

注入固化工法による既設タンク地盤の液状化対策

西松建設土木設計部	正会員	平野孝行
西松建設技術研究所	正会員	今村眞一郎
西松建設技術研究所	正会員	佐藤靖彦
西松建設技術研究所	正会員	萩原敏行

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必要があった。

薬液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。

- 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 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。

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)～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、小型模型を用いて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を用いた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ならびに試掘を実施した⁴⁾。現場実験および試掘の結果より、液状化に対して十分安全な改良が行われ、高い施工性を有し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⁵⁾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、改良強度の違いによる沈下抑制効果について、2次元モデルによる検証も兼ねて比較・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。

2. 遠心振動模型実験

図-2に、加速度計、間隙水圧計および変位計の設置位置を含む実験システムの全体概要図を示す。実験には、新しく開発したせん断土槽（幅650mm、奥行400mm、深さ500mm）⁵⁾を使用し、試料には表-1に示す物性の珪砂8号を用いて、相対密度が50%となるように空中落下法により砂地盤を作成の上、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

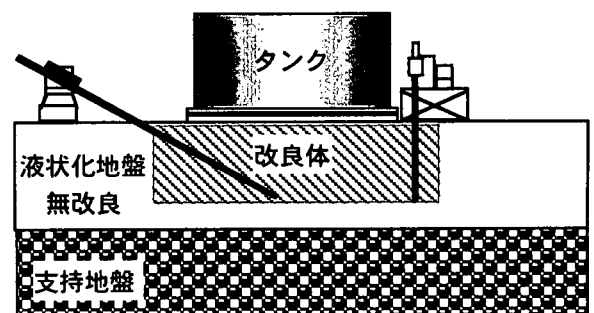


図-1 薬液注入固化工法の模式図

キーワード：タンク・地盤改良・遠心模型実験・液状化（連絡先〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津字桜台4054番地、西松建設（株）愛川衝撃振動研究所 TEL 046-285-7101 FAX 046-285-7104）

表-1 珪砂 8 号の物理的特性

土粒子密度	2.650
D ₅₀ (mm)	0.100
D ₁₀ (mm)	0.041
均等係数 U _c	2.927
曲率係数 U _{c'}	0.968
最大間隙比 e _{max}	1.333
最小間隙比 e _{min}	0.703

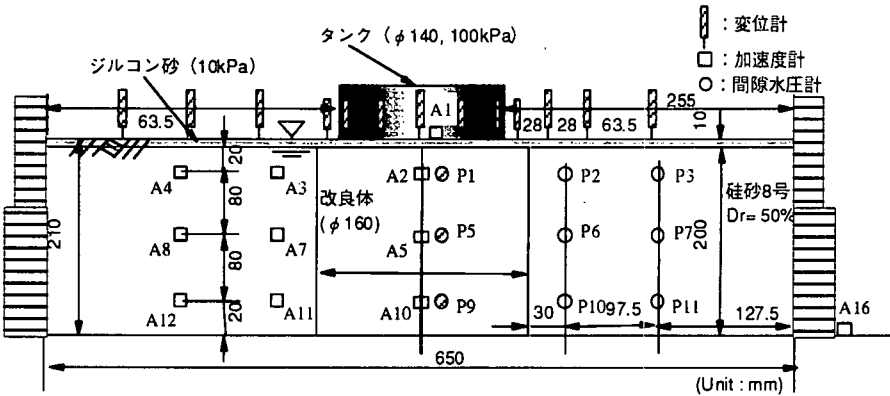


図-2 遠心振動模型実験システム

表-2 実験ケース (12 ケース)

実験 Code	改良 範囲	改良深さ H' (mm)	深さ改良比 (H'/H)	Dr (%)	一軸強度 q _u (kPa)
IA1	未改良	—	0	52.3	—
IA2	直下	200	1	43.4	120
IA3	直下	200	1	52.0	75
IA4	直下3/4	150	0.75	51.9	121
IA5	直下3/4	150	0.75	52.7	121
IA6	中抜き3/4	150	0.75	52.3	142
IA7	直下1/2	100	0.5	52.5	142
IA8	直下1/2	100	0.5	52.6	223
IB1	未改良	—	0	48.9	—
IB2	直下	200	1	50.9	120
IB3	直下3/4	150	0.75	50.9	121
IB4	直下1/2	100	0.5	51.5	142

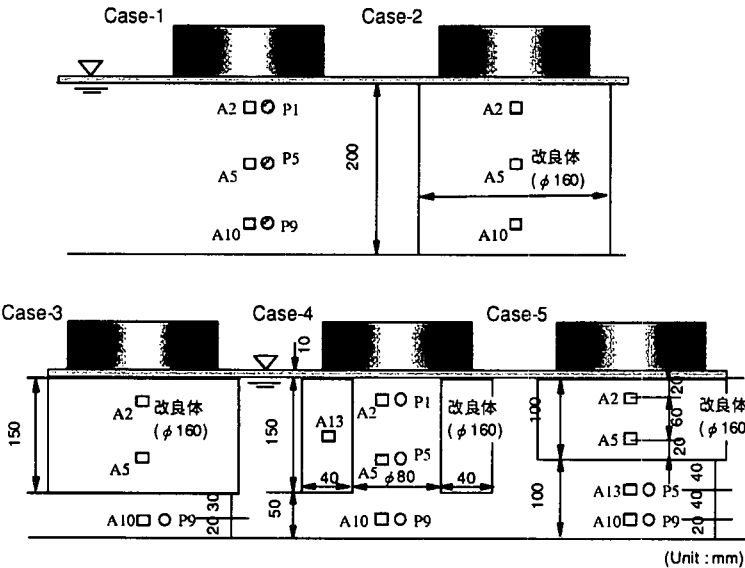


図-3 実験ケースの模式図

地盤作成については別報^{1)・3)}を参照されたい。

タンクのモデル化は、タンク荷重のモデル化に留め、アルミ製肉厚 1mm の簡易な 2 次元、3 次元構造 (φ140mm) とした。また、タンク荷重を直接基礎へ伝達できるように、タンク底部をゴム膜 (肉厚 0.5mm) で構成し、その荷重が遠心力場 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、別容器に珪砂 8 号地盤を作成し、超微粒子シリカ系のエコシリカを注入して固化したものを 2 次元・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、再現性の確認、強度を変化させたケースを含め表-2 に示す 12 ケースを実施した (図-3 参照)。入力地震波は、図-4 に示す卓越周波数 100Hz の正弦波 (水平加速度 13g: 実物換算にて 250gal) を 20 波、加振時間 0.2 秒である。

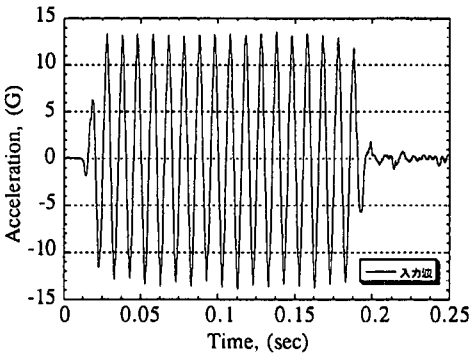


図-4 入力波形

表-3 遠心振動載荷実験装置諸元

	項 目	仕 様
遠心載荷装置	有効回転半径	3.80m
	最大遠心加速度	150G
	最大回転数	188r.p.m
	最大搭載容量	2MN・m/s ²
	載荷スペース	幅1250×奥行1250×高さ1250mm
振動台	型式	電気油圧サーボ式
	定格質量	5kN
	最大加振加速度	40G
	最大加振容量	320kN
	最大水平変位量	±5mm
	加振周波数	10Hz～300Hz
	加振テーブル寸法	幅1000mm×奥行700mm

なお、全ての実験は、表-3 に示す諸元の西松建設技術研究所所有の遠心振動載荷実験装置（写真-1 参照）⁶⁾を使用して遠心加速度 50g で実施し、実物換算するとタンク径 7m、地盤深さ 10m に相当する。

3. 実験結果および考察

全てのケースにおけるタンク、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。

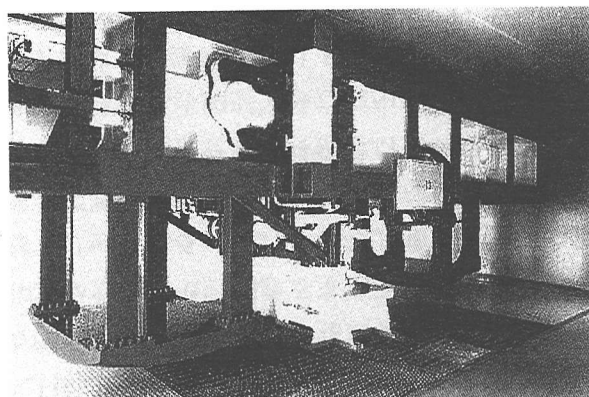


写真-1 大型遠心振動載荷実験装置

(1) タンク基礎沈下分布の比較

図-5(a)に 2 次元モデル、(b)には 3 次元モデルで実施した、加振終了時のタンク直下基礎の沈下分布形状を示す。

2 次元モデルによる未改良地盤での最大沈下量は約 6mm と大きな値に対し、直下改良、3/4 改良ともに約 2mm (30%) と大幅に沈下が抑えられている。1/2 改良でも約 3mm (50%) に抑えられている。

一方、3 次元モデルによる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、2 次元モデル同様に明瞭な改良効果が認められ、概ね沈下量も同じ値を示した。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関わらず、改良体上の沈下量は直下改良、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、中抜き部分ではタンク基礎のモデル化が行われていないため、改良体上とタンク中心部との間に不等沈下が生じた。

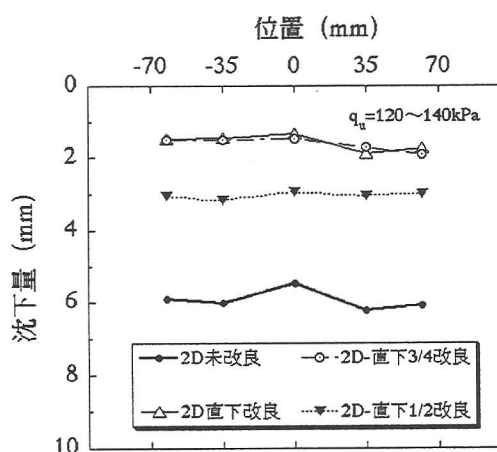


図-5 (a) 沈下分布形状 (2D モデル)

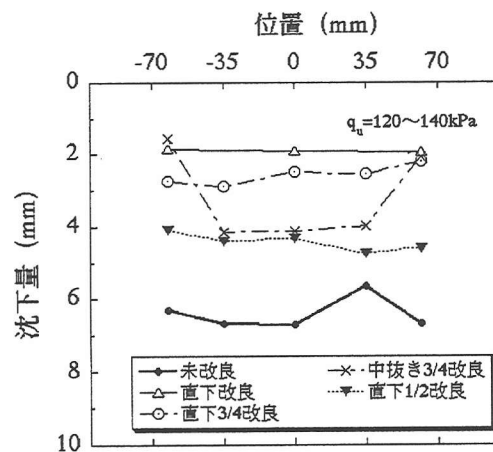


図-5 (b) 沈下分布形状 (3D モデル)

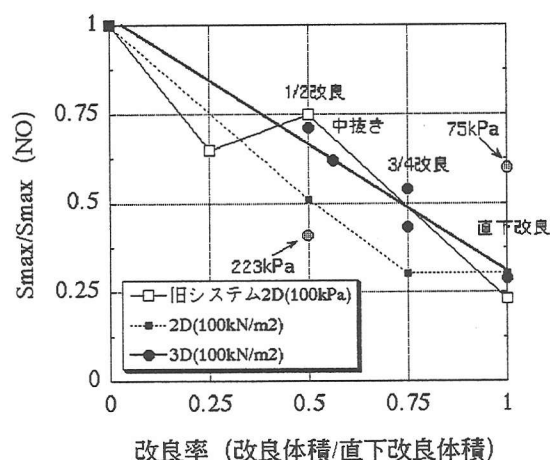


図-6 改良率による改良効果

図-6 は、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たものである。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、過去に実施した旧システムと当システムで行った 2 次元モデルによる結果も 3 次元モデルの結果と同様に改良効果が得られていることから、簡易な 2 次元の実験でも 3 次元改良効果の確認が可能であることが示唆された。また、経済性を考慮して、直下改良では改良体の強度を約 0.6 倍、1/2 改良では強度を約 1.6 倍にした結果も併せて図示しているが、いずれも 3/4 改良と同程

度の改良効果があり、最大沈下量は、改良体強度にも依存することが判る。

図-7 は、改良率と最大沈下量をタンク径 D で正規化した最大沈下量比 (S_{max}/D) との関係を示す。図-8 には、改良率と最大不等沈下量比

($\delta S_{max}/D$) の関係を示した。

改良率の増大に伴い、最大沈下量比、最大不等沈下量比とも、ほぼ直線的に減少し、改良効果が発現されている。また、図-5 (a) から 2 次元では 3 次元ほど不等沈下を生じていないように、図-8 に示す 2 次元では改良率を変化させても殆ど認められなかった改良効果や強度の違いを 3 次元モデル実験では明確に読みとれる。

(2) 加速度応答分布

図-9 に、周辺地盤を含む (代表 1 ケース) 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をその加速度で除したものを加速度応答倍率と定義した。

図-9 (a) の 2 次元モデルでは改良範囲の違いによる加速度応答倍率の明確な差は認められなかった。一方、図-9 (b) の 3 次元モデルでは、タンク直下、3/4 改良では 70~95% とほぼ同じ高い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。この原因として、2 次元モデルと 3 次元モデルでは改良体に対する周辺地盤による拘束条件の違いが大きく影響したのと考えられる。なお、周辺地盤では 2・3 次元に関わらず、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ていた。

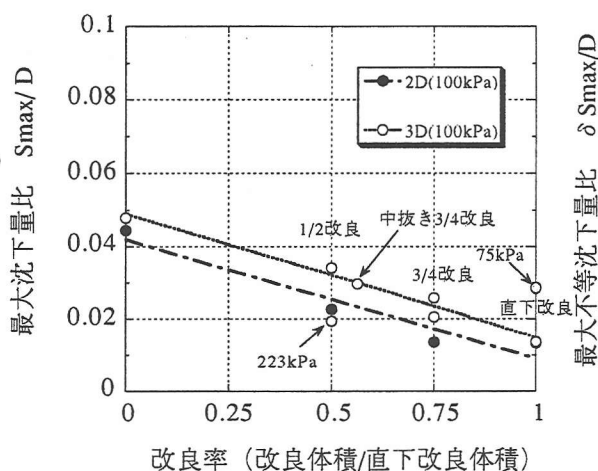


図-7 改良率と S_{max}/D の関係

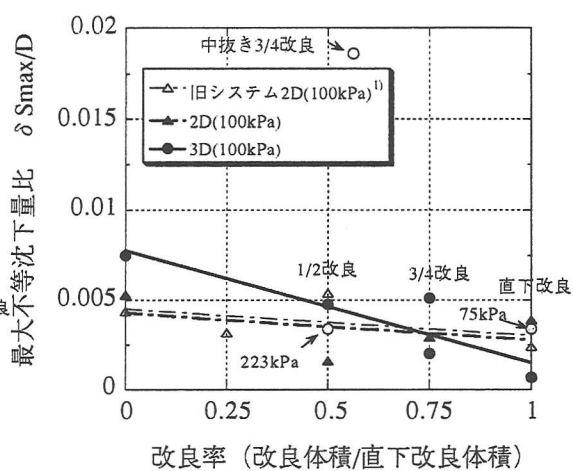


図-8 改良率と $\delta S_{max}/D$ の関係

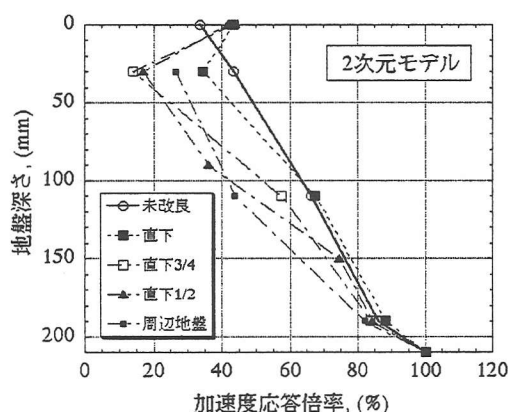


図-9 (a) 加速度応答倍率 (2D)

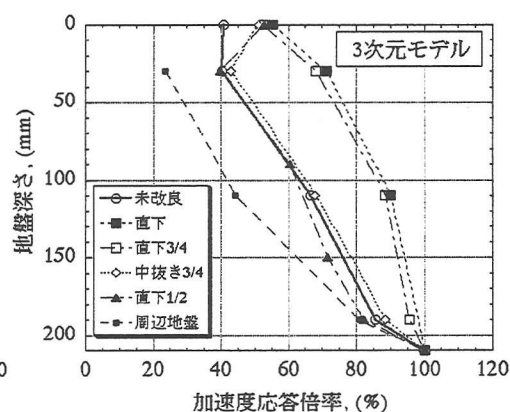


図-9 (b) 加速度応答倍率 (3D)

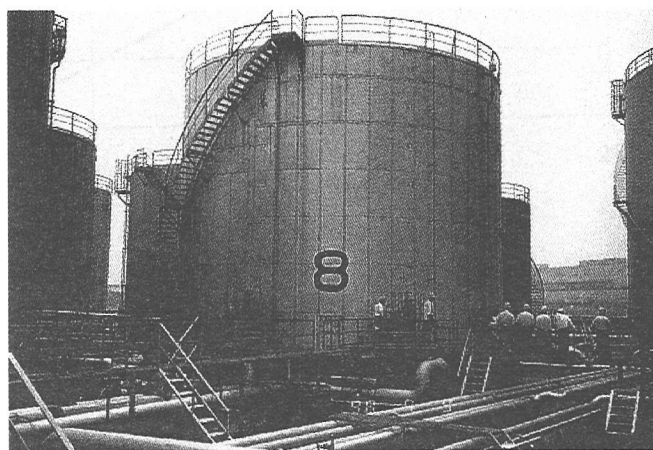


写真-2 実験対象タンク

A-A断面図 S=1/200

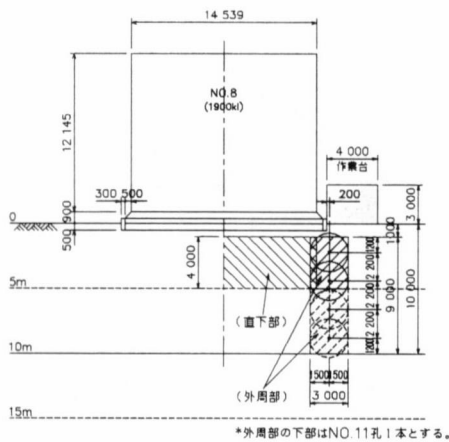


図-10 注入詳細断面図

平面図 S=1/200

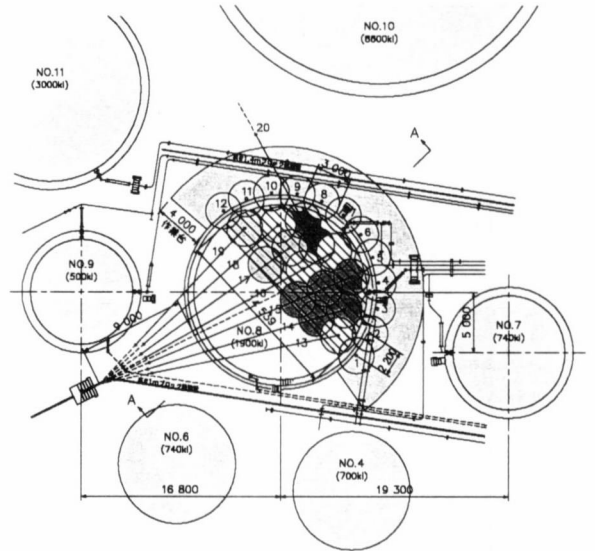


図-11 注入平面図

4. 現場施工実験

(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 1900ℓ、直径 14.5m：写真-2 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 $q_u = 50 \sim 100 \text{ kPa}$ ）
- 4) タンク底板下部における注入出来形の確認

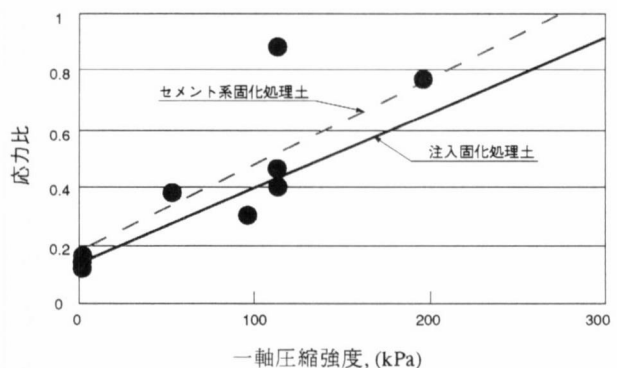
(2) 現場施工概要

図-10 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、調査完了深度まで 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-11 に示す。注入深度は液状化の可能性ある土層 GL -1.0~GL -5.0m のシルト質細砂を主な対象とし、タンク直下では注入圧の影響を確認するために 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

表-4 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 A	4 ℓ
反応材 B	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%

図-12 一軸圧縮強度 q_u と繰り返し強度に関する応力比 τ_d / σ_c の関係

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。この範囲は今回、配管・歩廊・階段等が過密している施工条件のできるだけ悪い部分が選定された。

注入材料は、耐久性の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-4 に注入材の標準配合、注入率を示す。

改良目標強度は、山崎ら⁷⁾が行ったセメント系固化工法の実験を参考に硅砂 8 号と新潟砂を用いた振動三軸試験結果に基づき、図-12 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_d / σ_c との関係から、 $q_u = 50 \sim 100 \text{ kPa}$ とした。

改良径は、注入材料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することになる。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れば、改良直径 4m の造成が可能である。今回の実験工事に際しては、以下に述べる限界注入速度試験の結果と作業の制約時間から直径 3m とした。

薬液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。図-13 に限界注入速度試験の一例を示す。この結果をもとに、注入速度を $12 \sim 15 \text{ l/min}$ と決定した。

(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。図-14 の上図にはタンク基礎、下図には隣接するタンク基礎および周辺地盤における鉛直変位の計測結果を示す。これらの図から判るように、いずれの場所も変位はほとんど観測されなかった。

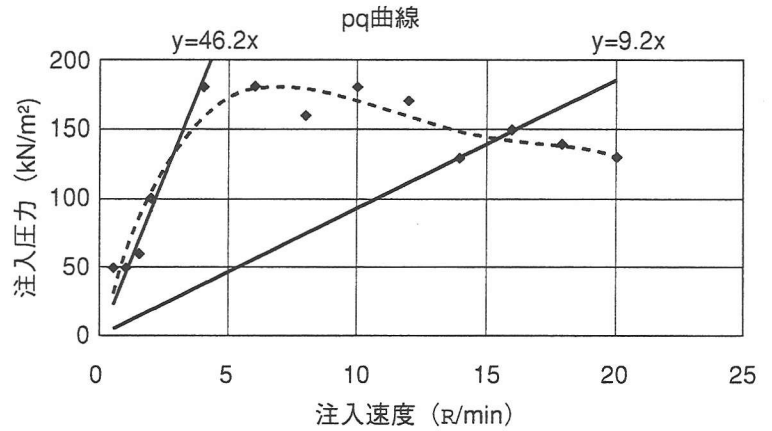


図-13 限界注入試験による吐出量

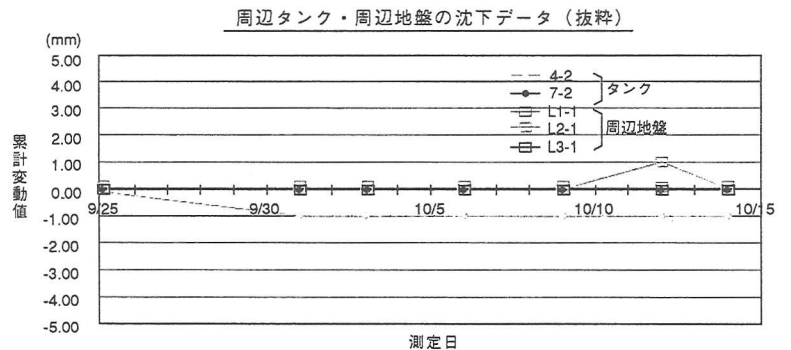
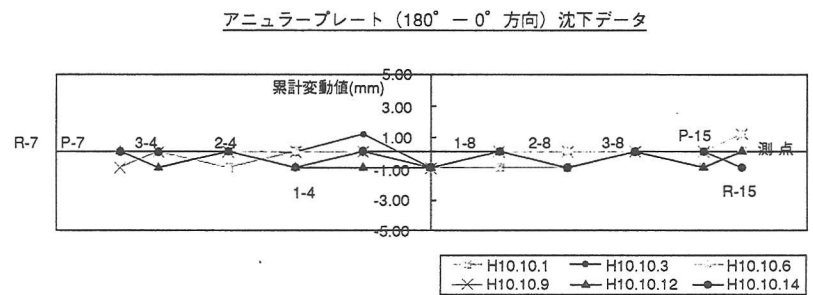


図-14 地盤変状計測結果

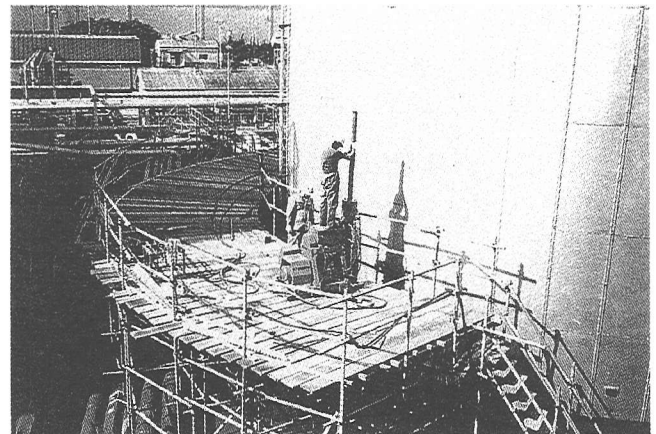


写真-3 外周部鉛直マシンによる注入施工状況

(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-3 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。

(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、現位置注入固化体の強度を確認した。図-15 に示すように、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。

標準貫入試験については改良前後の比較を行ったが、図-16 から判るように大きな差は無く、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當であることが判明した。

(6) タンク底板下部における注入出来高の確認

現場実験後に地盤断面の試掘を行い、液状化対策としての施工計画範囲にどのように充填されているか、薬液注入効果を確認した。オールコアサンプリングによる固化体の目視確認、タンク撤去後の注入地盤の試掘による目視確認を行った。写真-4 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状況よの差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。

5. おわりに

遠心振動模型実験から、以下に示す知見が得られた。

- ① 注入固化工法による既設タンクの3次元モデルによる遠心振動模型実験の結果、2次元モデルと同様に、改良範囲の違いによる沈下抑制効果が確認され、他の3工法と比べ優れた改良効果のあることが確認できた。さらに、せん断土槽を含む当実験システム、2次元モデルによる3次元の簡易評価の妥当性が確認された。
- ② 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、最大不等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た。さらに、改良体の深さ方向の

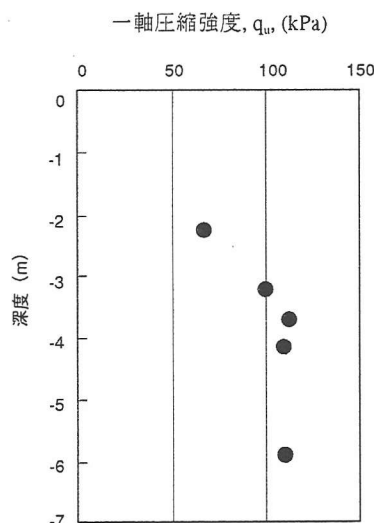


図-15 改良後の一軸圧縮強度

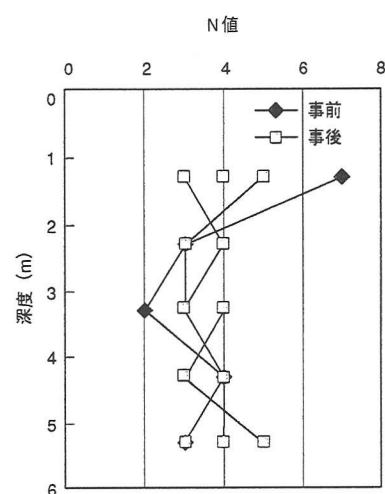


図-16 改良前後のN値分布

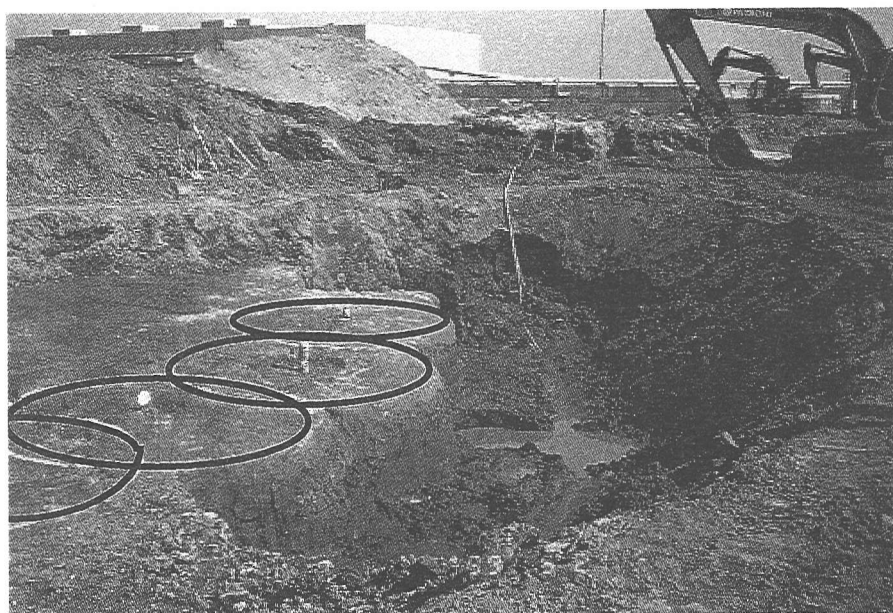


写真-4 注入固化体の試掘状況

改良範囲、強度の度合いによる効果の違いも確認し、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。

また、実機タンクヤードでの注入の現場実験から、以下の4点が確認された。

- ① 注入によるタンク底板や近傍の既設タンク、周辺地盤への影響はほとんどなく、危険物貯蔵区域での施工においても高い安全性のあることが確認された。
- ② 既設ヤード内での配管等の存在は施工上問題とならない。
- ③ 実際にタンクを撤去しタンク底面下部における出来形を調べた結果、計画改良範囲内の改良が十分に行われていることが確認できた。
- ④ 注入固化後の改良地盤強度は、設計上の改良目標強度（一軸圧縮強度: $q_u = 100 \text{ kPa}$ ）を満足することを確認した。

以上の遠心振動模型実験、現場実験の結果から、注入固化工法が従来の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も確認され、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。

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、これと併せて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（株）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、高橋章浩助手に対し謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 溝口ら：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.
- 2) 今村ら：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 次元遠心模型実験，第 35 回地盤工学研究発表会，2000(投稿中).
- 3) 今村ら：注入固化工法により液状化対策された既設石油タンクの遠心振動模型実験，土木学会第 55 回年次学術講演会発表講演集，2000(投稿中).
- 4) 辻ら：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、1999 年 12 月、pp.18-22.
- 5) 今村ら：せん断土槽の違いが応答特性に及ぼす影響，第 35 回地盤工学研究発表会，2000(投稿中).
- 6) Imamura, et al.: Nishimatsu dynamic geotechnical centrifuge, Proc. of Centrifuge 98, pp.25-30, 1998.
- 7) 山崎ら：溶液型注入固化材による液状化対策工法の開発、港湾技研資料、No. 905, 1998. 6.