

注入固化工法による既設タンク地盤の液状化対策

Countermeasure against Liquefaction on Existing Oil Tanks by Chemical Grouting

今村 真一郎*	平野 孝行**
Shinichiro Imamura	Takayuki Hirano
佐藤 靖彦*	萩原 敏行*
Yasuhiko Sato	Toshiyuki Hagiwara
吉野 修*	小宮 隆之**
Osamu Yoshino	Takayuki Komiya

要 約

筆者らは、既設石油タンク地盤の液状化対策工法として、浸透性の良い薬液（特殊シリカ系水ガラス）を注入材とした注入固化工法の実用化に向けた研究開発を進めている。本研究では、低強度の薬液注入固化工法による地盤改良について、本工法の改良効果および施工性を検証する目的で、3次元遠心振動模型実験、ならびに実タンクを用いて現場施工実験を実施した。遠心振動模型実験の結果から、タンク基礎直下を注入固化改良することにより、タンク直下のみの改良でも未改良地盤の変形に比べ30%以下に抑制できる上、部分的に未改良部を残しても実用上問題ないことが確認された。一方、現場実験の結果からは、施工実験および試掘の結果、良好な注入結果が得られ、液状化に対して十分安全であり、高い施工性を有していることが確認された。

本論文では、より現実に近い条件での改良効果を検証するため、3次元モデル遠心振動模型実験を行ない、改良範囲の違いによる沈下抑制効果について比較・検討した結果と、実タンクを用いて実施した現場実験の結果から得られた知見について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 遠心振動模型実験
- § 3. 現場施工実験
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

平成7年の改正消防法の施行に伴い、昭和52年2月以前に許可を受けた、または許可申請された危険物屋外貯蔵タンクの液状化に対する早急な安全対策が義務づけられるようになった。消防庁の通達により、地盤の液状化対策工法として、鋼矢板によるせん断変形抑制工法、過剰間隙水圧消散工法、地下水位低下工法、注入固化工法の4工法が示されている。これら4工法のうち注入固化工法は、他工法と比べて施工機械が小さく、軽量であることから、狭小狭隘で配管等が錯綜する実際の既設タンク基

地での施工性に優れた工法と言える。

しかしながら、現行の消防法では注入固化工法の設計手法が確立されていないため、「タンク側板より10mの範囲」の地盤を改良することになり不経済となるため、合理的な改良範囲を定め、より経済的で確実性を高めた設計手法を確立することが急務であった。

注入固化工法の施工概念図は、図-1に示す通りである。今回提案する注入固化工法は、既設タンク地盤の液状化対策工法の一つとして、従来の工法と比較して、以下の特徴を有する。

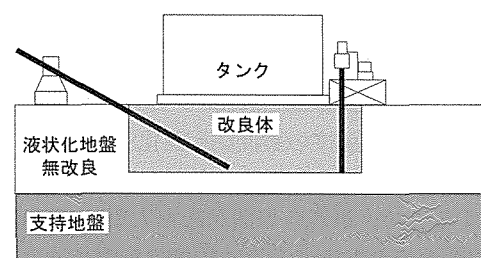
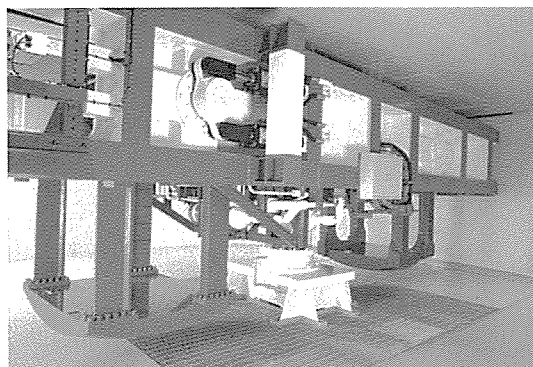


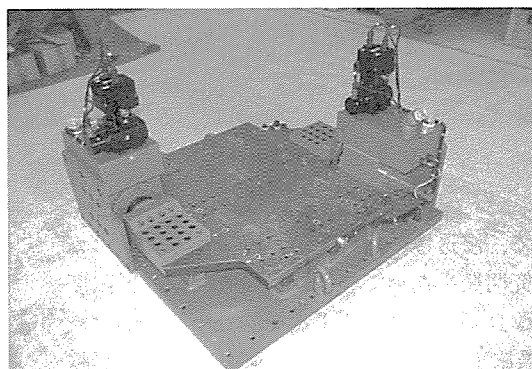
図-1 注入固化工法の施工模式図

* 技術研究所技術研究部土木技術研究課

**土木設計部設計課



写真一1 大型遠心振動載荷実験装置

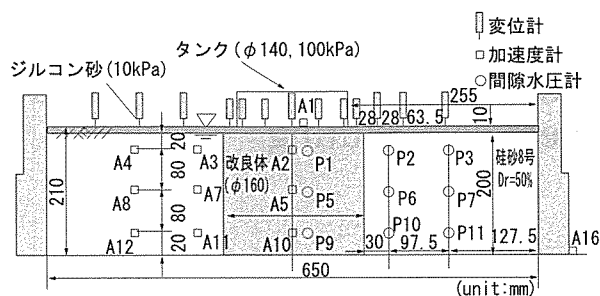


写真一2 小型振動台

- ① ゲルタイムの長い特殊シリカ系水ガラスを注入材とする二重管ダブルパッカー工法である。
- ② 浸透性の良い薬液（特殊シリカ系水ガラス）を注入材として用いることにより、一つの注入点から大型改良体（直径3～4m程度）の造成が可能である。このため、注入孔間隔を大きく、削孔本数を少なくすることが可能であり、削孔費が割安である。
- ③ SiO_2 の固結ゲルであり、恒久性に富んでいる。
- ④ 低濃度の注入材で、高耐液状化性を有する。

筆者らは、既設タンク地盤の液状化対策工法として、浸透性の良い薬液（特殊シリカ系水ガラス）を注入材として用いた注入固化工法の実用化に向けた研究開発を進めている^{1), 2), 3)}。薬液注入固化工法の実用化に向けて、より実際に近い条件で経済的で安全な改良範囲を設定するために、小型縮尺模型を用いた遠心振動模型実験を実施した。この模型実験と併行して、稼動中のタンクヤードにおける実際の石油タンク直下への国内初の注入固化工法による液状化対策工法の現場実験を実施した¹⁾。現場実験の結果より、計画改良範囲に対して十分安全な改良が行われ、高い施工性を有するとともに目標の品質が確保されていることが確認された。

本論文では、低強度の薬液注入固化工法による地盤改良について、より現実に近い条件での改良効果を実験的に検証するため、筆者らが開発した大型せん断土槽⁹⁾を用いて3次元モデルによる遠心振動模型実験を行い、改良範囲の違いによる沈下抑制効果について比較・検討した結果と、実タンクを用いて実施した現場実験の結果を



図一2 実験システム概要図



写真-3 実験システム外観

表-1 8号珪砂の物理的特性

土粒子密度Gs	2.65
D ₅₀ (mm)	0.100
D ₁₀ (mm)	0.041
均等係數Uc	2.927
曲率係數Uc'	0.968
最大間隙比e _{max}	1.333
最小間隙比e _{min}	0.703

ら得られた知見について報告する。

§ 2. 遠心振動模型実験

2-1 実験概要

実験には西松建設技術研究所の遠心振動載荷実験装置(有効半径3.8m, 最大遠心加速度150g)⁹⁾を使用して行った(写真-1参照)。この遠心振動載荷装置は、小型模型に対して遠心加速度を加えることにより、実地盤に相当する応力状態をモデル化できる特徴がある。また、遠心加速度を加えたまま小型振動台(写真-2参照)を用いて振動実験を行うことが可能で、兵庫県南部地震クラス(実物換算800gal相当)の大地震を再現できる国内屈指の大型遠心載荷装置である。

図-2に、各種センサーの設置位置を含む実験システムの全体概要図を示す（写真-3参照）。実験には大型せん断土槽（幅650mm，奥行400mm，深さ500mm）⁴⁾を使用し，試料には表-1に示す物性の8号珪砂を用いて相対密度が50%となるように空中落下法により砂地盤を

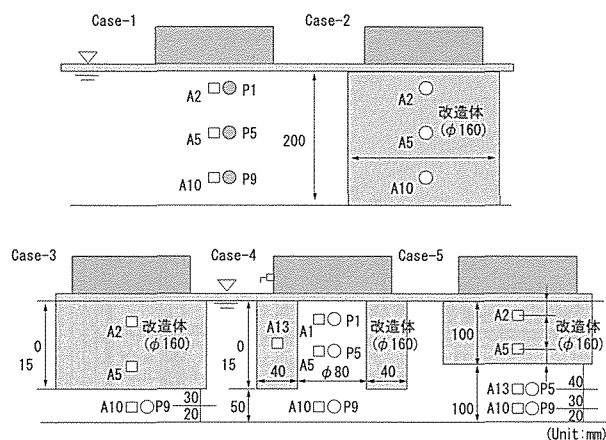


図-3 実験ケース模式図

表-2 実験ケース一覧

実験 code	改良 範囲	改良深 H'(mm)	深さ 改良比 (H' / H)	Dr (%)	一軸強度 q _u (kPa)
Case-1	未改良	—	0	52.3	—
Case-2	直下	200	1	43.4	120
Case-3	直下3/4	150	0.75	51.9	121
Case-4	直下3/4	150	0.75	52.7	121
Case-5	中抜き3/4	150	0.75	52.3	142
Case-6	直下1/2	100	0.5	52.5	142

作成の上、10kPaのサーチャージとしてジルコン砂を敷いた後、地表面まで十分飽和させた。なお、詳細な飽和地盤作製については、別報^{2),3)}を参照されたい。

タンクのモデル化はタンク荷重のみに留め、肉厚1mmのアルミ製円筒棒を用いた簡易な3次元構造（φ140mm）とし、タンク底部はフレキシブルな条件となるよう肉厚0.2mmのゴム膜とした。そのタンク荷重が遠心力場50gで100kPaとなるようにタンク内部に鉛散弾を敷いた。改良地盤は別容器に8号珪砂地盤を作成し、超微粒子シリカ系の活性シリカを注入して固化したものを3次元形状にトリミングし、地盤作成時にタンク中央直下に設置した。

実験は改良範囲の違いによる効果、再現性の確認を含め、表-2に示す6ケースを実施した（図-3参照）。なお、すべての振動実験は、遠心加速度50gで実施したので、実験モデルは実物換算するとタンク径7m、地盤深さ10mに相当する。入力地震波は、卓越周波数100Hzの正弦波（水平加速度13g：実物換算にて260gal）で、加振数20波、加振時間0.2秒を加えた。

2-2 実験結果および考察

(1) タンク基礎沈下分布の比較

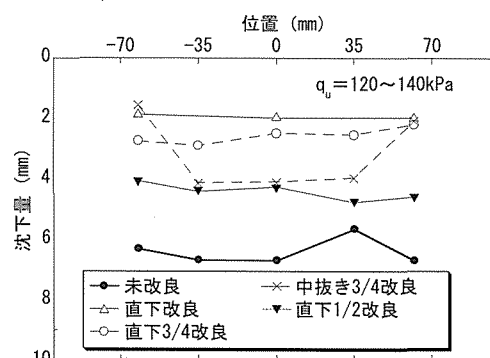


図-4 タンク直下における沈下分布形状

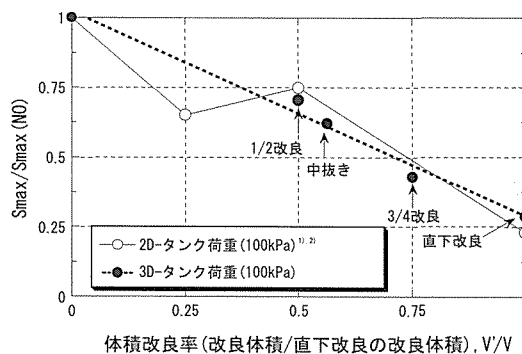


図-5 加速度応答率

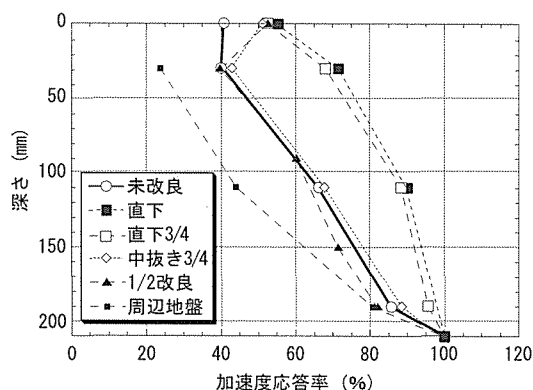


図-6 加速度応答率

未改良を除く全てのケースにおけるタンク直下、改良体直下および改良体内では、加振終了時点では液状化には至っておらず、周辺地盤では少なくとも深さ100mm（5m）まで液状化が起こった。なお、応答加速度、間隙水圧等の挙動については、別報³⁾を参照されたい。

図-4に加振終了時のタンク直下基礎の沈下分布形状を示す。未改良地盤での最大沈下量は約7mmと大きな値に対し、直下改良では約2mm（30%）と大幅に沈下が抑えられ、タンク側板より1mの範囲だけで明瞭な改良効果が認められた。未改良部を残した3/4改良でも、タンク直下改良と同程度の沈下量を示し、中抜き改良で約4mm（60%）、1/2改良で約5mm（70%）に各々抑えられている。中抜き改良では、改良体直下に未改良部を残しているのにも関わらず、改良体上の沈下量は直下改



写真-4 実験対象タンク

良, 3/4改良とほぼ同じ値を示し十分な改良効果が認められるが, 中抜き部分では改良体上とタンク中心部との間に不等沈下が生じた。実際の施工での対策としては, 中抜き部分を斜め注入施工により深さ方向に改良幅を大きくすることにより液状化時の不等沈下を抑制できると考えられる。

図-5に未改良地盤での最大沈下 ($S_{max} (NO)$) に対する改良地盤の最大沈下量比 ($S_{max}/S_{max} (NO)$) と直下改良に対する改良率の関係として示し, 過去に実施した2次元モデルによる結果²⁾も併せて示した。改良率を大きくするほど, 沈下量比はほぼ直線的に減少し, 改良効果が発揮されていることが判る。また, 2次元の結果も同様な改良効果が得られていることから簡易な2次元でも3次元の改良効果の確認が可能であることが示唆された。

(2)加速度応答分布

図-6に周辺地盤を含むタンク直下における加速度応答分布を示す。なお, 入力波が目標加速度に達した時の各深さでの応答加速度を入力加速度で除したものを加速度応答倍率と定義した。タンク直下, 3/4改良では70~95%とほぼ同じ応答分布を示したのに対し, 中抜き, 1/2改良では40~90%とそれを下回る応答分布を示し, 未改良の応答分布とほぼ一致しているのが判る。いずれも入力加速度よりも小さな応答を示した。なお, 周辺地盤では地表に向かうほど応答倍率が小さくなる傾向を示し, その応答分布は全てのケースにてほぼ一致した。

以上の結果から, タンク基礎直下を注入固化改良することにより, 未改良地盤に比べタンク基礎の最大沈下量は著しく減少し, 沈下抑制効果について大幅な改良効果が確認され, 部分的に未改良部を残しても実用上問題ないと判断できると考えられる。

§ 3. 現場施工実験

3-1 実験概要

千葉県市川市にある旧消防法タンク基地における石油タンク実機 (容量1900kℓ, 直径14.5m: 写真-4参照) を用いて, 我が国初の薬液注入固化工法による液状化対策の実験工事を実施した。現場実験では, 以下に述べる

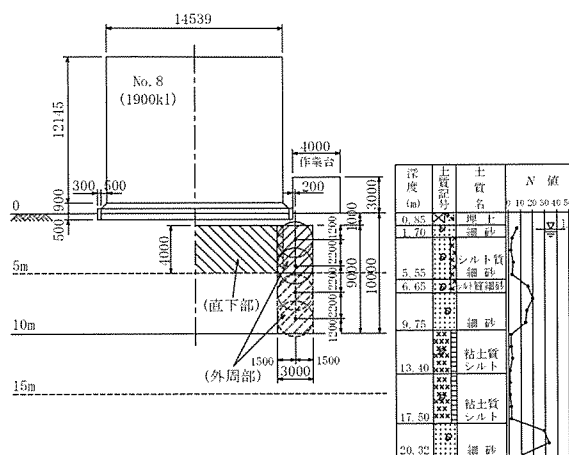


図-7 注入詳細断面図

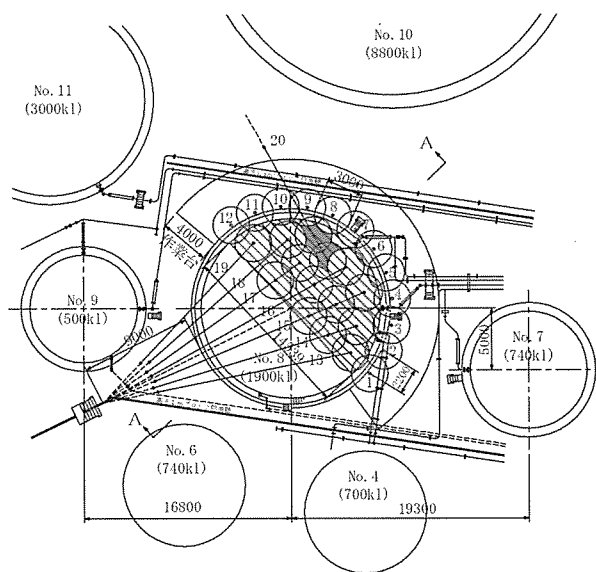


図-8 注入平面図

表-3 注入材の配合および注入率

材料名	注入材の標準配合
超微粒子シリカ	950 ℓ
反応材	4 ℓ
反応材	10kg
助剤	1kg
水	40 ℓ
合計	1,000 ℓ
計画注入率	一般的砂層の注入実績より30%

ような施工に伴い想定される具体的な問題点について調査した。

- ① 注入によるタンク底板や近接構造物への影響の確認
- ② 既設タンクヤード内での施工に伴う問題点の把握
- ③ 注入固化後の改良地盤強度の確認 (目標 $q_u = 50 \sim 100$ kPa)
- ④ タンク底板下部における注入出来形の確認

3-2 現場施工概要

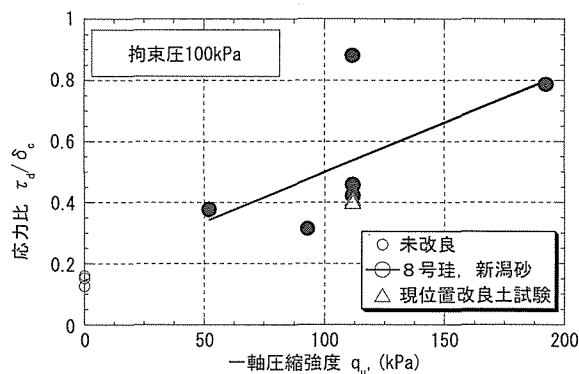


図-9 一軸圧縮強度と繰り返し強度に関する応力比

図-7に注入詳細図を示す。地質構成は、表層からGL-5.0m程度まではN値3程度の緩いシルト質砂からなり、それ以深より10m程度まではN値15程度の細砂、17.5mまではN値1~2程度の粘土質シルト、17.5m以降はN値30程度の細砂からなる沖積地盤である。なお、消防法の規定によると対象地盤の深度5mまでが液状化対策の対象となる。

注入範囲を図-8に示す。注入深度は液状化の可能性のある土層GL-1.0~GL-5.0mのシルト質細砂を主な対象とし、タンク直下ではGL-5.0mまで、タンク側板直下では施工性を確認するためにGL-10.0mまで注入した。平面範囲については注入による影響、出来形、地盤強度、施工上の諸問題等のデータを把握するのに必要な範囲として、タンクの半分を注入範囲とした。この範囲は配管・歩廊・階段等が特に過密した施工条件の悪い部分が選定された。

注入材料は、長期耐久性が確認されているアルカリ分を除去した超微粒子シリカを採用した。表-3に注入材の標準配合、注入率を示す。

改良目標強度は、8号珪砂と新潟砂および原位置試料を用いた振動三軸試験結果に基づき、図-9に示す一軸圧縮強度 q_u と繰り返し強度に関する応力比 τ/σ_c との関係から、改良土が液状化しないための液状化強度比（応力比）0.3が得られる一軸圧縮強度として $q_u=50\sim100\text{kPa}$ とした。

注入固化工法では均一な改良体を造成するためには、注入工法、注入材料の他に、浸透注入に適切な注入速度を決定することが重要である。そこで注入速度を求める試験として、今回の対象地盤に対して事前に行った水注入試験における注入圧と注入速度曲線とその初期値直線勾配を用いて決定する限界注入速度試験法を採用した。対象地盤に対して事前に行った水と薬液の限界注入試験の結果をもとに、注入速度を $12\sim15\text{ l/min}$ と決定した。なお、この時の注入圧力は、 140kPa であった。

改良径は、注入材のゲルタイムや均一浸透注入の可能な注入速度によって決定される。過去に実施された緩い砂地盤を対象とした注入固化工法の実験結果によると、

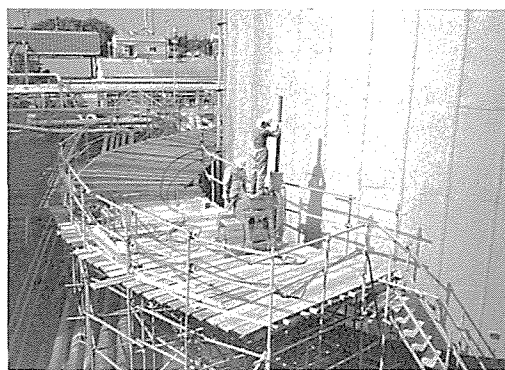


写真-5 鉛直マシンによる注入施工状況

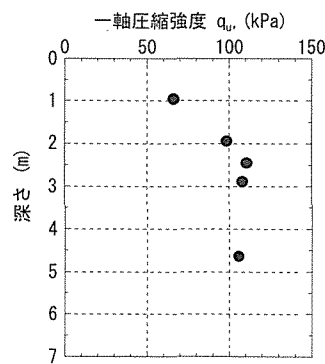


図-10 改良後の一軸圧縮強度分布

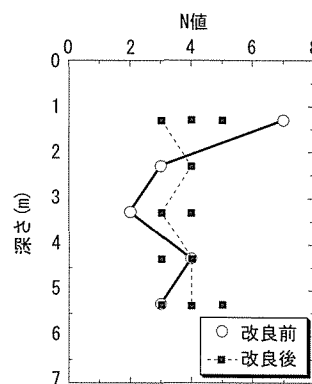


図-11 改良後の改良前後のN値分布

改良直径4mまでの造成が可能である。本工事では、限界注入試験の結果と作業の制約時間から直径3mとした。

(3) 注入によるタンク底板や近接構造物への影響の確認

固化材の注入によるタンク底板や隣接するタンク基礎に及ぼす影響を確認するため、タンクのアニュラープレート、タンク底板、基礎リングコンクリートの鉛直変位についてレベル測量した。いずれの場所も変位はほとんど観測されず、危険物貯蔵区域での施工においても高い安全性が確認された。

(4) 既設タンクヤード内での施工に伴う問題点の把握

写真-5に注入施工状況を示す。配管や架構等が錯綜した既設タンクヤード内での配管等の存在は、注入施工上、全く問題とならなかった。



写真-6 注入固化体の試掘状況

(5) 注入固化後の改良地盤強度

一軸圧縮強度と標準貫入試験により、原位置注入固化体の強度を確認した。図-10に示した改良後のボーリングにより採取した試料の一軸圧縮強度試験の結果から、 $q_u=100\text{kPa}$ の目標強度が確保できていることが確認された。したがって、一軸圧縮強度試験は、改良前後の試料状況や液状化強度との相関性の高さから、改良効果判定のための有効な手段の一つであることが判明した。

一方、標準貫入試験については、図-11から判るように改良前後の大きな差がないことから、低強度改良の場合には、標準貫入試験による改良効果の判定は不適当であることがわかった。

(6) タンク底板下部における注入出来高の確認

液状化対策としての施工計画範囲において、注入固化した地盤の薬液注入効果を確認するため、現場実験後にタンクを撤去し、試掘調査による注入地盤の目視確認を行った。写真-6は試掘後の状況である。黒丸が鉛直注入部の設計改良範囲である。非注入域に比べ止水性に富んでいること、また自立した注入部に比べ、未注入部分の崩壊の状況との違いが顕著であることから、薬液が目標とした地盤改良範囲に良好に注入されていることを確認できた。

§ 4. おわりに

以上の遠心振動模型実験、現場実験の結果から、以下に示す知見が得られた。

① 遠心振動模型実験の結果から、タンク基礎直下を注入固化改良することにより未改良地盤に比べタンク基礎の最大沈下量は著しく減少し、沈下抑制効果について大幅な改良効果が確認され、部分的に未改良部を残しても実用上問題ないと考えられる。また、注入工法自体の低廉化と合わせ、現行消防法の解釈に比べ改良範囲が大幅に縮小できることとなり、従来の考え方の注入による液状化対策工法と比べて施工費を大幅に低減できることが

示唆され、既設タンク地盤の液状化対策工法として最も有力な工法であるとの確信を得ることができた。

② 現場実験より、注入固化工法による既設タンク地盤の液状化対策は狭小、狭隘な旧法タンクヤードでも、十分に安全な施工と、必要な改良仕様を満たすことが可能であることが判った。

以上の結果は、危険物保安技術協会の自主研究報告書に採用され、注入固化工法による液状化対策工法の新しい設計法として、平成12年6月公に周知されることになった。

今後は、より経済的でタンク規模に応じた適切な改良範囲を定めるため、タンク基礎中央部直下に未改良部を残した中抜き改良について、数値解析と組み合わせた実験的検討を進め、実施工に向けた推進を図っていく予定である。さらに、改良効果の確認手法や他の構造物への適用についても検討を加えていく予定である。

謝辞：最後に、貴重な現場実験の場を提供して頂き、便宜を図って頂きました日石三菱㈱に対し謝意を表します。また本研究を実施するにあたり、貴重な御助言ならびに御指導を頂いた中央大学理工学部 藤井齊昭教授、東京工業大学工学部 竹村次朗助教授に対し謝意を表します。

参考文献

- 1) 辻 保文，平野孝行，木下吉友：注入固化工法による既設タンク地盤の液状化対策，配管技術，pp.18-22, 1999.
- 2) 溝口淳司，高橋章浩，竹村次朗，平野孝行：砂地盤上の既設タンクの液状化対策としての薬液注入固化工法の効果，土木学会第54回年次学術講演会発表講演集，pp.286-287, 1999.
- 3) 今村眞一郎，平野孝行，佐藤靖彦，萩原敏行，竹村次朗：薬液注入固化工法による既設タンクの液状化対策に関する3次元遠心振動模型実験：第35回地盤工学会研究発表会，pp.1679-1680, 2000.
- 4) 今村眞一郎，萩原敏行，野本 寿，藤井齊昭：せん断土槽の違いが応答特性に及ぼす影響，第35回地盤工学会研究発表会，pp. 2221-2222, 2000.
- 5) Imamura, S., Hagiwara, T. & Nomoto, T.: Nishimatsu dynamic geotechnical centrifuge, Proc. of Centrifuge 98, pp.25-30, 1998.