

図-2 実験ケース模式図

表-1 実験ケース一覧表

実験code	改良範囲	改良深 H' (mm)	深さ改良比 (H'/H)	D_r (%)	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3/4	150	0.75	51.9	121
IA4	直下3/4	150	0.75	52.7	121
IA5	中抜き3/4	150	0.75	52.3	142
IA6	直下1/2	100	0.5	52.5	142

である。

なお、実験には西松建設技術研究所所有の遠心振動載荷実験装置（有効半径3.8 m，最大遠心加速度150 g）⁵⁾を使用して遠心加速度50 gで実施した。したがって、実物換算するとタンク径7 m，地盤深さ10 mに相当する。

図-3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7 mmと大きな値に対し、直下改良では約2 mm (30%)と大幅に沈下が抑えられ、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4 mm (60%)，1/2改良で約5 mm (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にもかかわらず、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同沈下が生じた。実際の施工では、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同沈下を抑制できると考えられる。

図-4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。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。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、その応答分布はすべてのケースにてほぼ一致した。

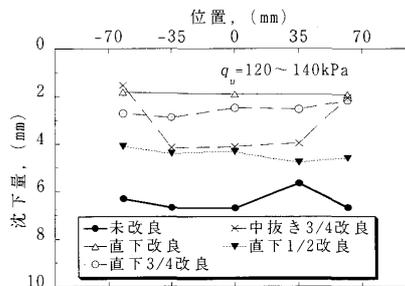


図-3 タンク直下における沈下分布形状

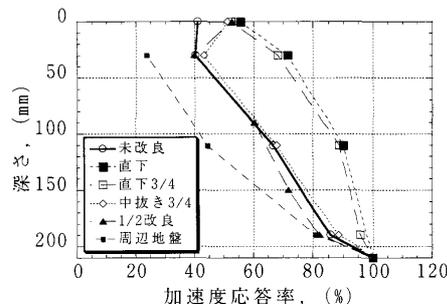


図-4 加速度応答率

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. 現場実験

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1900 kL，直径14.5 m：口絵写真-19参照）基礎地盤に対して、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。

3.1 現場施工概要

図-5に地質構成および注入詳細図を示す。消防法の規定によると、 N 値3程度の緩いシルト質砂からなっている表層からG.L. -5.0 m程度までが液状化対策の対象地盤となる。注入深度は、この液状化の可能性ある土層G.L. -1.0~-5.0 mのシルト質細砂を主な対象とし、タンク直下ではG.L. -5.0 mまで、タンク側板直

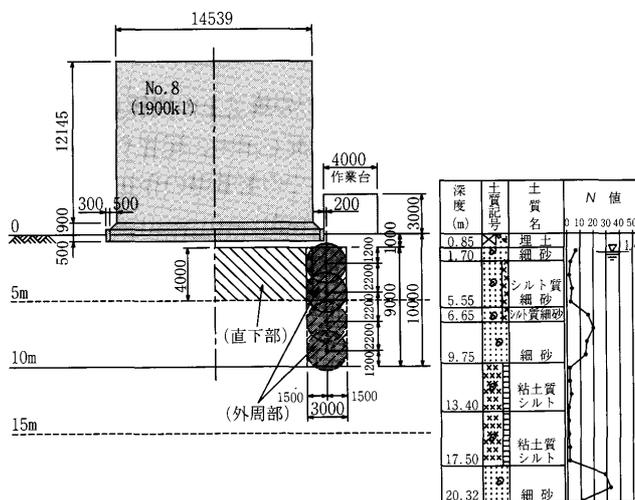


図-5 地質構成および注入詳細図

論文

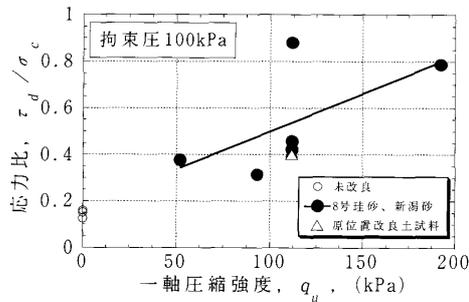


図-6 一軸圧縮強度と繰返し強度に関する応力比

下では施工性を確認するために G.L. -10.0 m 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。改良目標強度は、8号珪砂と新潟砂および現位置試料を用いた振動三軸試験結果に基づき、図-6に示す一軸圧縮強度 q_u と繰返し強度に関する応力比 τ_d/σ_c との関係から、改良土が液状化しない一軸圧縮強度として $q_u=50\sim 100$ 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、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。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12~15 l/minと決定した。

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、改良直径4 m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3 mとした。

3.2 注入によるタンク底板や近接構造物への影響

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、タンクのアニュラッププレート、タンク底板および基礎リング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。

3.3 既設タンクヤード内での施工上の問題点の把握

口絵写真-20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。

3.4 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-7左図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、 $q_u=100$ kPaの目標強度が確保できていることが確認された。一方、標準貫入試験については、図-7右図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

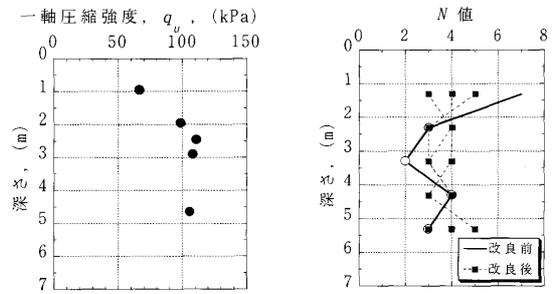


図-7 改良後の一軸圧縮強度と改良前後のN値分布

定は不適當であることが判明した。

3.5 タンク底板下部における注入出来高の確認

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、オールコアサンプリングによる注入地盤の目視確認による試掘調査を行った。口絵写真-21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、部分改良による薬液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。

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、数値解析と組合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。

最後に、貴重な現場実験の場を提供していただき、便宜を図っていただきました日石三菱(株)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回地盤工学研究発表会，pp. 2221~2222, 2000.
- 5) Imamura, S., Hagiwara, T. & Nomoto, T.: Nishi-matsu dynamic geotechnical centrifuge, Proc. of Centrifuge 98, pp. 25~30, 1998.

(原稿受理 2000.12.25)