

## 一軸圧縮過程における浸透固化改良土内部の負圧発生メカニズムに関する研究

日本大学 工学部 学生会員 ○海津 竣也 非会員 木村 海斗  
 五洋建設株式会社 正会員 秋本 哲平 正会員 上野 一彦  
 日本大学 工学部 正会員 仙頭 紀明

## 1. はじめに

我が国は世界有数の地震国であり、発生した地震の多くで液状化被害が報告されている。液状化による被害の対策として浸透固化処理工法が用いられている。森らは、薬液によって安定化された砂の強度特性を明らかにするために、改良砂の強度発現に対するダイレイタンシーによって発生する負の間隙水圧の影響について研究した。その結果、薬液改良土の強度はゲルによる粘着力と砂骨格のダイレイタンシーの影響を受け、ダイレイタンシーによる負圧が強度発現に大きく影響することを指摘している。また、佐々木らの実験では、ゲル（薬液が固化した物体）と薬液改良土の強度の発現にはダイレイタンシーやゲルの剛性などが起因していることを示した。しかし、剛性の小さいゲルが土粒子骨格の変形を拘束することで強度発現が発生しているというメカニズムについて十分に解明されていない。

そこで本研究では、浸透固化改良土内部で発生するゲルの圧力を間隙水圧として測定し、一軸圧縮過程に供試体内部で発生する間隙水圧と強度発現特性の関係に着目した実験を行った。具体的には、異なる粒径の砂を用いて、小型の間隙水圧計を入れた改良供試体を作製し、圧力を直接測定した。その実験結果から、強度発現に及ぼす種々の要因について考察した。

## 2. 実験方法

試験には粒径の異なる3種類の試料（いわき珪砂4号、東北珪砂7、8号）を用いた。物理特性を表-1に示す。平均粒径 $D_{50}$ は、それぞれ0.49mm、0.15mm、0.11mmである。供試体の目標相対密度は $D_r=60\%$ とした。また、薬液のシリカ濃度は6%とし、配合（1L当たり）を表-2に示す。実験ケースを表-3に示す。供試体は、直径5cmの型枠に薬液を6cm程度の高さまで入れて試料を水中落下させた。本実験で用いた小型の間隙水圧計（株式会社センシズ製、HWT-8VC-100KP-50-100-LP）を写真-1に示す。寸法は直径8mm、高さ15mmであり、測定可能範囲は-100～100kN/m<sup>2</sup>である。また、間隙水圧計は供試体中心に位置するように設置した。なお、供試体は3本ずつ作製し、養生期間は14日間とした。養生後、供試体を高さ10cmに整形した。試験は、JISA1216に準拠して実施したが、載荷速度は1%/minに加え、0.04%/min、10%/minとした。

表-1 試料の物理特性

| 試料      | $\rho_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $e_{max}$ | $e_{min}$ | $D_{50}$<br>(mm) | $F_c$<br>(%) | $U_c$ | $U_c'$ |
|---------|----------------------------------|-----------|-----------|------------------|--------------|-------|--------|
| いわき珪砂4号 | 2.557                            | 1.062     | 0.679     | 0.49             | 1.4          | 1.71  | 1.14   |
| 東北珪砂7号  | 2.527                            | 0.998     | 0.568     | 0.15             | 3.8          | 1.50  | 1.04   |
| 東北珪砂8号  | 2.515                            | 1.268     | 0.683     | 0.11             | 20.9         | 2.73  | 1.47   |

表-2 薬液配合表（1Lあたり）

| シリカ濃度<br>(%) | リアクター<br>(g) | 反応剤<br>(g) | 特殊シリカ<br>(g) | 硬化材<br>(g) | 水<br>(g) |
|--------------|--------------|------------|--------------|------------|----------|
| 6            | 11.1         | 37.4       | 120.5        | 92.4       | 797.2    |

表-3 実験ケース

| ケース | 試料      | 載荷速度<br>(%/min) | シリカ濃度<br>(%) | 相対密度 $D_r$<br>(%) | 間隙比   |
|-----|---------|-----------------|--------------|-------------------|-------|
| 1-1 | いわき珪砂4号 | 1               | 6            | 60                | 0.832 |
| 2-1 | 東北珪砂7号  | 1               |              |                   | 0.740 |
| 2-2 |         | 0.04            |              |                   |       |
| 2-3 |         | 10              |              |                   |       |
| 3   | 東北珪砂8号  | 1               |              | -                 | 0.740 |

表-4 一軸圧縮試験結果

| ケース | 試料      | 載荷速度<br>(%/min) | 湿潤密度 $\rho_t$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 乾燥密度 $\rho_d$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 最小間隙水圧<br>$u_{min}$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 一軸圧縮強さ $q_u$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) |
|-----|---------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1   | いわき珪砂4号 | 1               | 1.769                                 | 1.396                                 | -2.13                                       | 29.5                                 |
| 2-1 | 東北珪砂7号  | 1               | 1.848                                 | 1.452                                 | -27.6                                       | 151.0                                |
| 2-2 |         | 0.04            | 1.870                                 | 1.452                                 | -13.4                                       | 78.4                                 |
| 2-3 |         | 10              | 1.861                                 | 1.452                                 | -40.6                                       | 183.6                                |
| 3   | 東北珪砂8号  | 1               | 1.903                                 | 1.445                                 | -14.7                                       | 123.5                                |



写真-1 小型間隙水圧計

### 3. 実験結果

一軸圧縮試験結果を表-4 に示す。応力-ひずみ関係及び間隙水圧-ひずみ関係を図-1 に示す。応力-ひずみ関係はひずみが 2%前後で応力が最大となった。間隙水圧はひずみが1%を過ぎると間隙水圧の増分はマイナスに転じて負圧が発生し、応力のピークとほぼ同時に負圧の絶対値が最大となり、その後クラックの発生とともに負圧が減少して大気圧に戻る傾向を示した。この傾向はすべての試料で確認することができた。なお負圧は、ダイレイタンシーによって発生し、大気圧と負圧の差が拘束圧として働くことで改良砂の強度増加に影響を与えていると考えられる。

平均粒径と一軸圧縮強さの関係を図-2 に示す。合わせて平均粒径と負圧の関係を図-3 に示す。 $D_{50}$  が 0.1mm 付近では約  $150\text{kN/m}^2$  であるが 0.5mm では、一軸圧縮強さが約  $30\text{kN/m}^2$  と約 1/5 となり、粒径が大きくなるにしたがって強度が小さくなる傾向を示した。同様に負圧を見ると、 $D_{50}$  が 0.1mm 付近では約  $-23\text{kN/m}^2$  であるが 0.5mm では、約  $-3\text{kN/m}^2$  となり、約 1/8 程度であった。以上より、粒径が大きくなると一軸圧縮強さ、負圧ともに小さくなる結果が得られた。

載荷速度と一軸圧縮強さ及び間隙水圧の関係を図-4 に示す。載荷速度が 0.04%/min では、一軸圧縮強さが約  $80\text{kN/m}^2$ 、10%/min では、約  $180\text{kN/m}^2$  となり、約 2.3 倍となった。載荷速度が 0.04%/min では、負圧が約  $-15\text{kN/m}^2$ 、10%/min では約  $-40\text{kN/m}^2$  となり、約 2.5 倍となった。以上より、載荷速度が大きいほど一軸圧縮強さ、負圧ともに大きくなる傾向が見られ、図のように対数軸で表すと、載荷速度と一軸圧縮強さ及び間隙水圧の関係は概ね直線で表されることがわかった。

### 4. まとめ

浸透固化改良砂の一軸圧縮試験を行って供試体内部の間隙水圧を測定した結果、以下のことがわかった。

- 1) 供試体内部に小型間隙水圧計を埋め込むことで、一軸圧縮過程における負圧の発生とその消散過程の挙動を確認できた。
- 2) 改良砂はダイレイタンシーの影響で負の間隙水圧が発生し、大気圧と負圧の差が拘束圧として働くことで強度増加に寄与していると考えられる。
- 3)  $D_{50}$  が 0.11～0.49 の範囲では、粒径が大きくなるほど一軸圧縮強さ及び負圧は小さくなった。
- 4) 載荷速度が 10%/min では、0.04%/min と比べて一軸圧縮強さは約 2.3 倍、負圧は約 2.5 倍となり、載荷速度が大きくなるほど一軸圧縮強さ及び負圧が大きくなった。また、それらの関係は、片対数グラフで示すと、直線となった。

### 5. 参考文献

- 1) 森麟・田村昌仁(1986): 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, 第 370 号, III-5 pp.113~122.
- 2) 佐々木隆光・末政直晃・島田俊介, (2018): 薬液注入工法における非アルカリ系注入材の主剤が固化特性に及ぼす影響, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.74, No.1, 92-105.

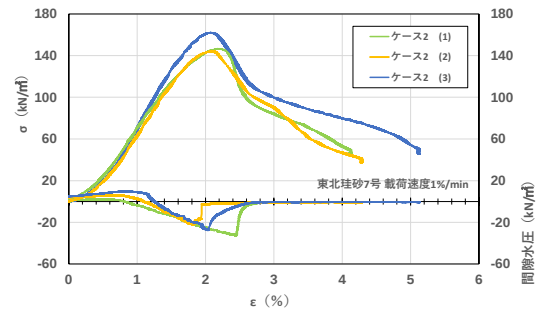


図-1 ひずみと応力及び間隙水圧の関係の例

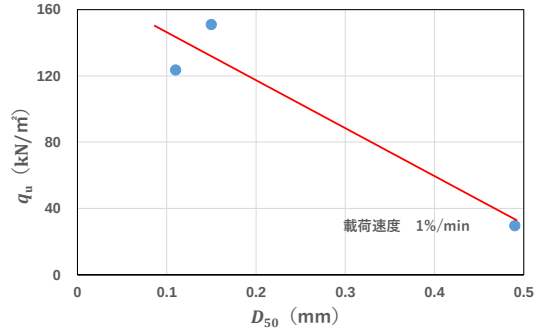


図-2  $D_{50}$  と  $q_u$  の関係

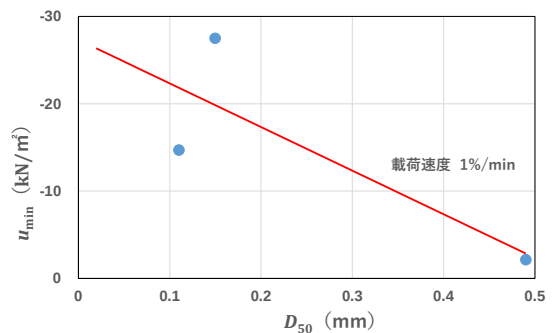


図-3  $D_{50}$  と  $u_{\min}$  の関係

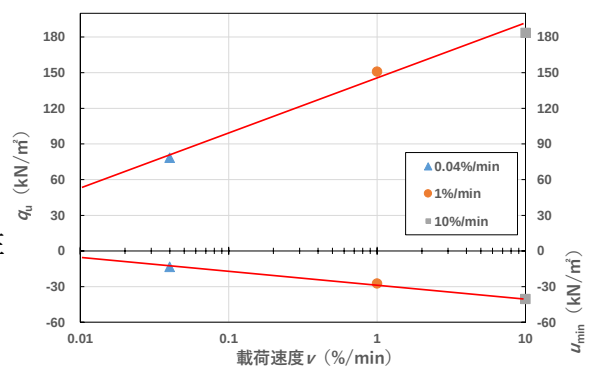


図-4 載荷速度と  $q_u$  及び  $u_{\min}$  の関係