

ポスト液状化解析による注入固化対策後のタンクの残留変形検討

清水建設 福武 毅芳、○古川 治、中檜 新

1. はじめに 本論文では、前報¹⁾で検討した表層注入固化対策したタンク～地盤系の地震終了後の残留変形量を評価する。具体的にはポスト液状化解析を実施し、液状化後の三次元的変形状を検討する。

2. 液状化後の地盤変形の評価法（ポスト液状化理論） 文献^{2), 3), 4)}に示された考え方に従い、地震応答によって経験した地盤の最大せん断ひずみから、液状化終了後に発生する残留体積ひずみと残留せん断ひずみを求め、各要素で求められた残留ひずみが生じるように体積弾性係数とせん断弾性定数を設定し、タンク～地盤系の三次元FEM解析を行って、液状化後の残留変形解析を行う。以下に解析手法（ポスト液状化理論）を概説する。

地震時に生じる最大せん断ひずみを γ_{max} とすると、地震終了後、過剰間隙水圧が消散した状態で発生する残留せん断ひずみ γ_p および残留体積ひずみ ε_{vp} は、次式のように表わすことができる²⁾。

$$\varepsilon_{vp} = (1 - C_h) \cdot \frac{e_o - e_{min}^*}{1 + e_o} R_o^* \gamma_{max}^m \quad (1), \quad \gamma_p = C_h \cdot \frac{e_o - e_{min}^*}{1 + e_o} \frac{R_o^*}{M_{CS,o}} \gamma_{max}^m \quad (2)$$

ここで、 e_o ；初期間隙比、 $e_{min}^* = e_{max} - 1.3(e_{max} - e_{min})$ ：真の最小間隙比、 R_o^* 、 m ；砂の種類や密度に依存しない固有の定数で $R_o^* = 2.0$, $m = 0.76$ ⁵⁾、 $M_{CS,o}$ ；有効拘束圧がゼロ付近の限界状態面の傾き、 C_h ；液状化時の地震応答によって生じた非可逆な体積ひずみポテンシャルが残留せん断ひずみと残留体積ひずみに寄与する割合を示すパラメータ(水平地盤では 0.2)^{3), 4)}。

タンク～地盤系をモデル化した三次元FEMで自重解析を行い、地盤内の各要素の平均拘束圧 σ_m と水平方向の最大せん断応力 τ_{max} を求め、次式のように地盤の等価ポアソン比 ν_{eq} と等価弾性定数 E_{eq} を求める。

$$G_{eq} = \frac{\tau_{max}}{\gamma_p}, \quad K_{eq} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_{vp}} \quad (3), \quad \nu_{eq} = \frac{1}{2} \frac{3K_{eq} - 2G_{eq}}{3K_{eq} + G_{eq}} \quad (4), \quad E_{eq} = 2 \cdot (1 + \nu_{eq}) \cdot G_{eq} \quad (5)$$

求めた ν_{eq} と E_{eq} をパラメータとして、再度自重解析を行い液状化後の変形を算定する。この際自重解析から求めた各要素の応力とひずみが式(1), (2)で求めた値と整合するように、必要に応じて式(4), (5)を用いてパラメータの繰返し計算を行う。今回は三次元状態で評価するので、せん断ひずみ γ は次式の合せせん断ひずみ Γ を用いる。

$$\Gamma = \sqrt{\gamma_{zx}^2 + \gamma_{zy}^2 + \gamma_{xy}^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2} \quad (6)$$

3. 解析条件 各要素ごとに生じた最大の Γ に基づき、残留変形をイタレーション自重解析により算定した。よって要素ごとに γ_p 、 ε_{vp} も異なる。タンク重量と液体重量を集約して、スラブの単位体積重量として評価した。境界条件は、底面固定、側面は鉛直ローラとした。注入固化の改良範囲は、直径 19.6m の円筒状であり（図1のピンクで囲んだ領域）、改良体下部はGL-9.1mである。

自重解析の収束判定は、本来は全ての要素で式(1)と(2)を満足することにある。しかし、多数回の自重解析を実施しても、解が若干振動してしまい、式(1)と(2)を同時に満足する結果は得にくかった。そこで、地表面沈下が一定値に落ちついた（沈下傾向が定常になった）ことにより収束とみなした。このとき剛性は前ステップの剛性と同等値に収斂していることを確認し、せん断ひずみも殆どの要素で概ね γ_p に収斂していた。

4. 解析結果 前報の有効応力解析結果¹⁾とポスト液状化理論に基づき、残留変形量を求めた。図1には鉛直断面における変形図を示す。ピンクの枠で囲んだ部分が改良体である。色の濃淡は鉛直変位の大きさを示す。地表の沈下性状はすり鉢状に沈下している。タンク底版と改良体は剛体的に沈下している。鉛直ひずみは液状化層で大きく発生し、改良体の下層では 2%程度となった。液状化層では沈下に伴い側方変形も生じている。表層の沈下量はタンク底版で約 11cm、30m離れた周辺地盤で 5cm程度である。この勾配の相対変位量は十分吸収できるものと考えられる。図2には対称面(断面①)のタンク地表近傍の沈下形状を示す。タンク底版の場所による違いを詳しく見る

キーワード 液状化, 三次元, 薬液注入改良, タンク, ポスト液状化, 残留変形

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株) 技術研究所 TEL 03-3820-8314

と、タンク中心部の沈下量は 11.03cm、端部の沈下量は 10.35cm である。すなわちタンク中心と端部における相対変形沈下量は 0.7cm と小さく、端部と中心の平均変形勾配は 1/983 である。地表における水平変形はごく小さい。

4. まとめ ポスト液状化解析を行い、過剰間隙水圧が全て消散した後の残留変形量を求め、以下のことが明らか

になった。①鉛直ひずみは液状化層で大きく発生し、特に改良体の下層で、2%程度と大きい。②沈下性状はすり鉢状に沈下している。③タン

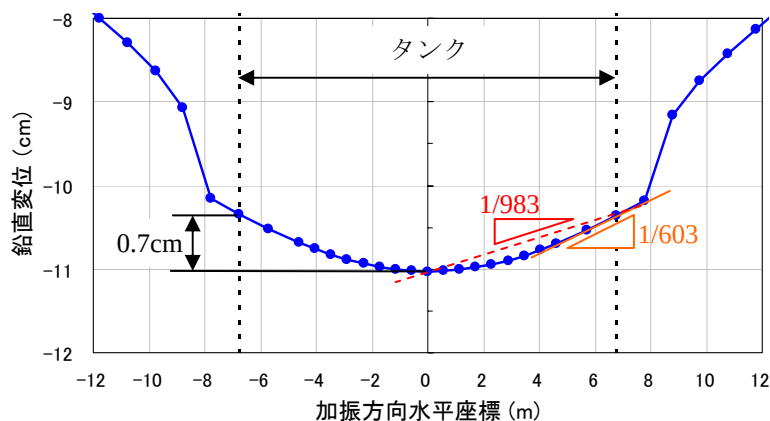
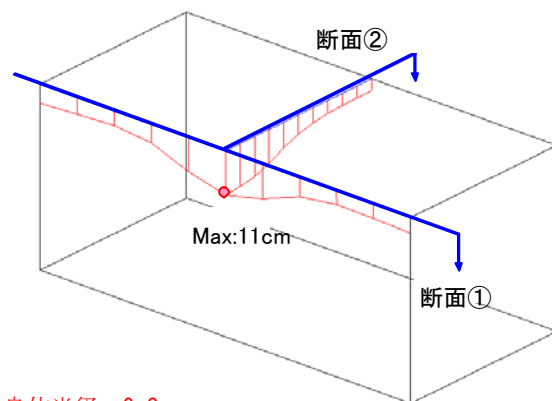


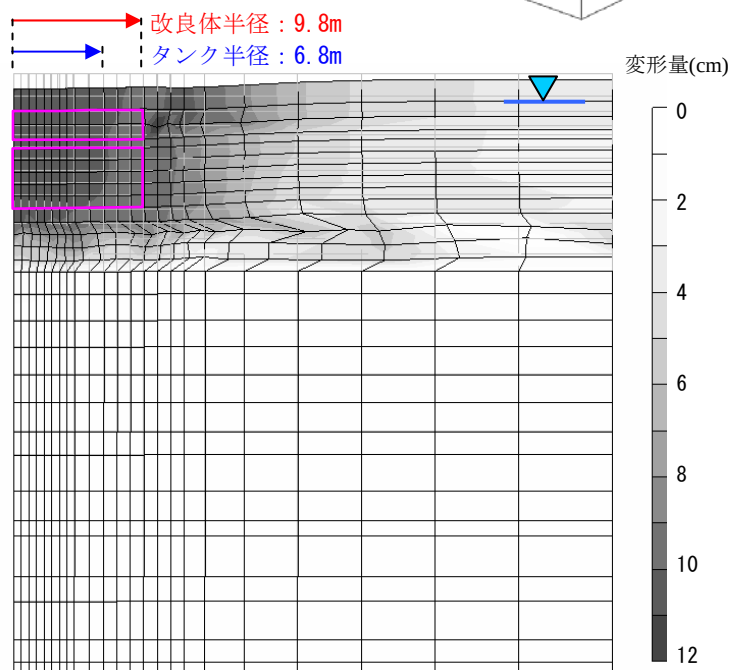
図2 対称面(断面①)のタンク近傍の地表沈下形状



ク底版と改良体は剛体的に沈下している。④絶対沈下量はタンク底版で約 11cm、周辺地盤で 5cm 程度であり、この相対変位量は吸収できるものと考えられる。⑤タンク底版の場所による違いは、タンク中心部の沈下量は 11.03cm、端部の沈下量は 10.35cm である。タンク中心部と端部における相対変形沈下量は 0.7cm と小さく、平均変形勾配は 1/983 である。以上より、薬液注入改良を提案した範囲で改良すれば、改良部分以外で液状化が生じてもタンクの安全性は確保できると言える。

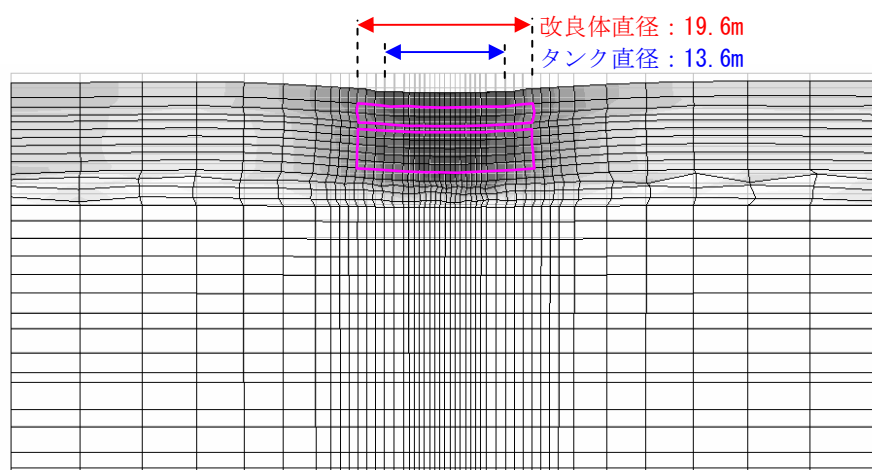
謝辞 ポスト液状化に関しては、清水建設の社本康広博士に有用な助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献 1) 福武・古川・中檜：表層注入固化対策によるタンクの液状化時の挙動解析，第 64 回土木学会学術講演会 III 2009(投稿中) 2) Shamoto, Y., Zhang, J.-M. and Goto, S. (1997): Mechanism of Large Post-Liquefaction Deformation, Soils and Foundations Vol. 37, No. 2, pp. 71-80. 3) Shamoto, Y., Zhang, J.-M. and Tokimatsu, K. (1998): New



(a) 対称面と直交 (断面②, 変形倍率 10)

Charts for Predicting Large Residual Post-Liquefaction Ground Deformation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.17, pp427-438. 4) 社本康広、張建民、時松孝次 (1998): 液状化後の地盤沈下と側方変位に対する簡易予測法、地盤工学会「地震時の地盤・土構造物の流動性および永久変形に関するシンポジウム」. 5) Shamoto, Y. and Zhang, J.-M(1998): Evaluation of Seismic Settlement Potential of Saturated Sandy Ground based on Concept of Relative Compression, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Vol.2, pp57-68.



(b) 対称面 (断面①, 変形倍率 20)

図1 鉛直断面における変形図