は殆ど変化していない. 一方, GB-AGによるときの砂層上部では, 図-8のような約0.05割の間隙率の減少に対して, 注入後の透気係数は注入前に較べて約3割低下しており, 空気的一次元流れ方向に対する間隙断面積, 換言すると, 面積間隙率が減少していることが想像される.

5. 注入粒子粒径と間隙構造

砂層内に侵入可能な球形粒子は, 図-7, 8, 9及び表-1から判断すると, GB-AG程度の粒度を有する粒子であり, その粒度は粗砂の粒度の約1割, 粗砂の間隙径分布の約4割の大きさである.

ところで, 球形の注入粒子が砂層内に侵入するには, ある間隙断面において, その粒子の直径以上の大きさの空間(内接円)を有する間隙が存在する必要がある. 即ち, 粗砂では, 粗砂の粒度の1割程度の大きさに相当する内接円を有する間隙が最も多く存在するよ

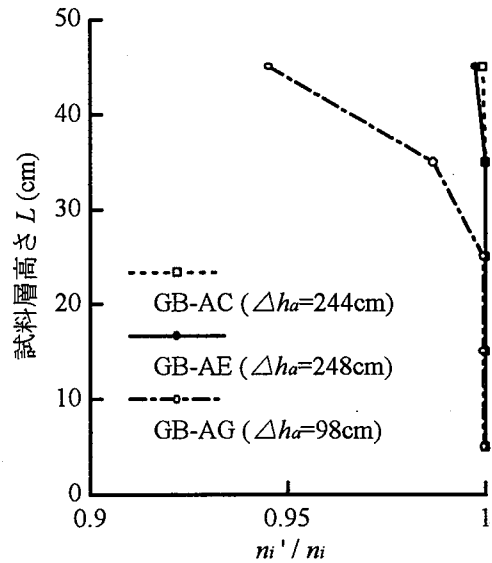


図-8 注入実験後の砂層の間隙率の変化

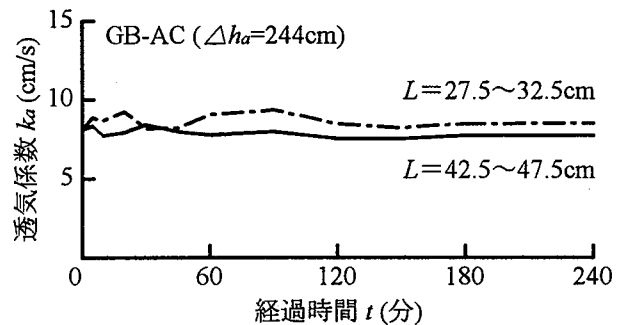


図-9(a) 透気係数の経時変化(注入粒子: GB-AC)

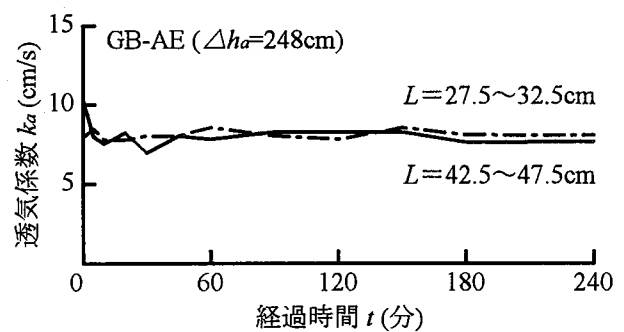


図-9(b) 透気係数の経時変化(注入粒子: GB-AE)

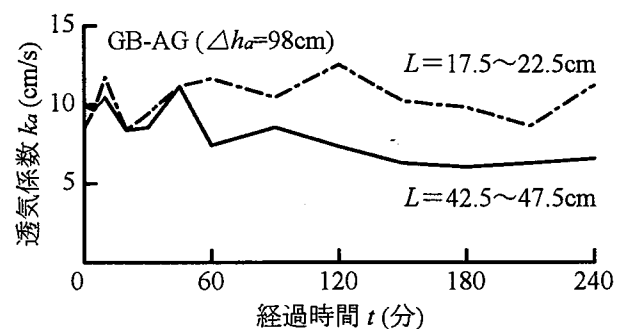


図-9(c) 透気係数の経時変化(注入粒子: GB-AG)

うな間隙構造であることが推定される。

一方、前述のように、侵入可能な注入粒子であるGB-AGの粒度は粗砂の間隙径分布の約4割であるが、間隙径分布付近の粒度を有するGB-AC、GB-AEは殆ど侵入不可能なようである。実際の間隙構造は、複雑な断面形状を有しており、また、間隙はねじれて太さが変化し、枝分かれしていることが想像される。計測する間隙径はこのような複雑な間隙構造を毛管とみなして評価するものであり、実際の間隙の大きさに対して過大な評価を与えている懸念がある。しかしながら、ある間隙断面の断面積あるいは間隙径が大きく球形粒子の侵入が可能であると考えられても、間隙の形状によっては注入粒子の粒径に相当する内接円を有する間隙が存在せず、その間隙部分を粒子が通過できないことが十分にあり得る。即ち、侵入可能粒子の粒度と粗砂の間隙径分布のずれは、間隙形状の影響が一因となっていることが考えられる。

6. おわりに

本報告では、「空気圧入法」による砂の間隙径分布計測と砂層への球形粒子の注入実験に基づいて、砂の粒度、間隙径分布及び注入粒子粒度の相互関係を調べるとともに、その間隙構造について考察した。その結果、次述する事項が得られた。

- ①平均間隙径 d_e^* は平均粒径 D_m 、間隙比 e により良好な関係(式(12))により表現された。
- ②粒度の細粒分の指標である20%粒径 D_{20} に対する平均間隙径 d_e^* の比率は間隙比 e に関係なく一定となる傾向にあり、間隙径には細粒分の影響が大きいことが考えられた。
- ③砂層内に侵入可能な注入粒子の粒度は、砂の粒度の約1割、間隙径分布の約4割の大きさであり、砂層内にはその注入粒子の粒径相当の内接円を有するような間隙が多く存在していることが推定された。

【参考文献】

- 1) 神谷・宇野・松島：「空気圧入法」による砂質土の間隙径分布の計測，土木学会論文集，1996.6(掲載予定)。
- 2) 宇野・杉井・神谷：比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察，土木学会論文集，No. 469/III-23，pp. 25-34，1993。
- 3) Bear, J. : Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier Publ. Co., pp.161-164, 1972.
- 4) Carman, P. C. : Fluid Flow through Granular Beds, Trans. Inst. Chem. Eng., Vol.15, pp.150-166, 1937.
- 5) 森・柴田・堀家：地盤中への粉体注入現象の研究，土木学会論文集，No. 445/III-18，pp. 27-35，1992。