

液状化性地盤上の盛土の地震時挙動 の数値シミュレーション

松尾 修¹・西 邦夫²・渦岡 良介³

¹正会員 建設省 土木研究所 (〒301 茨城県つくば市旭一番地)

²正会員 間組 技術研究所 (〒301 茨城県つくば市苅間字西向 515-1)

³正会員 間組 土木本部 (〒107 東京都港区北青山 2-5-8)

有限要素法を用い液状化性地盤上の盛土を対象とした動的遠心模型実験のシミュレーションを行った。解析に用いたコードは、繰返しを考慮できる弾塑性モデルを用いており、Biotの二相系理論に基づいたものである。解析では、加振により水平地盤が液状化しても、盛土下の基礎地盤の有効拘束圧はゼロに至らないという実験結果を表現できた。応答加速度や過剰間隙水圧の時刻歴についても、実験結果と解析結果は比較的よく一致した。また、基礎地盤の液状化に起因する盛土の沈下量についても、解析結果は大きめの値を示したが、最大加速度が同じでも入力波形が異なる場合の沈下量の違いを表現できた。

Key Words: liquefaction, embankment, FEM, centrifugal model test

1. まえがき

砂質地盤上の盛土は、その基礎地盤が液状化することにより盛土の沈下が引き起こされる。このことから、地震時の盛土の沈下量を推定できる手法が求められている。繰返しを考慮できる弾塑性モデルを用い、ビオの二相系理論に基づく有限要素法による動的解析手法は、盛土構造物の地震時挙動を推定できる有力な手法である。

一方、盛土の地震時挙動の解明を目的として模型実験が数多く実施されてきたが、実地盤と同様の高拘束圧下でのものは数少ない。

本報では、有限要素プログラムLIQCA (Okaら¹⁾)を一連の動的遠心模型実験 (Kosekiら²⁾)に適用した結果について報告する。解析対象は液状化性地盤上の盛土であり、解析結果について実験結果と比較することで解析手法の有用性と限界について検討した。

2. 加振実験

図-1に模型実験の断面図および計測器の配置を示す。基礎地盤は豊浦標準砂を用い、盛土は、豊浦標準砂とクレイサンドを4対1の割合で混合し含水比15%に調整したものでそれぞれ作成した。また、地盤は水の30倍の粘性を持つシリコンオイルを用いて飽和させた。

水平加振は30gで遠心载荷した状態で行った。試験ケースおよび試験条件を表-1に示す。ケースC-1,C-2,C-3

では100Hz 20波の正弦波加振を行い、ケースC-4,C-5,C-6では図-2に示す地震波を用いて加振を行った。

実験の詳細については、Kosekiら²⁾によって詳しく報告されている。要点のみを以下に述べる。

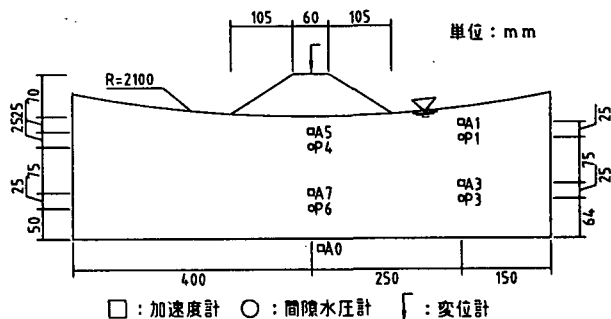


図-1 盛土模型の断面図

表-1 実験ケースと実験条件

ケース	遠心加速度(G)	加振波	入力(G)	砂層の相対密度(%)
C-1	30	サイン波	4.0	57.3
C-2	30	100Hz	5.4	62.2
C-3	30	20波	8.9	59.6
C-4	30	地震波	6.0	60.2
C-5	30	継続時間:0.5秒	8.3	60.9
C-6	30		4.3	62.9

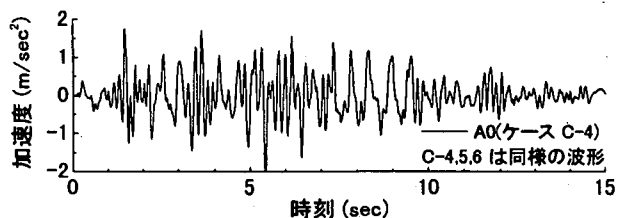


図-2 入力地震動 (1g 場換算)

- (1) 自由地盤では有効応力がゼロとなる状態となったが、盛土下の地盤ではそのような状態には至らなかった。
- (2) 盛土天端の沈下量と加振加速度の最大値との関係は、加速度波形に依存する。最大加速度が同じ場合でも正弦波加振の場合の方が地震波加振の場合よりも沈下量が大きい値を示した。

3. 有効応力解析

3.1 解析手法

LIQCA¹⁾は、砂の弾塑性モデルを用いた有効応力法に基づくプログラムであり、液状化の解析に用いられている。つり合い式と連続式を結びつける LIQCA の支配方程式は、固層の変位と間隙水圧を変数とする $u-p$ 法に基づいている。つり合い式の空間的離散化には有限要素法を用い、連続式の離散化には差分法を用いている。時間積分にはニューマークの方法を用いている。

砂の構成式は繰返しを考慮できる岡ら³⁾の弾塑性モデルを用いており、以下の仮定のもとで定式化されている。

1. 微小ひずみ理論の適用
2. 弾塑性理論に基づいたひずみの定義
3. 非関連流れ則の適用
4. 過圧密境界曲面の導入
5. 非線形移動硬化則の適用

また、構成式が材料の挙動をより詳細に表現できるように、Tateishi ら⁴⁾に基づき、以下の修正を行った。

- ① 有効応力が変相線に達した後、塑性せん断ひずみ量に対応させて弾性せん断剛性 G_e 、塑性せん断剛性 G_p を低減した。この修正により変相後の履歴減衰が増大し、なめらかな履歴曲線が得られる。
- ② 異方圧密砂のフェーディングメモリ効果を表現するために、ダイレタンシー挙動を制御する応力比の不変量の初期値 η_0 を塑性せん断ひずみ量に対応して低減させた。
- ③ 塑性体積ひずみ増分と塑性偏差ひずみ増分の割合を制御するためにダイレタンシー係数と呼ぶ変数 D^* を導入した。

3.2 解析条件

飽和砂地盤と盛土の両者に繰返し弾塑性モデルを適用した。用いた物性の一覧を表-2 に示す。物性は、模型実験の準備時の測定値、および同一材料に対する既往の室内土質試験結果から決定した。

繰返し単純せん断試験に対する要素シミュレーションの例として、繰返し回数 10 回の場合の応力～ひずみ関係および有効応力経路を図-3 に示す。要素シミュレーションにより求めた液状化強度曲線を室内試験結果と合わせて図-4 に示す。液状化の判定基準は DA 15 % として

いる。シミュレーション結果は、室内試験結果によく一致している。

模型実験の解析は 1 g 場に換算したモデルで実施した。初期応力状態は静的弾塑性解析により求め、動的解析は時間刻みを 0.001 秒とし、レーリー減衰は剛性の 0.2 % とした。

解析結果との比較を行いやすくするため、以下、本報では、実験結果も 1 g 場換算で示す。

表-2 解析に用いた物性値

ケース	盛土部	基礎地盤部
密度 ρ	1.954/m ³	1.926/m ³
初期間隙比 e_0	0.605	0.738
透水係数 k	—	5.00E-5 m/s
圧縮指数 λ	2.00E-2	2.00E-2
膨潤指数 κ	1.00E-2	5.00E-4
加せん断剛性比 G_0/σ'_m	6.38E+2	2.34E+3
破壊応力比 M_f	1.072	1.30
変相応力比 M_w	1.072	0.98
パラメータ B の初期値 B_0	1758	6550
異方性の制御パラメータ C_d	2000	2000
塑性基準ひずみ γ^p_r	0.002	0.002
弾性基準ひずみ γ^e_r	0.008	0.008
ダイレタンシーパラメータ D_0^*	1.0	1.0
ダイレタンシーパラメータ n	0.0	4.0

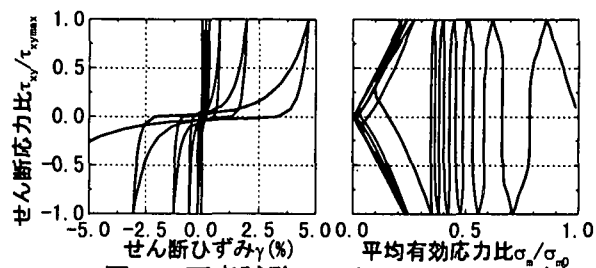


図-3 要素試験のシミュレーション例

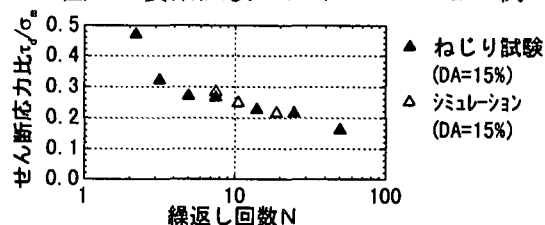


図-4 液状化強度曲線

4. 実験結果と解析結果の比較

4.1 加速度応答

図-5 は、ケース C-2 (正弦波入力) の地盤の応答加速度の時刻歴を示したものである。盛土下部の A5, A7 点の応答加速度の解析結果は、実験結果と非常によく一致している。一方、自由地盤 (A1, A3) においては、1.5 秒以降応答加速度が減衰していることは定性的には表現できているが、減衰の程度は異なっている。過剰間隙水圧の項で述べるように、自由地盤においては実験結果、解析結果とも 1.5 秒時点で液状化している。このことから、解析において応答加速度があまり下らないのは、剛な容器の側壁が揺れることにより液状化地盤を水平方向に伝

わってくる物体波を解析では過大評価しているのではないかと考えている。解析結果と実験結果の関係については、全てのケースでおおむね同様の傾向を示していた。

4. 2 過剰間隙水圧

図-6,7 は、ケース C-2(正弦波入力)、ケース C-4(地震波入力)の過剰間隙水圧の時刻歴を示したものである。図には静的な初期応力解析により求めた初期有効鉛直応力 σ_{v0}' を示した。ケース C-2 については、図-6 に示すように、自由地盤部(P1,P3)で実験値と計算値はよく一致している。P1 の測定値が σ_{v0}' まで上がりきっていないが、このことは図-5 の A1 で応答加速度の計測結果がほとんど応答しなくなっていることや、ケース C-4 では同一箇所でも σ_{v0}' まで達していることから間隙水圧の計測誤差によるものと考えられる。液状化後の水圧変動がやや大きいことについては、おそらく上述した物体波が主な原因ではないかと思われる。

一方、盛土直下に着目すると、間隙水圧の計測値(P4,P6)は、初期鉛直有効応力まで上昇していない。このことは、

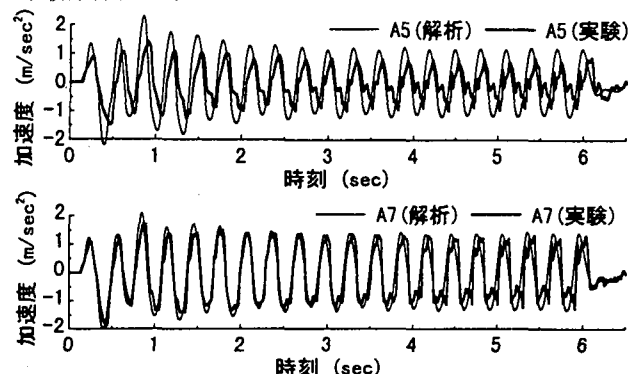


図-5 加速度応答の時刻歴図(ケース C-2)

以下のように説明できる。盛土下部の地盤は、加振により軟化し盛土の沈下に伴って水平方向に広がる。しかし、側方に位置する自由地盤部はそれよりも早い段階で既に液状化しており、水平応力の増加に耐えることができない。それゆえ、盛土下部の地盤では鉛直方向と水平方向の直応力の偏差応力が残る。その結果、有効応力がゼロとなる状態になりえないことになる。類似の測定結果は、Koga ら⁵⁾や長尾ら⁶⁾によっても報告されている。

解析においては、P4 と P6 の水圧は実験結果よりも早く上昇し、その値も高い結果となっている。図-8 は P4 を含めた上下方向の近傍の過剰間隙水圧の解析結果を示したものであるが、盛土直下部の要素 (No.211) では、実験結果のように水圧が上昇しない現象を表現できていることがわかる。したがって、解析結果と実験結果の差異は、水圧が上昇しない領域の大きさであるといえる。その原因についてはまだ検討が不十分であり、今後の課題である。

上述した過剰間隙水圧の挙動は、図-7 に示すようにケース C-4 においても同様に見られ、また、他の全てのケ

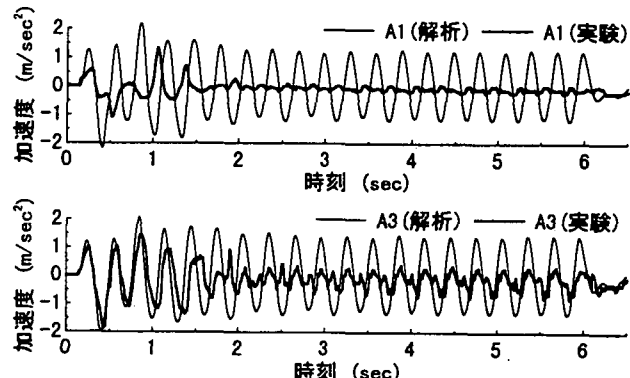


図-6 過剰間隙水圧の時刻歴図(ケース C-2)

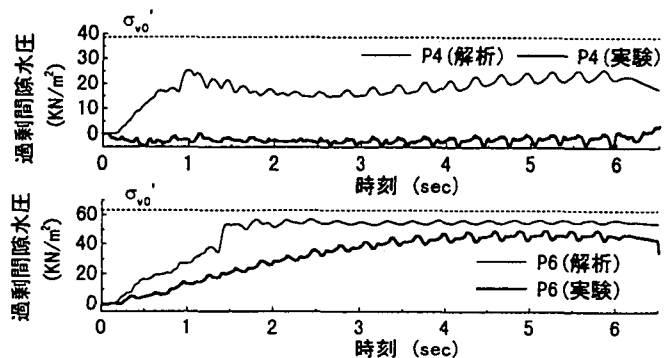


図-7 過剰間隙水圧の時刻歴図(ケース C-4)

ースにおいてもみられた。

4. 3 盛土天端の沈下

図-9 は、ケース C-2 および、ケース C-4 のケースの盛土天端の沈下の時刻歴を示したものである。実験と解析とで定量的には異なるものの、沈下が進行する傾向はよく似ている。

図-10 は、表-1 に示した全てのケースについて、沈下量を入力加速度との関係で比較したものである。実験では、最大加速度が同一でも定常波加振による沈下量は地震波加振による沈下量よりも大きい値となっており、両者の違いは入力加速度が大きい場合に縮まる傾向にあ

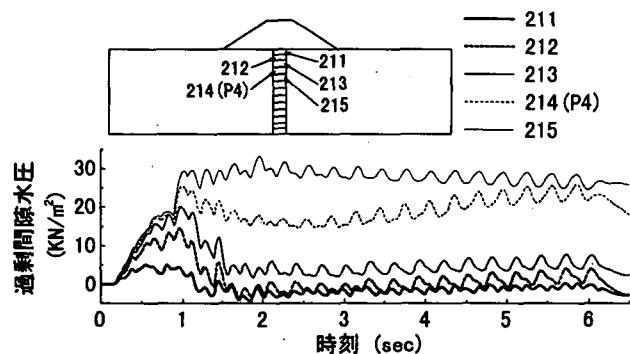
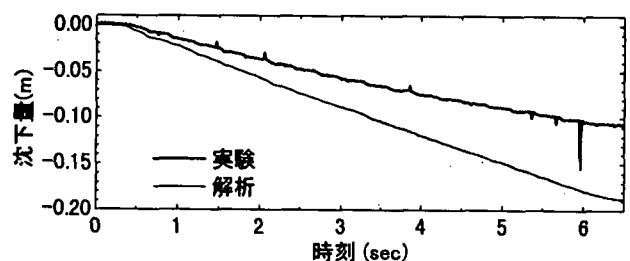
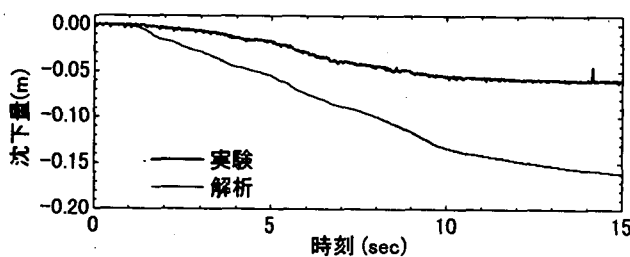


図-8 盛土直下部の過剰間隙水圧の時刻歴



(a) 正弦波加振(ケース C-2)



(b) 地震波加振(ケース C-4)

図-9 沈下量の時刻歴図

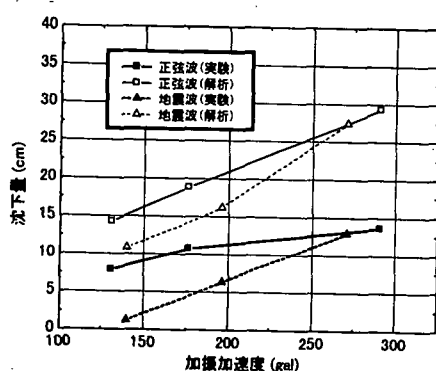


図-10 入力加速度と沈下量の関係

る。また、解析結果については、実験により得られた入力加速度と沈下量の関係を定量的にはよく再現しているが、解析により得られた沈下量は実験結果の2倍から3倍の値となっている。この差は図-6 に示した盛土下部の間隙水圧が異なること起因しているのではないかと考えられる。

なお、パラメータスタディーにより、盛土剛性の評価が盛土の沈下量に直接的に影響することがわかった。剛性を高く評価すると沈下量が小さい結果が得られた。

5. 結論

液状化性地盤上の盛土の動的遠心模型実験に対する数値シミュレーションを実施し、その解析結果を実験結果と比較した。結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 盛土下部の地盤の応答加速度は解析によりよく表現できたが、自由地盤が液状化することにより応答加速度が著しく減衰することは、十分に表現できなかった。
- (2) 過剰間隙水圧については、盛土下部において実験結果よりも早く上昇し、その値も大きかったことを除いて、解析結果は実験結果とよく一致した。
- (3) 入力加速度と盛土天端の沈下量の関係や入力地震動の波形の影響を定量的には解析でよく表現できた。ただし、解析による沈下量の算定結果は、実験結果よりも2倍から3倍大きな値を示した。この差は、盛土下部の過剰間隙水圧の上昇量が異なっていることに起因していると考えられる。

謝辞：解析全般にわたり、岐阜大学工学部岡二三生教授、八嶋厚助教授には大変お世話になりました。砂の繰返し弾塑性モデルの修正に際して、大成建設立石章氏、田口洋輔氏から貴重な助言を頂きました。記してここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M., & Uzuoka, R.: FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, Applied Scientific Research, Vol.52, pp.209-245, 1994.
- 2) Koseki, J., Koga, Y. & Takahashi, A.: Liquefaction of sandy ground and settlement of embankments, Proc. of International Conference CENTRIFUGE 1994, pp.215-220, 1994
- 3) 岡二三生、八嶋厚、加藤満、後藤宇：非線形移動硬化則を用いた砂の繰返し弾塑性構成式の拡張、第28回土質工学研究発表会、pp.489-490, 1994
- 4) Tateishi, A., Taguchi, Y., Oka, F. & Yashima, A.: A cyclic elasto-plastic model for sand and its application under various stress conditions, Proc. Earthquake Geotechnical Engineering, pp.399-404, 1995.
- 5) Koga, Y. & Matsuo, O.: Shaking table tests of embankment resting on liquefiable sandy ground, Soils and Foundations, Vol.30, No.4, pp.162-174, 1990.
- 6) 長尾和之、殿垣内正人、別井智行：地震時の液状化による高速道路盛土の挙動に関する模型実験、日本道路公団試験研究所報告、第33巻、pp.1-10, 1996.11