

# 微粉末スラグセメント注入材を用いた地盤改良工法の開発

東亜建設工業株式会社 正会員 大野 康年  
同 上 正会員 佐藤 孝次  
同 上 正会員 ○村松 敬哲

## 1. はじめに

著者らは、液状化対策を目的とした薬液注入工法の新しい技術として、微粉末スラグセメント注入材を用いた地盤改良技術の開発に取り組んでいる。本技術は、従来の特殊シリカ液による薬液注入工法と比較して、1) 高強度の改良強度が得られる、2) 礫質地盤の改良が可能となる等、広範な適用範囲が考えられる技術である。

本報告では、室内にて作製した本注入材による固結改良砂の変形・強度特性を示すとともに大型土槽を用いた注入実験の結果について報告する。

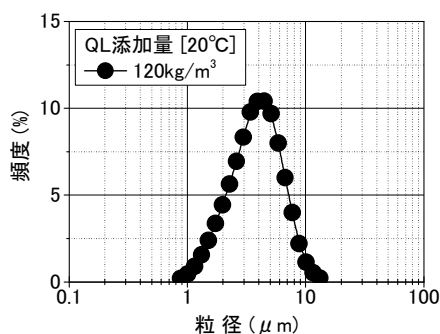
## 2. 注入材の概要

本注入材<sup>1),2)</sup>は、微粉末スラグセメントと分散剤より構成されている。微粉末スラグセメントは、高分散性と高浸透性を実現するためにブレン比表面積  $9000\text{cm}^2/\text{g}$  以上に分級した微粉末スラグセメントを用い、微粉末スラグセメント中の成分を調整することにより凝結開始時間や発現強度をコントロール可能としている。分散剤は、スラグセメントの微粉末化に伴いスラグセメント粒子の凝集が激しくなるため凝集抑制のためポリカルボン酸系の分散剤を使用している。また、一般的なセメントと同様にセメント水和物が生成されることで硬化する。表—1 に代表的な配合を示す。

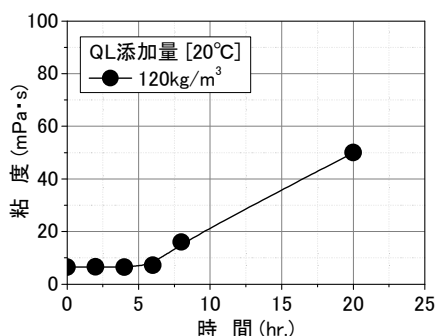
本注入材の粒度分布、粘度～時間関係およびブリージング率～時間関係を図—1、図—2 および図—3 に示す。粒度分布はレーザー回折式粒度分布測定装置を用い、本注入材と水との混練り後、エタノールを溶媒として測定した。粘度～時間関係は B 型回転粘度計を用い、 $20^\circ\text{C}$  の温度にて練り上がり直後から所定の時間毎に粘度の測定を行った。ブリージング率～時間関係はプレパックドコンクリートの注入モルタルのブリージング率および膨張率試験方法（ポリエチレン袋方法）[JSCCE-F522-1999]に従い、 $20^\circ\text{C}$  にて練上がり直後から所定の時間毎にブリージング率の測定を行った。本注入材のメジアン径は、 $3.6\mu\text{m}$  であり、 $15\mu\text{m}$  以上のセメント粒子は存在しない。粘度は、初期で  $5\text{mPa}\cdot\text{s}$  程度であり、5 時間付近までは粘度はほぼ一定で、5～6 時間から上昇する。ブリージング率は、初期から 6 時間まで全て 5% 以下であり、ブリージングの極めて少ない材料である。これはスラグセメントの微粉末化とその成分調整およびポリカルボン酸系分散剤の添加による効果によるものである。

表—1 注入材の配合例

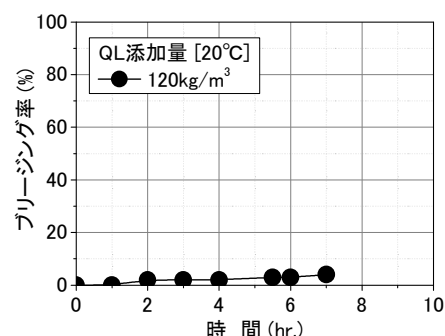
| 配 合   | 注入材<br>(kg) | 水<br>(kg) |
|-------|-------------|-----------|
| 100kg | 100         | 966       |
| 120kg | 120         | 959       |
| 140kg | 140         | 952       |
| 160kg | 160         | 945       |



図—1 粒度分布



図—2 粘度～時間関係



図—3 ブリージング率～時間関係

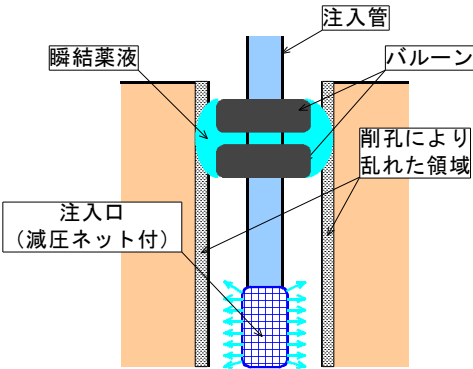
キーワード 薬液注入工法、微粉末スラグセメント、液状化対策

連絡先 〒163-1031 東京都新宿区西新宿 3-7-1 新宿パークタワー31F TEL 03-6757-3861

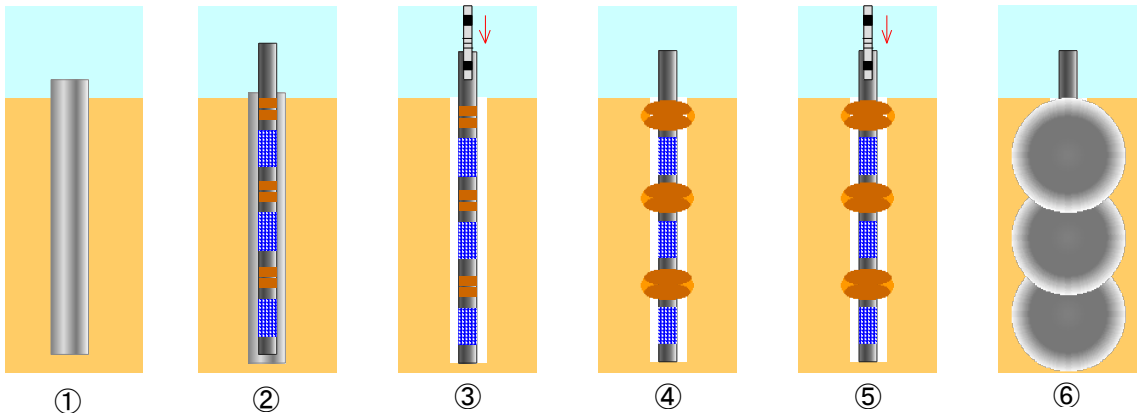
3. 注入方法の概要

本工法には、注入材の逸走防止性能に優れた薬液注入工法<sup>3)</sup>を採用している。同工法は、図—4 に示すように注入口の上部に設置された瞬結薬液とゴム製バルーンによる薬液逸走防止装置により、削孔軌道からの薬液逸走がほとんどなく、所定深度に所定量の薬液注入が可能である。同工法に使用する瞬結薬液は、硬化時間が 20 秒以内、固結強度が  $q_u=300\text{kN/m}^2$  程度のセメント系瞬結材である。

注入方法の施工手順を図—5 に示す。①ケーシングにて所定の深度まで削孔する。②注入外管をケーシング内に建て込み、ケーシングを引き抜く。③ダブルパッカー付きのバルーン用内管を注入外管内に挿入し、所定位置にて固定する。④バルーン用内管から瞬結薬液を注入して二つのバルーンを膨張するとともにバルーン間の吐出口からバルーンと地山の境界部等に瞬結薬液を充填する。なお、地盤性状等によっては孔壁防護材を充填する。⑤ダブルパッカー付きの薬液注入用内管を注入外管内に挿入し、所定位置にて固定する。⑥注入圧を低くして薬液を地盤内に注入し、改良体を形成する。



図—4 注入管構造図<sup>3)</sup>



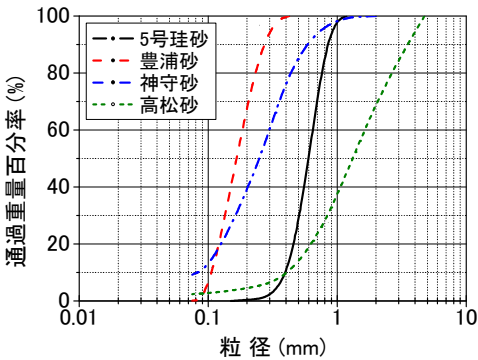
図—5 施工手順<sup>3)</sup>

4. 改良地盤の変形・強度特性

本注入材を用いて改良された改良地盤の変形・強度特性を明らかにするため、室内にて作製した改良砂供試体を用いて一軸圧縮試験、圧密排水三軸圧縮試験(CD)、動的変形試験、繰返し三軸試験を実施した。実験に使用した改良砂供試体は、5号珪砂、豊浦砂、神守砂および高松砂を用い、薬液注入による安定処理土の供試体作製方法(JGS0831-2009)に従い作製した。砂試料の粒径加積曲線および物理特性を図—6 および表—2 に示す。実験は、注入材の配合を変えて作製した改良砂供試体について実施し、動的変形試験は、 $100\text{kN/m}^2$  の拘束圧にて等方圧密した後、一軸圧縮強さの 1/2 の相当する初期せん断荷重を载荷した後、非排水条件下で繰返し荷重を作用させた。また、軸ひずみの測定は LDT(局所変位計)を用いて実施した。

(1)一軸圧縮試験結果

試験は、100,120,140 および 160kg の 4 種類の異なる配合にて改良砂を作製し、一軸圧縮試験を実施した。



図—6 砂試料の粒径加積曲線

表—2 砂試料の物理特性

| 使用砂                        | 5号珪砂 | 豊浦砂  | 神守砂  | 高松砂  |
|----------------------------|------|------|------|------|
| 土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.64 | 2.63 | 2.64 | 2.65 |
| 平均粒径 (mm)                  | 0.60 | 0.17 | 0.26 | 1.32 |
| 細粒分含有率 (%)                 | 0.2  | 0.2  | 9.3  | 2.4  |
| 均等係数                       | 1.33 | 1.40 | 3.54 | 3.49 |

改良砂作製時の砂試料の相対密度は、改良5号珪砂、改良豊浦砂、改良神守砂および改良高松砂にて  $Dr=60,40,65$  および40%とした。また、試験時の材令は28日とした。

改良砂の一軸圧縮強さ  $q_u$  と注入材添加量および変形係数  $E_{50}$  の関係を図—7 および図—8 に示す。一軸圧縮強さは、 $q_u=250 \sim 1500 \text{ kN/m}^2$  の範囲に分布し、一軸圧縮強さは注入材の添加量に比例して増加する。また、改良砂の一軸圧縮強さと変形係数には比例関係があり、 $E_{50}=250q_u$  で近似される。

## (2)圧密排水三軸圧縮試験(CD)結果

試験は、高松砂について100,120,140 および160kgの4種類の異なる配合にて改良砂を作製し、圧密排水三軸試験(CD)を実施した。試験条件を表—3 に示す。

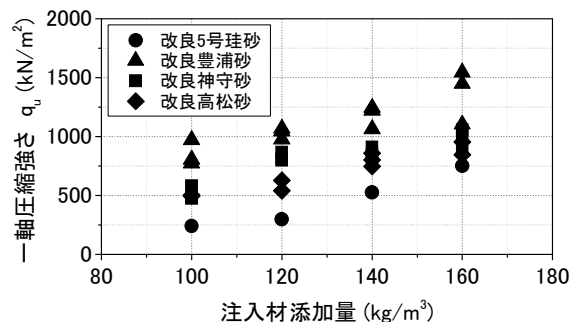
内部摩擦角  $\phi_d$ 、粘着力  $c_d$  の一覧を表—4 を示し、高松砂および改良高松砂(100kg 配合)のモールの応力円を図—9 に示す。改良により内部摩擦角  $\phi_d$  の変化はほとんど見られないが、改良砂の粘着力  $c_d$  は、 $78 \sim 158 \text{ kN/m}^2$  増加している。これは水ガラス系の特殊シリカ液を用いた改良砂<sup>5)</sup>と同様に、改良により在来土の元来所有している強度を低下させることなく、粘着力が付加されたことを示している。また、改良砂の粘着力は、一軸圧縮強さと同様に注入材の添加量に比例して増加する。

表—3 三軸圧縮試験(CD)の試験条件

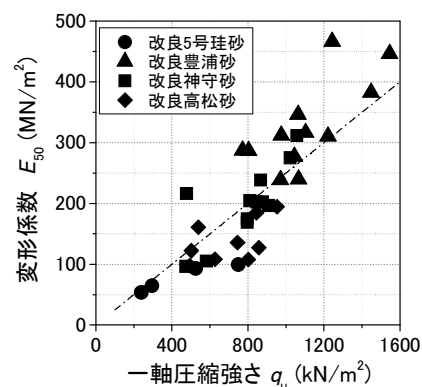
| 試料                        | 高松砂   |       |       | 改良高松砂   |       |       |         |       |       |         |       |       |         |       |       |
|---------------------------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| 配合                        | -     |       |       | 100kg配合 |       |       | 120kg配合 |       |       | 140kg配合 |       |       | 160kg配合 |       |       |
| $K_0$                     | 1.0   |       |       | 1.0     |       |       | 1.0     |       |       | 1.0     |       |       | 1.0     |       |       |
| 有効拘束圧 ( $\text{kN/m}^2$ ) | 50    | 100   | 200   | 300     | 600   | 1200  | 300     | 600   | 1200  | 300     | 600   | 1200  | 300     | 600   | 1200  |
| ひずみ速度( $\%/min$ )         | 0.10  |       |       | 0.10    |       |       | 0.10    |       |       | 0.10    |       |       | 0.10    |       |       |
| 初期間隙比 $e_0$               | 0.588 | 0.592 | 0.588 | 0.605   | 0.615 | 0.660 | 0.612   | 0.619 | 0.602 | 0.622   | 0.620 | 0.590 | 0.627   | 0.596 | 0.591 |
| 材令(日)                     | -     |       |       | 28      |       |       | 28      |       |       | 28      |       |       | 28      |       |       |

表—4 内部摩擦角  $\phi_d$  と粘着力  $c_d$

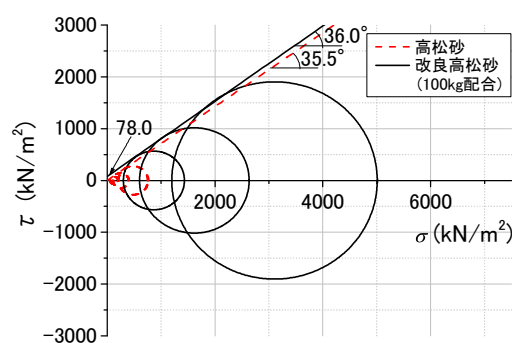
| 試料名   |         | 内部摩擦角 $\phi_d$ (degree) | 粘着力 $c_d$ ( $\text{kN/m}^2$ ) |
|-------|---------|-------------------------|-------------------------------|
| 高松砂   |         | 35.5                    | 0                             |
| 改良高松砂 | 100kg配合 | 36.0                    | 78                            |
|       | 120kg配合 | 36.2                    | 90                            |
|       | 140kg配合 | 36.0                    | 125                           |
|       | 160kg配合 | 35.6                    | 158                           |



図—7  $q_u \sim$  注入材添加量関係



図—8  $q_u \sim E_{50}$  関係



図—9 モールの応力円

## (3)動的変形試験結果

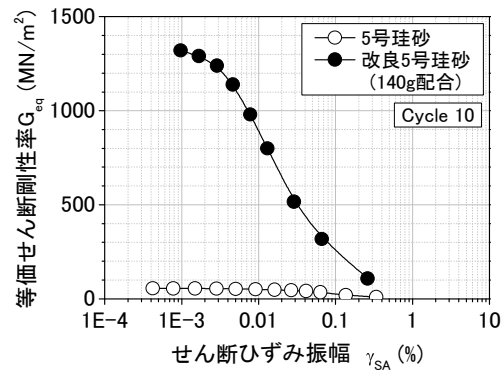
試験は、5号珪砂について100,120,140 および160kgの4種類の異なる配合にて改良砂を作製し、動的変形試験を実施した。試験条件を表—5 に示す。

図—10(a), (b)に5号珪砂と140kg 配合の改良5号珪砂の等価せん断剛性率  $G_{eq}$  ～片振幅せん断ひずみ  $\gamma_{sa}$  関係、等価せん断剛性率を初期値で正規化した等価せん断剛性率比  $G_{eq}/G_{eq0}$

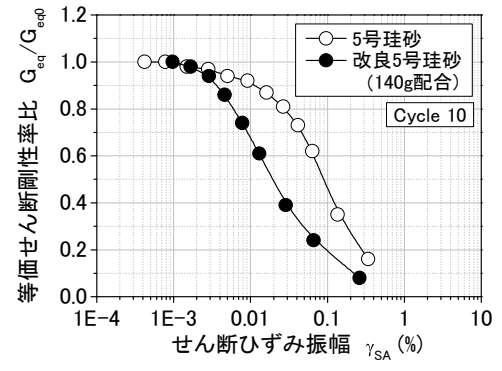
表—5 動的変形試験の試験条件

| 試料          | 5号珪砂  | 改良5号珪砂  |         |         |         |
|-------------|-------|---------|---------|---------|---------|
| 配合          | -     | 100kg配合 | 120kg配合 | 140kg配合 | 160kg配合 |
| 有効拘束圧 (kPa) | 100   | 100     | 100     | 100     | 100     |
| 載荷周波数 (Hz)  | 0.1   | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     |
| 初期間隙比 $e$   | 0.597 | 0.659   | 0.635   | 0.600   | 0.622   |
| 養生日数(日)     | -     | 28      |         |         |         |

～片振幅せん断ひずみ  $\gamma_{sa}$  関係を示す。改良砂の剛性率は、未改良砂より著しく大きい。ただし、図—10(b)に示すように改良砂の剛性率は未改良砂と比較してせん断ひずみ振幅が大きくなると剛性率の低下の度合いが大きくなる。これは、事前混合処理土<sup>6)</sup>等のセメント系改良砂と同様に改良砂が脆性特性を有することによる。



図—10(a)  $G_{eq} \sim \gamma_{sa}$  関係



図—10(b)  $G_{eq}/G_{eq0} \sim \gamma_{sa}$

(4) 繰返し三軸試験結果

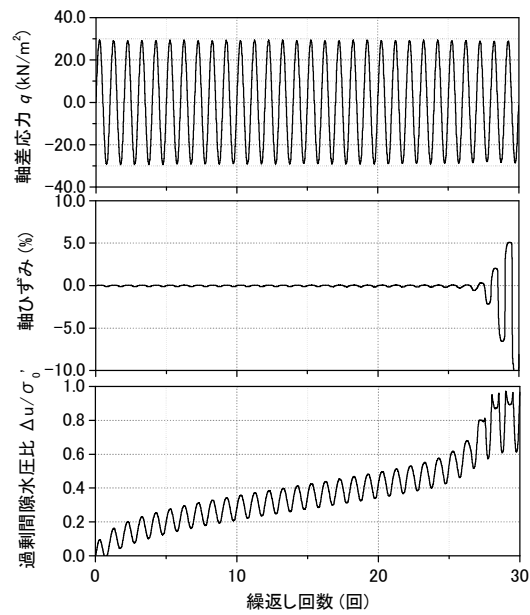
試験は、高松砂と 100kg 配合の改良高松砂について繰返し三軸試験を実施した。試験条件を表—6 に示す。

図—11(a), (b) に高松砂，改良高松砂 (100kg 配合)の軸差応力  $q$ ，軸ひずみ  $\varepsilon_a$ ，過剰間隙水圧比  $\Delta u/\sigma'_0 \sim$  繰返し回数関係の代表例を示す。高松砂の繰返し応力振幅比は

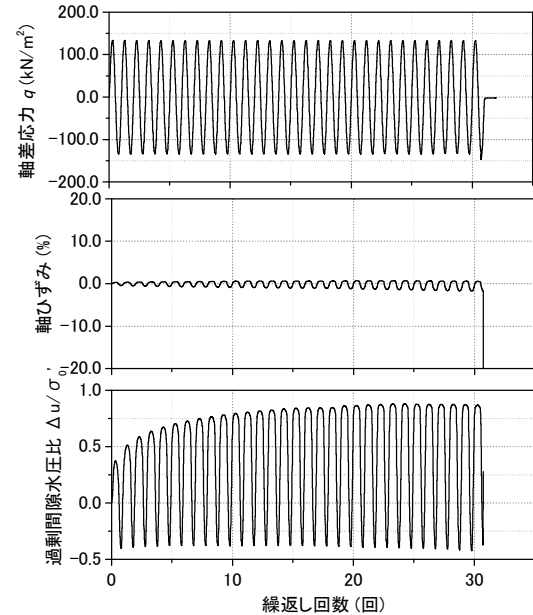
0.143，改良高松砂(100kg 配合)の繰返し応力振幅比は 0.669 である。未改良砂は，繰返しの初期には軸ひずみの発生量は微小であるが，過剰間隙水圧比が 1.0 近くになると圧縮伸張側にて急増する。また，過剰間隙水圧比は繰返しを重ねる毎に増加し，液状化に至る。一方，改良砂は，繰返しの初期には軸ひずみの発生量は微小であるが，繰返し回数の増加に伴い，伸張方向に軸ひずみが発生し，破壊に至っている。また，過剰間隙水圧比は破壊時においても 1.0 以下で，液状化には至っていない。このように，改良砂は液状化による破壊ではなく，コンクリートのような引張りによる破壊が生じている。また，このような繰返し载荷時の挙動は，事前混合処理土<sup>6)</sup>等のセメント系改良砂と同様である。

表—6 繰返し三軸試験の試験条件

| 試料                                     | 高松砂   |       |       | 改良高松砂<br>(100kg配合) |       |       |
|----------------------------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|                                        | 1.0   | 1.0   | 1.0   | 1.0                | 1.0   | 1.0   |
| $K_0$                                  | 1.0   | 1.0   | 1.0   | 1.0                | 1.0   | 1.0   |
| 有効拘束圧 $\sigma'_a$ (kN/m <sup>2</sup> ) | 100   | 100   | 100   | 100                | 100   | 100   |
| 繰返し応力振幅比 $q/2\sigma'_0$                | 0.196 | 0.143 | 0.159 | 0.739              | 0.643 | 0.669 |
| 载荷周波数 (Hz)                             | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.1                | 0.1   | 0.1   |
| 初期間隙比 $e_0$                            | 0.630 | 0.627 | 0.627 | 0.632              | 0.625 | 0.602 |
| 材令 (日)                                 | —     | —     | —     | 28                 | 28    | 28    |



図—11(a) 高松砂の繰返し三軸試験結果

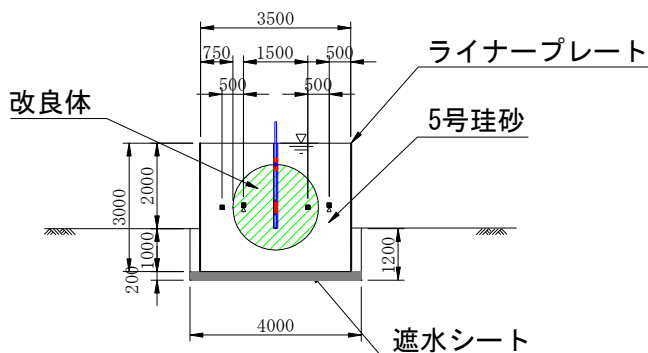


図—11(b) 改良高松砂の繰返し三軸試験結果

## 5. 大型土槽注入実験

本工法による改良体の出来形を確認するため、大型土槽を用いた注入実験を実施した。また、本工法による周辺への影響を把握する目的で、注入時の地盤へ作用する圧力を測定した。

実験に使用した大型土槽は、内径 3.5m、高さ 3.0m の円筒形土槽である。図—12 に土槽断面図を示し、写真—1 に大型土槽の全景を示す。土槽地盤の作製は、5 号珪砂を用い、厚さ 30cm を一層として 10 層に分けて投入敷均した後、土槽下部に設置した水管から水を注入し、全体をゆっくり飽和させた。土槽地盤の間隙比は、 $e=0.719$  である。

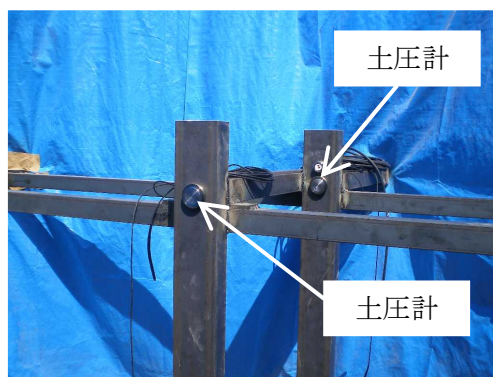
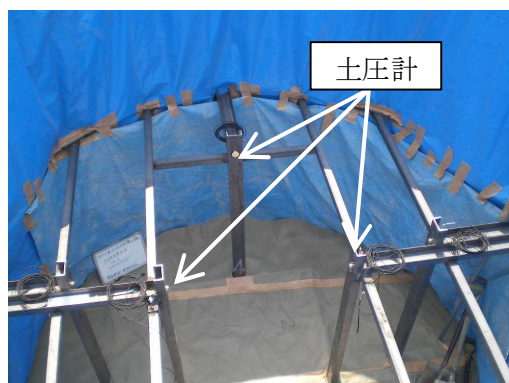


図—12 大型土槽断面図



写真—1 大型土槽全景

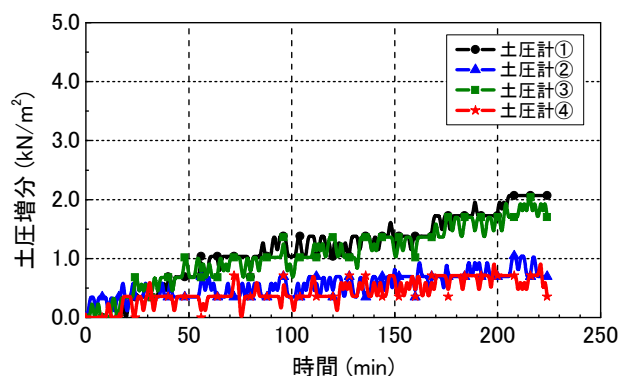
実験は、GL-1.5m 深度に注入口を設置し、注入口上部に瞬結材によるパッカーを形成した後、本注入材を注入した。注入材の配合は、230kg 配合である。土槽内には土圧計(株東京測器研究所製 KDF-200KPA)を 4 個、注入口から 0.5m, 1.0m 位置に設置した(写真—2 参照)。薬液の注入速度は、毎分 13 リットルにて行い、注入量は 1750 リットルとした。



写真—2 土圧計設置状況

図—13 に土圧増分と時間関係を示す。土圧増分は注入前の初期土圧をゼロとし、注入による土圧の増分を示す。

初期値からの土圧の増分量は、注入に伴い、土圧は徐々に増加する。また、土圧計の設置方向により若干異なるが、最大で  $0.5 \sim 2 \text{ kN/m}^2$  程度と本注入材の注入により地盤に作用する圧力は非常に低いことがわかる。



図—13 土圧増分～時間関係



写真—3 に形成された改良体の発掘写真を示す。

改良体の形状は、ほぼ球状を示し、その大きさは、縦 2.2m、横 1.85m であった。一方、土槽地盤の間隙比  $e=0.719$  (間隙率  $n=41.8\%$ )、注入材の注入量  $Q=1750$  リットルおよび充填率 1.0 の注入条件から改良体の計画寸法を算定すると、 $\phi 2.0\text{m}$  程度となる。したがって、本土槽実験にて得られた改良体は計画寸法を満足していることがわかる。なお、写真—3 の改良体上部に見られる固結体は、本注入工法のパルーンと瞬結薬液によって形成された逸走防止層である。



写真—3 改良体全景

## 6. まとめ

本文では、微粉末スラグセメント注入材を用いた地盤改良技術の概要と改良地盤の変形・強度特性および大型土槽実験結果について示した。

本技術は、従来の特殊シリカ液による薬液注入工法と比較して高強度の改良が可能なことから、液状化対策の他、地盤の側方流動対策等、広範な適用範囲が考えられる技術である。今後は、地盤種別毎の適用限界についての詳細検討を実施していきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 西野英哉，小野寺浩，大野康年(2010)，スラグ微粉末を主体としたセメント系注入材の開発—注入材の基本特性—，土木学会第 65 回年次学術講演会 VI-138.
- 2) 大野康年，西野英哉，小野寺浩(2010)，スラグ微粉末を主体としたセメント系注入材の開発—地盤への浸透性能—，土木学会第 65 回年次学術講演会 VI-139.
- 3) 大野康年(2011)，薬液の逸走防止性能を向上させた薬液注入固化工法，地盤工学会誌，平成 23 年 3 月号.
- 4) 大野康年，村松敬哲(2012)，スラグ微粉末系注入材による改良砂の変形・強度特性，第 47 回地盤工学研究発表会.
- 5) 岡二三生，小高猛司，西松範介，高戸順一，田久勉，大野康年(2002)，特殊シリカを用いた浸透注入改良砂の液状化強度特性，土木学会関西支部年次学術講演会集.
- 6) 財団法人沿岸技術研究センター(2008)，事前混合処理工法 技術マニュアル（改訂版）.