

弾性波を用いた薬液固結砂の力学特性評価の試み

薬液注入工法 弾性波速度 等価骨格間隙比

早稲田大学 国際会員 ○兵動 太一
早稲田大学 国際会員 赤木 寛一

1.はじめに

薬液注入工法は、近年首都圏臨海部で問題になっている液状化対策や、軟弱地盤の改良のためなど我が国の都市土木において重要な工法だと言える。しかしながら、その設計・施工方法は経験に頼ることが少なくなく、より合理的な設計・施工を行うために改良固結土についての的確な力学特性評価が求められている。本研究では、特殊中性・酸性系の水ガラス薬液で改良した固結砂を用い弾性波速度測定試験を行い、薬液固結砂の力学特性に関する既存の基礎的研究成果と混合土で提案されている等価骨格間隙比の考え方をもとに薬液ゲルが固結砂の強度発現に果たす役割について、実験的な調査を試みた。

2.試料および試験方法

実験では、砂試料として珪砂 7 号を用いた。珪砂 7 号の物理的性質を表 1 に示す。また、使用した薬液は特殊中性・酸性系の水ガラス薬液であり、ゲルタイムはおよそ 24 時間程度である。供試体の作成方法は、寸法 $\phi 50\text{mm} \times h100\text{mm}$ のモールド内に予め薬液を入れ、上部より砂を流し込んでそのまま固める混合方式を採用した。このとき砂は落下高さを調整して目標相対密度が $Dr_0=60, 80\%$ となるように作成し、薬液の水ガラス濃度(水溶媒に対する 3 号水ガラスに硬化剤を加えた標準配合溶液の比率)は、 $N=15, 20, 25\%$ と変化させた。薬液の中に砂を投入して 24 時間空気養生した後、1~2 週間水中養生を行い、一定の強度となったことを確認して脱型した。

本研究では、薬液供試体の弾性波特性を知るために弾性波速度測定装置を用いた。弾性波速度測定装置には供試体に拘束圧を载荷した状態で弾性波速度を測定するために三軸装置を使用した。弾性波の送受信には、図 1 に示すセラミック素子を用いた。セラミック素子は、図 2 に示すように三軸装置の試料キャップおよびペDESTAL に組み込まれている。素子は試料から排水経路を確保出来るよう中空構造となっている。等方応力条件で有効拘束圧を $\sigma_c' = 100\text{kPa}$ 载荷し、S 波素子に発信用電圧を印加し供試体を伝播する波動 V_s を測定した。また弾性波の測定条件として起信電圧を 100V、起信波形を矩形波とした。

3.薬液固結砂における等価骨格間隙比

Thevanayagam¹⁾は等価骨格間隙比 e_{ge} を用いることにより、シルト・砂混合土の定常状態における間隙比-有効応力関係が細粒分含有率 F_c に関わらず一義的関係となることを示している。混合土を構成する粗粒土と細粒土の土粒子密度 ρ_s が同等であると仮定すると、細粒分含有率は式(1)で表されるので、等価骨格間隙比 e_{ge} は通常の間隙比 e と細粒分含有率 F_c および寄与率 b を用いて式(2)で表現される。ここで寄与率 b とは、粗粒分と同等の役割を果たす細粒分の割合であり、細粒分特性により異なる。

$$F_c = \frac{V_{sf}}{V_s} \quad \dots (1) \quad e_{ge} = \frac{e - (1-b)F_c}{1 - (1-b)F_c} = \frac{V_v - (1-b)V_{sf}}{V_s - (1-b)V_{sf}} \quad \dots (2)$$

ここで、 V_s は土粒子全体の体積、 V_{sf} は細粒分の体積である。

薬液固結砂において砂粒子骨格の他に間隙中に固結した薬液ゲル化物が存在する。また、薬液を間隙内に 100% 充填させても、余剰水やゲル化する際にある程度離しょう水が生じるので間隙が存在する。したがって、薬液固結砂は、砂骨格(Sand)、薬液ゲル化物(Gel)、間隙(Void)の三相で構成されると考えられる。

そこで、本研究では混合土の考え方にならって、図 3 の構成図において細粒分を薬液のゲル化物と置き換えて、混合土

表 1. 珪砂 7 号の物理的性質

土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.62
最大間隙比	0.931
最小間隙比	0.613
平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	0.18

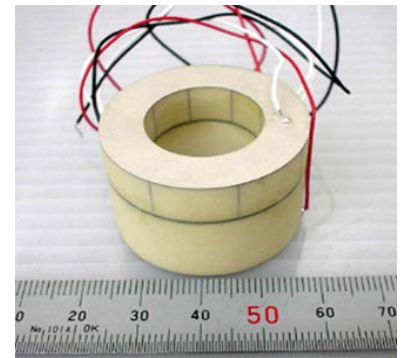


図 1. セラミック素子

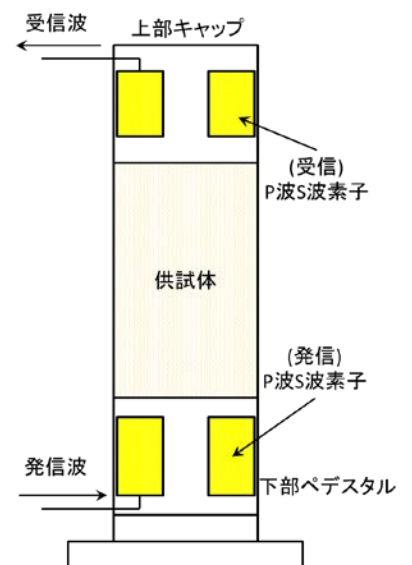


図 2. 弾性波速度測定装置の断面図

と同じように等価骨格間隙比の考え方を適用し、薬液固結砂の力学特性評価を試みることにした。

薬液固結砂においては、混合土の細粒分の代わりに薬液のゲル化物が存在して、強度発現に役割を果たすことになる。薬液ゲル化物の体積を V_{sg} とおくと、等価骨格間隙比は次のように表される。

$$e_{ge} = \frac{V_v + (1-b)V_{sg}}{V_s - (1-b)V_{sg}} \quad \dots (3)$$

等価骨格間隙比は混合土の土粒子配列構造に密接な関係を持つので、薬液固結砂の薬液ゲル化物を含む土粒子配列構造を反映した正のダイレイタンスー特性を考慮した薬液ゲル化物の寄与率を導入する際は、薬液の水ガラス濃度に対応した値をそれぞれ適用する必要がある。森らは、アルカリ有機系の薬液で固結させた豊浦砂の一軸圧縮強さと正のダイレイタンスーに基づく負圧の関係を明らかにするため、Unjacketed 試験を行っている²⁾。この Unjacketed 試験は、ゴムスリーブを用いずに水浸状態で行われる三軸圧縮試験であり、供試体内部の間隙水圧がセル圧に等しくなるために、せん断中供試体内に負圧が発生せず有効拘束圧がゼロとなる。そこで本研究では森らの試験結果を用い寄与率 b を算出した。本研究では、水ガラス濃度を $N=15, 20, 25\%$ の 3 種類としたので、それぞれの寄与率はそれぞれ $b=0.01, 0.10, 0.20$ となった。

4.試験結果

図 4 と図 5 は、砂を薬液で固結させた供試体の S 波弾性波速度について通常の間隙比と等価骨格間隙比の関係を比較している。なお、これらの図には比較のために 7 号砂と豊浦砂の未固結供試体を用いて別途実施したベンダーエレメント試験 (BE 試験) で得られた S 波弾性波速度の測定結果をプロットしてある。図 4 の通常の間隙比で整理した場合には、薬液固結砂のプロットは狭い間隙比の範囲に集中しており、また未固結砂のプロットの分布と異なっている。一方、図 5 の等価骨格間隙比で整理すると、薬液固結砂の e_{ge} は e に比べて低下するので、薬液固結砂と未固結砂の S 波弾性波速度を等価骨格間隙比ではば一義的に評価できることがわかる。S 波弾性波速度は、未固結砂を含めて薬液固結砂や細粒分を含むしらすの微小ひずみ領域でのせん断特性は、等価骨格間隙比で適切に評価できると考えてよい。細粒分を含む混合土の場合には、砂粒子骨格内の間隙に存在する細粒分の半分が微小ひずみ領域でのせん断に対して砂粒子骨格と協働して抵抗している。一方、薬液固結砂においては、正のダイレイタンスーに伴う負圧が発生することが、前述のように森、田村により指摘されている³⁾。薬液固結砂の BE 試験や弾性波速度測定試験では、せん断時のひずみ速度が十分大きく給水が行われなため、正のダイレイタンスーに起因する負圧が解放されずに微小ひずみ領域におけるせん断抵抗に寄与するものと考えられる。

5.まとめ

水ガラス系薬液で固結された砂の等価骨格間隙比の算定に必要な寄与率を、せん断に伴う正のダイレイタンスー特性が水ガラス濃度の違いによって異なることに着目して、過去の文献をもとに決定した。S 波弾性波速度については、等価骨格間隙比により評価できるものといえる。特に、等価骨格間隙比で整理すると、薬液固結砂の等価骨格間隙比は通常の間隙比に比べて低下するので、薬液固結砂と未固結砂の S 波弾性波速度を等価骨格間隙比で一義的に評価できることを確認した。

参考文献 1) Thevanayagam, S., Shenthan, T, Mohan, S. and Liang, J. : Undrained fragility of clean sands, silty sands and sandy silts, ASCE Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, Vol. 128, No.10, pp.849-859, 2002. 2) 森麟, 田村昌仁 : 水ガラス系固結砂の強度に関する工学的特性, 土木学会論文集, 370 号/III-5, pp.113-122, 1986. 3) 森麟, 田村昌仁 : 薬液により固結した砂の粘着力とダイレイタンスーについて, 土木学会論文集, 370 号/III-5, pp.123-132, 1986.

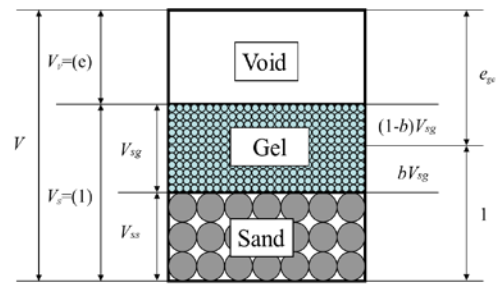


図 3. 薬液固結砂の模式図

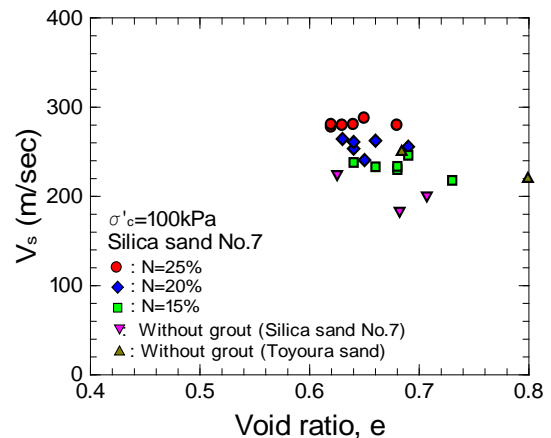


図 4 S 波弾性波速度と間隙比の関係

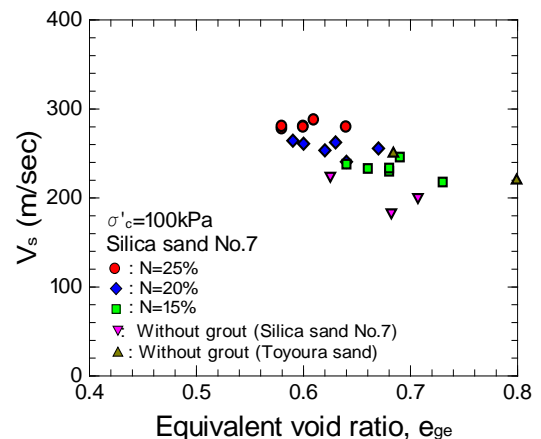


図 5. S 波弾性波速度と等価骨格間隙比の関係