

砂層への空気流による粒子注入実験

岐阜大学工学部 正会員 宇野 尚雄
 岐阜大学工学部 正会員 神谷 浩二
 岐阜大学大学院 学生会員 木村 大介

1. はじめに

適切な注入材(懸濁液型)を選定するには、地盤内の注入材挙動に影響を及ぼす間隙構造を把握するとともに、その構造の観点から検討する必要がある。本報告では、その基礎的研究として、空気流により砂層へ球形粒子を一次元方向に注入する実験に基づいて、砂層内に侵入可能な注入材粒径と著者らが提案している「空気圧入法」により計測した間隙径との関係を調べるとともに¹⁾、間隙径分布の観点から注入材の侵入特性について考察する。

2. 注入実験装置及び試料

注入実験装置は²⁾、装置の全体の概要を示す図-1のように、空気圧力調節器、空気流量計、注入材供給器、試料部、マンメータ、排気タンクにより構成され、砂試料を充填する試料筒は内径5cm、高さ $L=50\text{cm}$ の鉄製の円管であり、高さ方向に5分割(1分割あたりの高さ $\Delta L_i=10\text{cm}$)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気中に注入材供給器により注入材を分散させ、空気と注入材の混合流体を砂層内に圧送する。そして、そのときの空気流量 $Q_a(\text{cm}^3/\text{s})$ を空気流量計により、砂層内の空気圧力水頭 $h_a(\text{cm})$ をマンメータによりそれぞれ計測する装置である。

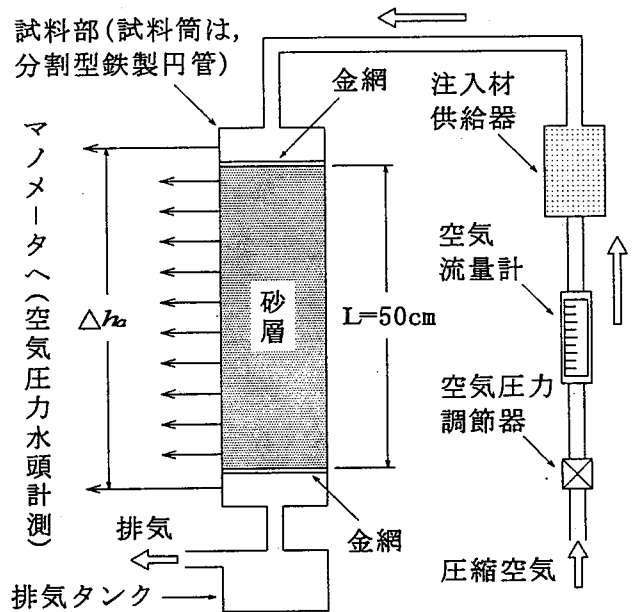


図-1 注入実験装置の全体概要

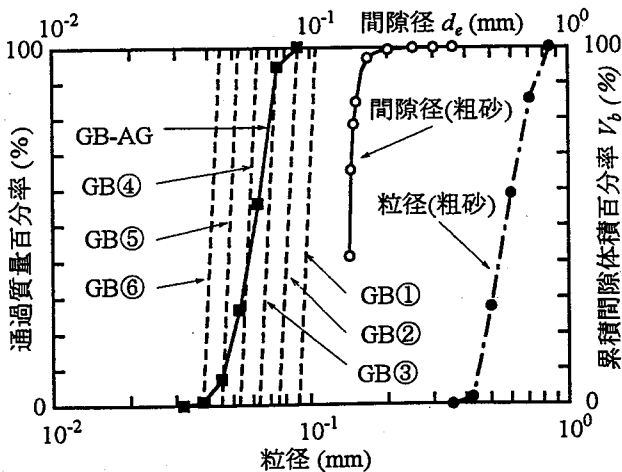


図-2 砂の粒度・間隙径分布及び注入材粒度

表-1 砂の粒径・間隙径と注入材粒径の対比

砂試料名称	$D_{50}(\text{mm})$	$d_g^*(\text{mm})$	
粗砂	0.599	0.148	
注入材名称	$D_g^*(\text{mm})$	D_g^*/D_{50}	D_g^*/d_g^*
GB①	0.098	0.16	0.66
GB②	0.088	0.15	0.59
GB③	0.069	0.12	0.47
GB④	0.058	0.10	0.39
GB⑤	0.049	0.08	0.33
GB⑥	0.042	0.07	0.28
GB-AG	0.059	0.10	0.40

実験試料は、注入対象砂には粗砂を、注入材には6種類の均一径のガラスビーズ(GB①～⑥)、及びその6種類のガラスビーズを混合した注入材 GB-AG をそれぞれ用いた。図-2には粗砂の粒度、空気圧入法により計測した間隙径分布(間隙径 d_g (mm)～累積間隙体積百分率 V_g (%)関係)¹⁾、及び注入材の粒度を示した。また、表-1には、粗砂の50%粒径 D_{50} (mm)、平均間隙径 d_g^* (mm)²⁾、注入材の中間径 D_g^* (mm)、及び D_g^* の d_g^* に対する比をそれぞれ示した。

実験は、炉乾燥した砂層の上下端に空気圧力水頭差 $\Delta h_a \approx 90$ cm を負荷した状態で、炉乾燥した注入材(GB①～⑥：供給量 $m_A \approx 30$ g, GB-AG：供給量 $m_A \approx 100$ g)を徐々に圧送しながら、空気圧及び空気流量をそれぞれ計測した。また、実験終了後には、5分割した各砂層内の注入材の残留量 m_f (g)及び注入材の砂層通過量 m_p (g)をそれぞれ計測した。

3. 実験結果

図-3は、5分割する各砂層における注入前の間隙率 n に対する注入後の間隙率 n' の比、注入材の砂層通過率 P_p をそれぞれ示したものである。なお、 n' 及び P_p は、それぞれ次式により定義し求めたものである。

$$n' = \frac{V_v - V_f}{V} = \frac{V_v - m_f / \rho_s}{V} = n - \frac{m_f / \rho_s}{V} \quad (1)$$

$$P_p = \frac{m_p}{m_A} \quad (2)$$

ここに、 V_v ：各砂層の注入前の間隙体積(cm³)

V_f ：各砂層内に残留した注入材体積(cm³)

V ：各砂層の全体積(cm³)

ρ_s ：注入材の粒子密度(g/cm³)

注入材 GB①～GB⑥に関する表-1、図-3(a)によれば、砂層内に侵入可能な注入材の粒径 D_g^* は砂層の粒径 D_{50} の1.5割程度以下、平均間隙径 d_g^* の6割程度以下であると判断される。また、 D_g^* の d_g^* に対する比のわずかな変化に伴い、砂層内の高さ方向における注入材の侵入長や滞留量の分布は、以下のように変化する傾向にある。

- (1) $D_g^* / d_g^* \approx 0.6$ のとき、注入材は砂層中部まで侵入するが、砂層上部に集中して滞留する。
- (2) $D_g^* / d_g^* \approx 0.4 \sim 0.5$ のとき、注入材は砂層下部まで侵入するが、砂層上部から砂層中部にかけて集中して滞留する。
- (3) $D_g^* / d_g^* \approx 0.3$ のとき、注入材は砂層上部から下部にかけて一様に滞留量が分布するとともに、注入材の砂層通過量も増加する。

一方、上記の GB①～⑥を混合して構成された粒度範囲の広い注入材 GB-AG に関して、図-3(b)によれば、

- (4) 注入材は砂層下部まで侵入するものの、砂層上部から砂層中部に集中して滞留する。また、各砂層に滞留した注入材の粒度を GB-AG の粒度と併せて示した

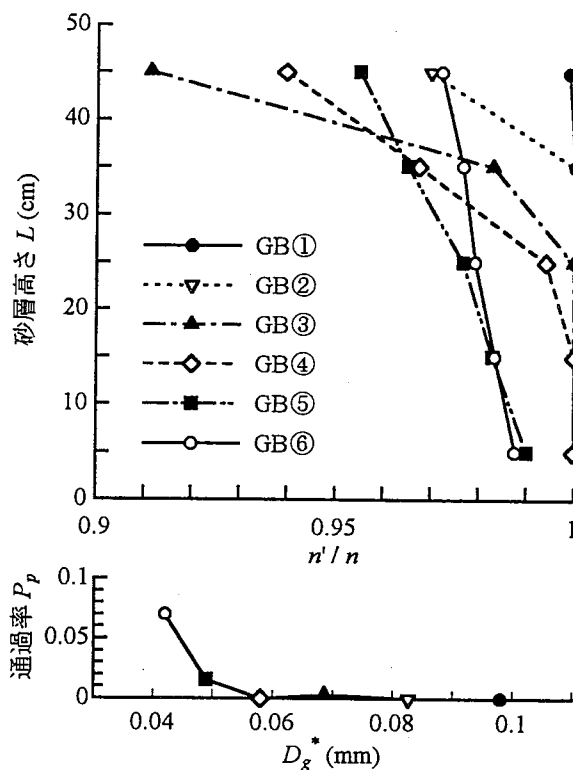


図-3(a) 注入前後の間隙率の変化及び通過率

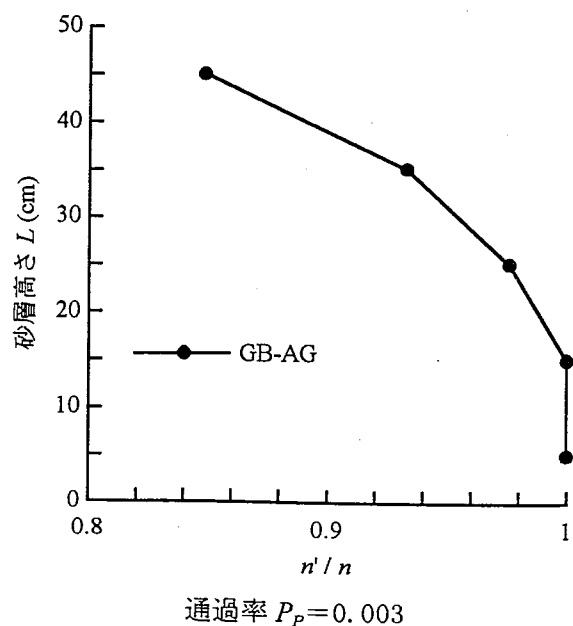


図-3(b) 注入前後の間隙率の変化及び通過率

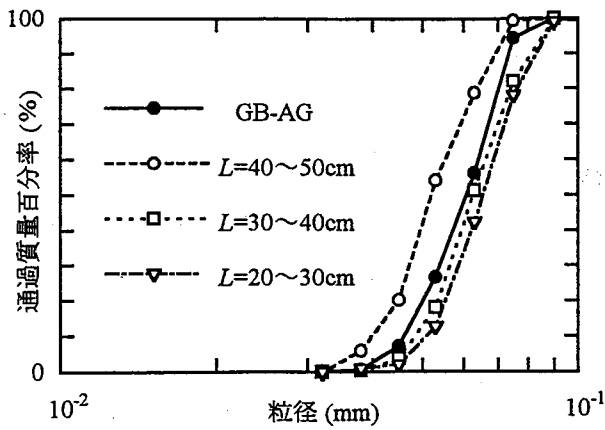


図-4 (a) 砂層内に滞留した注入材(GB-AG)粒度

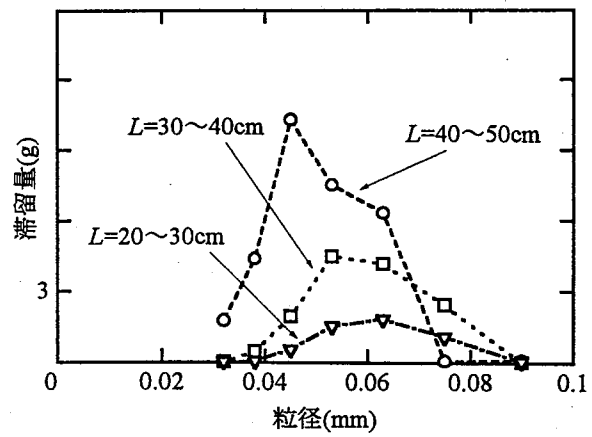


図-4 (b) GB-AG の粒径別滞留量

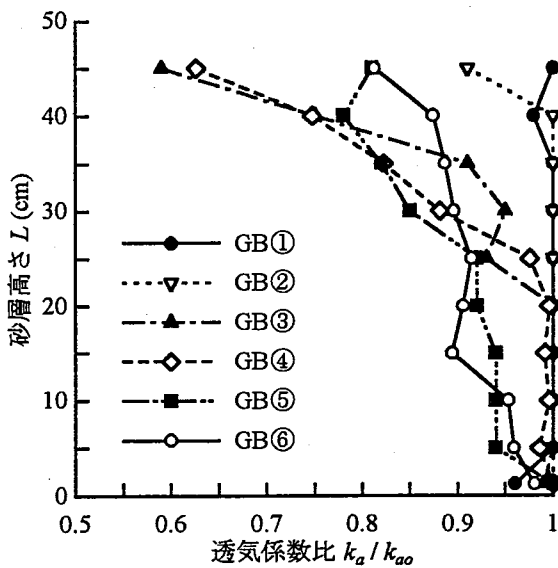


図-5 (a) 注入前後の透気係数変化

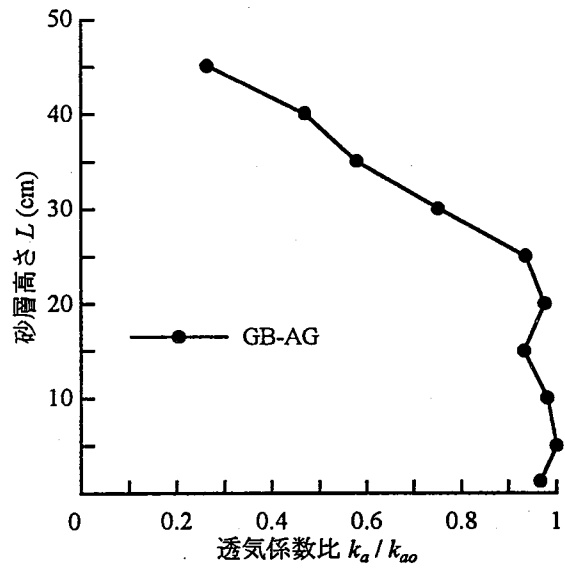


図-5 (b) 注入前後の透気係数変化

図-4 (a) によると、各砂層に滞留した注入材の粒度は、砂層下方に向かうに従って粒径が大きくなる傾向にある。なお、図-4 (b) は各砂層内に滞留した粒径別滞留量を示したものである。

図-5 は、注入後の透気係数 k_a (cm/s) を次式により算出し、

$$k_a = \frac{Q_a \Delta h_{ai}}{A \Delta L_i} \quad (3)$$

ここに、 Δh_{ai} : 分割した砂層高さ ΔL_i (cm) における空気圧力水頭差 (cm)

各砂層高さにおける k_a の注入前の透気係数 k_{a0} (cm/s) (式(3)と同様な式により算出) に対する比を示したものである。注入材の滞留量の増加に伴い、透気係数も低下する傾向にあり、わずかな(最大で1割程度)間隙率の低下に対して、透気係数は最大で5割程低下している。

4. 砂層の間隙径分布と侵入可能な注入材粒径

注入材はほぼ球形であるため、その粒径を直径とする内接円を有する間隙断面が存在しない限り注入材が侵入することは不可能である。

図-6 は粒径 0.5mm の均一な球形粒子について計測した間隙径分布であり³⁾、この粒子が最も密なときに生ずる間隙(3個の球形粒子により形成される間隙)の最大内接円の直径を併せて示した。この最大内接円径

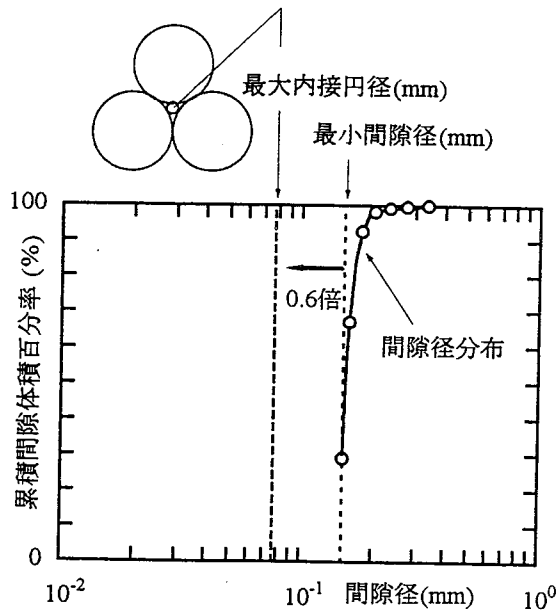


図-6 均一粒径の間隙径分布と最大内接円

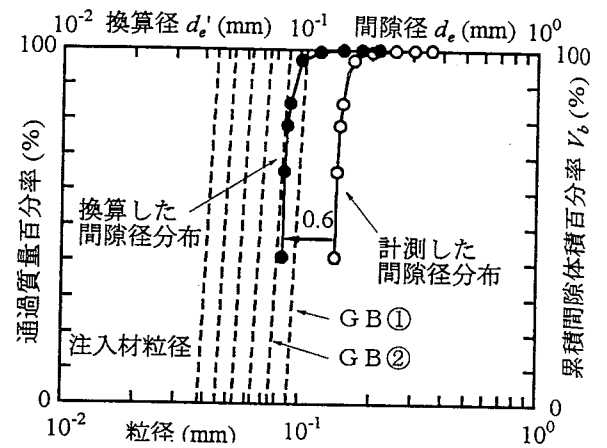


図-7 換算間隙径分布と注入材粒度

は間隙を通過できる最大の注入材粒径に相当し、最小間隙径の約0.6倍である。これを考慮し、最小間隙径が6割となるように、計測した間隙径分布を間隙径軸方向に平行移動した間隙径分布が図-7の換算した分布であり、その間隙径を換算間隙径 d_e^* と定義する。また、図-7には注入材粒度を重ね合わせた。

図-7によれば、換算間隙径の分布範囲から考えると、GB①より大きな注入材でも侵入できる可能性がある。しかしながら、GB①の粒径に相当する換算間隙径を有する間隙部分の存在がわずかで、GB②に相当する間隙部分が多く存在する。注入材がある断面の間隙から隣り合う断面の間隙に移動するとき、小さい方の間隙に大きく影響を受け、注入材の侵入には換算径の最小径に依存すると予想される。即ち、GB①程度の粒子が侵入可否の境界であると推測される。

5. 注入に伴う砂層の間隙径の変化と注入材挙動

間隙径分布が要素的なものであるのに対し、本実験での砂層高さは $L=50\text{cm}$ である。砂層が一様に充填されていることを考慮すると、砂層内全ての断面において同一の間隙径分布が存在する。先述の砂層内に侵入可能な注入材の侵入率(%) (侵入した注入材量/供給した注入材料)は、GB①で数%、GB②で約20%、GB③、④で約80%、GB⑤、⑥で約100%である。即ち、GB③~⑥は砂層内に容易に侵入できる粒子であるため、砂層を殆ど通過すると予想される。しかしながら、注入材の砂粒子への付着等に起因して、図-3(a)のように砂層途中で注入材が滞留する。

図-8に推測される注入前後の平均間隙径の変化を示す。空気圧入法による計測結果より、平均間隙径 d_e^* は平均粒径 D_m 、間隙比 e によって、次式の関係で表される⁴⁾。

$$d_e^*/D_m = e/2 \quad (4)$$

図-8は、この d_e^* を注入後の平均間隙径 d_e^{**} (mm) に、 D_m を注入後の平均粒径 D_m' (mm) に、 e を注入後の間隙比 e' にそれぞれ置き換え、推定された d_e^{**} と d_e^* の比を示したものである。GB②では最大で0.2割、GB③、④で2割、で1割程度減少している。この影響を上記の換算間隙径に含ませると、GB③、④のときの二次的な換算径の最小径はGB③、④の粒径相当になり、GB⑤、⑥のときでは二次的な換算径に比べGB⑤、⑥の粒径は小さい。換言すると、平均間隙径の約3割の大きさの粒径を持つ注入材の挙動は二次間隙の影響を受けにくく、通過し得ると推察される。

一方、図-9に $L=40\sim 50\text{cm}$ における透気係数の経時変化を示す。透気係数が粒子供給中のみ減少して

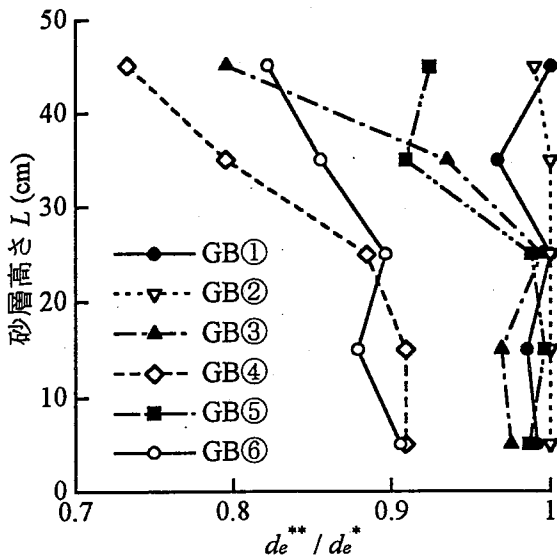


図-8 (a) 注入前後の間隙径の変化
(均一注入材)

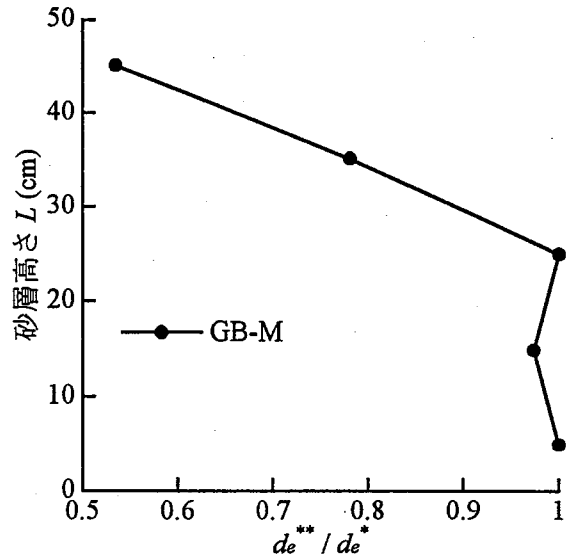


図-8 (b) 注入前後の平均間隙径の変化
(GB-AG)

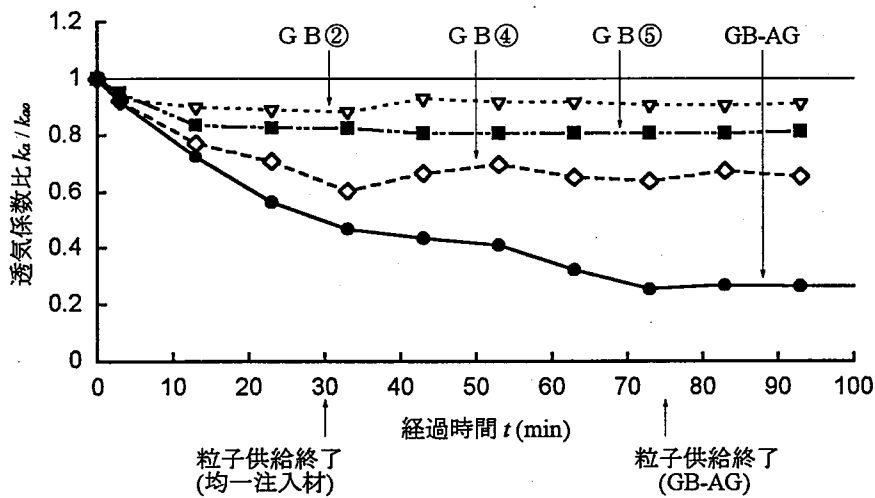


図-9 $L=40\sim 50$ (cm)における透気係数の経時変化

いることから、粒子供給開始直後に二次間隙が形成されている。つまり、侵入特性は注入開始後の初期の段階では計測された間隙径分布に影響を受け、時間の経過とともに二次間隙が減少し、その結果、変化した間隙径分布に影響を受けると考えられる。

6. 注入材の滞留状況への粒度の影響

GB-AGにはGB⑤や⑥程度の粒子が約3割含まれている。つまり、全供給量が約100gであることから約30g程度含まれており、均一注入粒子の供給量とほぼ同じである。しかし、図-3によれば、GB⑤や⑥では砂層内に一様に滞留するものの、GB-AGは砂層下端までは殆ど到達していない。図-10に均一注入材における各砂層内に滞留した粒径別滞留量を示した。図-10とGB-AGにおいて各砂層内に滞留した粒径別滞留量を示した図-4(b)を比較すると、砂層内に一様に滞留する均一注入材GB⑤や⑥程度の粒子は、GB-AGの一部として砂層内に侵入することにより、砂層下方に向かって滞留量が減少するとともに、粗粒分子の頻度が増加する傾向にある。これは、間隙内で留まる粗粒分子を先頭として、砂層上部に向かって滞留する。即

ち、注入材の侵入性には、侵入しがたい粗粒分粒子によって形成される二次間隙が、GB⑤や⑥程度の粒子の侵入性に大きく影響すると推測される。

7. おわりに

本報告では、砂層への粒子注入実験に基づき、注入材粒径と砂層の間隙径分布の関係を調べるとともに、間隙径分布の観点から注入材の侵入特性について考察した。その結果、次述する事項が得られた。

①砂層内に侵入可能な注入材粒径は平均間隙径の6割程度以下であった。また、侵入可能な注入材粒径の平均間隙径に対する比のわずかな変化に伴い、先述の3.の(1)～(3)のように、砂層内の高さ方向における注入材の侵入長や滞留状況は異なった。

②注入材の侵入特性には、注入に伴い形成される二次間隙の影響を受けることが考えられたが、平均間隙径の約3割の大きさの粒径を持つ注入材の侵入には二次間隙の影響を受けにくいと推察された。

③上述①、②は均一粒径の注入材についての結果であるが、GB-AGのような粒度に幅を有する注入材では、侵入特性には注入材における粗粒分粒子に大きな影響を受けると推測された。

【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，No. 541/Ⅲ-35，pp. 189-198，1996.
- 2) 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.
- 3) 林・宇野・神谷：砂の粒度特性が間隙径分布に与える影響，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，1997(掲載予定)
- 4) 宇野・神谷・今枝：「空気圧入法」により計測した砂の間隙径と粒径の関係，第31回地盤工学研究発表会平成8年度発表講演集，pp. 2079-2080，1996.

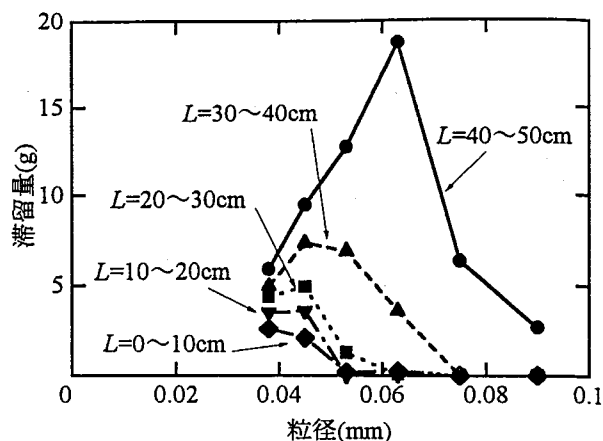


図-10 均一注入材の粒径別滞留量