

# 超多点注入工法による地盤の液状化対策技術

## Ultra Multi Grouting Method as a Countermeasure against Liquefaction

関口 宏二 基盤技術研究所 都市工学研究部 主任研究員 工博  
恩田 邦彦 基盤技術研究所 都市工学研究部  
浜田謙二郎 技術企画部 統括スタッフ  
松尾 淳 日本鋼管工事㈱ 技術開発本部 研究開発部 次長  
大野 康年 東亜建設工業㈱ 土木本部 技術開発部  
小山 忠雄 日本基礎技術㈱ 技術本部 技術管理部 部長

Koji Sekiguchi  
Kunihiko Onda  
Kenjiro Hamada  
Atsushi Matsuo  
Yasutoshi Ohno  
Tadao Oyama

当社は(1)砂質地盤の多数の点に同時に注入可能な「超多点注入装置」、および(2)耐久性と浸透性に優れたシリカ系注入材料を用いて、従来工法では対応が難しい既設構造物の液状化対策技術の開発に取り組んでいる。本稿では大型土槽を用いた注入実験の概要とともに、液状化解析手法 **LIQCA** を用いた改良範囲設計法について、タンク基礎地盤を例として述べる。

*NKK are developing a countermeasure against liquefaction for existing structures, combining following two new technologies : (1)“Multiple Permeation Grouting Method”, which is capable of grouting into multiple points in a sandy ground simultaneously ; and (2)Silica type grouting materials with durability and high permeability in sandy soils. This paper describes the test results of the grouting test using a large container, and presents the design method of tank foundation using a liquefaction analysis method, LIQCA.*

### 1. はじめに

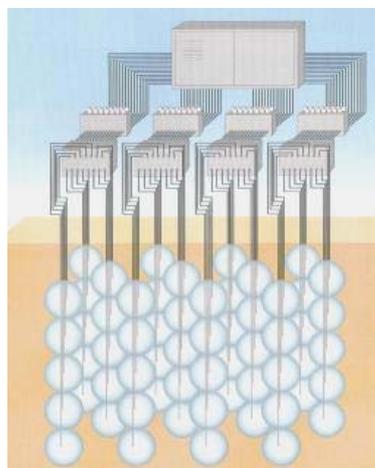
地盤改良を目的とした注入工法における新しい技術として、並列配置された多数(30~60ユニット)のポンプそれぞれより、径数ミリの注入用細管を経て地盤内の任意の場所へ同時に注入可能な超多点同時注入装置が開発されている<sup>1)</sup>。また、注入用材料として、浸透性および耐久性に優れた水ガラス系の恒久グラウト材料が開発されている<sup>2)</sup>。

当社は、これらの新装置および材料を用いて、従来工法では対応が難しい既設構造物下部などの液状化対策技術の開発に取り組んでいる<sup>3)-5)</sup>。本稿では、大型土槽注入実験<sup>3)</sup>の概要と、液状化解析手法 **LIQCA** による石油タンク基礎地盤の改良範囲に関する検討結果について報告する。

### 2. 超多点注入工法の概要

本工法概念図を **Fig.1** に示す。本工法では、数十から数百という逆止弁機能のついた大量のノズル (**Photo 1**) を地盤中に配置し、各ノズルから低吐出(1ノズル当たり **0~2 l/min**) で注入を同時に行うことによって改良体を形成する。注入装置は、注入圧力・流量を厳密に制御可能である。注入材料<sup>2)</sup>は、水ガラスのアルカリをイオン交換によって除去して得られる純粋なシリカからなる活性シリカコロイドがベースで、薬液注入による改良体形成後の劣化原因であるアルカリを含まないため、改良体からのシリカの溶脱がほとんどなく、恒久性に優れている。また、水質

保全などの環境面にも優れた注入材料である。



**Fig.1 Conceptual configuration of the ultra multiple grouting method**



**Photo 1 Injection nozzle**

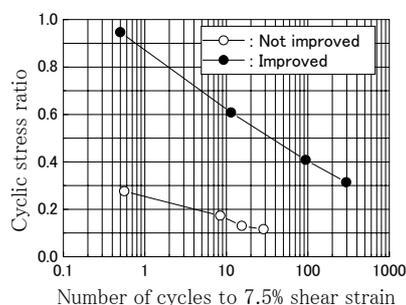
### 3. 大型土槽注入実験

本工法による改良体形成状況および改良効果を確認するために、内寸で幅 **5.0m**、高さ **2.0m**、奥行き **2.5m** の大型土槽を用いた注入実験を行った<sup>3)</sup>。実験土層は、厚さ **25cm** を **1層**として **6層**に分けて山砂(浅間山砂,  $D_{50}=0.32\text{mm}$ ,  $U_c=2.44$ ,  $F_c=6.25\%$ )を投入・敷均し、その後、土槽下部に設置した飽和用水管から脱気水を注入して地盤全体をゆっくりと飽和させて作成した。砂置換法による密度測定の結果、相対密度  $D_r$  は **70.0%**であった。実験土層完成後、恒久グラウト材のパーマロック **ASF** (濃度 **4%**)による注入実験を実施した。注入は、**3点法**、カーテン法の**2種類**の注入方法を用いて実施し、径 **500mm** の球形改良体を計 **24** 個形成した。

**Photo 2** に周辺地盤を掘削除去して撮影した改良体の形成状況を示す。改良体出来形は、改良目標寸法を満足していた。本工法による改良効果を把握するために、拘束圧  $\sigma_c=50\text{kPa}$  の条件下にて未改良砂 (平均相対密度 **74.3%**) および採取した改良体 (平均相対密度 **74.0%**) の非排水繰返しねじり試験を実施した。**Fig.2** に **7.5%**せん断ひずみ両振幅における繰返し回数と応力比の関係図を示す。改良体の液状化強度は未改良砂に比べてかなり高くなっている。**Fig.3** に改良体の**(a)**せん断応力～ひずみ関係図、および**(b)**有効応力経路図を示す。**Fig.3 (b)**に示すように、有効応力はゼロにならない。また、繰返し初期段階からせ



**Photo 2** Improved soil formed from grouting test using a large container



**Fig. 2** Liquefaction resistance curve of unimproved and improved sand

せん断応力の増加に伴って、有効応力が増加する現象（正のダイレイタンス）が見られ、密な砂のような挙動をしている。

## 4. 既設タンク基礎への適用

### 4.1 はじめに

本工法を既設タンクの基礎地盤に適用する場合、タンク下部および周辺部をどの範囲で改良するかが、本工法の有効性・経済性に大きく影響する。当社は、タンクの外周部のみをリング状に改良する場合の改良効果について1G場の2.5次元模型振動台実験により検討し、有望なコンセプトであることを確認している<sup>5)</sup>。

本節では、液状化解析手法LIQCA<sup>6)</sup>により、リング状改良時の有効性について未改良および全面改良の場合と比較した結果について述べる<sup>11)</sup>。なお、液状化解析手法とは、水～土2相系の混合体理論に基づき導出され、離散化された力の釣り合い式と連続条件式を時々刻々と解いてゆく手法である。

### 4.2 解析条件

厚さ10mの様な液状化性地盤上に、厚さ1mの砂マウンドを介して設置された、直径40m、液深20m、容量25000klの石油タンクを想定し、Table 1に示す6ケースの解析を実施した。注入改良形式としては、下記の3種の地盤条件の比較を行った。

- (1) 未改良地盤
- (2) リング状改良地盤 (Fig.4 参照)
- (3) 全面改良地盤 ((2)においてリング内部も改良)

Table 1 Cases of 3D liquefaction analysis

Case no.	Improvement type	Input motion	Maximum acceleration, Gal
1	None	Hachinohe	170
2	Ring	Hachinohe	170
3	Circle	Hachinohe	170
4	None	Kobe PI	527
5	Ring	Kobe PI	527
6	Circle	Kobe PI	527

リング状改良の場合、付録、式(1)に示す加振終了後の改良地盤内・外部の液圧（完全液状化状態を仮定）による改良体の滑動安全率評価式を用いて、リング内・外径をそれぞれ31.4m、46.0mとした（安全率=1.4）。改良範囲は、Fig.4に示すように、タンク側板の内側にも入り込んでおり、タンク直下の未改良地盤が液状化した場合でも、側板直下からの液状化砂の噴出を抑制することを意図している。

未改良地盤および改良地盤は、繰り返し弾塑性モデル<sup>6)</sup>で表し、その材料パラメータは、3章で述べた大型土槽注入実験における山砂の繰り返しねじりせん断試験結果（せん断応力～ひずみ関係図、有効応力経路図）に対するフィッティングにより決定した。Fig.3に、改良体の要素試験

のシミュレーションによる(c)せん断応力～ひずみ関係図、および(d)有効応力経路図を示す。実験結果との比較より、要素シミュレーション結果は実験結果を良好に再現していることがわかる。

計算時間の短縮を図るため、解析モデルはFig.4に示すように1/2モデルとし、加振可能方向は、水平X方向、鉛直Z方向とした。入力地震動としては、2段階耐震設計が時代の趨勢であることから、下記2種類の地震波を用いた。

- (1) レベル1：八戸波<sup>7)</sup>  
(最大水平加速度=170Gal)
- (2) レベル2：神戸PI波<sup>8)</sup>  
(最大水平・鉛直加速度=527, 173Gal)

Fig.4には表示していないが、長さ100mの要素を加振方向(X)の両側に付加している。これは、タンクより十分遠方においては、水平自由地盤と同じ応答をするという境界条件を表現するためである。また、地下水位レベルは地表面と一致すると仮定し、地表面は排水境界とした。なお、本解析に用いた時間ステップは0.005sとし、初期剛性比例型のRayleigh減衰（初期剛性に対する比例係数は0.002）を与えた。

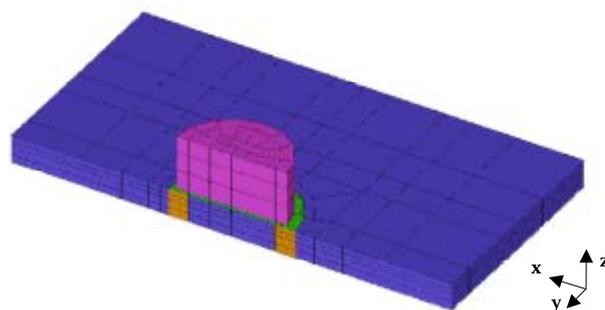


Fig.4 3D liquefaction analysis model of tank and foundation improved by the ultra multiple grouting method in a ring shape

### 4.3 解析結果

Fig.5に(a)レベル1、および(b)レベル2地震動入力後のY=0面上におけるタンク底面の沈下量分布を示す。これらの図から、次のことがわかる。

- (1) リング状改良の場合には未改良の場合に比べて、タンク底面の平均沈下量は70%（レベル1）～60%（レベル2）程度に低減される。レベル2地震動入力時の方が改良効果はやや大きい。
- (2) リング状改良と全面改良とを比較すると、タンク底面の平均沈下量は同程度である。すなわち、本解析からは、リング状改良と全面改良は同程度の改良効果と見なすことができる。

なお、本解析結果では、未改良の場合でもタンク底面はほぼ一様に沈下しており、タンクの不等沈下は見られな

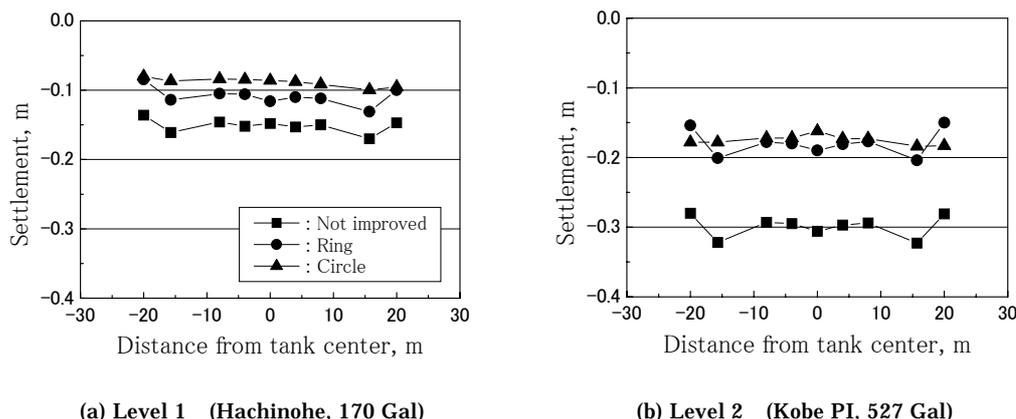


Fig.5 Distribution of tank base settlement after excitation

ったが、この点については地盤の不均一性を考慮するなど今後の検討が必要と考えている<sup>9)</sup>。参考として、兵庫県南部地震における高圧ガス施設および建築物の被災事例より推定する方法<sup>10)</sup>による検討を行ったところ、未改良地盤でレベル 2 地震動入力時に消防法令の基準値 1/100 を超える傾斜となった(傾斜 =  $0.0004 \times$  平均めり込み沈下 (cm) =  $0.0004 \times 30 = 0.012$ )。

次に、Fig.6 にレベル 1 地震動 (八戸波) 入力後の (a) 未改良、および (b) リング状改良の場合の平均有効主応力の変化率分布図を示す。ここに、平均有効主応力の変化率  $L_m = 1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0}$  は、平均有効主応力の初期値  $\sigma'_{m0}$  および現在値  $\sigma'_m$  を用いて定義され、色が赤いほど液状化の程度が激しい (平均有効応力が小さい) ことを示す。

Fig.6 (b) に示すように、リング状改良の場合には、リング状改良体の内・外部では液状化によって平均有効主応力が小さくなる。図は省略するが、レベル 2 地震動入力時にはほぼ完全液状化状態に達した。すなわち、リング状改良体の滑動安全率評価式 (1) を導く際の仮定がほぼ妥当であることが、本解析結果から確認された。

5. おわりに

本稿では、既設構造物の液状化対策工法としての超多点

注入工法の概要および大型土槽注入実験結果について述べ、さらに既設タンク基礎への適用に向けた改良範囲に関する検討結果について報告した。大型土槽注入実験において採取した改良体の室内試験より得られた応力~ひずみ関係を取り入れた液状化解析を行い、リング状改良の場合でも全面改良の場合とほぼ同等の改良効果があることを確認した。これは、工法の経済性向上および工期短縮に資する有用な情報と考えられる。

本稿で示した液状化解析手法を用いた注入改良範囲の設計法は、既設タンクの基礎地盤に限定されるものではなく、埋設管路や港湾・空港施設など既設構造物一般に適用可能なものである。今後、注入改良体の力学的性質をより詳細に検討するとともに、設計・解析・対策事例を増やしてゆきたいと考えている。

なお、本稿は、超多点注入耐震技術研究会 (NKK, 東亜建設工業(株), 日本鋼管工事(株), 日本基礎技術(株)) において実施した共同研究成果の一部を取りまとめたものである。末筆ながら、液状化解析についてご指導いただいた京都大学大学院 岡二三生教授、ならびに振動台実験についてご指導いただいた東京大学工学部 東畑郁生教授に謝意を表す。

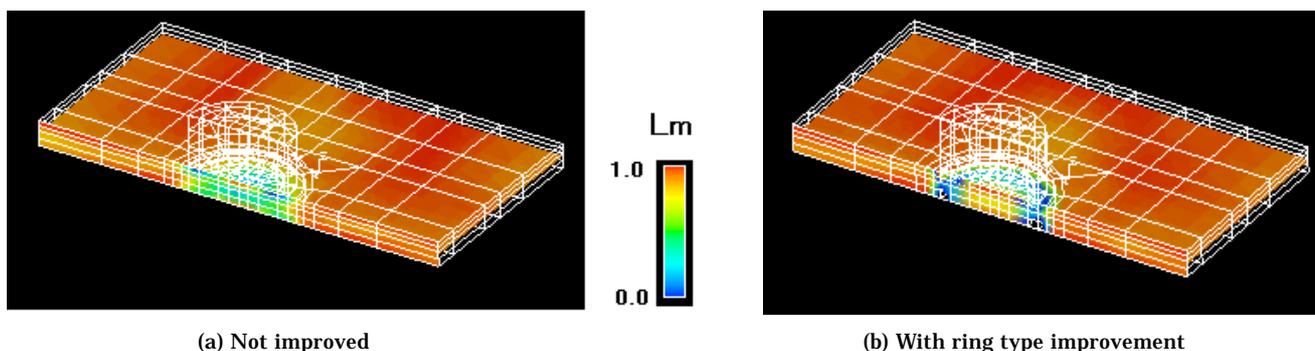


Fig.6 Calculated displacement and distribution of normalized effective stress variation after level 1 excitation (Hachinohe, 170 Gal)

付録： 改良地盤の滑動安全率(加振終了時)

Fig.A (a), (b)に示すように、タンク基礎をリング状に改良した場合を考える。地表面からの深度  $z$  において水平な滑り面を仮定し、タンクに作用する慣性力を無視して滑り面以浅の改良体ブロックに対する滑動安全率を考えると、

$$F_s(z)^{3D} = \frac{c_d \frac{\Delta\sigma}{2} (R_{out}^2 - R_{in}^2) + \tan\phi_d(z) (W_{tank} + W_{umg}(z) - P_{umg}(z))}{P_{in}(z) - P_{out}(z)} \dots\dots(1)$$

ここに、

$P_{in}(z)$ ,  $P_{out}(z)$  : 改良地盤内・外部の未改良部分液圧  
(完全液状化状態を仮定)

$W_{umg}(z)$  : 改良体全自重

$W_{tank}$  : タンク荷重により改良体に作用する鉛直力

$P_{umg}(z)$  : 改良体に作用する揚圧力

$C_d, \phi_d$  : 改良体の粘着力,内部摩擦角

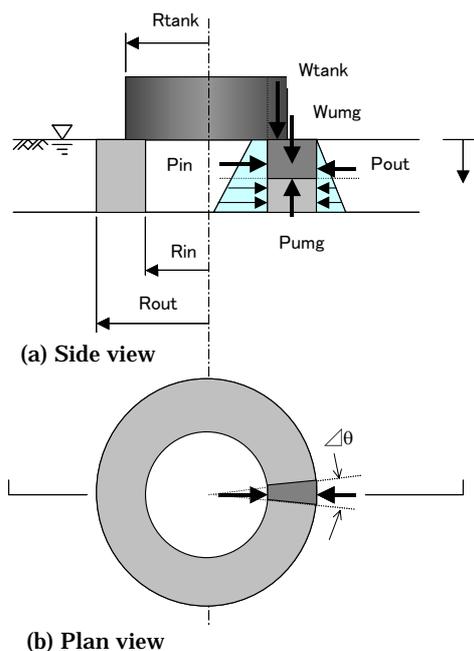


Fig.A View of ring type improvement of tank foundation and forces acting on the improved soil after excitation

参考文献

- 1) 那須丈夫ほか. 超多点注入工法の開発. 第 34 回地盤工学研究発表会. pp.1415-1416(1999).
- 2) 旭電化工業(株)資料. 恒久グラウトパーマロック・ASF-パンプレット(1999).
- 3) 関口宏二ほか. 超多点注入工法による液状化対策技術～大型土槽注入実験結果～, 第 44 回地盤工学シンポジウム, pp.371-376(1999).
- 4) 大野康年ほか. 多点浸透注入工法による液状化対策技術～現地注入実験結果～, 第 4 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム, pp.315-322(2000).
- 5) 東畑郁生ほか. 浸透注入工法によるタンク基礎の液状化対策に関する模型振動台実験, 第 35 回地盤工学研究発表会. pp.1685-686(2000).
- 6) Oka, F. et al. A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependency of the shear modulus, Geotechnique, 49, No.5, pp.661-680(1999).
- 7) 沿岸開発技術研究センター. 埋立地の液状化対策ハンドブック(1993).
- 8) Sugito, M. et al. Correction of orientation error of borehole strong motion array records obtained during the South Hyogo Earthquake of Jan.17, 1995, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.12, No.3, No.4, pp.95s-107s, (1996).
- 9) 鄭 京哲ほか. 石油タンクの地震被害とその検証, 土と基礎, Vo.46, No.3, pp.19-21(1996).
- 10) 高圧ガス保安協会. 高圧ガス設備等耐震設計指針, レベル 2 耐震性能評価, 解説編・評価例編(2000).
- 11) 関口宏二ほか. 浸透注入工法により改良されたタンク基礎地盤の 3 次元液状化解析, 第 36 回地盤工学研究発表会, pp.2045-2046(2001).

<問い合わせ先>

基盤技術研究所 都市工学研究部

Tel. 044 (322) 6222 関口 宏二

E-mail address : ksekigut@lab.keihin.nkk.co.jp

日本鋼管工事(株) 研究開発部

Tel. 045 (505) 8777 松尾 淳

E-mail address : endo2826@cityfujisawa.ne.jp