

## 浸透注入により固化された砂の液状化強度と波動伝播特性

東京理科大学大学院 学生会員 ○榎本忠夫  
 ライト工業 正会員 吉田晃  
 東京理科大学大学院 正会員 石原研而、塚本良道  
 東京理科大学大学院 学生会員 梅田敬太郎

### 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以来、構造物の耐震性の向上は重要な課題のひとつであり、既設構造物直下の地盤の液状化対策として薬液注入工法が注目されている。今後も、薬液を用いた液状化対策工法は、飛躍的に需要が増大するものと思われる。本研究では、薬液により固化された砂質土供試体を作製し、弾性波伝播特性から微小ひずみにおける動的性質を調べ、同じ供試体を用いて液状化強度を調べることを目的とした。

### 2. 実験概要

試料には豊浦砂を用い、注入薬液として溶液型活性シリカ（シリカ濃度 6%）を使用した。供試体作製方法は、薬液改良砂の場合には湿潤締め法（W.T、相対密度  $D_r=25, 40, 55\%$ ）と水中落下法（W.S、 $D_r=20\sim30, 35\sim45, 50\sim60, 65\sim75\%$ ）を採用し、未改良砂の場合には湿潤締め法（ $D_r=25, 40\%$ ）を採用した。本研究で使用した三軸試験機は、P・S波速度測定装置を有している。有効拘束圧 98kPa で等方圧密後、P・S波速度を測定し、周波数が 0.1Hz の正弦波繰返し軸荷重を非排水条件下で載荷した。

### 3. 実験結果及び考察

#### (1) 薬液改良砂の波動伝播特性による動的性質の検討

図-1に初期せん断弾性率  $G_0$  と間隙比  $e$  の関係（湿潤締め法のみ）を示す。 $G_0$ は測定したS波速度を用いて  $G_0=\rho V_s^2$  より算出した。 $G_0$ に関しては、いくつかの実験式が提案されており<sup>1)</sup>、豊浦砂の場合は、

$$G_0 = A \cdot (2.17 - e)^2 / (1 + e) \cdot (\sigma'_0)^{0.5} \text{ (kPa)} \quad (A = 8400) \quad (1)$$

と表現される。本研究より得られた薬液改良砂の微小ひずみ領域における定数  $A$  は、湿潤締め法では  $A=8675$ 、水中落下法では  $A=6405$  であった。また、ホモゲル供試体を作製しP・S波速度測定を行った結果、ホモゲル中の平均P波速度は20℃の水中でのP波速度にほぼ等しく約1489 m/sであり、S波速度は計測不能であった。つまりホモゲルはせん断剛性を持たない。図-2、3にP・S波速度と間隙圧係数  $B$  の関係を示す。湿潤締め法では充填率が相対密度によらず約76%で、不飽和状態にあった。 $B$  値の変動は約0.05~0.45程度で、P波速度の測定値は約600~900m/s程度まで上昇した。多孔質弾性理論より得られる式(2)のP波速度理論値を実測値と比較すると、相対密度に関係なく、土骨格構造のポアソン比  $\nu_b=0.43\sim0.44$  で良く一致することが分かった。一方、水中落下法では、充填率が相対密度によらずほぼ100%に近いと仮定してよいが、 $B$  値の変動は約0.1~0.8程度であり、不飽和状態にあったと考えられる。そして、 $B=0.2\sim0.4$  に達するとほぼ  $V_p=1600\sim1700\text{m/s}$  程度の一定値に収束するが、これは飽和した未改良砂内を伝播する場合のP波速度と同等で、 $B$  値が小さい範囲でも圧縮性がかなり小さいことが分かる。これは、水中落下法では砂粒子が水平方向に寝る形で堆積し、粒子構造的に圧縮に強いためであると思われる。式(2)のP波速度理論値と実測値を比較すると、 $B$  値が約0.1~0.4の範囲では良く一致するが  $B$  値が大きくなると一致しなくなる傾向にあり、 $\nu_b$  の値は相対密度によって多少変化するが、大体0.47~0.495程度の範囲となった。S波速度は作製方法によらず、 $B$  値の変化に関係なく一定値を示した。

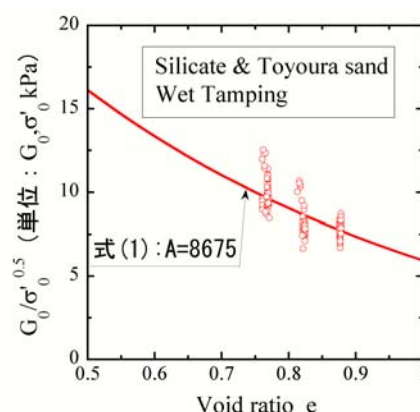


図-1  $G_0$  と  $e$  の関係 (W.T)

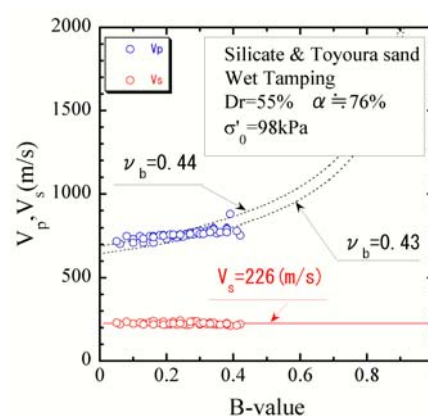


図-2  $V_p \cdot V_s$  と  $B$  の関係 (W.T)

**Key Words** : 薬液注入工法、液状化強度、波動伝播特性

連絡先 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻 TEL04-7124-1501

多孔質弾性理論より得られる式 (3) から、初期せん断弾性率  $G_0$  と土骨格構造の体積弾性率  $K_b$  の比が小さくなると、土骨格構造のポアソン比  $\nu_b$  は上昇し 0.5 に近づくことが分かる。既往の研究<sup>2)</sup> では未改良砂の  $\nu_b$  を 0.35 としている。湿潤締固め法を用いた実験結果に着目すると、改良前後で  $\nu_b$  は 0.35 から 0.43~0.44 に増加するが、 $G_0$  はわずかに増加する程度で、最大でも 6% 程度の増加にとどまった。これは、ホモゲルがせん断剛性を持たないためであると思われる。つまり改良により  $\nu_b$  が大きくなるのは、 $G_0/K_b$  が小さくなるため、 $K_b$  を算出すると改良により約 3 倍程度増加することが分かった。

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 = \frac{4}{3} + \frac{2(1+\nu_b)}{3(1-2\nu_b)(1-B)} \quad (2) \quad \nu_b = \frac{1}{2} \frac{3-2 \cdot G_0/K_b}{3+G_0/K_b} \quad (3)$$

## (2) 薬液改良砂の靱性・液状化強度の検討

図-4 に示すように、未改良砂では、過剰間隙水圧比が 0.5 付近に達すると急激に大きな軸ひずみが生じ脆性的な破壊に至った。しかし改良砂では、供試体作製法によらず、載荷 1 回目である程度の軸ひずみが進行するが、その後繰返し載荷をしても徐々に軸ひずみが収束し、破局的な液状化に至らないことが分かった。これは、薬液が間隙でゼリー状にゲル化することにより過剰間隙水圧の発生を抑制すると同時に、ゲルの粘着力が砂全体に付与されるためであると思われる。また、 $DA=4\%$  に達した時の繰返し回数  $N_{4\%}$  と  $DA=3\%$  に達した時の繰返し回数  $N_{3\%}$  の比を相対密度  $D_r$  に対してプロットしたのが図-5 である。改良砂は軸ひずみの増加傾向が未改良砂に比べ少ないことが分かる。以上より改良砂は非常に靱性が優れていると考えられる。図-6 に  $DA=4\%$  における液状化強度曲線を示す。改良砂は未改良砂よりも液状化強度曲線が上方に位置し、薬液注入により 2 倍以上の明確な強度増加が確認できた。靱性の高さが繰返し載荷回数の増加に寄与しているため、液状化強度に関してのみ言えば、薬液注入により相対密度が増加したのと同様な効果が得られたと考えられる。また相対密度が同じ改良砂を比較すると、湿潤締固め法の方が水中落下法よりも液状化強度が大きくなることが分かった。原因として、湿潤締固め法は粒子構造がランダムで圧縮にも伸張にも抵抗しやすい構造であることや、ゲル中の気泡が過剰間隙水圧の発生を抑制する、すなわち不飽和化による強度増加の可能性が考えられる。

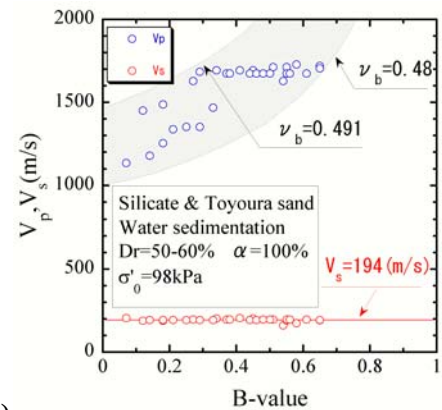


図-3  $V_p/V_s$  と B の関係 (W. S)

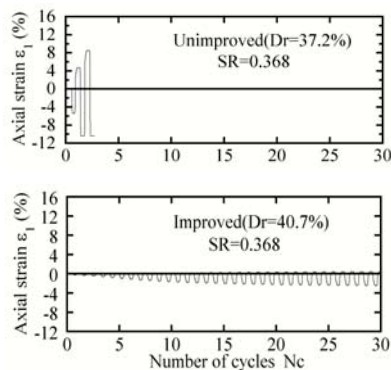


図-4 軸ひずみ (W. T)

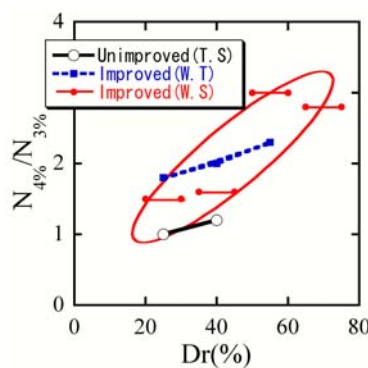


図-5  $N_{4\%}/N_{3\%}$  と  $D_r$  の関係

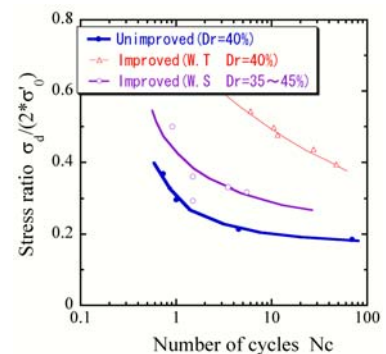


図-6 液状化強度曲線

## 4. 結論

(1) 薬液改良により初期せん断弾性率  $G_0$  はほとんど変化しないが、土骨格構造の体積弾性率  $K_b$  は数倍に増加し、微小ひずみ領域において地盤の圧縮性は非常に小さくなる。(2) 薬液改良砂は間隙のゲルの粘着力によって高い靱性を有するため脆性的な破壊に至らない。そして靱性の高さが、液状化強度の増加に寄与すると同時に、地震時の地盤変形抑制効果を発揮する要因であると考えられる。

**謝辞：**本研究を遂行する際にご協力頂いたライト工業の羽田哲也氏に深く感謝致します。

**参考文献：**1) Kokusho, T. (1980), "Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range", Soils and Foundations, 20, pp.45-60. 2) Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Nakazawa, H., Kamada, K., Huang, Y. (2002), "Resistance of partly saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities", Soils and Foundations, Vol.42, No.6, pp.93-104.