

地下式貯槽に接する盛土の地震時沈下・変形予測手法

松田 隆 上野 孝之

Methods of Predicting Seismic Deformation for Abutting Embankments of Storage Tanks

Takashi Matsuda Takayuki Ueno

Abstract

Seismic response analyses were conducted under the strong input motion of the L2 earthquake wave for a pile-supported LNG storage tank. The object of the analyses was to investigate the applicability of each analysis method as afor seismic design. For the response analysis of the ground motion, the equivalent linear method and the non-linear time integration method were compared. The equivalent linear method yields responses almost equal to those of the detailed method and gives somewhat larger accelerations at the ground surface, so the equivalent linear method would be adapted to the seismic design from the aspect of the safety assessment. For the soil-structure interaction analysis, four methods including the Penzien model and the FEM model were compared. It was indicated that, taking account of the nonlinearity of the ground using an interaction model gives relatively large section forces, as well as using more detailed methods such as 3D FEM and axial symmetry FEM. In the last result, the existing PC-LNG tank has satisfactory seismic safety against the L2 earthquake wave.

概 要

地下式貯槽周辺盛土を対象に、レベル2地震動に対する耐震性照査手法の一環として、残留変形・沈下を簡易的に評価する手法を開発した。開発の第一段階として、詳細な液状化の影響を考慮できる動的有効応力解析法による地震応答解析を用いて、地下式貯槽に接する盛土構造物の残留変形モードを把握した。次に、地震時のすべり安定性の可能性が無いことを判断したうえで、周辺地盤の液状化の影響を考慮した盛土構造物の変形・沈下予測に関する簡易法を構築した。この手法の位置付けは、有効応力解析に供する地盤物性が与えられない場合の等価線形化法や線形解析の適用を前提とする。具体的には、液状化抵抗率を基本とした物性評価を行ない、最終的には自重解析による沈下予測手法を提案する。その簡易的予測手法の妥当性は、先の詳細法である有効応力法による地震応答解析と比較し、変形モードと盛土沈下量がほぼ一致することで確認した。

1. はじめに

LNG地下式貯槽指針¹⁾に関しては、1995年兵庫県南部地震での貯蔵設備の被害を受けて、レベル2地震に対する耐震性評価を盛り込むための改定がなされた²⁾。この指針には本体構造物である鉄筋コンクリート製躯体、屋根、メンブレン、保冷材のほか、周辺地盤や盛土構造物の安定性も評価の対象としている。これは、地盤や土構造物の安定性と構造本体の安定性が一体となって貯液であるLNGの漏液防止を確保することになるためである。具体的な盛土の貯槽本体構造物に対する影響としては、その周圧が本体側壁の圧縮応力として作用することで、側壁の曲げ耐力が上昇することになる。この場合、地震時に盛土が崩壊あるいは沈下すると、側壁の曲げ耐力も低下することになる。すなわち、周辺にある盛土は、貯槽本体の側壁を保持する機能が要求され、レベル2地震

動に対してもその機能を維持する必要がある。

一方、LNG地下式貯槽周辺盛土は道路や河川盛土とは異なり、盛土端部は構造物に接し、のり面が一方向にしかない。この場合、振動モードは左右対称ではなく一方に偏るモードになり、また通常の盛土は底部から入力されるのに対して、構造物に接する側面からも地震動が入力される。これまで、このような盛土のレベル2地震動に対する耐震性評価手法は確立されていないばかりか、前述した変形モードに関しても不明な点が多い。

盛土などの地盤と土構造物の地震時変形予測に関しては、動的有効応力解析法の適用や鉄道構造物耐震設計指針などに盛り込まれている簡易法の適用が考えられる。前者の場合、解析法固有の詳細な土質試験結果が必要であり、N値程度の地盤定数だけが把握されているような場合、動的有効応力解析法の適用はその精度が保証されない。後者に関しては、鉄道構造物耐震設計指針などの

簡易法の適用が考えられるが、一般的な対称形の盛土の沈下量予測が適用範囲であり、LNG貯槽に接するような盛土に関しては適用性を別途に確認する必要がある。

本研究では、N値程度の基本的な地盤定数を用いて、盛土の地震時変形状態、特に、構造物に接する部分の沈下量を評価する手法を開発した。

Fig.1に本研究の検討フローを示す。ここでは、第一段階として、詳細な液状化の影響を考慮できる動的有効応力解析法による地震応答解析を用いて、LNG貯槽に接する盛土構造物の残留変形モードを把握した。この残留変形モードは第三段階で設定する簡易法の妥当性を確認する基準値にもなる。すなわち、液状化を考慮し残留変形を算定する動的有効応力解析法は、盛土の挙動を正確に再現しているものと仮定し、最終的な簡易法の検証に用いた。具体的には、護岸の液状化時変形挙動³⁾や地盤沈下解析⁴⁾に実績のある大林組のEFFECTを採用した。

第二段階として、地震時のすべり安定性の可能性を把握する。これは、盛土の変形の評価にすべり変形を加える必要を判定するためであるが、結果的には、LNG貯槽に接する最大級の盛土に対してもすべり安定性は確保できることが判明した。そのため、すべり安定性の検討は変形評価項目には加えないものとした。

第三段階では、周辺地盤の液状化の影響を考慮した盛土構造物の変形・沈下予測に関する簡易法を提案するものである。この手法の位置付けは、一般的な耐震検討の場合、すなわち動的有効応力解析法に供する地盤物性が与えられない場合の等価線形化法や線形解析の適用を前提とする。具体的には、液状化抵抗率を基本とした沈下予測手法を提案し、その予測結果を有効応力解析の推定結果と比較した。最終的にこれらの検討はLNG地下式貯槽指針²⁾(平成14年度発刊)に反映された。

2. 動的有効応力解析法EFFECTによる挙動予測

2.1 解析条件

ここでの解析結果が、地下式貯槽に接する盛土のレベル2地震時挙動や、その振動現象によって生じる残留変形を与えるものとする。これは、これまで検討対象となる盛土構造物にレベル2地震動が作用し損傷を受けた例がなく、また、実証的研究もないためである。

Fig.2に検討対象とする盛土とその盛土に接する貯槽の関係を示す。盛土は、既存する地下式貯槽周辺盛土のうち、最大の高さ10mを有する構造を採用した。のり面勾配はLNG地下式貯槽指針に示されている一般的なのり面勾配1:2.5¹⁾を採用した。また、天端幅は大規模地下式貯槽で標準的に採用されている15mとした。

地盤構造は、多くの地下式貯槽が実在する埋立て地盤を想定した。具体的には、上層16mは液状化の可能性のあるN値10の砂層とし、地下水位をGL-4mに設定した。下層はN値3の軟弱な粘性土と仮定した。地盤改良は盛土斜面下部と法尻から10mの平面区間で行われ、実際の施工によってN値が平均で10上昇したことを参考に、地盤物

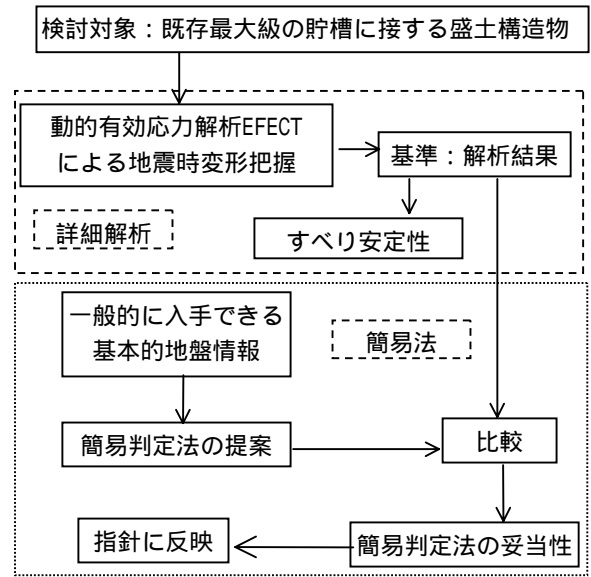


Fig. 1 検討フロー
Investigation Flow

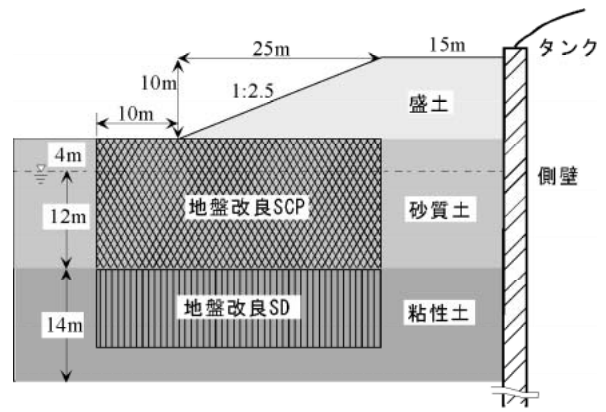


Fig. 2 解析対象盛土と地盤構成
Analysis Model and Soil Condition

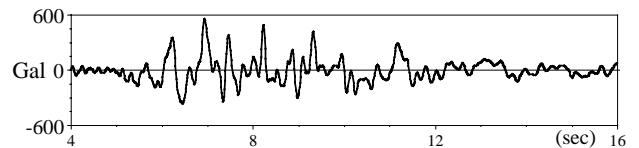


Fig. 3 入力地震動
Input Motion for Engineering Foundation (L2)

性を設定した。

自由地盤側の境界条件は粘性境界を設置し、側壁側は側壁をモデル化するため梁要素を設置した。梁要素の剛性は、LNG地下式貯槽全体の曲げ剛性を単位奥行き当たりの値に変換することで設定した。梁要素下端は回転自由度を拘束したため、側壁側からの地震動の入力は下方の粘性境界からの入力とほぼ等しくなると考えられる。

解析ケースは、地盤改良が有り無しとの二つである。

Fig.3に入力地震動波形を示す。この波形は、工学的基盤で設定された内陸型のレベル2地震動を、重複反射解析を用いて、解析領域下端に上げたものである。

2.2 解析結果

最終変形状態をFig.4～5に示す。側壁に接する位置での盛土の沈下量dは、改良有りの場合で10.2cm、無しの場合で15.1cmとなり、盛土の変形抑止に対する地盤改良効果が認められる。この沈下によって側壁の拘束圧は低下するが、耐力に及ぼす影響はほとんど無い。盛土の変形モードは、地盤改良がある場合、地盤改良によつてのり戻りの側方流動が抑制されるため天端の水平変位も小さくなる。地盤改良がない場合、側方流動によつて水平地盤が押され、盛土に接する地盤はやや盛り上がる形状になる。盛土天端沈下は側壁に接する位置で大きい。

Fig.6に応答波形を示す。盛土天端Aの最大加速度は1150Galであり、自由地盤表面での530Galに対して約2倍増幅する。盛土下部地盤Dは、盛土上載圧の影響で液状化せず、振動成分が大きくなっている。盛土の沈下Aでは、最初の主要動振動で大きく沈下し、その後、過剰間隙水圧が大きい時間帯においての沈下は小さい。これは、盛土下部地盤が側壁と地盤改良部に囲まれており、変形が抑制されると考えられる。これに対して自由地盤Bは単調に沈下が進行する。Fig.7に、過剰間隙水圧が消散するまでの地盤沈下の経時変化を示す。自由地盤側Cでは300秒後においても消散しきっていないが、地盤沈下Bは約70秒後に終了している。盛土直下地盤の過剰間隙水圧Dはほぼ100秒で消散しているが、残留沈下Aは初期に生じているのみである。

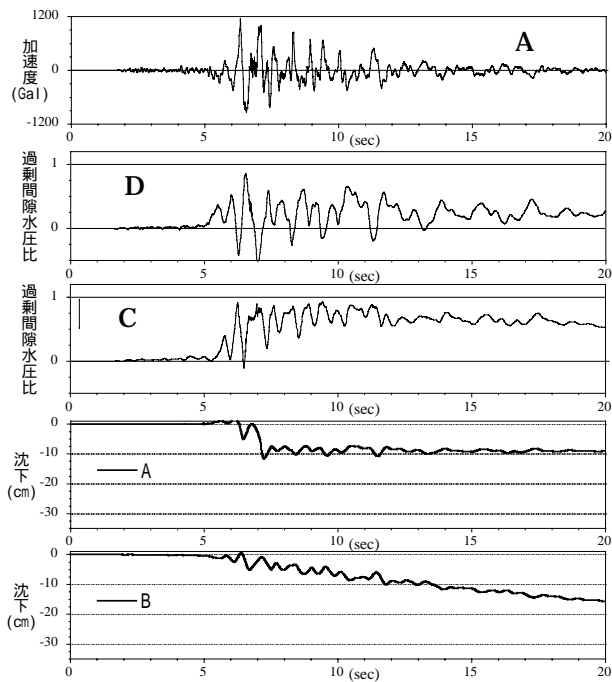


Fig. 6 主要動における時刻歴応答 (地盤改良有り)
Time Histories during Main Shock

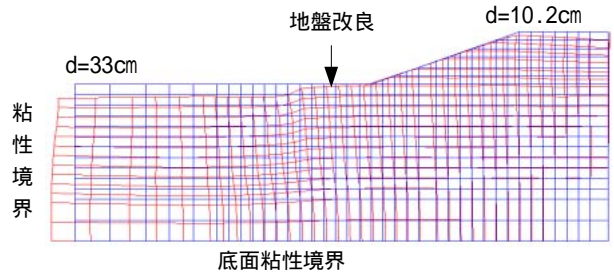


Fig. 4 地盤改良が有る場合の残留変形
Residual Deformation (In Case of Soil Improvement)

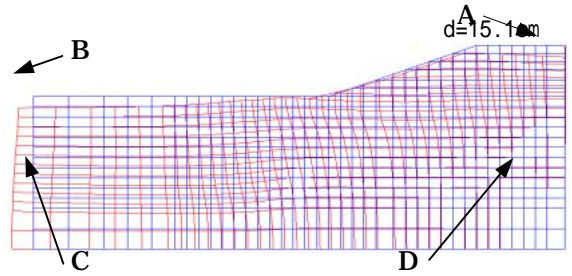


Fig. 5 地盤改良が無い場合の残留変形
Residual Deformation (In Case of Original Condition)

2.3 すべり崩壊に対する検討の必要性の有無

Fig.8に地震応答解析によつて生じるせん断応力から算定した局所安全係数を基にすべり線 (Fig.8中のA₁, A₂)を仮定し、そのすべり線に沿った全体すべりに対する安全率F_sを算定した (式1参照)。ここでは、最も盛土に大きな慣性力が作用する、盛土天端の加速度が最大となる時刻におけるせん断力から判定した。盛土近くのすべり線A₁に沿ったすべり安全率は1.57であり、局所安全率の小さい下部の粘性土層を通過するすべり線A₂に

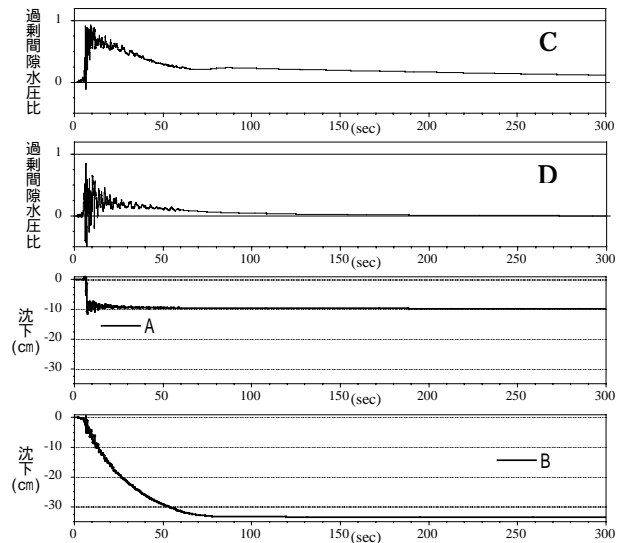


Fig. 7 間隙水圧消散までの沈下現象 (地盤改良有り)
Time Histories during Main Shock

沿った F_s は1.16である。このことから、盛土が1000Galを超える加速度で振動した場合においても、全体すべりに対する安全性は確保される。よって、レベル2地震時の盛土の変形挙動及び沈下予測において、すべり変形を考慮する必要がないことを確認した。

$$F_s = \frac{\sum S_i \cdot L_i}{\sum \tau_i \cdot L_i} \dots\dots (1)$$

ここに、 S_i : i要素のせん断強度
 L_i : i要素内の仮定せん断すべり面長さ
 τ_i : i要素内の仮定すべり面上の発生せん断力

3. 簡易法の提案と妥当性の確認

3.1 解析方法

ここで簡易法とは、N値や単位体積重量などの通常的地盤調査で得られる地盤定数を用い、静的FEMや一次元地震応答解析などの比較的簡単な解析手法による算定手法である。ここでは、液状化や振動現象によって生じる残留変形を反映できることを前提に簡易法を提案する。

Fig.9に簡易法の解析評価フローを示す。基本原理は、地盤沈下は繰り返しせん断ひずみ振幅に依存する体積変化によって生じる、とした石原らの理論⁹⁾に基づいている(Fig.10 (a))。ただし、地盤が液状化した場合、液状化時の変状の他、液状化後の過剰間隙水圧の消散に伴う体積変化も生じる。この種の変形は一種の圧密変形になるが、液状化時の沈下と消散時の沈下の関係は、前者が支配的であることがFig.7の過剰間隙水圧と沈下の関係からも示されていることから、ここでは消散時の沈下変形は無視した。盛土構造はFig.3に示すように二次元平面ひずみ要素でモデル化できるものとして、地震力による変形を反映できる盛土及び周辺地盤の等価剛性を用いたFEM静的自重解析によって残留変形を算定する

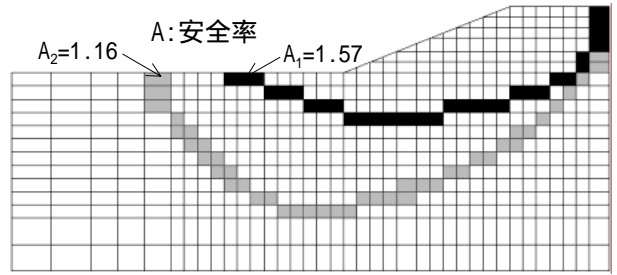


Fig. 8 すべり安全率 Safety Factor and Sliding Line

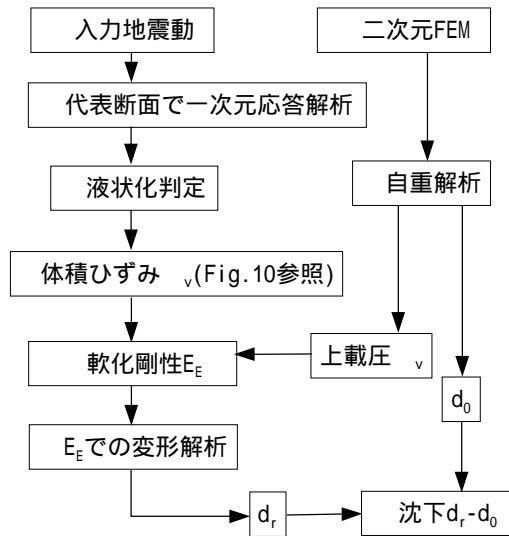
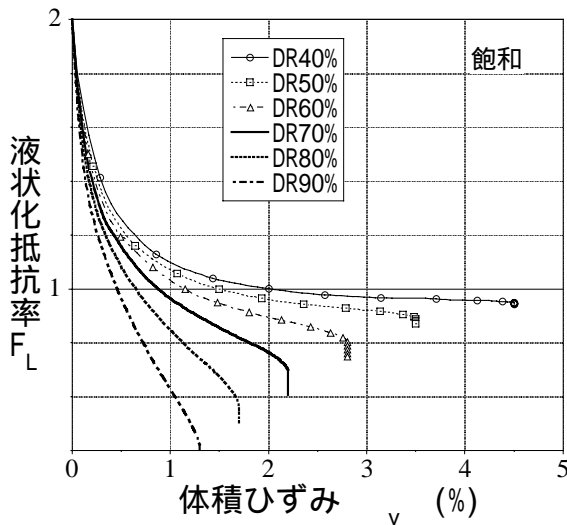
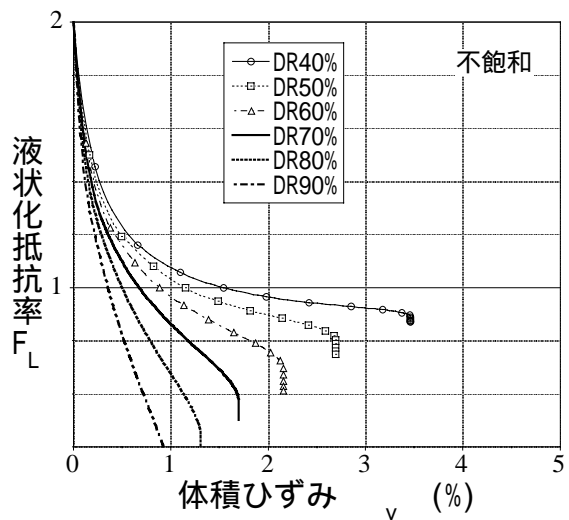


Fig. 9 簡易法の評価フロー Procedure of Estimation for Deformation



(a) 飽和



(b) 不飽和

Fig. 10 $F_L \sim v$ 関係 Relationship between F_L and v

(Fig.9)。具体的には、地震時の液状化や振動によって生じるひずみを評価し得る等価剛性 E_E (同)を用いた変形解析結果(同)と、初期剛性を用いた変形解析結果(同)との差分で評価している。

地震時等価剛性 E_E は、一次元地震応答解析によって液状化抵抗率 F_L を求め(同 ~), Fig.10(a)に示す液状化抵抗率 F_L ~体積ひずみ ν_v 関係から体積ひずみ ν_v を評価する(同)。このとき、不飽和部分についてもせん断応力比が算定できることから、便宜上、液状化抵抗率 F_L を求めFig.10の右図に従い体積ひずみを算定する。この液状化抵抗率 F_L ~体積ひずみ ν_v 関係は、砂質地盤の場合、相対密度に依存し、同様の相対密度の場合、飽和地盤の方が大きな体積ひずみが生じる実験事実⁶⁾に基づいて設定している。ただし、不飽和土の液状化抵抗率 F_L ~体積ひずみ ν_v 関係の妥当性については、実験データが少なく定性的な領域を出ないため、今後の詳細な実験データに基づく検討が必要である。

地震時等価剛性 E_E は、式(2)により算定する。すなわち、弾性の体積圧縮係数の考え方を導入し、応力である上載圧と体積ひずみが既知として、地震時等価剛性 E_E を逆算することにした。ここで、 ν はポアソン比であり、上載圧 σ_v は初期応力解析で求める。

$$E_E = \frac{1}{3(1-2\nu)} \cdot \frac{\sigma_v}{\varepsilon_v} \quad \dots\dots (2)$$

3.2 検討モデル

Fig.11に検討対象となる解析モデルを示す。断面緒元は2章の動的有効応力解析法に用いたモデルと同様である。ここでは、地震時等価剛性を算定する断面として、自由地盤部A、改良地盤部B、盛土部Cの3断面を設定した。これら3断面で一次元地震応答解析をすることになるが、このとき地盤の物性値に関しては、盛土重量による拘束圧の影響は考慮していない。

地盤構造は、上層16mの砂層(N値10)を地下水位(GL-4m)及び地盤改良区域を境界に分割した。ただし、飽和砂層は厚いため、2層に分割した。下層(M値3の軟弱粘性土)は分割せず1層とした。自重解析を行う場合の初期剛性は、各層の中央部のS波速度を基本に、せん断剛性値が拘束圧の1/2乗則に従うものとして算定した(式(3))。

$$G_0 = \frac{\gamma_i}{9.8} \left(aN^{1/3} \right)^2 \quad \dots\dots (3)$$

ただし、 G_0 :せん断剛性
 a :定数{ $a=100$ (粘性土), $a=80$ (砂質土)}
 γ_i :単位体積重量

自重解析に用いるFEMモデルの側方境界条件は、両端とも鉛直ローラーとした。そのため、自由地盤側の盛土沈下に伴う水平方向の変形は阻止される。この影響を低減させるため、バッファゾーンとして25mの自由地盤を付加した。

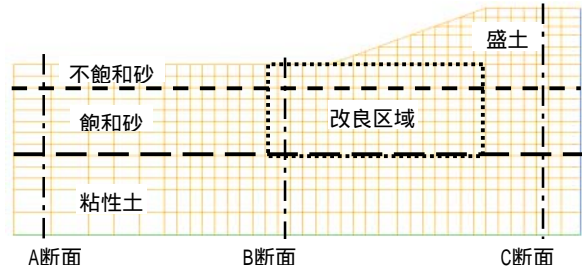


Fig. 11 簡易法の評価対象領域分割
Regions for Presented Method

FL:液状化抵抗率 R = E_r/E_0		
FL=1.31, R=5%	FL=2.84, R=100%	R=5%
FL=0.75, R=0.4%	FL=3.52, R=100%	R=1.3%
FL=0.54, R=0.6%	FL=1.76, R=19%	R=100%
R=100%		

Fig. 12 各領域での剛性低下率R分布(改良あり)
Distributions of Reducing Factor (R)

解析ケースは、有効応力法を用いた地震応答解析と同様に、地盤改良ありと改良なしの2ケースである。

3.3 検討結果

一次元地震応答解析結果から算定した液状化抵抗率及び、式(2)によって評価した等価剛性 E_E と初期剛性 E_0 の比Rの分布(地盤改良ありの場合)をFig.12に示す。飽和砂層の剛性低下率Rが大きい。すなわち、液状化する砂層の場合、 F_L が2を下回ると等価剛性 E_E は低下し、液状化の場合、初期剛性 E_0 の1%以下になる。ここで、液状化抵抗率($F_L=0.54$)の小さな砂層下部の方で低下率($R=0.6\%$)が大きくなっているのは、下層の方で上載圧が大きくなっているためである。なお、地盤改良なしの場合、B断面での等価剛性はA断面と同じになる以外は、Fig.12の分布と同様になる。

地盤改良がある場合の最終変形状態をFig.13に、地盤改良が無い場合の最終変形状態をFig.14に、それぞれ詳細解析法である動的有効応力解析法の変形図を併記して示す。地盤改良がある場合、地盤改良部の沈下はなく、水平方向の水平変形も小さい。構造物に接する部分の沈下は、のり肩の沈下より大きく、この傾向は提案方法と動的有効応力解析法とで一致している。盛土の沈下量は提案法で11.5cm、動的有効応力解析法で10.2cmとほぼ一致している。地盤改良がない場合も、盛土及び周辺地盤の変形モードは、提案方法と動的有効応力解析法とで一致している。ただし、盛土天端の沈下量は、動的有効応力解析法で15.1cmであるのに対して、提案手法は58.9cm

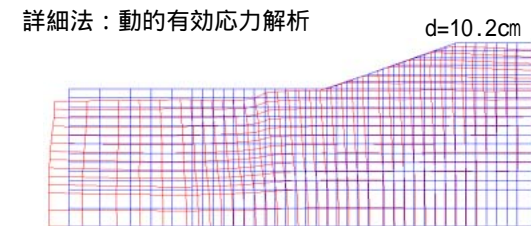
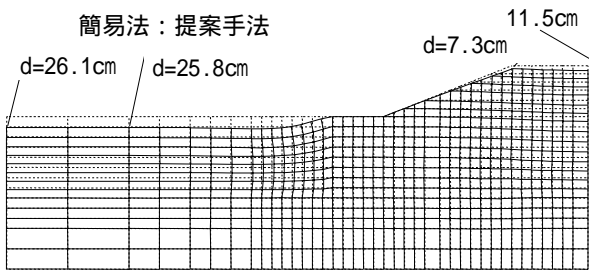


Fig. 13 地盤改良がある場合の残留変形量の比較
Residual Deformations (Soil Improvement)

とかなり大きくなっている。この点，設計手法としては，解析精度向上に関して改善の余地があるものの，安全側に変形を評価する立場をとる限り，提案手法の妥当性は認められる。

地盤改良効果の評価に関しては，側壁に接する位置での盛土の沈下量で，地盤改良ありの場合11.5cm，地盤改良なしの場合58.9cmとなり，盛土の変形抑止に対する地盤改良の有効性が認められる。このとき，自由地盤での沈下量は約25cmであり，その沈下量は地盤改良がある場合の盛土天端沈下より小さく，地盤改良がない場合の盛土天端沈下より大きい。すなわち，盛土部の沈下は，下部地盤の液状化剛性軟化により大きくなるが，地盤改良部の側方流動抑止効果によって盛土の沈下が抑制され，自由地盤の沈下より小さくなる傾向がある。

地下式貯槽に接する盛土のレベル2地震時変形挙動を等価剛性静的FEM自重解析によって評価した。その結果，盛土の地震時変形パターンは詳細法である動的有効応力解析法EFECTと同様になり，自重解析を用いる妥当性と，地盤改良の変形抑制効果が示された。

4. まとめ

本研究は，地下式貯槽周辺盛土を対象にした，レベル2地震時の簡易的残留変形・沈下評価手法を開発した。開発の第一段階としての詳細な動的有効応力解析法，すなわち液状化解析によって，地下式貯槽に接する盛土構造物の残留変形モードを明確にした。この解析によって，盛土の沈下量は，地盤改良がある場合で，盛土高さの1%程度であり，側壁構造物の安定性に影響する値でないことがわかった。さらに，既存のLNG地下式貯槽に接する盛土構造物は，当面想定する地震に対してすべり崩壊の可能性が非常に低いと考えられた。液状化解析に用いる地盤の詳細データがない場合の盛土構造物の変形・沈下

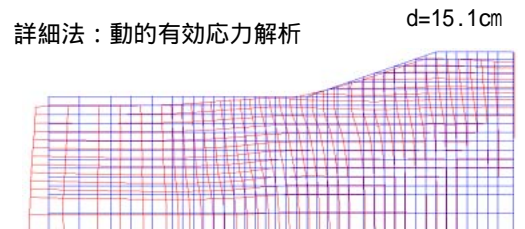
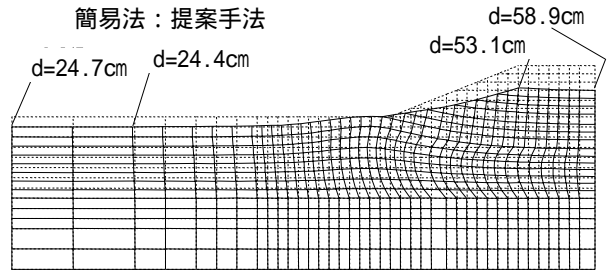


Fig. 14 地盤改良がない場合の残留変形量の比較
Residual Deformations (Original Ground Condition)

予測に関する簡易法を周辺地盤の液状化の影響を考慮した自重沈下解析手法を基に構築した。簡易法の予測結果と，動的有効応力解析法による地震応答解析とに関して，変形モードと盛土沈下量がほぼ一致することを確認し，提案手法の妥当性は認められた。ただし，提案手法は，動的有効応力解析法を基準とした場合，大きな変形を与え，自重解析モデルの境界条件など精度を改善する余地はある。

謝辞

この研究をまとめるにあたり，株式会社東京ガス中野正文氏，川村佳則氏には有益なご助言を頂いたことを感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本ガス協会：(旧)LNG地下式貯槽指針，昭和56年12月
- 2) 日本ガス協会：LNG地下式貯槽指針，平成14年8月
- 3) 佐藤清，松田隆：護岸背後地盤の側方流動と埋設管に関する遠心模型振動実験，大林組技研報No63，平成13年8月，pp.33-40
- 4) 松田隆：動的有効応力解析EFECTその2，大林組技研報No52，平成8年2月，pp.53-58
- 5) ISHIHARA et al :EVALUATION OF SETTLEMENTS IN SAND DEPOSITS FOLLOWING LIQUEFACTION DURING EARTHQUAKES, S&Fs Vol.32,No.1,1992
- 6) 石原研而，木村孟：「土木工学大系8」土質力学，彰国社，昭和55年，pp.23-24