

弾性波法に基づく薬液改良砂の力学特性評価について

薬液注入 弾性波 透水試験

早稲田大学 学生会員 ○平岡 陽

早稲田大学 国際会員 赤木 寛一

(財)鉄道総合技術研究所 正会員 澤田 亮, 仲山 貴司

1. はじめに

薬液注入工法は、溶液型薬液を使用し、その薬液が砂粒子間の水と置き換わりながら浸透し、地盤を固結させる工法である。本工法は地盤改良の重要な1分野であり、従来は仮設工事を目的として用いられ、現在では液状化対策工法としても期待されている。薬液注入の施工後には、薬液の注入効果を確認するために現場確認試験（現場透水試験や標準貫入試験）により改良効果を確認することが義務づけられている。しかし、この現場確認試験は限られた部分の結果から全体の改良効果を予測する方法であるため、得られた数値が大ききばらつくこともあり¹⁾、改良体全体の効果を確認する手法としては課題も残されている。したがって、未だ明確に薬液の全体的な注入効果を定量的に評価する手段は確立されておらず、効果確認のための簡易で確実な原位置試験法が求められている。本研究では、薬液注入の効果確認の手法として、従来は地質構造や地盤の工学的性質の推定に用いられていた弾性波法の適用について検討した。具体的には、希釈濃度を変化させた薬液改良供試体の弾性波速度を測定することにより、弾性波法に基づく薬液改良砂の力学特性の定量的評価について基礎的な実験的検討を実施した。

2. 使用材料と供試体作製方法

本実験で使用した珪砂は東北珪砂7号で、表1に物理的性質を示す。薬液は非アルカリゾル系の特殊酸性薬液を用い、薬液の固化成分を決める水ガラス濃度を25%、20%、15%の3ケースに変化させた。供試体作製方法としては、薬液を小型モールド(φ50mm×100mm)に所定量を入れておき、そこに砂を水中落下させる方法で作製した。目標相対密度は60%とした。供試体作製後は、1日の空気養生の後、28日間水中養生を行った。

表1. 東北珪砂7号の物理的性質

土粒子密度(g/cm ³)	2.62
最大間隙比	0.931
最小間隙比	0.613
D ₅₀ (mm)	0.18

3. 弾性波速度測定試験と透水試験方法

28日間水中養生させた薬液改良供試体を、図1に示す弾性波速度測定装置により弾性波速度を測定した。試験手順は次の通りである。(1)供試体をペDESTAL上を設置し、ゴムスリーブを着装しOリングで密閉する。(2)P波、S波送受信信号線を接続する。(3)三軸室を取り付ける。(4)供試体を排水(排気)状態にして、空圧で100kPaを載荷する。その際にダイヤルゲージにて空圧載荷に伴う供試体の軸変位を測定した。(5)P波素子およびS波素子に発信用電圧を印加し、供試体を伝播する波動を測定する。ここでは、同じ条件で64回の送受信を行い、それぞれの波形の時刻歴を記録した。(6)波形測定後、装置を解体して供試体を取り出す。取り出した供試体に対して一軸圧縮試験を実施するとともに、薬液改良砂の透水係数の測定も行った。従来の透水試験は、10⁻⁵(cm/s)以下のオーダーであればJGS0311に示すような変水位透水試験を用いるのが一般的である。ここでは、薬液改良供試体は透水性が非常に低く変水位透水試験が採用できなかったため、通常とは異なるフローポンプ法にて実施した。

解析の方法は、P波とS波について発信波および受信波の初動を同定する方法を採用した。弾性波速度の算出は以下に示す式(3.1)の通りとする。式(3.1)中のdtは、伝播距離0の状態を観測される遅延時間で、送受信機器の持つ電氣的な遅延時間である。この遅延時間は、計測システムや使用するセンサに依存する。なお、測定条件は表2に従うものとする。

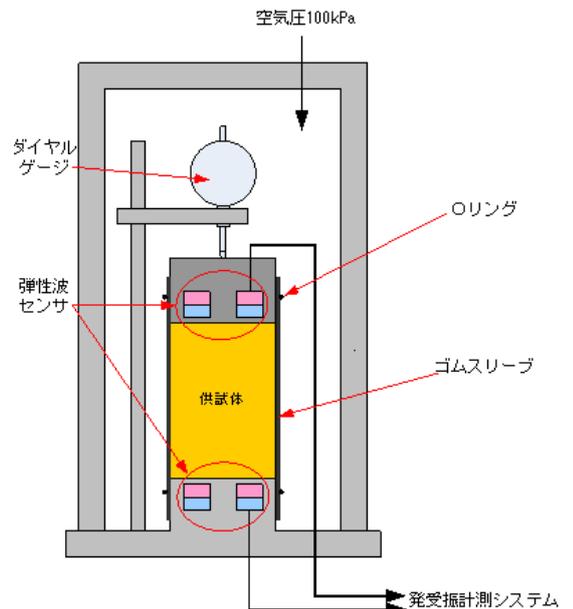


図1 弾性波速度測定装置の概要図

表2. 弾性波速度測定、試験条件

起信波形	矩形波
波形記録間隔	4 × 10 ⁻⁷ sec
平滑化用計測回数	64回

$$v = \frac{l}{(t - t_0) - d} \quad \dots (3.1)$$

ここで v : 弾性波速度 (m/s) , l : 供試体高さ (m) ,
 $(t - t_0)$: 発信初動から受信初動までの遅延時間 (s)

4. 試験結果と考察

図2に弾性波速度と水ガラス濃度の関係を示す。この弾性波速度測定試験は、同じ種類の薬液改良供試体に対して6回の試験を実施した。図2にはその結果をプロットした。この結果より、P波速度は水ガラス濃度の増加に対して顕著な増加を示していることが分かる。水ガラス濃度15%と25%の間では、最大で約400(m/s)ほどのP波速度の違いが認められた。一方、S波速度に関しては、水ガラス濃度の増加に伴わずかながら増加傾向にあるが、P波速度ほどの大きな増加は示さなかった。水ガラス濃度15%と25%の間では、最大でも約50(m/s)ほどの違いしか見られなかった。これは、しらすの固結度を評価した既往の研究²⁾における知見と近く、P波速度がS波速度よりも固結度に対して敏感であることは、薬液改良体においても同じ結果が得られたと考えられる。なお、P波速度は同じ条件の供試体であっても、S波速度よりもばらつきが大きいという結果となった。

弾性波速度測定試験後に一軸圧縮試験を実施したが、その結果を図3の一軸圧縮強度と水ガラス濃度の関係にて示した。この結果より、一軸圧縮強度は水ガラス濃度の増加に伴い顕著に増加する挙動を示していることが分かる。しかも水ガラス濃度15%と25%の間では、最大で約450kN/m²の違いがあり、水ガラス濃度により、薬液の固結強度は大きな違いを示すことが確認できた。ここで、図3と図2を合わせて考える。一軸圧縮強度とP波速度は似た増加傾向を示しており、P波により十分な効果確認が行えると言える。逆に、S波速度は水ガラス濃度の増加に伴わずかな変化しか示していなかった。薬液改良体の改良強度の評価はP波速度の方が適していると考えられる。

図4に透水係数と水ガラス濃度の関係を示す。この試験結果は、薬液改良供試体の止水性を確認するために実施した透水試験から得られたものである。通常、薬液注入による止水効果として10⁻⁵ (cm/s) オーダーの数値が得られれば改良度合いはかなり高いとされている³⁾。図4より、いずれの水ガラス濃度においてもその基準を十分に満たしており、止水性が十分に確保されていると考えられる。また、水ガラス濃度15%と25%の間では、10¹ オーダーの違いが見られ、止水効果が大きく異なる結果となった。ここで、図4と図2を合わせて考えると、この顕著な止水性の違いについてもP波速度により評価できると考える。

5. まとめ

本研究は、希釈濃度の異なる薬液改良供試体を作製し、薬液注入の効果確認を弾性波法により試みた。得られた知見は以下のように要約できる。

- (1) P波速度とS波速度は薬液の希釈濃度による依存性が異なる。
- (2) 同じ条件の改良体であっても、P波速度はS波速度よりも、ばらつきが顕著であった。
- (3) 薬液改良体における一軸圧縮強度と透水係数の変化特性は、P波速度をもとに適切な評価が可能である。

参考文献：1) 社団法人 地盤工学会 “薬液注入工法の理論・設計・施工”，pp98, 2009

2) 梅村・落合 “弾性波速度を用いたシラスの固結度評価の試み” 土木学会第48回年次学術講演会、1996.9、pp.1442～pp.1443

3) 社団法人 地盤工学会 “薬液注入工法の理論・設計・施工”，pp99, 2009

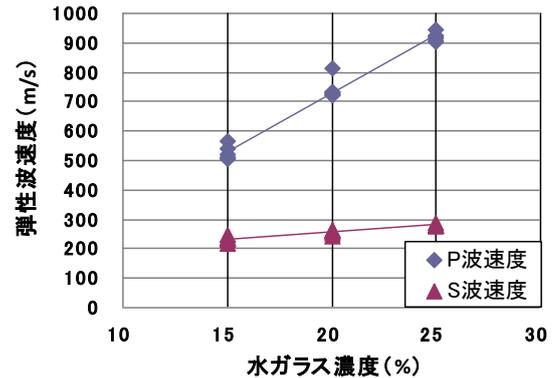


図2. 弾性波速度と水ガラス濃度の関係

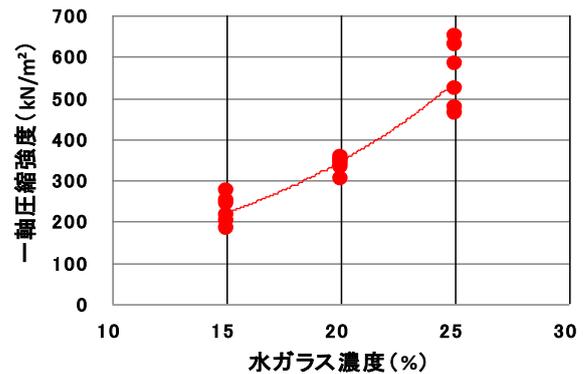


図3. 一軸圧縮強度と水ガラス濃度の関係

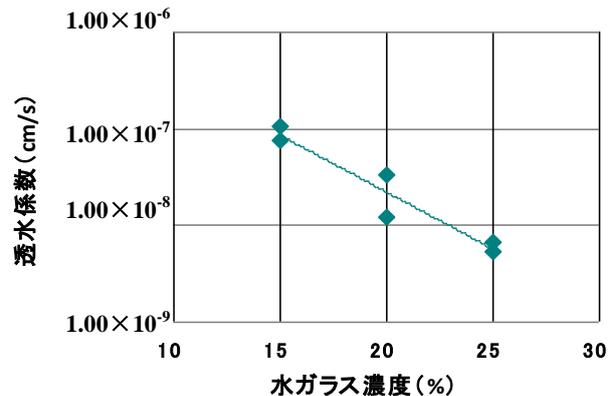


図4. 透水係数と水ガラス濃度の関係