

東北地方太平洋沖地震で効果が確認された液状化対策事例と 新たな地盤改良工法

石井 裕泰^{*1}・船原 英樹^{*2}・松井 秀岳^{*1}・堀越 研一^{*1}

Keywords : ground improvement, liquefaction countermeasure, sand pile compaction, permeation grouting

地盤改良, 液状化対策, 砂杭締固め, 浸透注入

1. はじめに

先の東北地方太平洋沖地震においては、東北地方沿岸部の津波被害とならんで、茨城県鹿嶋市、千葉県浦安市等においては甚大な液状化被害が発生した。兵庫県南部地震、新潟中越地震、新潟県中越沖地震等を経て、地盤の耐震補強の重要性が認識されてきたわけだが、さらなる取り組みの重要性と、経済的な液状化対策工法の開発の必要性を再認識する契機になったと言える。

適切な液状化対策の有無が、インフラの保全や早期復旧に大きく影響することも明らかとなった。仙台空港の事例はその一例と言え、2008年度以降に夜間の閉鎖時間を利用して空港化耐震化工事に取り組んだ結果、滑走路での液状化発生を抑制し、支援物資運搬機の早期の離発着を実現できた^{1)~3)}。一方で、日々の生産活動に影響を与えることなく従来の液状化対策工法により耐震補強を施すことが難しい産業施設も多くあり、新しい施工技術の開発に対する要望が今後増加するものと見込まれる。

本報ではまず、筆者らが関わった液状化対策を概観し、東北地方太平洋沖地震で確認された対策効果について言及する。次にこれらの具体例を題材に、液状化対策における施工条件を比較する。最後に、供用中のタンク直下を対象とした最新の液状化対策工法を取り上げ、適用技術の特徴や適用効果を示す。

2. 東北地方太平洋沖地震で効果が確認された液状化対策事例

2.1 密度増大工法を併用したパイルド・ラフト基礎（杭併用べた基礎）⁴⁾

2.1.1 概要

本工事は、東京都江東区新木場における、食品加工施設の耐震補強例である。対象地盤は、図一1に示すとおり、表層埋土の下に、厚さ12mの沖積砂層、厚さ20mの沖積粘性土層、厚さ8mの洪積粘土層が堆積し、 N 値50以上となる堅固な層はGL-44mほどから出現する。沖積砂層は N 値5~15、 S 波速度 V_s は110~160m/sと緩い状態にあり、細粒分含有率 F_c は15~30%となっている。 N 値、 F_c を使用した、日本建築学会・建築基礎構造設計指針による液状化判定では、GL-3m~-12mで F_L 値が1を下回り液状化の可能性ありと判断される。沖積粘土層は、 N 値0~3、一軸圧縮強さが100kN/m²前後で軟弱層を呈するとともに、有効土被り圧に対しては、50kN/m²程度の過圧密状態にある。

当初は杭基礎が計画されたが、沖積粘土層が厚く不経済になるため、各種詳細調査、解析的検討を経て、液状化対策を併用したパイルド・ラフト基礎（杭併用べた基礎）が採用された。（図一1、2）

2.1.2 液状化対策・基礎工事

地盤改良範囲は公共道路や建物が隣接する敷地境界から2mと近接しており、経済的かつ低振動・低騒音での施工が可能な、静的締固め砂杭工法を採用した。

施工にあたっては、周辺変位の発生防止に特に配慮し、改良範囲端部に、幅1m、深さ50cmの変位吸収溝や、その内部に直径40cmのオーガーでGL-10mまで

*1 技術センター 土木技術研究所 地盤・岩盤研究室

*2 技術センター 建築技術研究所 建築構工法研究室

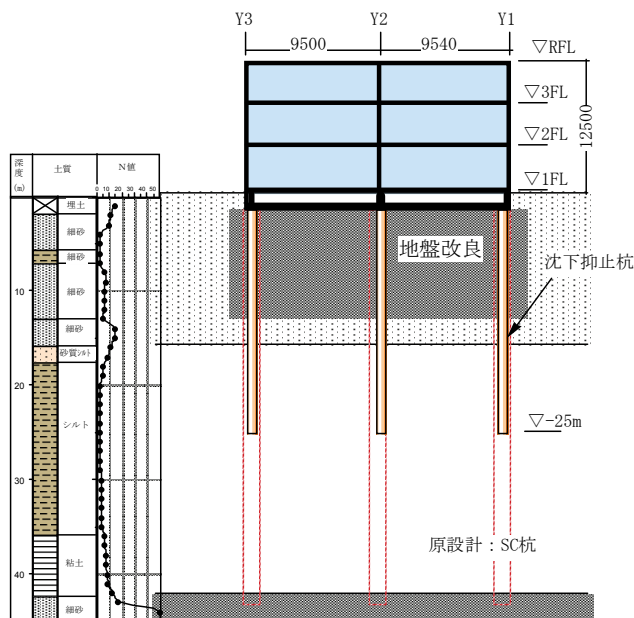
を掘削した変位吸収孔を設け、砂杭打設時に周辺部に向かって生じる側方変位を低減させた。隣接建物変位のモニタリングにあたりながら施工し、結果的に鉛直・水平とも 2mm 以下の微小な変位に抑えることができた。

また、施工後 2 週間後に N 値を調査し、 F_L 値が 1 を上回る N 値の増加を確認した。

なお、基礎杭の施工は上記地盤改良に引き続いて行い、芯材として 350×350×12×19 の H 鋼を挿入した $\phi 600$ のソイルセメント杭を GL-25m まで打設した。

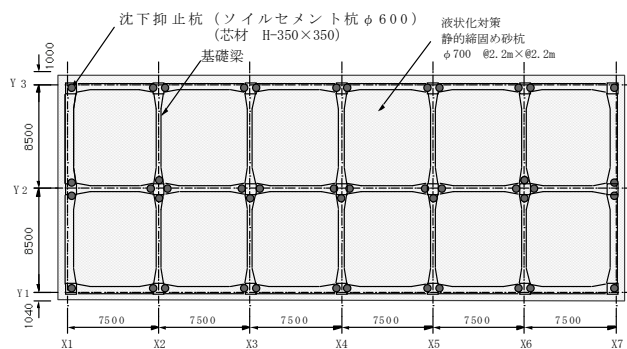
2.1.3 震災後の状況

震災時、東京都江東区では震度 5 弱が観測され、新木場周辺の広い範囲で液状化が発生した。本食品加工施設については、液状化やそれに伴う傾斜、沈下は発生せず、建物の健全性を十分確保していることが確認された。(図—3)



図—1 計画断面図

Fig.1 Sectional view



図—2 計画平面図

Fig.2 Plane view

2.2 浸透注入固化を施した貯油タンク⁵⁾

2.2.1 概要

本工事は、千葉県市原市において、旧法タンクの改修工事として実施した液状化対策工事で、1,100kL タンク 1 基を対象とした。

対象地盤は、図—4 に示す通り、GL-5m ほどまで埋土 (平均 N 値 5.3) が堆積し、下方に層厚 6m の砂質土 (平均 N 値 19.4) と軟弱粘性土が続く。液状化判定では、GL-7m ほどまでで液状化安全率が 1 を下回ることから、表層付近 GL-0.75m の地下水位より下の層厚 6.4m の範囲を液状化対策層に定めた。

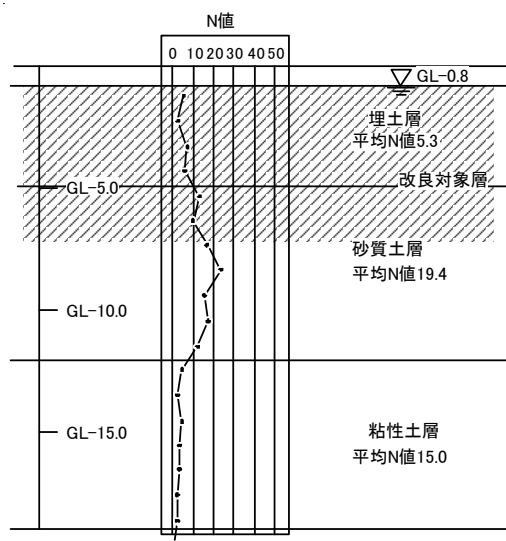
2.2.2 液状化対策工事

地盤改良にあたっては、浸透注入固化を採用した。本工法では、土のかみ合わせを崩すことなく、薬液を間隙に浸み込ませて固化させるために、現位置セメン



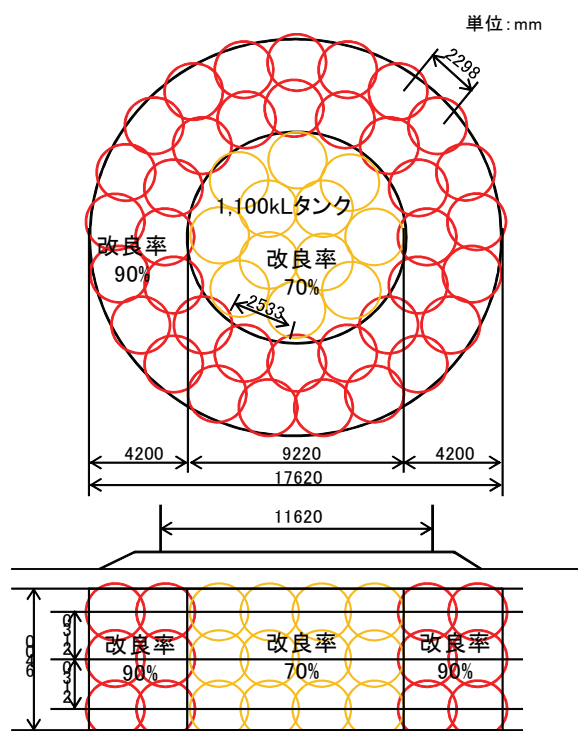
図—3 震災後の状況

Fig.3 Non-damaged building after the earthquake



図—4 地層構成

Fig.4 Soil profile



図ー5 注入計画図

Fig.5 Plan of permeation grouting

ト攪拌工法、締固め工法等とは異なり、地表面変位などによる既設構造物への影響を抑制できる。

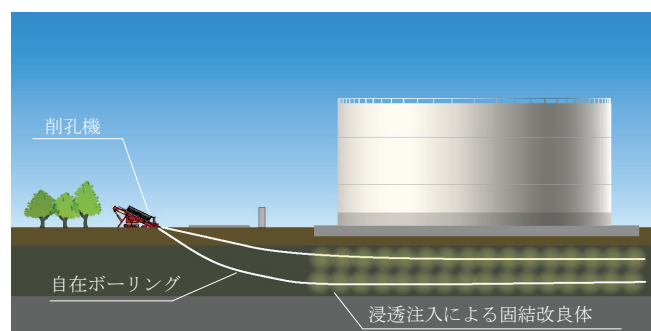
図ー5に施工計画図を示す。本施工はタンクの開放期間に合わせて実施したため、底板を撤去した上で、周辺および内部に機械を搬入し、改良範囲の直上から所定の位置での薬液の注入を実施した。薬液注入用の注入管を建て込むためのボーリングは図ー5に示す平面図の各円中心部で、タンク全体にわたり同心円状に均等配置にし、各地点では3深度から薬剤の注入を行った。また、対象土量に対して、タンク内部では70%、外周部では90%を改良するものとして注入量を区別した。

薬液の濃度は、現地の砂を用いた事前の配合試験に基づき設定した。設計で検討した繰返しせん断応力比に対して、直線的な相関がみられる一軸圧縮強さを管理値に定め、設計基準強度 70kN/m^2 、配合強度は割増率2をかけた 140kN/m^2 に定めた。

注入完了後には不攪乱試料を3か所から採取し、上中下段で各3本、合計27本の供試体を作成した。この結果、すべての供試体で設計基準強度を上回る一軸圧縮強さを確認した。

2.2.3 震災後の状況

千葉県市原市の当該地区周辺では、前述の新木場地区や広く報道された浦安地区のような大規模な液状化



図ー6 グランドフレックスモール工法の施工概念

Fig.6 Ground flex mole method

は見られなかったものの、震災時に震度5弱が観測された。本タンクについては、震災後特に傾斜、沈下は認められず、供用に支障はみられなかった。

3. 既設構造物直下の液状化対策の課題と新たな対策工法

上記、東北地方太平洋沖地震で効果が確認された液状化対策工法は、それぞれの施工条件、制約条件に応じた手法が採用され、震災を経て対策効果を確認するに至った。前章の実施例では新設・既設で異なる制約が課されたが、上部に構造物が存在しない、あるいは一時的に利用を停止している点では、施工に一定の自由度が確保されていたと言える。

一方、稼働中の工場や貯蔵施設直下に関しては、そのような休止・停止期間を設けることは、施設運用、や生産活動を中断しなければならないなど、これまでは適切な液状化対策工法を行うことに困難を伴った。

こうした問題を解決する一手段として、自在ボーリングを用いた浸透注入改良工法（グラントフレックスモール工法：平成19年度日本建設機械化協会奨励賞受賞技術）が開発され、実用化に至っている^{6)~8)}。

本工法では、斜め・水平方向に方向制御が可能な自在ボーリングを用いることで、周辺敷地より施設直下地盤にボーリングを行う（図ー6）。その後、薬液注入用の管を挿入し、薬液を地盤に浸透させそのまま固結させることで液状化対策を施す。

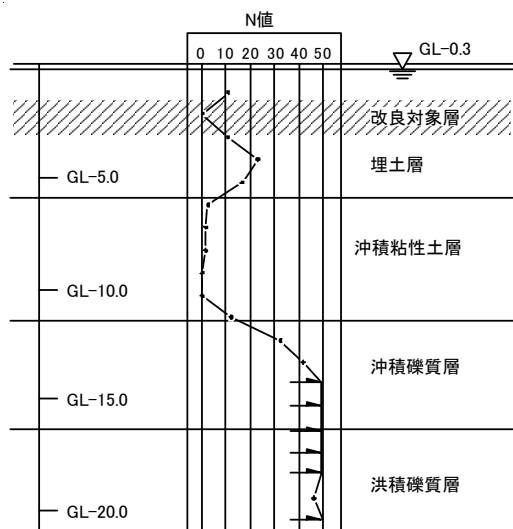
4. グラントフレックスモール工法によるタンク直下の液状化対策事例^{9),10)}

4.1 概要

本工事は、兵庫県高砂市において、旧法タンクの改修を目的として実施した液状化対策工事である。本工

事では、8,000kL タンク×2 基、2,000kL タンク×3 基を対象として、浸透注入による地盤改良をグランドフレックスモール工法を用いて実施した。

対象地盤は、図一7に示す。GL-6m程度まで砂質の埋土層が存在し、沖積粘性土層、沖積砂礫が続き、N値50を超える改良対象は、GL-16m付近から現れる。地下水位は地表面付近に存在し、液状化判定に基づき、埋土層内のタンク直下 GL-2~-4m 付近を液状化対策層に定めた。

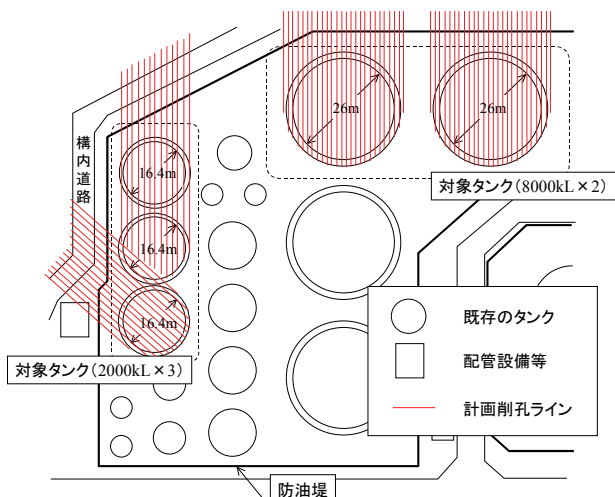


図一7 地層構成

Fig.7 Soil profile

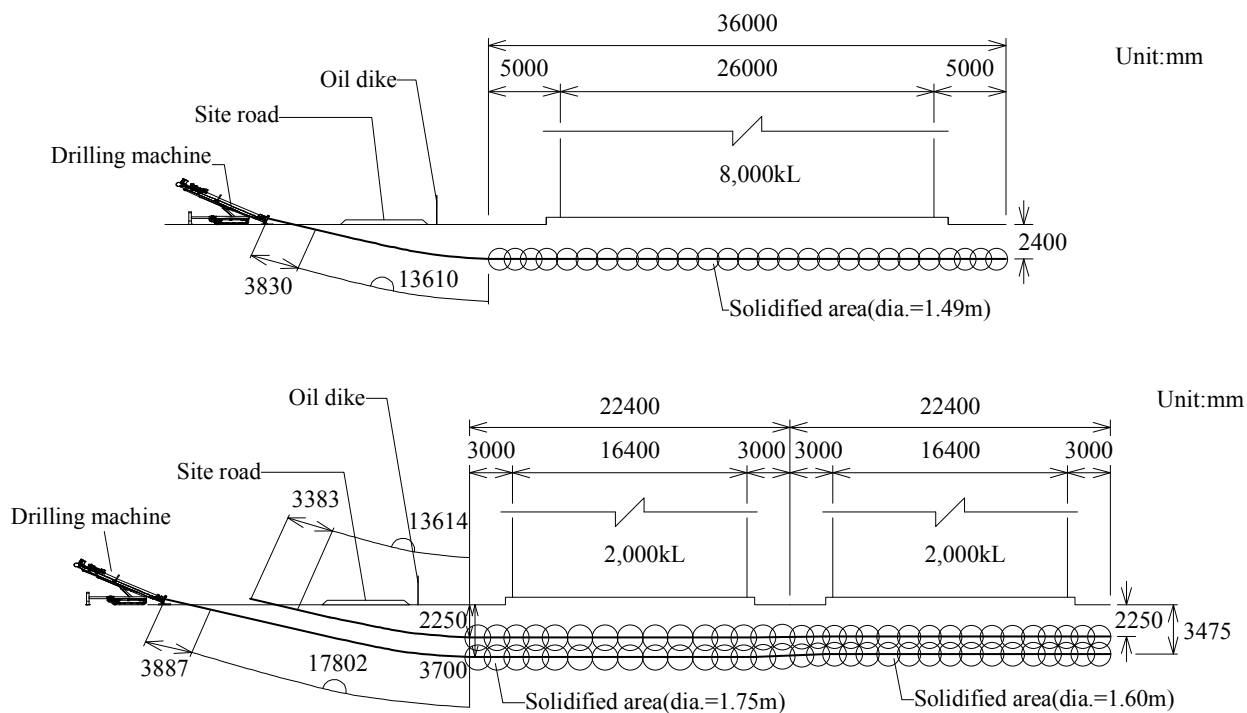
4.2 施工

図一8に計画平面図、図一9には施工断面図を、図一10にボーリング作業の状況を示す。防油堤外のタンクからは距離を置いた箇所に機械を設置し、注入位置は、改良範囲を水平方向に横断するボーリング上に配した。ボーリング作業は、挿入式ジャイロを用いた位置確認を随時行いながら、図一11のような形で削孔を完了した。削孔・注入作業にわたっては、タンク外周に沿って沈下計を設置し、地盤の変状を観察し続



図一8 施工概要

Fig.8 General view



図一9 施工断面図

Fig.9 Sectional views of drilling paths

けたが、図一12の計測事例にあるように、最大隆起量は、管理基準値を上回る変位には達しなかった。本工法の採用により、施工機械・薬液プラントの設置個所を除き、タンク周辺は大規模な敷地占有をすることなく、消防当局との協議を経てタンクの60%容量までの利用を継続した。また、防油堤外側に沿った構内道路も、全行程6か月にわたり支障をきたすことなく使用した。

なお、本5基の施工に先立ち、隣接するタンクで立坑から水平ボーリングを行う従来型の手法を用いて同様の液状化対策を行った。図一13に示すとおり、従来型手法ではタンクに隣接する構内道路を占有することとなり、注入管設置後の周辺状況は同図に示すとおり大きく異なる状況であった。

4.3 効果確認

改良効果の確認は、現位置から採取した不攪乱試料を用いた一軸圧縮試験を基本とし、液状化強度比との相関から定めた設計一軸圧縮強さは 60kN/m^2 であった。



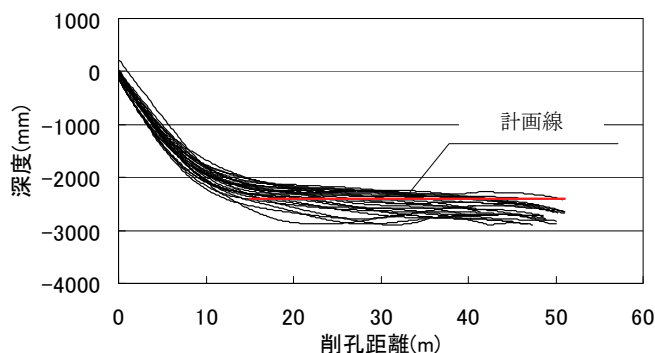
図一10 施工状況

Fig.10 Drilling work of Ground flex mole method

注入対象の埋立て土特有の地盤性状のばらつきも影響し、目標値を達成しないものが部分的に見られたが、必要な繰返し応力振幅比を有することを液状化試験により確認した。

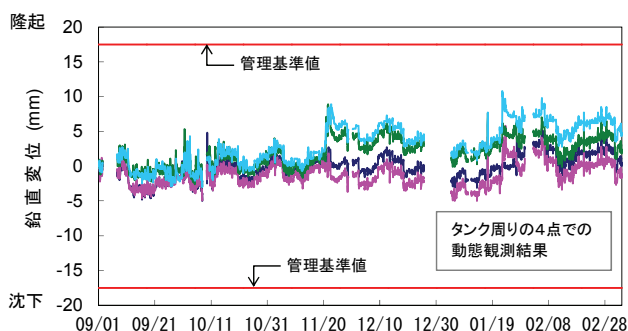
5. まとめ

著者らが関わり東北地方太平洋沖地震で液状化対策の効果を確認した事例、施設の供用を継続しながら施



図一11 ボーリング結果

Fig.11 Achieved drilling paths



図一12 タンク周りの鉛直変位の計測事例

Fig. 12 Observation of vertical displacement around tank



図一13 注入管の設置 (左: 立坑からの水平直線削孔, 右: グランドフレックスモール工法)

Fig.13 Grout pipe installation (left: conventional method from vertical shaft, right: Ground Flex Mole Method)

工を行った事例を概観し、各々の施工条件、施工方法と効果を明示・比較した。東北地方太平洋沖地震を受けて、沿岸地域をはじめとして耐震補強、あるいは液状化対策の需要が高まるとともに、様々な制約下での工事の必要性が具体化してくることが予想される。これまで技術の蓄積、本報に例示した最新の工法を活用するとともに、様々な制約を克服しうる技術の開発にもつなげていきたい。

参考文献

- 1) 瀬口均：空港の耐震化について，建設機械，553，Vol.47，No.3，pp.1-5，2011.
- 2) 四戸秀治：仙台空港耐震化 地盤改良工事について，第9回空港技術報告会，2008.
- 3) 港湾空港技術研究所：東北地方の港湾における被災状況について(現地調査速報)，<http://www.pari.go.jp/info/tohoku-eq/20110323.html>，2011.
- 4) 船原英樹，真島正人：締固め工法とパイルド・ラフト基礎を併用した低層建物，基礎工，Vol.36，No.8，2008.
- 5) 佐藤弘隆，佐藤将路：旧法タンクにおける注入固化工法における液状化対策の施工，土木学会第65回年次学術講演会，pp.261-262，2007.
- 6) 石井裕泰，檜垣貫司，川上純，三和信二，小泉亮之祐，小山忠雄，安部章正：誘導式水平ボーリング技術を用いた薬液注入工法 -急速浸透注入方式および無線式リアルタイム位置検知システムの開発-，大成建設技術センター報，第39号，37，2006.
- 7) 石井裕泰，檜垣貫司：既設構造物直下の地盤改良工法の開発，電力土木，No.326，pp.70-73，2006.
- 8) 石井裕泰，檜垣貫司，三和信二，勝田力，小泉亮之祐：自在ボーリングを用いた地盤改良工法 -無線式リアルタイム位置確認システムを用いた削孔試験-，大成建設技術センター報，第40号，24，2007.
- 9) 松井秀岳，石井裕泰，堀越研一：稼働中構造物直下の地盤改良工法／グラントフレックス工法，建設機械，553，Vol.47，No.3，pp.22-25，2011.
- 10) 三好俊司，佐藤将路：自在ボーリングを利用した既設タンク直下の注入固化工法による液状化対策，土木学会第56回年次学術講演会，pp.263-264，2010.