

薬液注入により固化された飽和砂地盤上の 既設タンクの地震時沈下挙動

高橋 章浩¹・竹村 次朗²・溝口 敦司³

¹ 正会員 修(工) 東京工業大学助手 大学院理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

² 正会員 工博 東京工業大学助教授 大学院理工学研究科土木工学専攻 (同上)

³ 正会員 修(工) 西日本旅客鉄道(株) 大阪支社

臨海部に多く存在する既設石油タンクの液状化対策工法として薬液注入固化工法を取り上げ、遠心模型実験並びに数値解析により、その地震時沈下挙動について調べた。模型実験並びに数値解析では、改良地盤の強度、改良幅は一定とし、改良深さをパラメータとした。その結果、タンク直下の地盤改良は改良幅が小さくとも沈下抑制に対して効果的であること、地震動後の改良地盤自体の変形が非常に小さい場合には、沈下のほとんどはその直下の未改良砂地盤の圧縮沈下と未改良砂地盤の側方変形により発生し、沈下量は未改良率にほぼ比例することが分かった。

Key Words: numerical analysis, centrifuge model test, oil tank, liquefaction remediation, grouting

1. はじめに

これまでに筆者らは、既設石油タンクに対する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や過剰間隙水圧消散工法の一つであるグラベルドレーン工法などを取り上げ、これらの液状化抑制効果並びにタンクの不等沈下抑制効果について、遠心模型実験を中心に検討してきた¹⁾。しかしながらこれらの工法は、施工時に広い作業領域の確保することができない既設石油タンクへは適用が困難であることから、あまり実施されていない。そこで本研究では、配管等が錯綜する狭隘部においても比較的小さな施工機械で施工可能な薬液注入固化工法を取上げ、その対策効果について遠心模型実験並びに数値解析により検討した。

2. 実験・数値解析概要

図-1に遠心模型実験の断面とセンサーの配置を示す。実験モデルは試験装置の制約上2次元とし、幅440mm×奥行150mmのせん断土槽内に作成した。図に示すように厚さ $H_L = 150\text{mm}$ 、相対密度約50%の砂8号($D_{50} = 0.09\text{mm}$)砂層上にサーチャージ(50G場で10kPa相当)としてジルコン砂を敷き、その上に模型タンクを設置した。地盤は水を用いて飽和した。地盤改良を施すケースでは、予めコンテナ内で砂に特殊シリカ系水ガラスを注入して作成したもの(一軸強度

$q_u = \text{約 } 150\text{kPa}$)を所定の大きさに切りだしたものをタンク直下に設置した。改良幅は160mmで一定とした。模型タンクは、厚さ0.7mmのアルミ製枠(幅140mm、実物換算で7m)で作成した。底板は実物が比較的薄い鋼板であることを考慮し、模型タンクにはゴム膜の底板を取り付けた。その中に50G場でタンク接地圧が100kPaとなるように鉛散弾を入れた。このようにして作成した模型地盤に対して、50Gの遠心加速度場において図-2に示すような100 [2]Hzの正弦波(最大加速度約17 [0.34]G)を20波入力することにより、振動実験を行った(〔〕内は実物換算値)。実験では改良幅はタンク幅の約1.15倍で一定として、改良深さ H_T をパラメータに取り、表-1に示す計4ケースについて実験を行った。こ

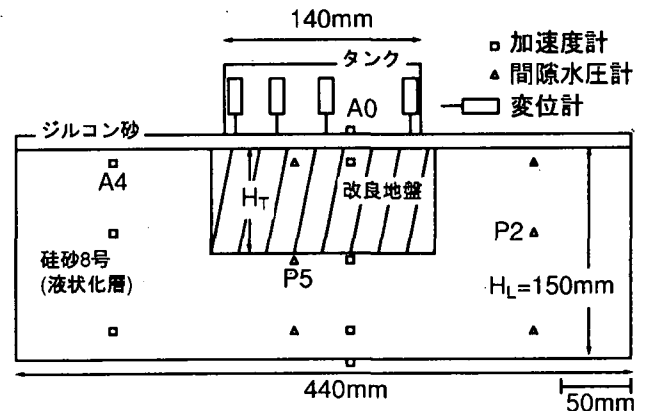


図-1 模型地盤の概要

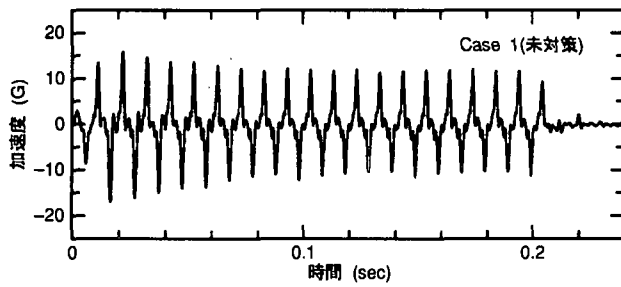


図-2 入力時振動の例 (Case 1)

表-1 実験条件

Case	改良深さ H_T /液状化層厚 H_L	最大加速度 (G)
1 (未改良)	0.00	17.0
2	0.25	17.1
3	0.50	17.7
4	1.00	13.3

表-2 解析に用いた地盤パラメータ

	G_s	e_0	κ	λ	
未改良砂層	2.65	1.03	2.9×10^{-3}	1.5×10^{-2}	
改良砂層	2.65	1.03	2.9×10^{-3}	1.5×10^{-3}	
ν	ϕ	ϕ_d	μ	ϕ_b	b_r
0.33	35	27	1.0	27	1.0×10^2
0.33	35	27	1.0	27	1.0×10^2
u_1	m_1	c	$k(m/s)$	OCR	s_0/σ'_0
8.0	1.0	30.0	1×10^{-3}	1.2	0.2
8.0	1.0	30.0	1×10^{-4}	12.0	0.2

未改良砂層は $R_5 = 0.25, R_{20} = 0.11 (\epsilon_{DA} = 5\%)$
改良砂層では $\epsilon_{DA} = 5\%$ に達しない。

では液状化層厚 H_L に対する改良深さ H_T の比 H_T/H_L を、地盤の改良率と呼ぶことにする。数値解析には、橋口らが提案している拡張下負荷面モデル⁴⁾を用いた。降伏曲面・下負荷面の形状は楕円型とし、微小ひずみ理論に基づき、時間離散化には Newmark- β 法を用いて、平面ひずみ条件で計算を行った。用いた地盤パラメータを表-2 に示す。薬液注入により改良された地盤は、土粒子骨格については未改良のものほとんど変わらないと考えられることから、ほとんどのパラメータは同じとし、過圧密比と透水係数の2つのパラメータのみ変更した。解析では、模型の実物換算値を用い、要素サイズは $0.5 \times 0.5m$ とし、排水は地表面のみ、側方境界は実験にあわせて等変位境界とした。入力地震動は実験と同じ波形、時間積分間隔は $\Delta t = 0.01sec$ とした。減衰に関しては、1次振動モードに対して0.1%の減衰となるように Reyleigh 減衰定数を設定した。解析対象全体系の1次固有周期は0.71秒であった。解析条件は、表-1に示す遠心模型実験に加え、 $H_T/H_L = 0.75$ も行った。但し、実験では Case 4 の振幅が若干小さくなってしまったが、解析ではすべてのケースで同じ実

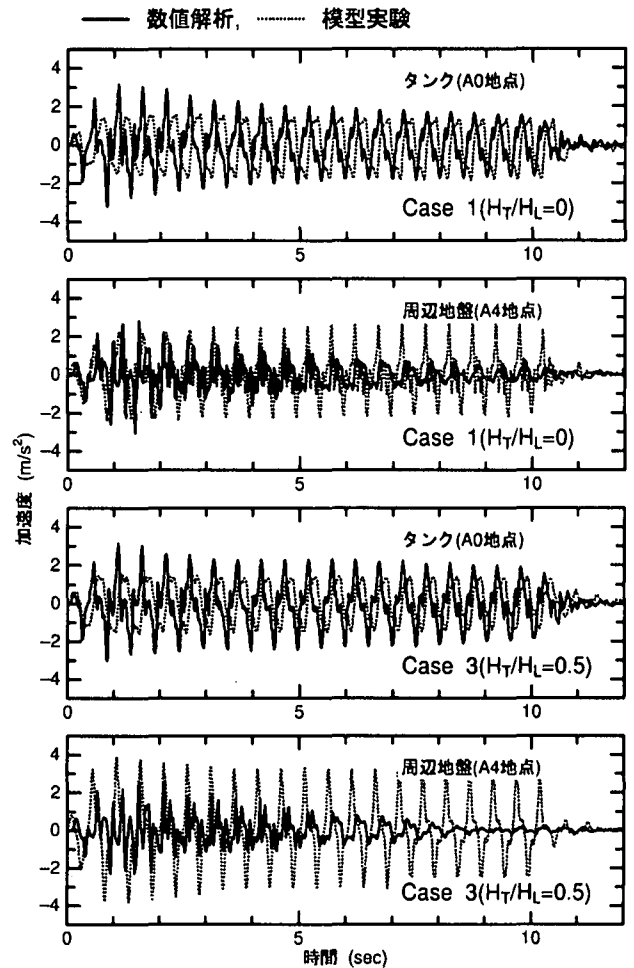


図-3 タンク (A0 地点) とその周辺地盤 (A4 地点) での加速度の時刻歴 (Case 1 & 3)

物換算最大加速度 0.34G を用いた。

3. 実験・解析結果

以下に示す実験・解析結果はすべて実物換算値である。

(1) 加速度・過剰間隙水圧応答

図-3に、改良率 $H_T/H_L = 0$ と 0.5 に相当する Case 1 & 3 におけるタンク (A0 地点) とその周辺地盤 (地表から 1m の A4 地点) での加速度の時刻歴を、図-4 にタンク直下地盤 (地表面から 4.5m の P5 地点) と周辺地盤 (地表から 3.5m の P2 地点) での過剰間隙水圧の時刻歴を示す。模型実験では、タンク・周辺地盤共に、加速度応答の振幅はほとんど一定である。しかしながら数値解析では全体的に徐々に減少している。タンクの応答に関しては、振動後半で模型実験とほぼ同じ振幅になっているのに対し、周辺地盤では極端に小さくなっている。この地震動に対する周辺地盤の加速度応答値の低下率は、地盤改良を施すことでより大きくなっており、これは後述する地盤の変形と密接に関係している。

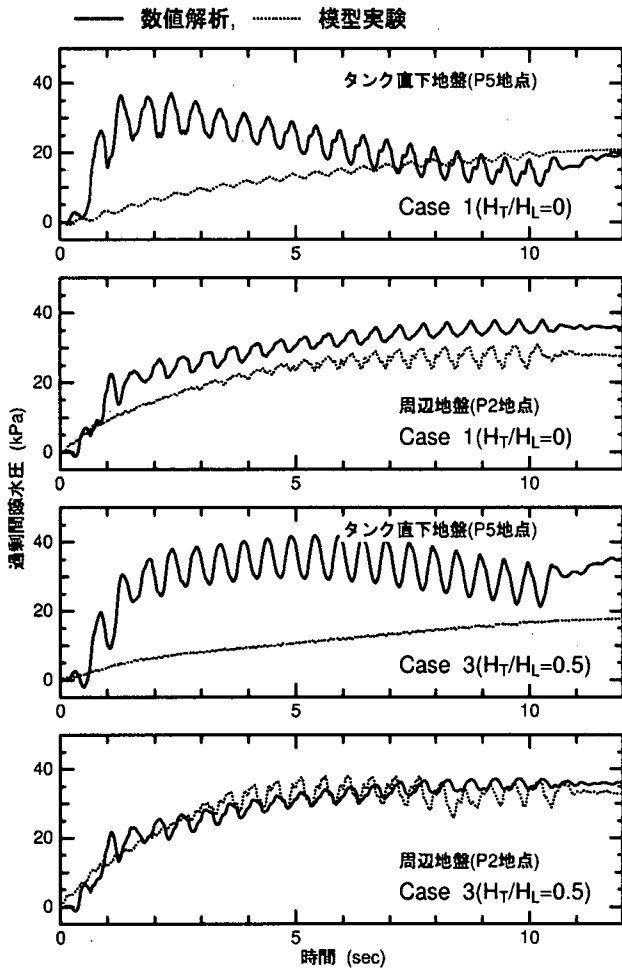


図-4 タンク直下地盤 (P5 地点) とその周辺地盤 (P2 地点) での過剰間隙水圧の時刻歴 (Case 1 & 3)

また過剰間隙水圧は、周辺地盤では実験結果と数値解析結果はよく一致している。一方でタンク直下では実験では振動中に単調に上昇しているのに対し、数値解析では振動中に一旦上昇した後、低下していき、その程度は地盤改良を施すことでより小さくなっている。このような数値解析での挙動は、ここでは図示していないが、数値解析の未改良のケースでは、タンクのすぐ直下で大きな側方変形が発生したときに負の過剰間隙水圧が発生していたことと、タンク直下の改良地盤の透水性の低さが原因と考えられる。

(2) タンクの沈下挙動

図-5 に数値解析における Case 1 & 3 の振動終了時の地盤変形を示す。地盤の変形モードは、実験時に X 線写真により求めた地盤内に設置の鉛散弾のターゲットの変位²⁾とよく一致している。未改良地盤では、タンク直下地盤が全体的に大きく側方に変位しているのに対し、 $H_T/H_L = 0.5$ の Case 3 では、改良部では側方変形がほとんど発生せず、その下部においてのみ発生

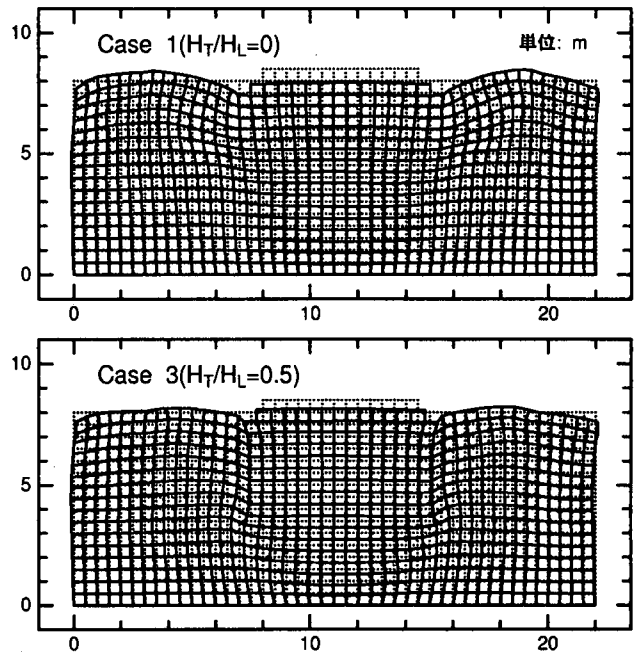


図-5 振動終了時の地盤変形 (変位を 5 倍に拡大した数値解析結果)

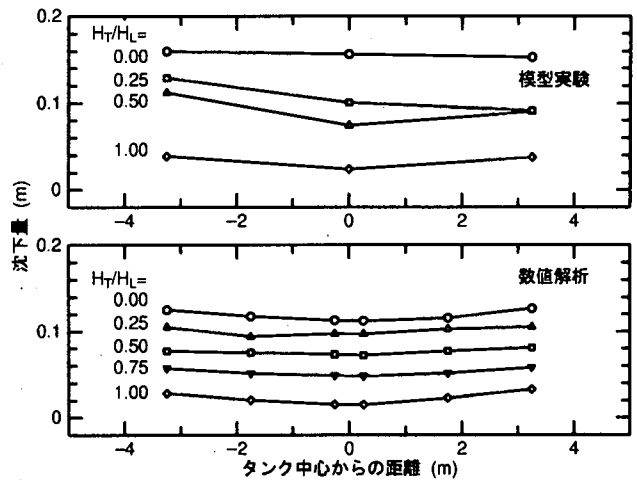


図-6 振動終了時のタンクの沈下分布

し、大きさも小さくなっており、地盤改良を施すことにより、タンク直下地盤の側方変形が小さくなるのが分かる。この側方への変位の抑制は、前節で示した未改良部の液状化の進展に影響を与えていると考えられる。即ちタンク直下地盤を改良すると、タンク荷重の影響が改良地盤を介して深部に及び、地表近くの周辺地盤への影響が小さくなるため周辺地盤は容易に液状化するといえる。

このように地盤改良を施すと、タンク直下並びに周辺地盤の変形モードが変化する。各改良率での振動終了時のタンクの沈下分布を図-6 に示す。改良率の増加に伴い沈下量は減少している。また、模型実験で見られる、タンク端部で相対的に大きな沈下が発生する傾

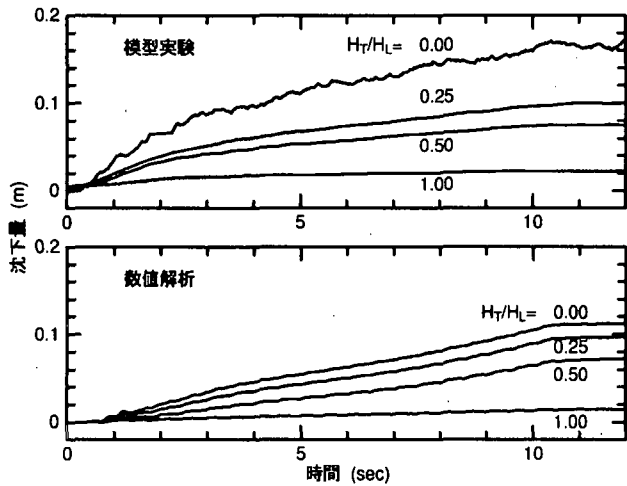


図-7 タンク中央の沈下の時刻歴

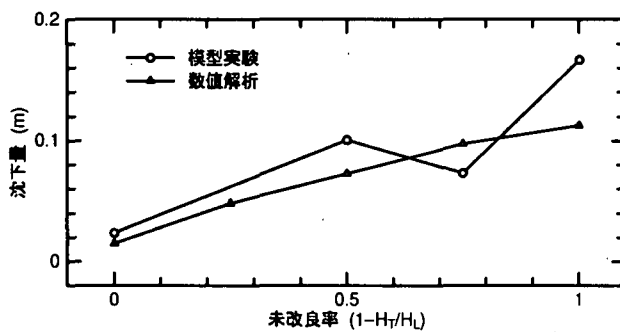


図-8 タンク中央の沈下と未改良率の関係

向は、数値解析においてもとらえられている。

地盤の改良率ごとのタンク中央部での振動中の沈下時刻歴を図-7に、最終沈下量と未改良率 $\frac{H_L - H_T}{H_L}$ の関係を図-8に示す。タンク沈下は振動と共に増加し、振動終了時にほぼ沈下は終了する。ここでは示していないが、振動終了後過剰間隙水圧の消散中にも、振動中の10~20%程度の沈下が発生する。模型実験・数値解析共に沈下量は未改良率にほぼ比例している。このことは、タンクの沈下のほとんどは未改良部で発生し、改良部直下の未改良砂地盤の圧縮沈下・側方変形量で決まることを意味する。

今回は、タンク直下を全面的に改良したケースのみを検討したが、タンク端部のみを改良(中抜き改良)しても、若干の不等沈下は生じるものの、全面的に改良したものとほとんど同じ沈下量が得られたという実験結果の報告もある⁵⁾。このような既設タンクの沈下抑制に最適な中抜き改良を含めた部分改良パターンの検討が必要であるが、そのためにはタンク底板やタンクのロッキング・スロッシングのモデル化が重要である

と考えている。

4. まとめ

既設石油タンクに対する薬液注入固化工法の液状化・不等沈下抑制効果について、地盤改良深さに着目した遠心模型実験並びに数値解析を行って得られた結果を以下に示す。

- (1) タンク直下の地盤改良は改良幅が小さくても、沈下抑制に対して効果的ある。
- (2) タンク直下地盤に改良を施すと、その側方への変形は抑制されるものの、周辺地盤はかえって液状化しやすくなる。
- (3) 地震動後の改良地盤自体の変形が非常に小さい場合、沈下のほとんどはその直下の未改良砂地盤の圧縮沈下と未改良砂地盤の側方変形により発生し、沈下量は未改良率 $(\frac{H_L - H_T}{H_L})$ に比例する。

謝辞: 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金(奨励研究(A) No.12750442)による補助を受けたことを記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kimura, T., Takemura, J., Hiro-oka, A., Okamura, M. & Matsuda, T.: Countermeasures against liquefaction of sand deposits with structures, *Proc. of 1st Int'l Conf. on Earthquake Geotech. Eng.(IS-Tokyo 95)*, Vol.3, 1203-1224, 1995.
- 2) 竹村次朗, 溝口敦司, 高橋章浩: 注入固化工法により地盤改良された砂地盤上のタンクの地震時挙動, 第35回地盤工学研究発表会, 1669-1670, 2000.
- 3) 溝口敦司, 竹村次朗, 高橋章浩: 既設タンクの液状化対策としての注入固化工法の効果について, 第35回地盤工学研究発表会, 1670-1671, 2000.
- 4) Hashiguchi, K. & Chen, Z.P.: Elastoplastic constitutive equation of soils with the subloading surface and the rotational hardening, *Int'l J. for Numer. and Anal. Meth. in Geomech.*, Vol.22, 197-277, 1998.
- 5) 今村眞一郎, 平野孝行, 佐藤靖彦, 萩原敏行, 竹村次朗: 薬液注入固化工法を用いた部分改良による既設タンク地盤の液状化対策工法の提案, 土と基礎, Vol.45, No.5, 28-30, 2001.