

# 工場内重要施設の液状化検討調査から対策工事 事例

応用地質(株) ○塚田 秀太郎  
 応用地質(株) 吉川 治雄

## 1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震後、地震被害への社会的影響が深刻化している。地震被害は、地震の発生規模の違いによって、津波・土砂災害・地盤沈下・液状化・火災などの影響範囲が大きく変化する。東海地方では、図-1に示すとおり東海・東南海・南海域でのいわゆる3連動地震が想定されており、今後50年以内に発生する確率は90%以上とされている。そのため、地震発生後の社会的機能の回復、特に東海地域の「もの作り」に係る企業では、3連動地震に対するハード、ソフトによる備えが急務となっている。



図-1 3連動地震想定範囲図 出典：三重県石油商業組合 HP

そのような中、本業務は地震発生時の工場の被害を軽減するために表-1に示す要望を求められた。対象施設は、工場の稼働を左右させる材料の貯蔵施設である。本業務は、①対象施設が液状化した際の被害予測、②対象施設へ実施可能な対策工法の検討、③対策工事および対策の効果確認を行った。

本報文では、工場施設の液状化調査から対策工事を実施した事例を紹介する。

表-1 対象施設の状況および顧客の要望

条件	工場の製造開始地点であり最重要構造物である。
要望	液状化の可能性がある場合には、地盤強化を実施。

## 2. 当該地の地質構成と液状化危険度

図-2に濃尾平野の地質断面図を、図-3には愛知県全域の液状化危険度マップを示した。濃尾平野は上層に沖積層の砂が広く分布し、液状化の危険性が非常に高い地域となっている。当該地も、液状化の可能性が「大～中」と評価される場所に含まれる。

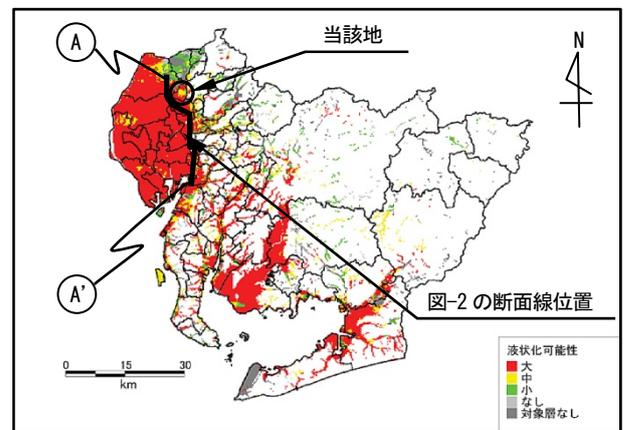


図-3 液状化危険度分布図 出典：1) 愛知県防災会議地震部会より一部加筆

## 3. 対象施設の地質地盤の特徴

本業務では、対象施設の地盤状況、地下水状況及び各地層の物理特性を把握するためにボーリング調査を実施した。図-4に対象施設の地質断面図を示す。当該地には、*N*値50以上と締まった洪積砂礫層(Dg)の上位に、緩く軟らかい沖積層(砂質土層(As)、粘土土層(Ac))が堆積し、埋土層(B)で覆われている。各層の性状は、以下の通りである。

As層は、シルト混り細砂～中砂で構成され、上部はシルト分を多く混入する細砂、下部は中砂が主体となる。含水量は中位であり、*N*値は概ね2～13と小さい。

Dg層は、主にGL-5.0m以深に分布し、玉石混り砂礫で構成される。礫はφ50mmを超える角礫を主体とし、最大礫径はφ80mm程度である。マトリックスは、少量のシル

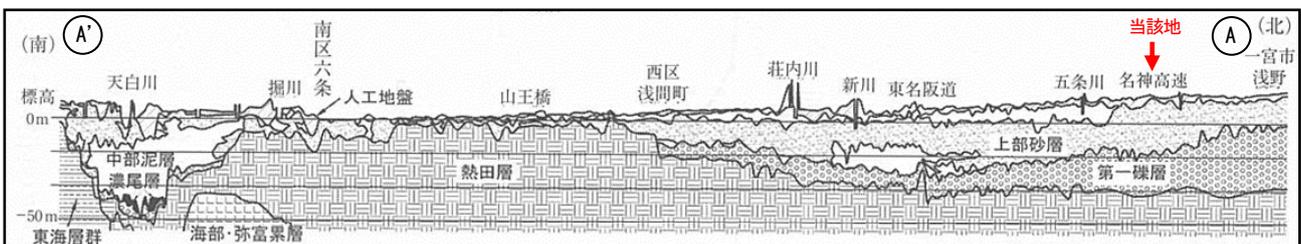


図-2 濃尾平野の地質断面図 出典：2) (社)地盤工学会より一部加筆

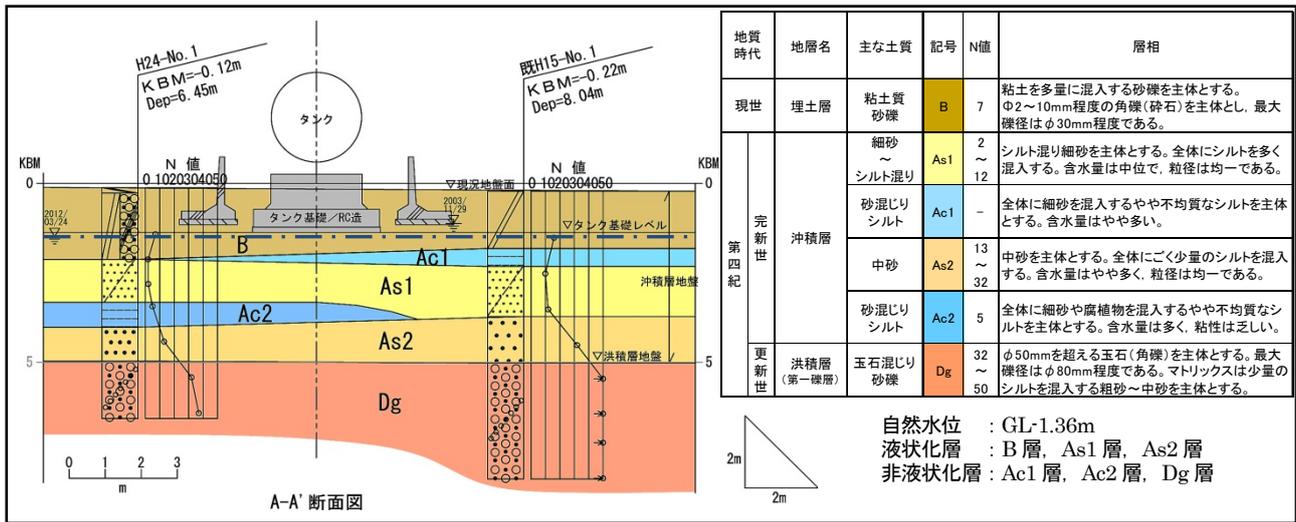


図-4 対象施設周辺の地質断面図

トを混入する中砂～粗砂が主体であり、 $N$ 値は32～50と高い。地下水位は、対象施設の基礎直下付近で確認された。

#### 4. 地震時の液状化判定について

地震時の液状化判定の方法は「建築基礎構造設計指針<sup>3)</sup>」(2001年)に記載されている $N$ 値と粒度試験結果を用いた簡便法により行った。

表-2に液状化検討結果を示す。液状化検討の結果、損傷限界(加速度200gal)は、沖積砂質土層(B層, As1層, As2層)のほぼ全ての深度で液状化抵抗率 $FL$ 値が1を上回った。 $PL$ 値は0.84となり、中央防災会議が公表している $PL$ 値の液状化判定(以下、中央防災会議液状化判定)によれば、「液状化の可能性が小さい」と判定された(表-3参照)。一方、終局限界(加速度350gal)は、沖積砂質土層(B層, As1層, As2層)のすべてで $FL$ 値が1を下回った。 $PL$ 値は6.98となり、中央防災会議液状化判定の基準である5.0を上回り、「液状化の可能性が中」と判定された。

また、沈下量を算定した結果では、H24-No.1地点では5.4～6.8cm、既H15-No.1地点では3.2～10.1cmの沈下量が見込まれた。

表-2 液状化検討 結果概要一覧

液状化検討地点	H24-No.1
損傷限界 加速度=200gal	$PL$ 値 0.84 液状化の可能性小：一般に対策の必要なし
終局限界 加速度=350gal	$PL$ 値 6.98 液状化の可能性中：一般に対策の必要あり
沈下量	H24-No.1地点 損傷限界：5.4 cm 終局限界：6.8 cm
	既H15-No.1地点 損傷限界：3.2 cm 終局限界：10.1 cm
傾斜角	14/1000 ※基礎幅7m, 不同沈下量10.1cmを想定

これらの結果を基に、機能的障害程度と関係の深い傾斜角を算定すると、最大で14/1000となり「排水管の逆勾配」程度の変状が発生する傾斜角に相当する結果を得た(表-4参照)。

表-3  $PL$ 値による液状化判定

液状化指数	液状化判定
$PL=0$	液状化の可能性が極小 (対策は不要)
$0 < PL \leq 5$	液状化の可能性が小 (一般に対策は不要、特に重要な構造物では詳細な検討が必要)
$5 < PL \leq 15$	液状化の可能性が中 (一般に対策が必要)
$PL < 15$	液状化の可能性が大 (対策は不可避)

出典：4)中央防災会議より一部加筆

表-4 傾斜角と機能的障害程度の関係

傾斜角	障害程度	区分
3/1000以下	品確法技術的基準レベル-1相当	1
4/1000	不具合が見られる	2
5/1000	不同沈下を意識する 水はけが悪くなる	
6/1000	品確法技術的基準レベル-3相当。不同沈下を強く意識し申し立てが急増する	3
7/1000	建具が自然に動くのが顕著に見られる	
8/1000	ほとんどの建物で建具が自然に動く	4
10/1000	排水管の逆勾配	
17/1000	生理的な限界値	5

出典：5)小規模建築物基礎設計指針

以上、液状化の可能性及び想定される施設の傾斜から、「地震後の早期の操業再開のために、対象施設の液状化対策を実施する」結論を得たものである。

### 5. 液状化対策工法の検討

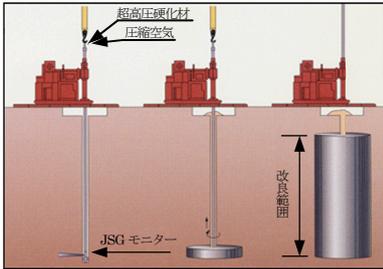
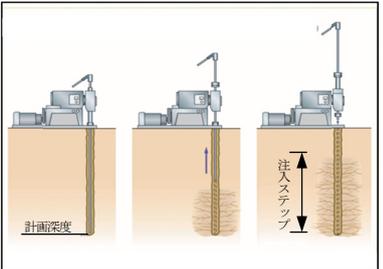
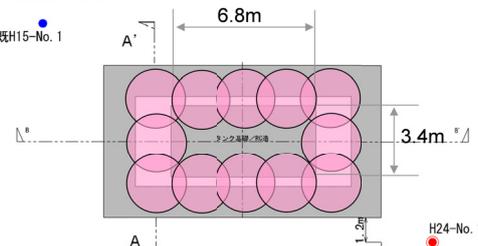
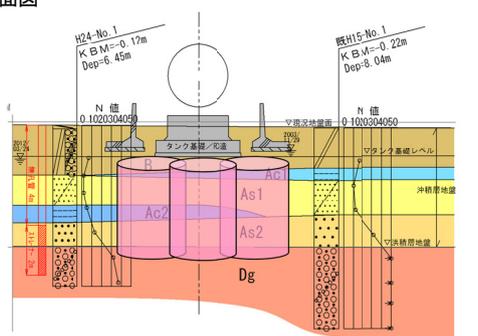
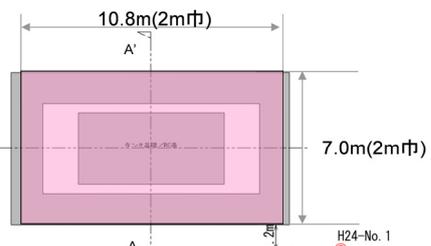
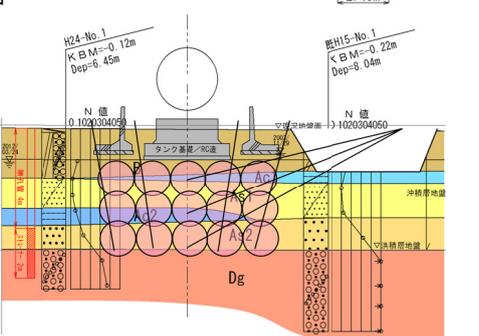
液状化対策工法選定の際の課題・問題点を表-5に取りまとめた。対象施設では、①既設構造物の支持地盤を改良するため対策工事を行うスペースが非常に限られること、②製造開始拠点のため配管が多く地盤改良時の変状は最小限に抑える必要があること、などの制約条件があった。これらの制約条件に対応可能な工法として、高圧噴射攪拌工法および薬液注入工法の2工法を比較検討した。

表-6には、それぞれの対策工法の考え方と併せて、対策工法の比較検討結果を示す。

表-5 工法選定上の課題と適応可能な対策工法

課題・問題点	対策可能な工法
限られたスペースの中で、既設構造物の地盤を改良する必要がある。	<ul style="list-style-type: none"> <li>高圧噴射攪拌工法</li> <li>薬液注入工法</li> </ul>
対象施設は製造開始拠点のため、工場と対象施設をつなぐ配管が多く、地盤改良時の変状は最小限に抑える必要がある。	

表-6 液状化対策工法検討結果一覧

	高圧噴射攪拌工法	薬液注入工法
概要	<p>地盤に超高压でセメント系の固化材を攪拌混合し、強度の高い改良地盤を造成する。</p> 	<p>地盤の間に薬液を注入し、間隙水と置き換えて液状化を防ぐ。</p> 
対策原理	液状化対象地盤を格子状に改良することにより、固化地盤で囲まれた砂地盤のせん断変形を抑制する。	砂質地盤の間に固化剤（薬液）を注入し、安定した地盤に改良する工法。注入した薬液は土粒子の間に浸透固化し、過剰間隙水圧の発生を防止することによって、液状化を防ぐ。
対策仕様	<p>タンク基礎平面図</p>  <p>A-A' 断面図</p> 	<p>タンク基礎平面図</p>  <p>A-A' 断面図</p> 
長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>強度が高く（1MN/m<sup>2</sup>以上）地震時の変位が少ない。</li> <li>対策工事は短期間で終了する。</li> <li>施工時の変形量が小さい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>斜め施工との併用でタンク基礎直下の改良が可能。</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>排泥が薬液注入よりかなり多く、その処理に費用がかかる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>強度が高圧噴射攪拌工法と比べ低く、地震時の変位が大きい。</li> <li>埋土には粘土分を多く混入するため均一な改良体とならない可能性が大きい。</li> <li>施工時に隆起の可能性があり、施設に有害な変形を発生させる恐れがある。</li> <li>対策工事に長期間を要する。</li> </ul>
工期	2週間（別途確認工が必要）	1ヶ月（別途室内配合試験 0.5ヶ月）
概算工費	≒67,000円/m <sup>3</sup>	≒52,000円/m <sup>3</sup>
評価	○	△

液状化対策工法は、以下の3つの利点から高圧噴射攪拌工法を採用した。

- ①対象施設は、製造開始拠点であるため、多くの配管が繋がっている状況にあった。高圧噴射攪拌工法は、改良時の地盤強度が1MN/m<sup>2</sup>以上と高く、地震時の変位が少ないことから、配管の対策とも併用できると考えた。
- ②対象施設周辺の立ち入りは、タンクが空になる定期メンテナンス時に限られていた。薬液注入工法は、実績工期が1ヶ月程度であり、製造を止める必要があった。従って、実働工期が2週間程度と短く製造を止める必要のない、高圧噴射攪拌工法が優位であると考えた。
- ③薬液注入工法は、薬液を圧入するため施工時の変形（地盤の隆起）が大きくなる可能性がある。一方、高圧噴射攪拌工法は、地盤に超高圧でセメント系の固化材を攪拌混合し、排泥を処理するため、施工時の変状が小さいと考えた。

## 6. 液状化対策工事

図-5 に液状化対策工事の流れを示す。

高圧噴射攪拌工法は、まずメタルビットにより地盤改良予定深度まで削孔を行う。次にロッド先端を高圧噴射ノズルに取り換え、地上から孔底まで水により攪拌する（プレジェット工）。孔底まで攪拌した後、固化材を孔底から地上へ向かって水平に噴射し上昇させて改良体を造成する。

対策工事で重要な点は、①対象施設への変位を最小限とすること、②所定深度まで品質の高い改良体を造成することであった。工事を行う際の課題および対応策を表-7 に示す。

### 1) 造成施工時の変位監視

管理施工として、対象施設基礎周辺および造成施工箇所周辺に監視点を設置し、トータルステーションにより、常時変位を確認しながら工事を行った。



図-5 工事の流れ図と工事中写真

### 2) 品質の高い改良体を造成

品質の確保として改良径の確認と非液状化層（Dg層）までの確実な造成に注意した。

改良径の確認では、造成工事の1箇所目において、施工中心位置から1.5m離れた観測孔を設置し、排泥噴射状況を確認した。また、非液状化層（Dg層）までの確実な造成は、地盤改良深度まで掘削する際に、砂礫層を10cm掘進し、その出現深度を確認した。

表-7 施工時の課題と対応策

課題①	対象施設の変位監視
対応策	造成施工時は、トータルステーションを対象施設基礎周辺および造成施工箇所周辺に設置。変位していないことを常に確認しながら施工。
課題②	改良径（φ3.0m）の確認
対応策	造成工事1箇所目では、施工中心位置から1.5m離れた位置に観測孔を設置し、排泥噴射状況を確認。
課題③	非液状化層（Dg層）までの確実な施工
対応策	地盤改良深度まで掘削する際に、Dg層を10cm掘進し、砂礫層の分布深度を各造成地点で確認した。

### 3) 改良体の品質確認

造成後10日間の養生期間を置いた後、効果確認のためにボーリングによる試料採取を行い、室内力学試験で設計強度（1M/m<sup>2</sup>）を満足しているかを確認した。コア採取位置は、3箇所で行い液状化対策層厚の上・中・下とした。試験時には、材齢28日まで湿潤状態で養生し、一軸圧縮試験を実施した。室内力学試験の結果、全ての試料において設計強度を満足する結果が得られた。

## 7. おわりに

東海地域において、今後想定される3連動地震による液状化の被害は、各企業の事業継続に大きく影響するものである。我々、地質調査業協会員は、民間企業に対し、液状化の危険性や対策の重要性を提示し、意識の高揚を図ることが重要と考える。私は、土質技術者として、液状化に対する調査から対策工事までの一連の社会貢献を持続的にを行い、有事の際の社会的機能回復の一助となれるよう努めていきたい。

### 《参考文献》

- 1) 愛知県防災会議地震部会：愛知県東海地震・東南海地震・南海地震等被害予測調査,pp3,2013.5
- 2) 社団法人地盤工学会：ジオテクノート⑤濃尾平野の地盤,pp57,2006.6
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針,pp61~72,2001.10
- 4) 中央防災会議事務局：中部圏・近畿圏の内陸地震に係る被害想定手法について,pp10~12,2007.11
- 5) 日本建築学会：小規模建築物基礎設計指針,pp253~256,2008.2