

# 東京国際空港における浸透固化処理工法を用いた地盤改良について

関東地方整備局 東京空港整備事務所 第二工務課 岩瀬美奈子

キーワード：浸透固化処理工法、既設構造物、誘導路、液状化対策

## 1. はじめに

浸透固化処理工法とは、液状化が予測される砂質地盤に対して、溶液型の恒久薬液を低圧力で浸透注入することにより地盤を低強度固化し、液状化を防止する地盤改良工法<sup>1)</sup>である。

この工法の特徴としては、薬液を低圧浸透させるため、既設構造物にほとんど影響を与えないこと、上部構造物に与える隆起などの影響がほとんどないことなどが挙げられる。

東京国際空港においては、今後、誘導路下に既設構造物が存在する箇所の液状化対策に採用する計画である。そこで、東京国際空港における浸透固化処理工法の適用性について、試験施工を行い確認した結果を報告する。



写真-1 施工位置

## 2. 試験施工の目的

東京国際空港においては、供用中の誘導路において、今後この浸透固化処理工法を採用した液状化対策を計画している。

しかしながら、浸透固化処理工法の適用範囲は原則、細粒分含有率  $F_c$  40%であり、建設発生土等により埋め立てられた人工地盤では  $F_c$  が40%を超える層が部分的に存在する場合があります、その場合にはボーリング調査を密に行うなど土層構成を正確に把握し、注入孔間隔、ステップ長、注入速度などを適切に設定することにより工法の適用が可能<sup>1)</sup>となる。

実際に、施工対象となる地盤は、建設発生土等により埋め立てられた人工地盤であり、事前の土質調査にお

いて細粒分含有率の高い層( $F_c=40\sim90\%$ )や既設の固化盤層が確認されており、過年度に施工した際に不具合が生じた。

よって、今後の本格施工に向けて、細粒分含有率のばらつきが非常に大きい人工地盤における浸透固化処理工法の適用性を把握するために試験施工を行うこととした。

また、適切な施工計画及び施工管理により、誘導路に舗装変状等の有害な影響を与えることなく、浸透固化処理工法を採用した液状化対策工が施工できることを確認することも本試験工事の目的である。

### 3. 試験施工において実施した対策

#### 3-1 試験施工において留意すべき事項

##### 3-1-1 課題の抽出

液状化対策工の対象地盤には部分的に細粒分含有率の高い層や固化盤層が確認されており、このような地盤に薬液を注入した場合、注入により押し出された地下水は、細粒分含有率の高い層へ到達すると、周囲の細粒分含有率の低い、水を通し易い層を通して上昇しようとするため、土中に割裂や水みちができる可能性がある。その後、地下水が上昇すると、既設舗装版に浸入し、舗装に変状を与えることが想定される。また、土中に割裂ができてしまうと薬液が割裂から抜けてしまい、適切な改良ができない可能性がある。

また、写真-1 に示す施工位置は現在供用中の施設であるため、埋設管等の既設構造物へ影響を与えることはもちろんだが、誘導路の舗装の変状は航空機の運航に支障を来すことになるため許されない。

したがって、以下の2点の課題を抽出した。

- ・ 部分的に細粒分含有率の高い層や固化盤層が確認されている地盤においても改良できるか。
- ・ 供用中の空港施設へ変状を与えることなく改良できるか。

##### 3-1-2 舗装に変状を来す要因の想定

土質性状に応じた注入諸元(注入率、注入量、注入速度、注入圧力)による注入計画や管理が行われなかった場合は、以下に示すような過程で舗装面の変状が発生することが想定される(図-1)。

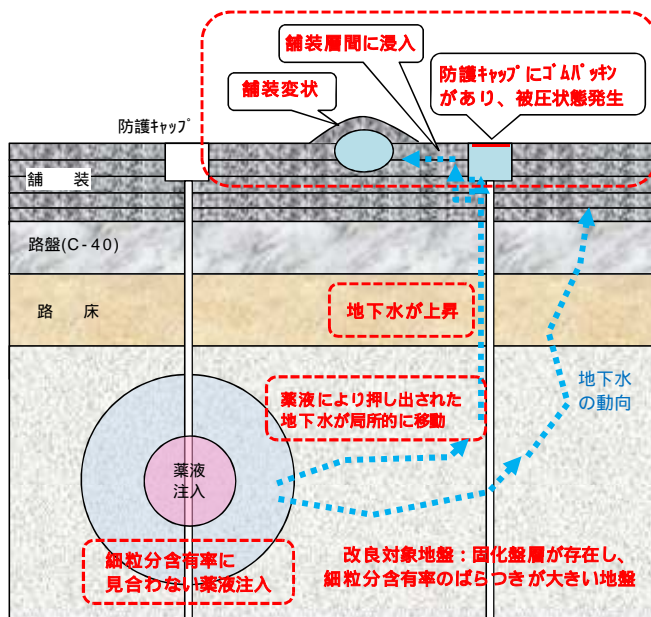


図-1 舗装版変状要因

薬液の注入により、押し出された地下水が上昇する。

押し出された地下水が、細粒分含有率の高い土層に到達すると周囲の細粒分含有率の低い土中に割裂・水通ができる可能性がある。

不均一な土層中の地下水は、地盤の弱い部分を通り、削孔部に沿って舗装版まで上昇する。

舗装版まで上昇した地下水は、薬液注入孔の防護キャップ(ゴムパッキン付)により被圧状態となり、舗装層間に浸入する。

舗装表面の盛り上がりなどの変状が発生する。

### 3-2 注入諸元の設定

#### 3-2-1 事前土質調査

浸透固化処理工法は、土質特性による注入諸元への影響が大きいいため、詳細な土質特性の把握が重要である。また、調査孔の間隔は 10m~50m 程度に配置し、調査孔 1 本の代表面積は 100m<sup>2</sup>~2,500m<sup>2</sup> 程度とするのが一般的である<sup>1)</sup>。

しかしながら、今回施工の対象とする範囲は建設発生土等による埋立地であり、土層の不均一が見込まれていることから、既設固化盤層や細粒分含有率の高い層を把握するため、簡易サウンディングによる土質調査を約 6m 間隔(改良箇所 4 箇所)に 1 箇所程度の間隔)で実施した。

その結果、土性のばらつきの確認および既設固化盤層の位置が把握できたため、改良施工前に想定土層の見直しを行い、土層に見合った注入諸元(注入速度、注入量)の再設定および固化盤層の全周囲を適切に改良できるよう、改良計画を行った。

#### 3-2-2 細粒分含有率に応じた注入速度および注入圧力の上限值の設定

注入速度は大きいほど経済的な施工が可能であるが、注入速度が過大になると地盤に亀裂が生じ、注入形態が浸透注入から割裂注入になる。この場合、割裂面に薬液が集中して流れるため、砂の間隙を均質に改良することができなくなるため、施工実績や原位置における限界注入速度試験などから適切な注入速度を設定する必要がある<sup>1)</sup>。

また、細粒分含有率  $F_c < 20\%$  以上の地盤へ適用する場合は、地盤の透水係数等を考慮の上、注入速度を適切に設定する必要がある<sup>1)</sup>。そこで、過年度の施工により得られた注入速度  $Q$  と間隙中に発生する圧力  $P$  の関係を用いて、土中に割裂・水通ができない注入速度  $Q$  を設定した。

まず、土中に割裂・水通を発生させないための許容圧力  $P_a$  を設定し、細粒分含有率に応じた注入速度の設定を行った。

土中に割裂・水通を発生させない許容圧力

$$P_a = m \times P_0 + t_a \cdot \dots (1) \text{式}^{2) 3)}$$

$P_a$  : 割裂・水通を発生させない許容圧力

$m$  : 定数 (森の実験値から  $m = 2$ )

$P_0$  : 全応力

$t_a$  : 土の見かけの引張応力

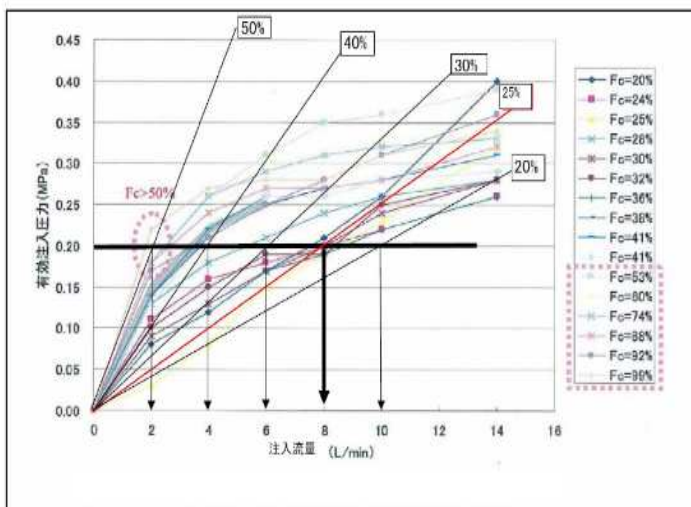


図-2 許容圧力  $P_a$  と  $P-Q$  曲線

計算から得られた許容圧力  $P_a$  は 0.2Mpa であり、この値を過年度の施工から得られている  $P-Q$  曲線(図-2)に重ね、細粒分含有率に応じた薬液注入速度  $Q$  を設定した。設定した注入速度は表-1の通りである。

表-1 細粒分含有率に応じた注入速度の設定

| 細粒分含有率 $F_c$        | 注入速度    |
|---------------------|---------|
| $F_c < 20\%$        | 10ℓ/min |
| $20\% < F_c < 40\%$ | 8ℓ/min  |
| $F_c > 40\%$        | 4ℓ/min  |



次に、施工前に限界注入速度試験を実施し、注入圧力の上限值の設定を行った。限界注入速度試験を行うと、注入速度  $q_p$  と有効注入圧力  $P$  の関係が得られる。注入速度を上げると注入圧力は徐々に増加していくが、ある注入速度を超えると注入圧力が低下する。これは注入圧によって地盤内に割裂が生じ、薬液の浸透面が増え、注入圧が低下したことを示している。この点を限界注入速度とし、この注入速度に対する注入圧力を上限値を設定し、薬液注入時の圧力管理を行うこととした。

本試験施工においては、限界注入速度試験を「固化盤層の上層」「固化盤層の下層」各々について、細粒分含有率区分毎に実施し、過去の実績も考慮して、土中に割裂水通を発生させないための注入圧力の上限值を細粒分含有率区分毎に設定した(表-2)。

表-2 設定した注入圧力上限値

【固化盤層より上層】

| 土層区分      | 計画注入速度 | 試験箇所     | 管内抵抗:①  | 有効注入圧:② | 注入圧力上限値 + |
|-----------|--------|----------|---------|---------|-----------|
| Fc>40%    | 4ℓ/min | f-16-6段目 | 0.02MPa | 0.2MPa  | 0.2MPa    |
| 20<Fc≤40% | 8ℓ/min | m-20-8段目 | 0.08MPa | 0.2MPa  | 0.2MPa    |

【固化盤層より下層】

| 土層区分   | 計画注入速度 | 試験箇所                | 管内抵抗:①  | 有効注入圧:② | 注入圧力上限値 + |
|--------|--------|---------------------|---------|---------|-----------|
| Fc>40% | 4ℓ/min | f-16-2段目<br>k-8-2段目 | 0.02MPa | 0.2MPa  | 0.2MPa    |

なお、施工中は、集中管理装置を使用し、注入量、注入速度および注入圧力を管理制御している。そのため、施工途中で注入圧力の増加が見られた場合、注入速度を低減させ土中の割裂水みちの発生を防止することができる。また、改良体ごとに注入速度、注入圧力の動向及び注入量をチャート紙に記録しており、注入完了後の出来形を確認することが可能である。

3-3 施工方法

3-3-1 防護キャップの改良

防護キャップの蓋部に  $\phi=8\text{mm}$  の圧抜き孔(写真-2)を設けた。これにより、上昇した地下水が防護キャップにより舗装版内で被圧状態になることを防止し、舗装層間へ水が浸入することを防ぐことができる。また、誘導路に防護キャップより地下水が浸出しないことを目的として防護キャップ内に取り付けていたゴムパッキンは、取り付けないことにした。

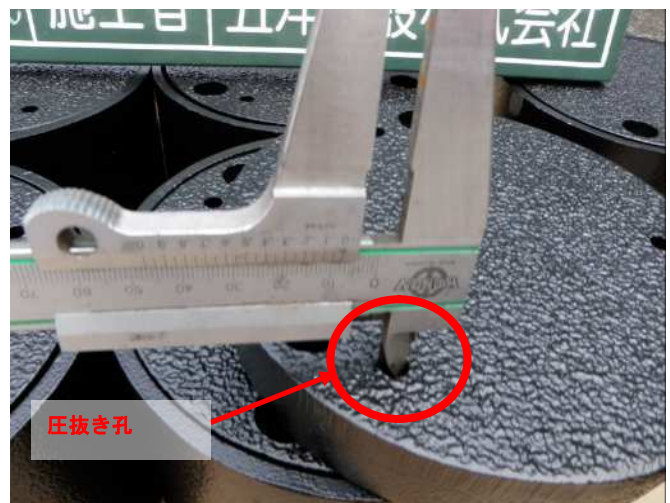


写真-2 防護キャップ圧抜き孔

### 3-3-2 注入順序

固化盤層は不透水層のため、固化盤よりも下層に注入する場合は上昇した地下水が固化盤層下に滞留し、水圧上昇を招くことが想定される。よって、この水圧上昇を防ぐために、固化盤層の下層の施工の際は注入箇所が隣接しないよう、分散施工(図-3)とした。また、固化盤層より上層に関しては、舗装版下に地下水が直接影響を与えるため、地下水の滞留を防ぐために分散施工とするが、さらに、緑地帯へ向かっての階段状の施工(図-4)とし、押し出された地下水を緑地帯へ誘導するような注入順序にて施工を行った。

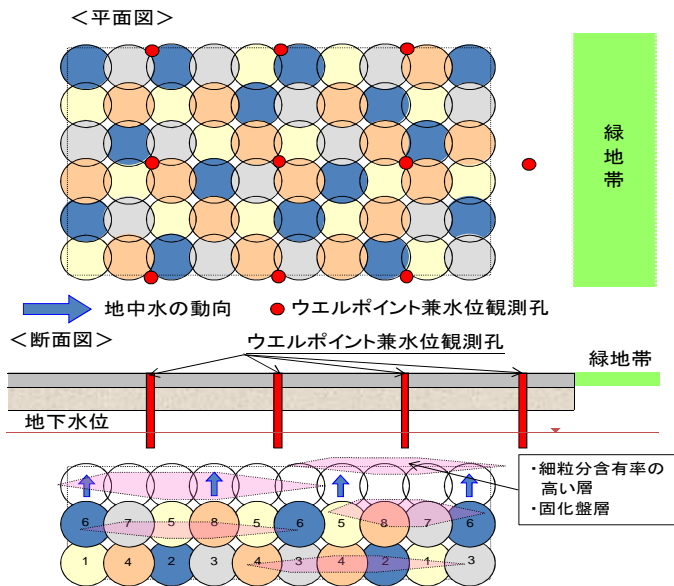


図-3 分散施工イメージ図  
(固化盤層より下層)

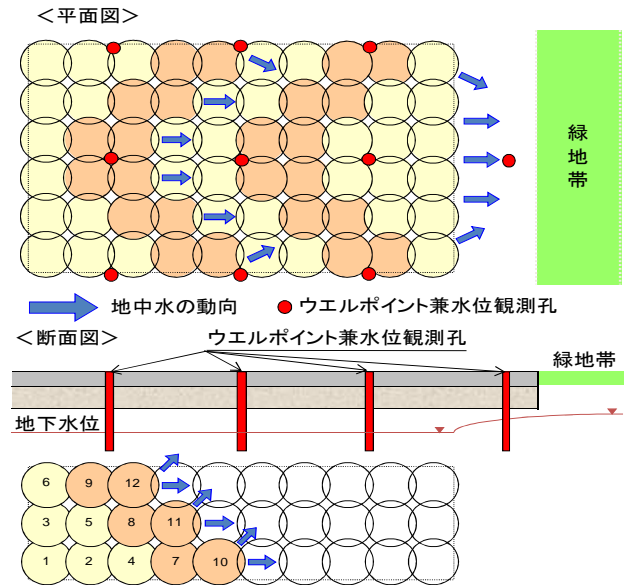


図-4 階段状施工イメージ図  
(固化盤層より上層：分散+階段状)

### 3-4 施工管理方法

#### 3-4-1 ウェルポイント稼働および地下水位・pH 観測

ウェルポイントは地下水位の上昇を抑える効果があるため、土中の間隙水圧を低減し、舗装面への圧力上昇を抑えるための手法として有効と考えられる。よって、注入薬液分に相当する地下水を揚水し、地下水位の上昇を抑えるためにウェルポイントを実施した。

ウェルポイントの設置間隔は4.5m(薬液注入間隔1.5mの3倍程度)とし、薬液注入時に稼働した。なお、ウェルポイント稼働箇所は、薬液注入箇所の近傍に選定した(図-5)。

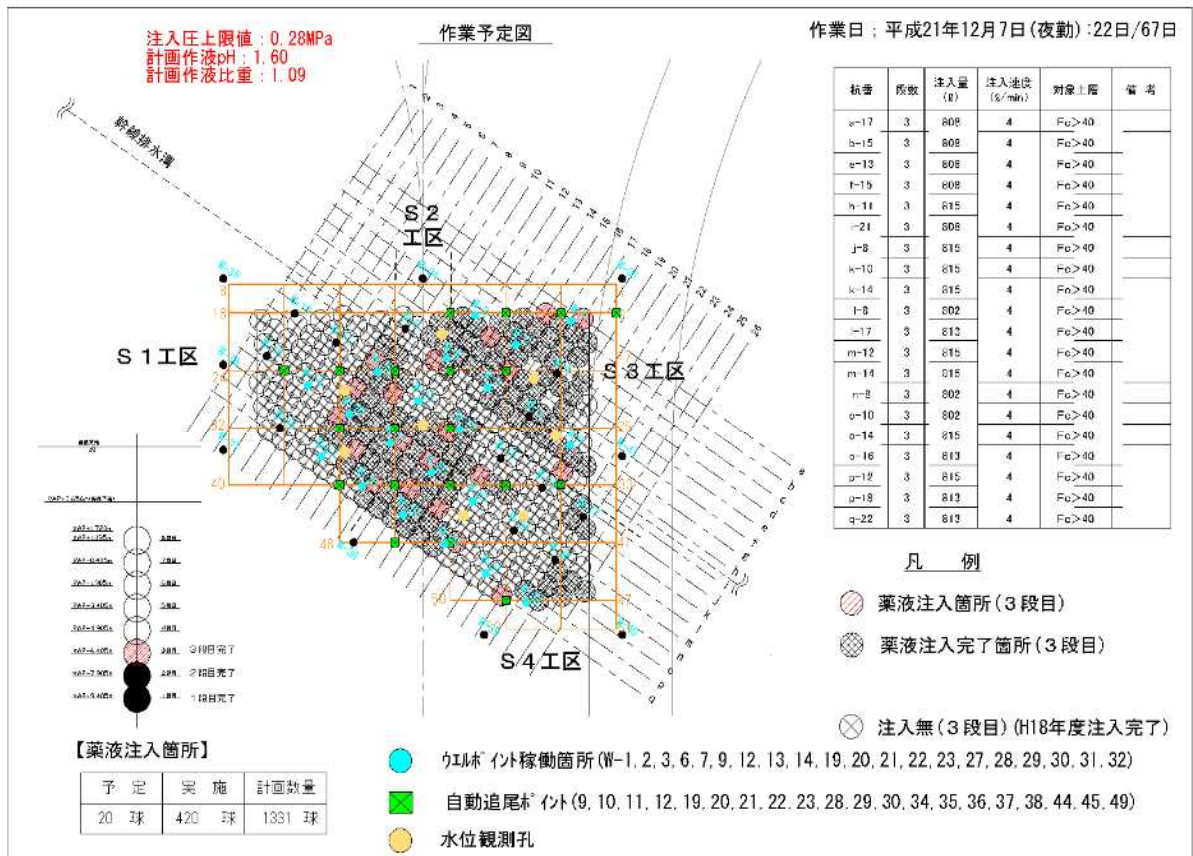


図-5 ウェルポイント作業実施例

また、地下水位観測孔を8箇所設置し、注入作業時の地下水位およびpH値の観測を行った。地下水の上昇が確認された箇所については、その水を採取し、pHの測定を行い、pH値が事前観測時と比較して2.0低くなった場合は、薬液が直接上昇していると考えられるため、その箇所周辺の薬液注入を中止するように中止基準を設定した。

実際に上記の管理を行っている中で、薬液注入中に水位の上昇が確認された事例は9回ほど発生したが、いずれもpHの異常は認められなかったため、水みちによる薬液混入ではなく押し出された水による水位の上昇と考えられる。また、初期水位が高かった事例も1回確認されたが、pHの異常は認められず、薬液注入の中止には至らなかった。

### 3-4-2 舗装版の隆起管理

自動追尾式トータルステーション(写真-3)を使用し、薬液注入中の舗装版の変状計測を常時実施した。

計測点は図-6に示すとおり5mメッシュとし、当日の注入箇所近傍の計測を行い、パソコンにて管理を行った。

管理基準は、

- ・一次管理値：5mm
- ・二次管理値：10mm

と設定し、一次管理値の5mmを超えた場合は注入速度および注入圧力の重点監視を行い、二次管理値の10mmを超えた場合は注入作業を中止することとした。

結果として、実際の作業中に管理基準値を超える挙動を

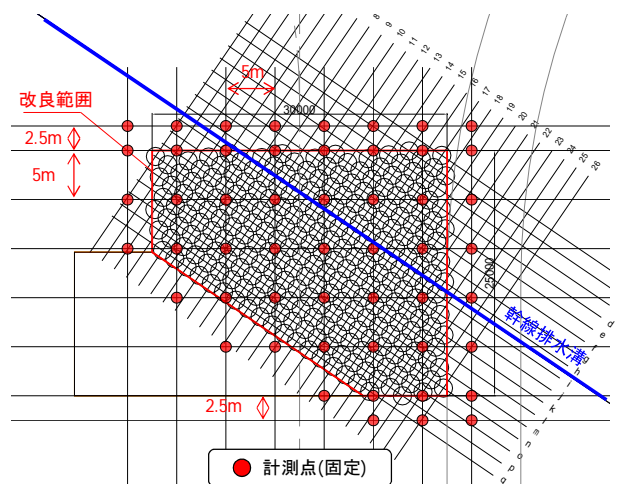


図-6 計測点位置図



示した箇所は確認されなかった。



写真-3 自動追尾計測実施状況

#### 4. 結果の考察

試験施工においては、既設舗装版に変状をきたすことなく浸透固化処理工法を採用した液状化対策を施工することができた。また、地盤改良後のチェックボーリングの結果、改良体は設計上必要とされる一軸圧縮強度  $80\text{kN/m}^2$  を満足していることも確認できた。

今回の試験施工の成功の要因は、以下のとおりと考えられる。

事前に詳細な土質調査を行い、細粒分含有率のばらつきを把握できたことにより、細粒分含有率に見合った注入諸元を設定できたこと。

適切な施工管理を行ったこと。

今回の試験施工においては、現場管理を行っている中で、ウェルポイント実施時の水位の上昇がほとんど確認されなかったこと、さらに、水位の上昇が確認された事例においても pH の異常がみられなかったこと、舗装面の隆起管理時においても異常な隆起は確認されなかったことから、薬液は設計通りに注入されたと判断できる。これは、細粒分含有率に見合った注入諸元を設定できたことが大きいと考えられる。

よって、事前に詳細に土層を把握した上で施工を実施すれば、細粒分含有率の高い層がある地盤においても適切に施工できることが示された。

今回の試験施工の結果、今後の本格施工に際しては事前に詳細な土層を把握すると共に表-3 に示す項目の施工管理を行いながら施工することが有効であることが実証された。今後の本施工に際しては今回の結果をふまえ、改善できる点を把握しながら実施していく予定である。

表-3 施工管理項目

| 項目                   | 実施内容                     | 提案する管理手法   | 目的および管理基準  |
|----------------------|--------------------------|--|--|
| 施工                   | 施工中の防護キャップ               | 注入箇所周辺を適宜取外し、孔内を確認する   | 薬液の逸脱の早期発見<br>地下水の舗装版内への浸入防止                             |
|                      | 防護キャップゴムパッキン<br>および、圧抜き孔 | ゴムパッキンは取付ない<br>=8mmの圧抜き孔を3箇所設ける                              | 地下水の被圧防止<br>地下水の舗装版内への浸入防止                               |
|                      | 注入順序                     | 固化盤下層：「分散施工」<br>固化盤上層：「分散施工」「階段施工」併用                         | 地下水の舗装版内への浸入防止   |
| 地下水位<br>および<br>舗装版管理 | 地下水位測定                   | 場 所： 注入孔直近箇所（適宜追加）<br>その他水位測定箇所<br>方 法： 水位計<br>※注入孔周辺水位は随時観察 | 注入区域内の水位変化の把握<br>薬液の逸脱の早期発見                              |
|                      | ウェルポイントの稼働               | 場 所： 注入箇所付近<br>（状況を確認しながら増減）<br>方 法： ウェルポイント                 | 注入薬液分に相当する地下水を揚水し、<br>地下水位の上昇を防止<br>初期値-0.5mにて稼働停止し、状況確認 |
|                      | 地下水のpH測定                 | 場 所： 注入孔直近<br>方 法： pH測定器                                     | 薬液の逸脱の早期発見<br>注入開始前の地下水初期pH値の-2.0の<br>値にて施工中止し、状況確認      |
|                      | 舗装版隆起管理                  | 薬液注入時： 注入箇所、随時レベル測量<br>日        々： 施工区域全体のレベル測量              | 隆起を確認した時施工中止し、状況確認<br>隆 起： GL+30mm  施工中止                 |

<参考文献>

- 1) 財団法人 沿岸技術研究センター：沿岸技術ライブラリーNo.33 浸透固化処理方向技術マニュアル 平成 20 年 10 月
- 2) 山崎他：港湾技術資料 1998JUNE.No.905 溶液型注入固化剤による液状化対策工法の開発
- 3) 森麟：早稲田大学 圧力注入における地盤のハイドロ・フラクチャリング現象