

(27)埋設構造物の液状化挙動に関する有効応力解析 - 振動台実験との比較 -

大林組技術研究所 正会員 ○松田 隆
正会員 伊藤 浩二
正会員 鳥井原 誠

1. はじめに

動的有効応力解析法は詳細な地震時液状化挙動の把握手法として用いられている。ただし、提案されている動的有効応力解析法の多くは1次元あるいは2次元の領域を対象としており、奥行き方向に一様でない構造物を対象とする場合の3次元性が考慮できないのが現状である。また、震動方向に関しても実地震での任意空間成分を考慮するためにも3次元性を導入する必要がある。そこで、著者らは多方向入力可能な3次元動的有効応力解析法("EFFECT"と称す)の開発を行ない、その適用性を検討してきた。

ここで開発した"EFFECT"には松岡により提案された2次元応力下の構成モデルに弾性ひずみ成分を加え、更に、その構成関係を3次元空間に拡張した手法を導入している。これまで、このモデルに対して応力経路の異なる種々の要素試験や波浪荷重による線形応答などを対象として検証を行ってきた。今回は、構造物と地盤の相互作用系における本手法の適用性を検討するため、飽和地盤中に埋設された構造物の液状化時挙動に関する振動台加振実験を対象とした"EFFECT"の解析を実施した。この報告では、地盤の応答加速度・過剰間隙水圧の経時変化や構造物の永久変位量に関して実験結果と解析結果、および、2次元解析結果と3次元解析結果を比較する。

2. 振動台実験

実験の対象となる構造物は1/8に縮小した20k1級コンクリート被覆貯油槽である(図1)。空液時模型貯油槽の見かけの比重1.4は地盤の飽和重量 1.9t/m^3 の3/4になるよう調整したもので、液状化時には浮き上がる構造である。振動台上の模型地盤は大型せん断土槽に保持されており、模型地盤の諸特性は表1に示す通りである。この時の相対密度は46%である。軽量埋設構造物の大きさは模型地盤の寸法に比べ充分小さいため、地盤の非排水境界の影響は小さいと考えられる。地下水位と模型貯油槽上面は地表面位置に設定した。

振動台への入力は一方向とし、時間軸を1/4に縮小した八戸波(継続時間10.4秒)で最大加速度 115gal に設定した。

3. 解析手法

動的有効応力解析法"EFFECT"は3次元空間でのU-u形式によるBiotの約合式に基づいている。構成式の基本は松岡モデルであり、非線形解法は初期剛性法によっている。松岡モデルでは2主応力平面における塑性ひずみ増分をせん断、主応力の回転、異方及び等方圧密の総和で与えているが、ここでは初期剛性法の適用上、弾性ひずみ成分を加えている

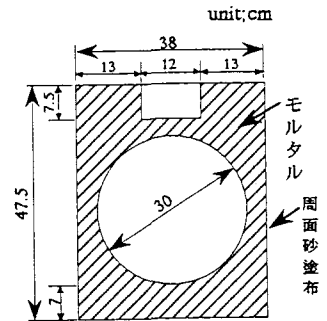


図1 模型貯油槽

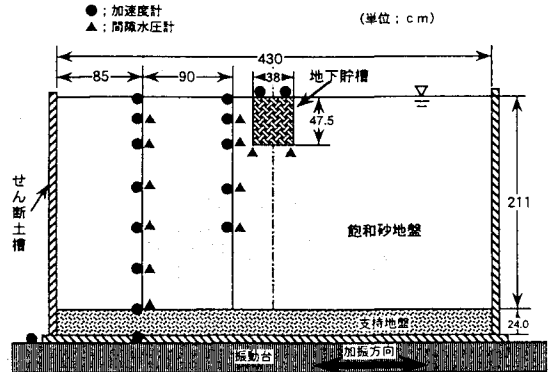


図2 模型地盤と計器配置

(式-1)。3次元への拡張はCMP理論(複合滑動面)に基づき、各主応力平面上での値を加えあわせることで評価した。このとき、等方圧密成分は3主応力方向に等しく生じ、弾性成分は通常の弾性応力～ひずみ関係 D^E より評価した。

$$\{d\varepsilon_{ij}\} = \{d\varepsilon_{ij}^E\} + \sum_{k=1}^3 [\{d\varepsilon^P_s\}_k + \{d\varepsilon^P_R\}_k + \{d\varepsilon^P_{Ac}\}_k] + \{d\varepsilon^P_{ic}\} \quad \dots (1)$$

$$\{d\sigma_{ij}\} = [D^E] \{d\varepsilon_{ij}^E\} \quad \dots (2)$$

ここに、 $d\varepsilon^P_s$ 、 $d\varepsilon^P_R$ 、 $d\varepsilon^P_{Ac}$ 、 $d\varepsilon^P_{ic}$:塑性ひずみ増分のうち、せん断、主応力回転、異方及び等方圧密の各成分

k: 主応力平面

D^E 、 $d\varepsilon_{ij}^E$: 弾性の応力～ひずみ関係、弾性ひずみ成分

4. 解析方法

加振方向の解析対象領域は自由地盤とみなせる構造物から70cm離れた位置までとした。加振直角方向は対称性を考慮し全領域の1/2である(図3)。境界は側面を繰り返し境界、底面を固定境界にした。

地盤の諸入力定数(表2)のうち、非線形構成則に関連するものは低拘束圧下での三軸試験を基に設定した。また、弾性係数など微小ひずみ領域の特性に関するものは表1に示す地表面での微動測定結果の卓越振動数から設定している。

5. 実験結果と解析結果の比較

図4に応答加速度と過剰間隙水圧の経時変化を示す。最大加速度に関しては解析のほうが大きい振幅値を示しているが、位相特性や間隙水圧の上昇に伴う周期の伸びなどに関して解析結果は実験結果を追随している。振幅に関しても、液状化したと考えられる3.5秒以降加速度は増幅しないが、解析でもその傾向は再現できている。

自由地盤側の過剰間隙水圧(P1、P2)に関しては最大値および最大値に達する時刻など、解析と実験の一致が認められる。

貯油槽側面の過剰間隙水圧P4では解析は実験のほぼ3/5程度しかでていない。これに対して、底面の過剰間隙水圧P3は解析のほうが大きくなっている。これは、実験では過剰間隙水圧が急激に上昇す

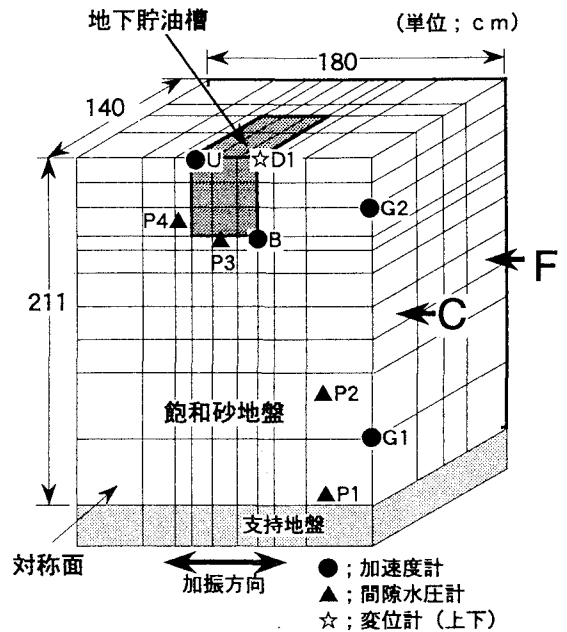


図3 要素分割

表1 模型地盤特性

土粒子比重	2.65	
平均的な単位体積重量	18.52 kN/m ³	
1次共振振動数	7.90Hz	
初期間隙率	0.461	
初期間隙比	0.851	
均等係数	1.36	
平均粒径	0.325mm	
地盤領域	平面	4.3m×2.3m
	深度	2.11m

表2 入力定数

硬化パラメーター	k_s	0.0006
タレイタソソ	λ	1.2
パラメーター	μ	0.28
圧縮指数	C_c	0.022
膨張指数	C_s	0.011
非共軸パラメーター	δ	30°
骨格弾性係数	E	21000 kPa
ポアソン比	ν	0.33
透水係数	k	10 ⁻⁵ m/sec
レーリ減衰係数	β	0.01

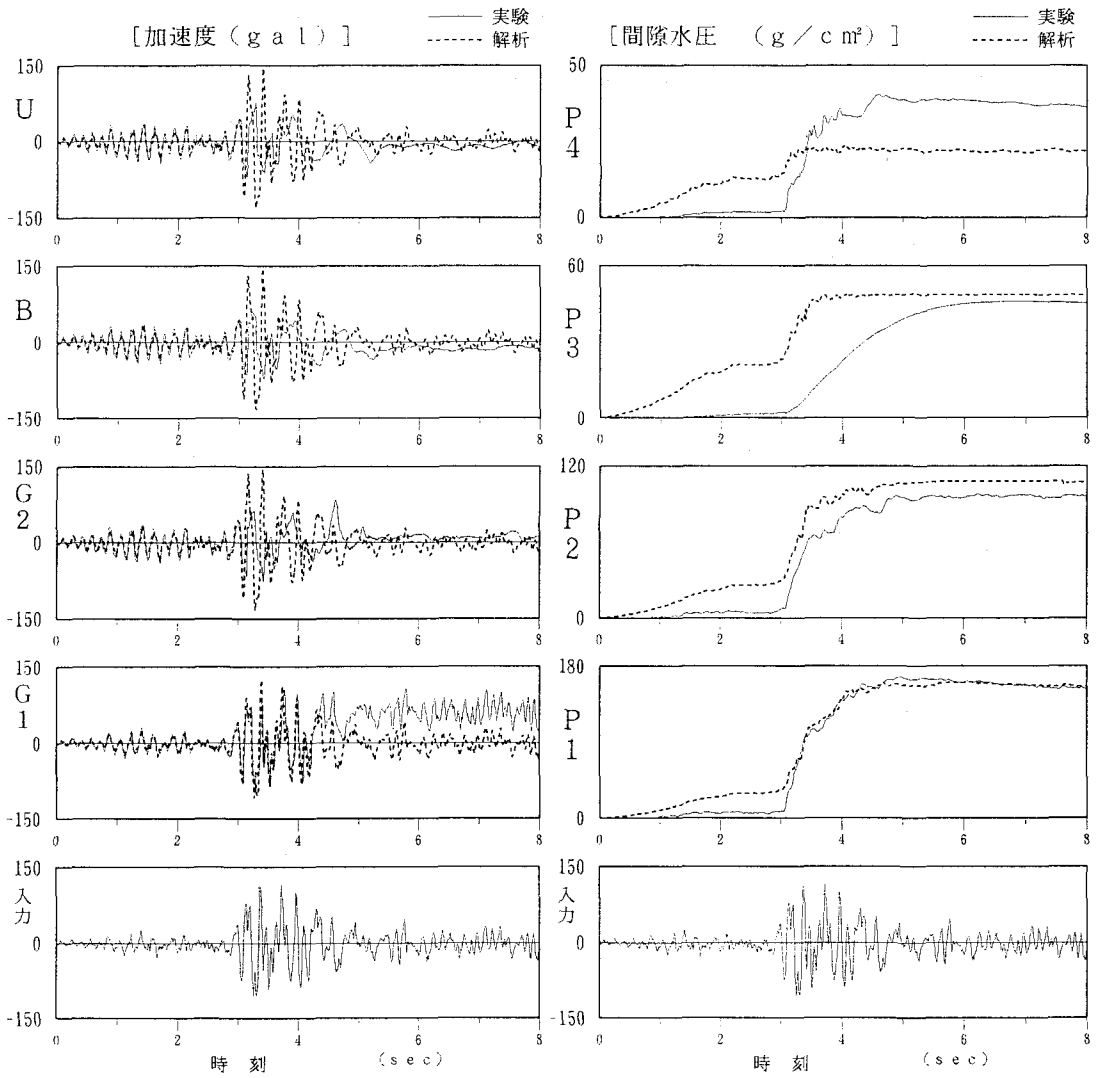


図4 加速度および過剰間隙水圧の経時変化

る時刻から貯油槽の浮上D1が始まり、その影響で貯油槽底部の過剰間隙水圧が大きく低下したと考えられる。この点、解析での貯油槽の浮上量D(図5)は実験値のほぼ1/3しか出ておらず、そのため解析でのP3過剰間隙水圧の低下はあまりみられなかったと考えられる。貯槽の浮上量Dに関しては、実験時の貯油槽と地盤は地盤の液状化にともなう不連続状態、すなわち滑りだすのに対して、解析はこの部分の不連続性をモデル化していなかったことに差を生じさせた原因がある。

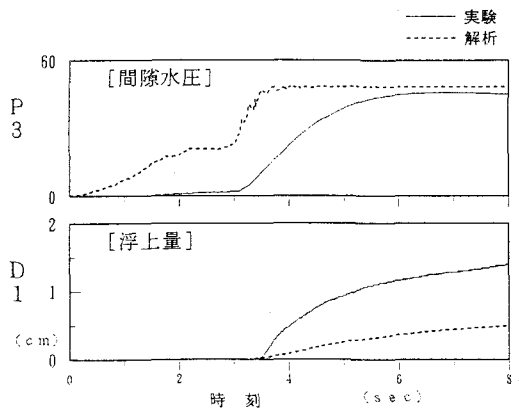


図5 貯槽の浮上量

貯槽周辺の液状化挙動に関して、解析上2次元と3次元を比較した結果を図6に示す。過剰間隙水圧に関しては最大値はほぼ同様であるが、初期動部分において3次元の方が大きくなっている。これは、3次元の方が加振直角方向のひずみを加えあわせ間隙水圧の上昇を考慮しているためである。加速度については3次元の方が小さく、2次元とは最大値で15%程度の差が生じている。これは間隙水圧の上昇に伴う地盤剛性の低下に関連しており、間隙水圧の上昇がより大きい3次元の方が剛性低下が大きく、その結果、振幅が小さくなる傾向になる。

図7に過剰間隙水圧比の分布を示す。地盤の上方から液状化が始まること、構造物の背面でも液状化が進展していることが分かる。

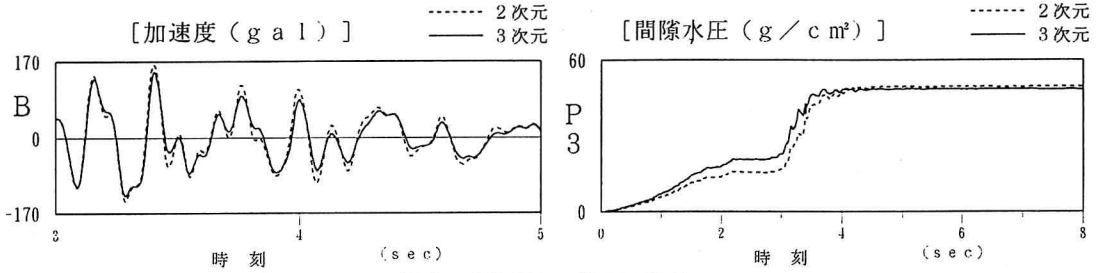


図6 2次元と3次元の比較

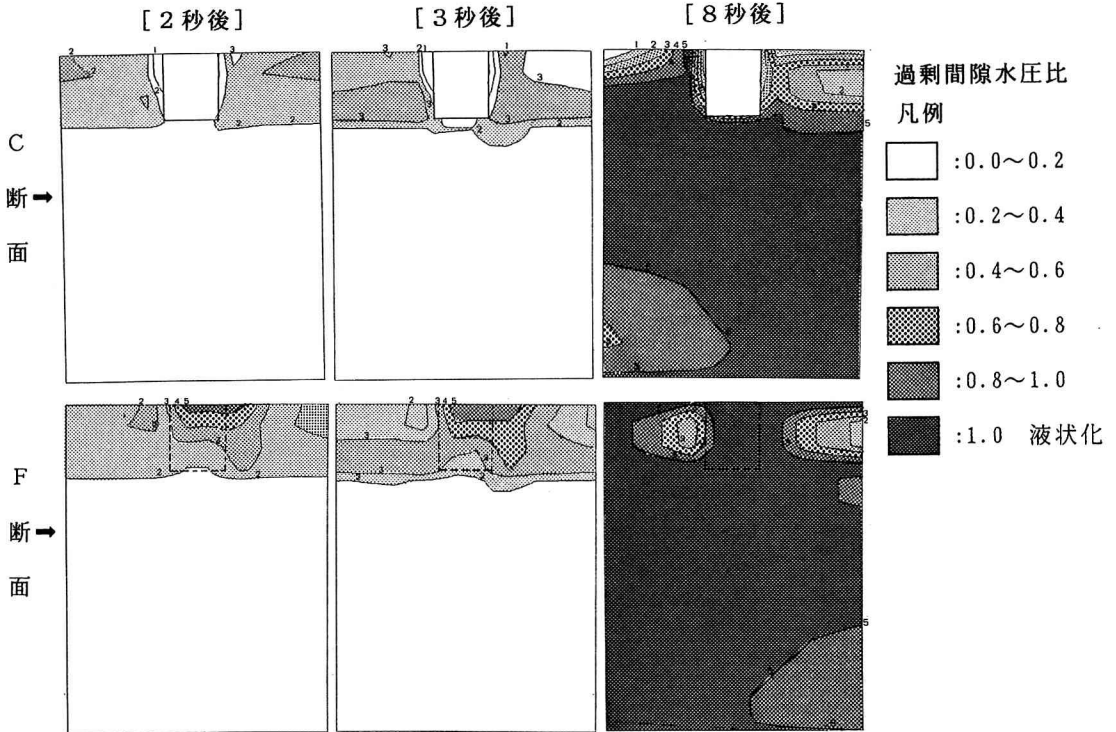


図7 過剰間隙水圧の分布

5. まとめ

地中構造物～飽和地盤相互作用系の振動台実験を対象としたシミュレーション解析を行なった。その結果、動的有効応力解析法EFFECT は過剰間隙水圧の経時変化や液状化時の応答加速度の減衰など実験結果を良好に再現できることが確認できた。また、地中構造物の液状化挙動も定性的に表現できることが分かった。

参考文献：伊藤ほか(1992)；3次元応力下の砂の繰返しせん断挙動の解析、第27土質工学研究発表会1101