

(21) 液状化対策工を含む盛土の二次元有効応力解析

東京都土木技術研究所 正会員○阿部 博
東京都建設局総務部 正会員 草野 郁

1. はじめに 既設土構造物の耐震性評価と液状化対策について、簡便かつ合理的に行うための解析システム“TOTAL”¹⁾を開発している。システムには、液状化解析を目的とした二次元有効応力解析プログラム“EFFCTD”¹⁾が含まれている。現在、プログラムの実用化に向けた機能検証を模型振動台実験から行っている。ここでは、盛土の液状化対策工として深層混合処理工法を模型化した液状化振動台実験^{2, 3)}を対象として、“EFFCTD”でシミュレーションを行い、得られた解析結果と実験計測値を比較した。

2. 解析手法 “EFFCTD”は、直接積分法を用いた平面ひずみ有限要素動的応答解析プログラムである。動的応力～ひずみ関係に、Masing 則に基づいて履歴関数化した修正 R-0 モデルを用い、初期剛性法による NEWMARK- β 法で直接積分して応答量を求める。有効応力法では過剰間隙水圧の変化に伴う、微小時刻ごとのせん断剛性率とせん断強さを求める必要がある。本手法には弾性論に基づく一相系モデルを使っており、弾塑性解析のようにダイレタンシーを評価できないため直接過剰間隙水圧を求められない。このため、Seedらが提案した規則波に基づく間隙水圧上昇実験式を、不規則波で運用可能とした国生ら⁴⁾の方法に準拠して水圧上昇を求めている。これは、Annakiらによって提案された累積損傷度の概念における損傷度と繰返し回数直線関係を間隙水圧上昇実験式に置き換え、不規則波の出現順序を考慮できるようにした過剰間隙水圧の上昇算定法である。ところで、修正 R-0モデルはもともと一次元で表現されているため二次元化にあたっては、①一次元での鉛直応力 σ'_v は平面ひずみ条件下の平均主応力 σ'_m で表し、② Clough & Woodward⁵⁾によって提案されたヤング率 Eとポアソン比 ν の代りにせん断弾性係数 $M_D(=G)$ と体積弾性率 $M_B(=K)$ を用いる二次元平面ひずみ弾性マトリックスで、せん断剛性率 Gは一次元の応力～ひずみ関係から得られる接線剛性率 G_t で置き換え、地震時には G_t だけを変化させ体積弾性係数 Kを一定とする。また、過剰間隙水圧の発生は一次元での水平面上のせん断応力 τ_a に対応させて②から得られる水平面上のせん断応力 τ_{xy} のみで生じるとしている。盛土斜面と基礎地盤には、地震前から初期せん断応力が作用しており、その大小が過剰間隙水圧発生に影響すると考えられる。著者らは過去に、相対密度 $D_r=60\%$ の飽和豊浦砂についての異方圧密平面ひずみ条件下で初期せん断応力を加えた非排水中空ねじり繰返しせん断試験から、 $D_r=60\%$ のとき、初期せん断応力比が増加すると水圧が100%に達しない結果を得たことから、最大発生水圧に制限を加える方法⁶⁾を提案した。また、国生ら⁴⁾によって提案されているサイクリックモビリティによる有効応力回復の評価法を上記試験結果から一部変更した。しかし、修正 R-0モデル自体は変えていないため、初期せん断応力による残留ひずみは評価できなかった。ここでは、残留ひずみを評価するために、藤川ら⁷⁾の提案した初期せん断作用方向のせん断剛性率を、Masing則の変更から低下させる方法(初期せん断応力の作用方向に限って、動的せん断応力が過去の折返し点の値に達したとき再載荷曲線のひずみが増加する)をプログラム化し“EFFCTD”に組込んだ。さらに、これまで行った振動台模型実験のシミュレーション結果をもとに、模型実験時の超低拘束圧下の液状化強度応力比の設定法や浸透流解析⁸⁾を可能としている。

3. 実験概要 振動台実験には加振方向側壁の水平変位を許すせん断土槽を使用した。土槽寸法は加振方向の内幅3.50m、奥行0.80m、高さ1.00mである。模型地盤には豊浦標準砂($D_{50}=0.20\text{mm}$)を使用し層厚は70cmとした。緩い地盤を想定して相対密度 D_r が60%になるように、乾燥砂の空中落下高さを調整して砂層を作成した。空中落下時にサンプリングした密度から求めた D_r は60%前後であったが、土槽内に投入した全砂重量から求めた D_r は79%でやや密な状態を示した。深層混合処理地盤は、図-1に示すように、格子状および杭状のコンクリート改良体(単位体積重量 2.3gf/cm^3)を盛土法尻位置にそれぞれ設置した。格子状改良体は、幅33cm、奥行76cm、深さ55cm、壁厚4cmとし、法尻から1cm離して設置した(改良率38%)。杭状改良体は直径

8 cm、深さ55cmで合計14本を3列に千鳥状に配列した(改良率27%)。両改良体底部は砂地盤中に留めており土槽には固定していない。地盤作成後、地盤中の空気をCO₂で置換し土槽底部から注水してGL±0.0cmまで飽和させた。盛土材料は不飽和豊浦砂であり、高さ29cm、天端幅15cm、法勾配1:1.5の規模とした。なお、加振時に地盤中の水が盛土に浸透するのを防ぐため、あらかじめ盛土設定位置にビニールシートを敷いた。土槽側面のゴムメンブレンには二重にテフロンシートを貼り盛土と土槽側面との摩擦を低減させた。図-1には加速度計、間隙水圧計、変位計の配置もあわせて示した。

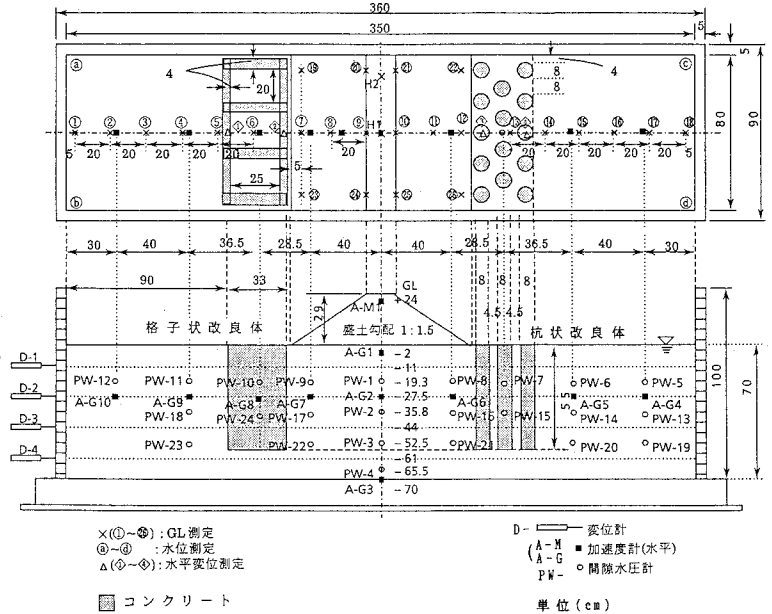


図-1 模型盛土地盤の断面図と計測器配置

加振は土槽長手一方向のみとし、入力波形には1983年日本海中部地震において秋田港で記録された加速度NS成分の波形を相似則から時間軸のみを1/4に圧縮したものを用い、実験継続時間は14秒とした。入力最大加速度98galの加振の後(非液状化時の挙動を知るための加振で中規模加振と呼ぶ)、排水してから入力最大加速度194galの液状化加振実験を行った。さらに、再液状化加振として最大加速度331galを入力した。

液状化加振時の加速度と過剰間隙水圧の時刻歴波形をそれぞれ図-2、図-3に示す。図-2から、盛土天端付近では入力加速度の振幅が増幅されること、また、盛土直下の地盤でも入力波形に追従した応答値が得られている。一方、側方水平地盤の地表近くでは加速度振幅が極端に小さくなり長周期化していることがわかる。さらに、格子状改良体の間でも加速度波形が長周期化している。図-3に示した過剰間隙水圧時刻歴から、盛土直下では液状化が発生しにくく、側方水平地盤では発生過剰間隙水圧が有効上載圧を上回っており

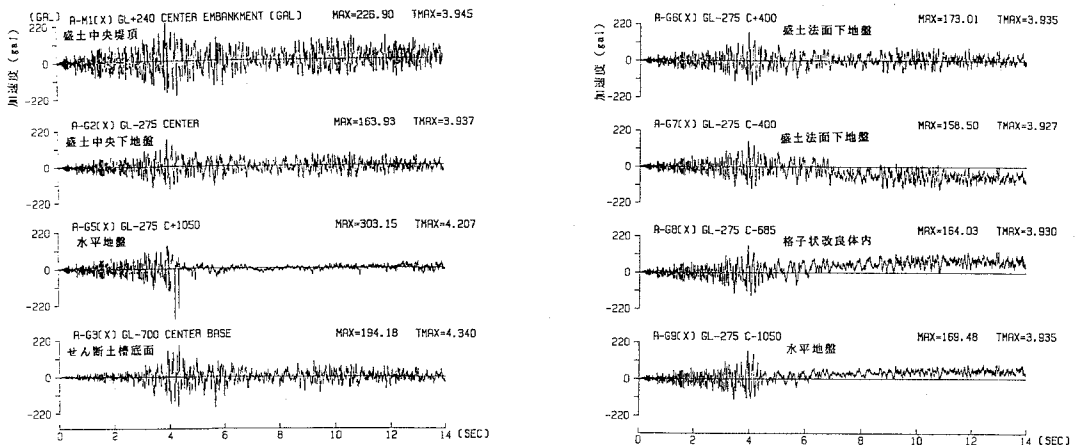


図-2 加速度の時刻歴

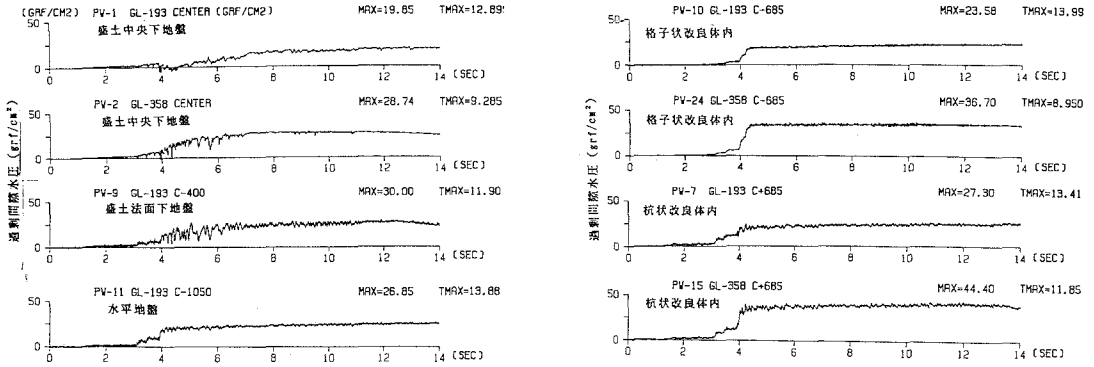


図-3 過剰間隙水圧の時刻歴

液状化していることがわかる。斜面下の間隙水圧は、激しい変動を伴って上昇する傾向を示す。杭状改良体間の水圧は周辺の未改良地盤の水圧と同様に上昇している。格子状改良体内の水圧は、加振後3~4秒では上昇が抑えられているが、それ以後、加速度振幅が大きくなると格子状改良体内でも液状化することがわかる。図-4に液状化加振後測定した地表面での変位量を示す。杭状改良体は横倒れしながら改良体頂部が12mm側方地盤側に移動したが、格子状改良体は移動していない。盛土部の変形は改良体の挙動に支配されており、杭状改良体側では法尻の沈下は大きい側方流動のために周辺地盤の沈下が少なくなっている。このことから、格子状改良の方が杭状改良より側方流動防止効果は大きいといえる。

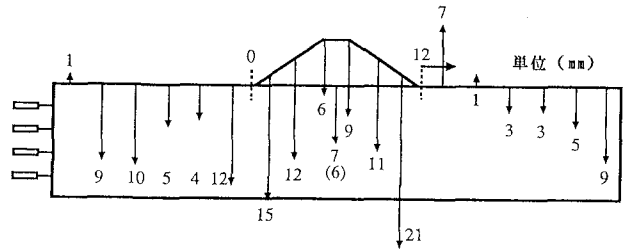


図-4 地表面の変位量

4. 解析モデル 二次元FEM解析モデル

図-5に示す。格子状、杭状コンクリート改良体のモデル化では、格子状改良体となる二重壁は梁要素で剛結した。また、杭状改良体は中間の列を除き二列の四辺形要素とした。改良体を弾性体とし、単位体積重量を $2.3(\text{gf}/\text{cm}^3)$ 、ポアソン比を $\nu=0.167$ 、弾性定数を $E=2.8 \times 10^6(\text{gf}/\text{cm}^2)$ とした。境界条件として、基盤はX、Y方向ともに固定、側方では左右の変位が等しくなるようX、Y方向にタイイングを入れた。直接積分は時間増分を0.000415秒、初期剛性法の繰返し回数を2回とし、解析時間は実験開始から7.0秒間とした。解析に用いた土質パラメータを表-1に示す。地盤の初期せん断剛性率 G_0 は、過去に行った未改良模型地盤の一次固有振動数 $f_0=28\text{Hz}$ に合うように固有値解析(各層ごとの $G_0=G_{01} \times (\sigma'_{m0})^{0.5}$ 、 $G_{01}:1\text{gf}/\text{cm}^2$ あたりのせん断剛性率)から

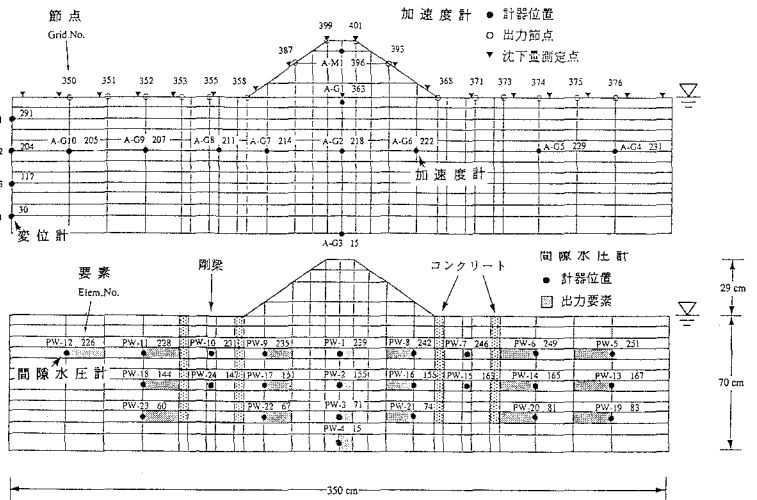


図-5 解析モデル

格子状、杭状コンクリート改良体のモデル化では、格子状改良体となる二重壁は梁要素で剛結した。また、杭状改良体は中間の列を除き二列の四辺形要素とした。改良体を弾性体とし、単位体積重量を $2.3(\text{gf}/\text{cm}^3)$ 、ポアソン比を $\nu=0.167$ 、弾性定数を $E=2.8 \times 10^6(\text{gf}/\text{cm}^2)$ とした。境界条件として、基盤はX、Y方向ともに固定、側方では左右の変位が等しくなるようX、Y方向にタイイングを入れた。直接積分は時間増分を0.000415秒、初期剛性法の繰返し回数を2回とし、解析時間は実験開始から7.0秒間とした。解析に用いた土質パラメータを表-1に示す。地盤の初期せん断剛性率 G_0 は、過去に行った未改良模型地盤の一次固有振動数 $f_0=28\text{Hz}$ に合うように固有値解析(各層ごとの $G_0=G_{01} \times (\sigma'_{m0})^{0.5}$ 、 $G_{01}:1\text{gf}/\text{cm}^2$ あたりのせん断剛性率)から

求めた。D_r=60%の豊浦砂の動的、静的試験から、修正R-0モデルのβを最大減衰比h_{max}から求めα' (=2β)を決定した。表中のφ'、φ_{CM}は有効内部摩擦角、変相角を示す。水圧上昇パラメータとしては、液状化強度応力比R_{L20}と繰返し回数N₀=5回と20回でのR_Lの両対数グラフ上の勾配η、Seedらの提案した実験式のパラメータξが必要となる。R_{L20}値は振動台実験時の低拘束圧を考慮し、R₄=-0.07・log₁₀σ'・m₀^{0.9}で補正した。

5. 解析結果 加速度、過剰間隙水圧の計測値と解析値の時刻歴を図-6、7に示す。水圧解析値は有効平均応力表示である。図から、解析応答加速度の波形形状と最大振幅値は計測値とよく一致している。過剰間隙水圧では、解析水圧値の発生時刻は計測値にほぼ一致する。図-3から計測過剰間隙水圧は盛土直下、斜面下で非液状化を、側方地盤では液状化を示した。解析では、側方地盤は計測値と同様に液状化を示し、また、斜面下では非液状化となり計測値に近い。しかし、盛土直下では水圧が有効平均応力に達しているため液状化を示し計測値との差が出ている。加振後4.9999秒における過剰間隙水圧比を図-8に示す。杭状改良体側の側方地盤の水圧比が格子状改良体側よりも高い傾向を示す。格子状改良体間では全く水圧が発生しておらず、図-3に示した計測結果に対応していない。加振後6.9986秒での変形形状を図-9に示す。下部層の左ずれによって杭頭が右に移動している。実験は14秒間であり、7秒目での比較には無理があるが計測された杭頭の移動方向は水平地盤側であり解析結果も同一方向を示している。格子状改良体の水平変位はほとんど無く実験値と一致している。また、解析結果の盛土部の沈下傾向は図-4の計測結果と一致している。しかし、周辺地盤では解析値が隆起を示し、特に格子状改良体側では大きく、計測結果と異なる傾向を示した。最後になりますが、大崎総合研究所と清水建設技術研究所、CRC 総研の皆様に感謝いたします。

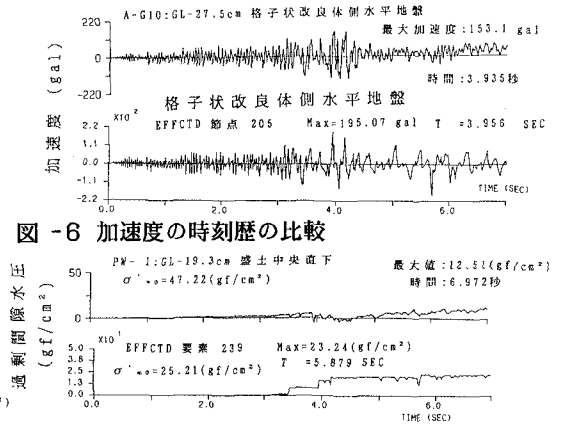
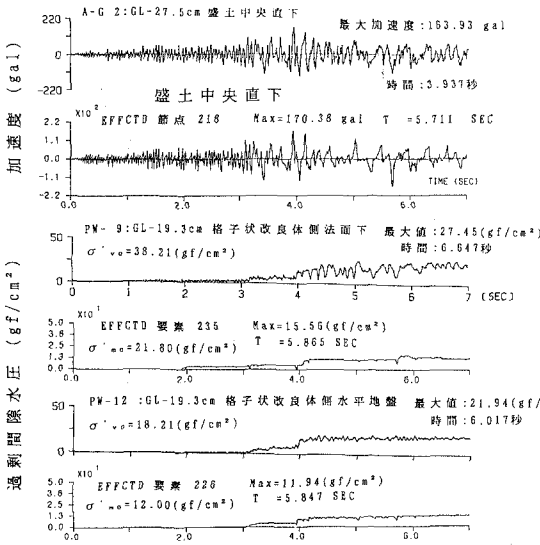


図-6 加速度の時刻歴の比較

図-7 過剰間隙水圧の時刻歴

表-1 解析土質パラメータ

	修正R-0モデル				水圧上昇パラメータ				物理特性	
	h _{max} (%)	α' (2β)	β	φ' (度)	φ _{CM} (度)	R _{L20}	η	ξ		γ _s (gr/cm³)
CASEB-4 盛土地盤	29	3.18	1.07	39	28	0.165*	-9.83	0.5	1.95	60
盛土	32	4.05	2.02	39	28	---	---	---	1.45	---

盛土地盤の1er/cm²あたりの初期せん断弾性係数G₀を23980(er/cm²)、盛土のG₀を18763(er/cm²)とした。
盛土地盤のGのポアソン比νは0.3、Kのνは0.38とした。* 0.165は拘束圧修正前の値である。

参考文献

- 1) H.ABE(1992): Two dimensional liquefaction analysis for ground with embankment, IJCEE, 1361-1366
- 2) 阿部 博、草野 郁(1993): 盛土を含む砂地盤の液状化振動台実験、第28回土質工学研究発表会、投稿中
- 3) 阿部 博、草野 郁(1993): 根固めを含む盛土二次元液状化解析、土木学会第48回年次学術講演会、投稿中
- 4) 国生 隆治、江刺 靖行、坂井 彰彦(1982): 砂層の液状化現象についての数値シミュレーション、電中研報告、No. 381023
- 5) Clough, R. W. and Woodward, R. J. (1987): Analysis of embankment stresses and deformations, ASCE, Vol. 93, SM4, 529-549
- 6) 阿部 博、草野 郁(1993): 盛土の二次元液状化解析、土木学会第48回年次学術講演会、986-987
- 7) 藤川 智、福武 毅彦、大槻 明(1992): 初期せん断作用時の応力・ひずみ関係と加振中における残留変形解析、第27回土質工学研究発表会、1111-1114
- 8) 阿部 博、草野 郁(1992): 浸透流を考慮した盛土地盤の液状化解析、平4、都市土木技研年報、319-328
- 9) 草野 郁(1990): 細粒分を含む砂質土の液状化強度の推定法、土木学会論文報告集、第418号/Ⅲ-13、55-64

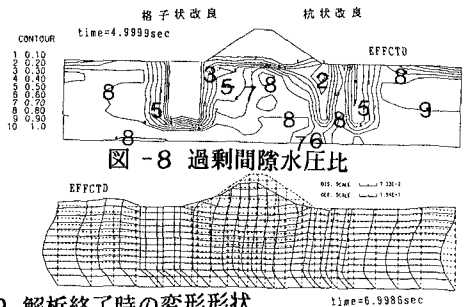


図-8 過剰間隙水圧比

図-9 解析終了時の変形形状