

液状化地盤上の盛土挙動に関する 模型振動実験および数値解析

池野 勝哉¹・吉田 誠¹
安楽宗一郎²・風間 基樹²・渦岡 良介²・仙頭 紀明³

¹五洋建設株式会社技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1）

E-mail:Katsuya.Ikeno@mail.penta-ocean.ac.jp, Makoto.Yoshida@mail.penta-ocean.ac.jp

²東北大学大学院工学研究科土木工学専攻（〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6）

E-mail:annraku@soill.civil.tohoku.ac.jp, kazama_motok@civil.tohoku.ac.jp, uzuoka@civil.tohoku.ac.jp

³日本大学工学部土木工学科（〒963-1165 福島県郡山市田村町徳定字中河原1）

E-mail:nsentoh@civil.ce.nihon-u.ac.jp

近年、既設構造物直下の有効な液状化対策として、曲がり削孔を併用した溶液型薬液注入工法が注目されている。これにより、従来、河川堤防で行われてきた法尻地盤の固化あるいは締固め、矢板打設などの液状化対策に代わり、堤体直下地盤を直接改良することが可能になる。そこで、筆者らは、同工法を用いて、盛土直下地盤を直接改良した対策効果を確認するため、1G場の模型振動実験を実施した。また、実験の再現解析を主目的に、FLIPを用いた有効応力解析を実施した。実験の結果、顕著な残留変形の抑制効果が確認できたほか、FLIPで概ね再現できることが分かった。

Key Words : Embankment, Shakeing table test, Numerical analysis, Chemical Grouting Method

1. はじめに

盛土直下の地盤では、常時において大きな偏差応力が作用しているため、地震時の液状化によって大きな残留変形が生じる。通常、既設の河川堤防における液状化対策では、盛土法尻部の地盤に固化あるいは締固め、矢板打設を行い、せん断変形を抑制することで、液状化の発生を軽微に留めている。しかし、盛土直下を直接地盤改良できれば、より対策効果が期待できるものと考えられる。

近年、既設構造物直下の有効な液状化対策として、曲がり削孔工法を併用した溶液型薬液注入工法¹⁾が注目されている。同工法は、飽和した砂地盤中に、水ガラス系の恒久薬液を低圧で浸透注入し、ゲル化させることで過剰間隙水圧の発生を抑えることができる。そのため、堤体に隆起などの変状がほとんど発生せず、また堤体を傷つけることなく施工することができる。

筆者らは、盛土直下を直接改良した対策効果について確認するため、1G場の模型振動実験を実施した²⁾。さらに、FLIPによる有効応力解析を実施し、模型実験の再現を試みた。

2. 模型振動実験

(1) 実験概要

実験は、長さ4.0m、高さ1.5m、幅2.5mの鉄製剛土槽を用いた。土槽は中央部に隔壁を設けることで、2断面を同時に加振することができる。実験ケースは、無対策および盛土直下地盤を液状化対策した計2ケースである。液状化対策ケースの模型断面図を図-1に示す。

盛土および液状化層には相馬硅砂5号を用い、不透水層にはベントナイトを使用した。液状化層は、相対密度60%を目標に水中落下方式で作製した。なお、不透水層は、後述する再現解析で用いるFLIPが、非排水条件を仮定しているため、水理条件を合わせる目的で設置している。改良層は、シリカ濃度(SiO₂)6%で配合された薬液を、あらかじめ地盤内に設置したチューブから定量ポンプで注入した。改良率は100%とし、直径450mmの球状体を360mm間隔に配置した。入力加振波は、正弦波(2Hz, 10波, 最大加速度200Gal)を用い、所定の深度に設置した加速度計および水圧計、変位計をサンプリング周波数512Hzで約90秒間収録するとともに、実験前

後にターゲットを計測することで、地表面形状を把握した。実験全景を写真-1に示す。

(2) 実験結果

実験前後の地表面形状および加速度(Acc.), 過剰間隙水圧(E.P.W.P.), 変位(Dis.)の時刻歴を図-2に示す。なお、過剰間隙水圧の図中に示した破線は、Osterbergの台形帯状荷重による地盤内応力を考慮した初期の有効上載圧である。

図-2より、加振と同時に過剰間隙水圧が上昇を始め、破線で示した有効上載圧に達したあたり(t=4.5s)から、加速度応答が減衰していく様子が分かる。液状化により剛性を失った地盤は、加速度応答が減衰するが、その傾向は無対策ケースで顕著である。過剰間隙水圧は、ほとんどの液状化層で有効上載圧に達し、概ね液状化している。水圧計W1は、盛土荷重の応力分散により、設置深度の浅い水圧計W2に比べて、過剰間隙水圧の上昇が早いことが分かる。なお、液状化対策ケースの改良層内に設置された水圧計W2は、破線で示した有効上載圧を大きく超えて上昇しているが、異常値である可能性も含めて更なる検討が必要である。

無対策ケースでは、盛土天端の鉛直変位D1が11cm(沈下)、水平地盤の鉛直変位D2が-4.8cm(隆起)の変形が生じている。変形のほとんどは、加振中に生じた非排水変形である。一方、液状化対策ケースでは、加速度応答の減衰が比較的少なく、盛土天端の鉛直変位D1は2cm(沈下)、水平地盤の鉛直変位D2が-1.3cm(隆起)に留めていることから、盛土全体の残留変形を抑制していると言える。

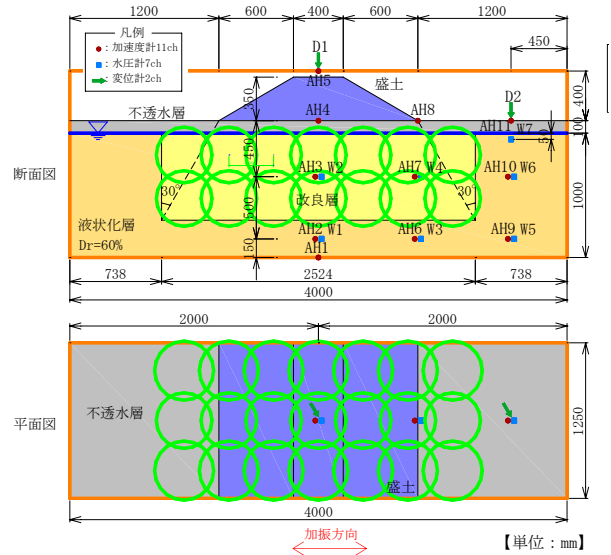


図-1 実験模型 (液状化対策ケース)

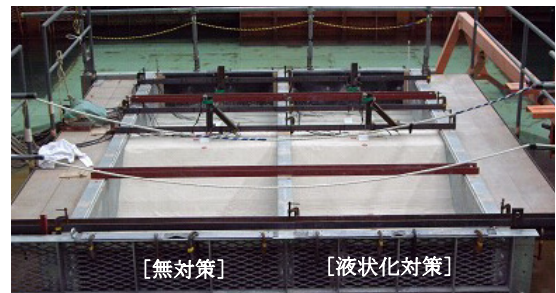


写真-1 実験全景

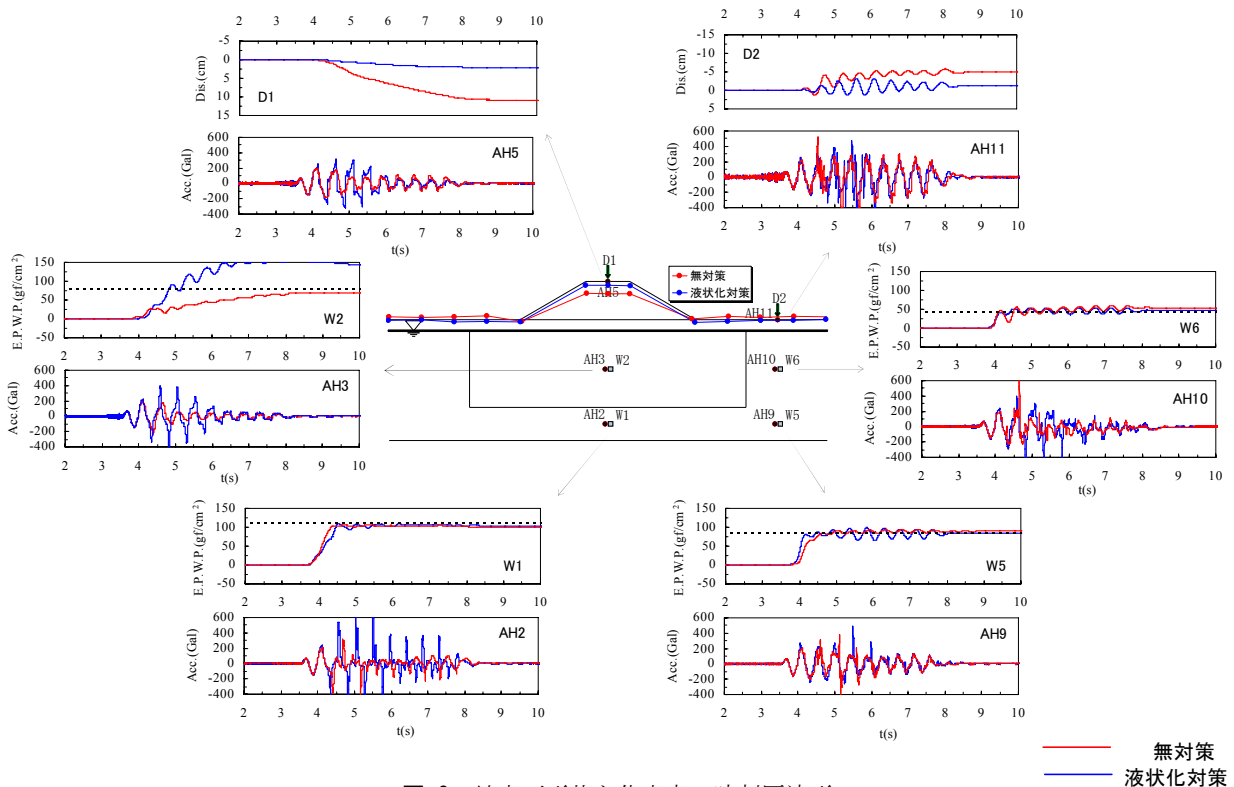


図-2 地表面形状と代表点の時刻歴波形

3. FLIPによる再現解析

(1) 解析条件

実験の再現解析には、土の構成式に双曲線モデルを組み合わせた東畑らのマルチスプリングモデル、過剰間隙水圧モデルに井合モデルを適用した2次元有効応力解析 (FLIP) を用いた。FLIPは、間隙水について非排水条件を仮定しているため、過剰間隙水圧は土骨格の体積ひずみ増分で表現される。

本解析では、盛土、不透水層、液状化層、改良層のすべてを非線形マルチスプリング要素とし、過剰間隙水圧モデルおよび数値積分方法は、FLIPの盛土地盤解析で推奨されている従来法を用いた³⁾。液状化対策ケースの解析メッシュを図-3に示す。拘束条件は、模型実験と同様に、底面を全方向拘束、両側面をx方向拘束の鉛直ローラーとした。解析に用いるパラメータは、要素シミュレーションを実施し、定ひずみ非排水繰返し三軸試験の有効応力経路および応力-ひずみ関係等を参考に設定した。解析パラメータを表-1に示すとともに、要素シミュレーション結果を図-4に示す。解析パラメータは、液状化層(a)について、概ね三軸試験結果に近い挙動を表現できているのに対して、改良層(b)は改良体の粘り強さを上手く表現することができなかった。

解析は、模型実験のケースに加え、比較用に改良層厚を小さくしたケースについても実施した。

(2) 解析結果

残留変形図、過剰間隙水圧比のコンターを図-5に示す。無対策ケースでは、盛土法尻部の水圧比が高いため、残留変形が大きく発生している。一方、液状化対策ケースでは、改良層の端部で水圧比が0.8程度まで上昇しているものの、盛土直下では大部分の水圧比を0.6程度以下に留めているため、残留変形が抑制されている。また、比較のために実施した液状化対策 (改良厚小) ケースについても、同様に残留変形が抑制されていた。

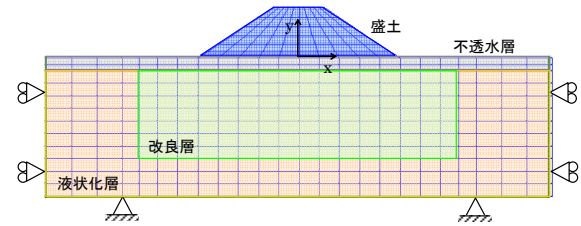


図-3 解析メッシュ (液状化対策ケース)

表-1 解析に用いたパラメータ

パラメータ	盛土	不透水層	液状化層	改良層
密度 ρ (g/cm ³)	1.321	0.888	1.868	1.868
基準拘束圧 σ_{ma} (kN/m ²)	1.982	0.333	3.921	6.908
せん断弾性係数 G_{ma} (kN/m ²)	5.55E+03	4.70E+03	9.87E+03	9.87E+03
体積弾性係数 K_{ma} (kN/m ²)	1.45E+04	1.22E+04	2.57E+04	2.57E+04
ポアソン比 ν	0.33	0.33	0.33	0.33
間隙率 n	0.50	0.46	0.46	0.46
内部摩擦角 ϕ_f (deg)	38.0	38.0	38.0	38.0
最大減衰定数 h_{max}	0.24	0.24	0.24	0.24
変相角 ϕ_p (deg)	-	-	30.0	30.0
w_1	-	-	6.5	6.0
p_1	-	-	0.5	0.7
p_2	-	-	1.1	0.4
c_1	-	-	1.5	3.0
S_1	-	-	0.005	0.005

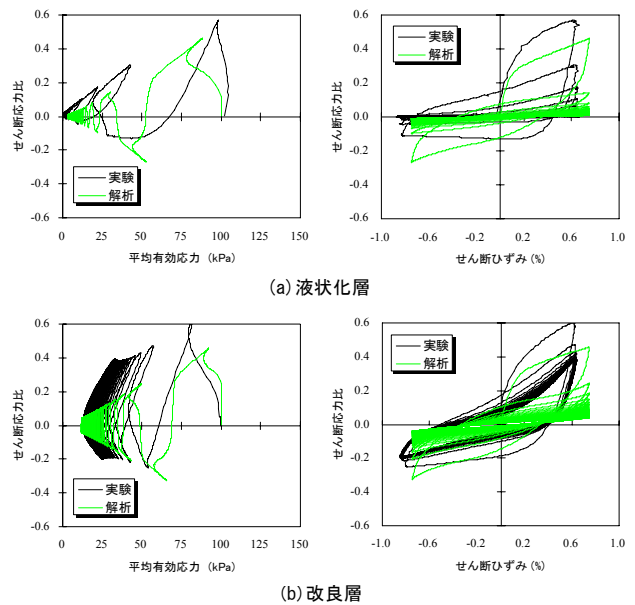


図-4 要素シミュレーション結果

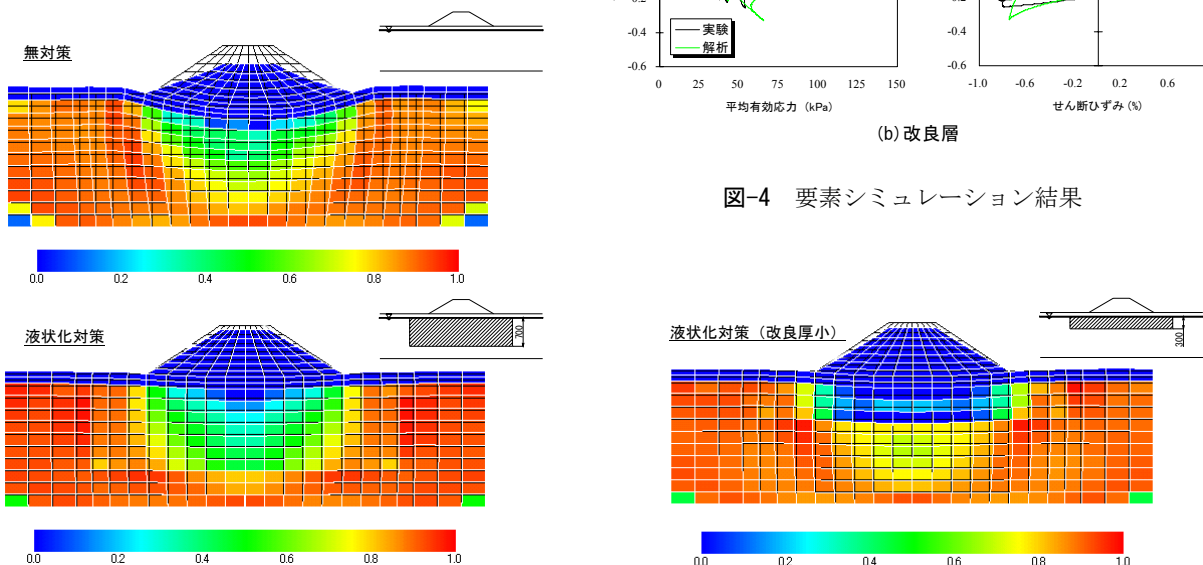


図-5 残留変形図と過剰間隙水圧比のコンター

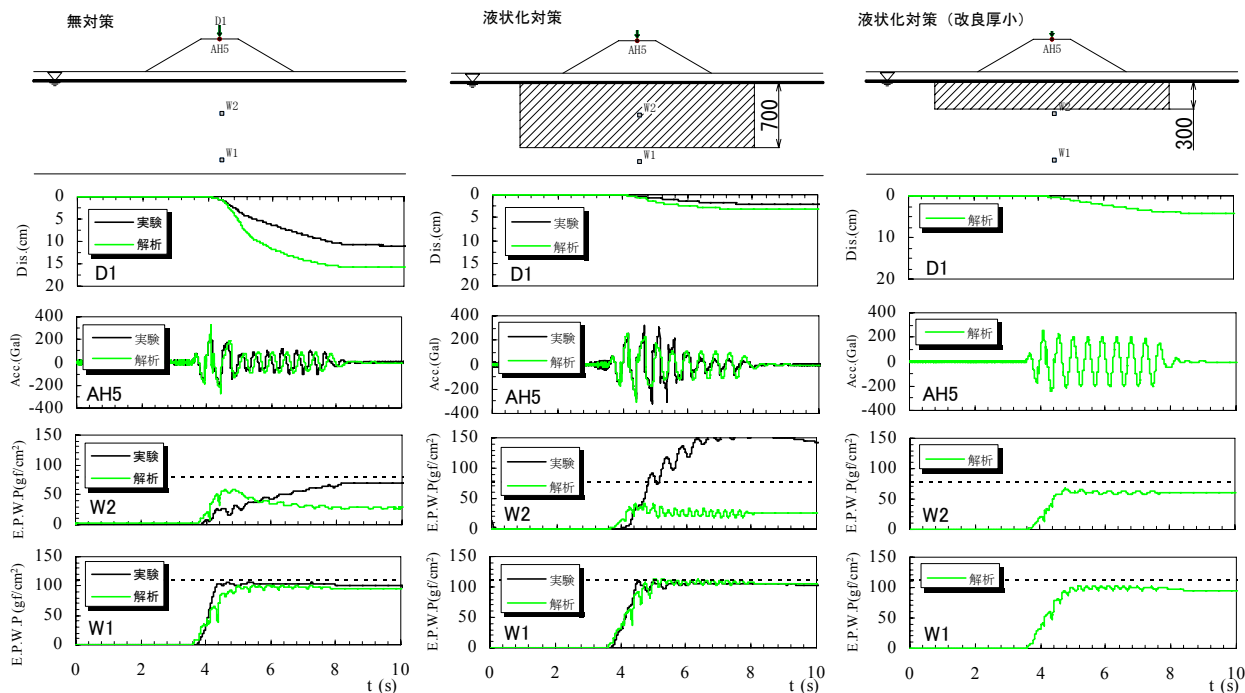


図-6 実験と解析結果の時刻歴比較

次に、代表点における実験と解析結果の時刻歴比較を図-6に示す。

解析では、実験に比べて、盛土天端の鉛直変位D1を過大に評価する傾向があるが、その他の挙動に関しては図示していないものも含めて、概ねよく合っていた。ただし、図-4に示したように、設定した解析パラメータは、改良体の粘り強さを適切に表現できていないので、盛土天端の鉛直変位を実験と合わせるためには、より精度の高いパラメータの設定方法について検討する必要がある。液状化対策（改良厚小）ケースは、解析上、液状化対策ケースと同程度の改良効果があったが、詳細については実験的な検討が必要である。

4. 結論

盛土構造物の液状化対策として、溶液型薬液注入工法を適用した模型振動実験およびFLIPによる再現解析を行い、以下のことが明らかになった。

(1) 模型実験より、盛土直下を液状化対策した場合、盛土天端の沈下量を無対策の2割弱に留めるなど、残留変形の抑制効果が高いことが分かった。

(2) FLIP解析より、盛土直下の改良厚を小さくしても一定の効果が期待できると推察された。

(3) FLIP解析は、実験よりも変形量を過大に評価する傾向があるが、概ね再現できることが分かった。今後は、改良体の粘り強さを適切に表現できる解析パラメータ設定し、変形量における精度を向上する必要がある。

参考文献

- 1) (財)沿岸技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル（改訂版），2008.
- 2) 池野ら：盛土の地震時挙動に関する振動台実験および数値解析，第44回地盤工学研究発表会，2009.
- 3) 第四期FLIP研究会：FLIP研究会せん断変形ロック問題WG，平成19年度成果報告書，平成20年7月31日.

MODEL TEST AND NUMERICAL ANALYSIS ABOUT SEISMIC BEHAVIOR OF EMBANKMENT ON LIQUEFACTION GROUND

K.Ikeno, M.Yoshida, S.Anraku, M.Kazama, R.Uzuoka, N.Sento

In this study, we conducted a model test in 1g gravitation field and numerical analysis about seismic behavior of embankment on liquefaction ground. Test cases are non improved, and improved ground under an embankment by Chemical Grouting Method. From results, it is found that improved ground by this method has remarkable resistance against shear deformation after liquefaction, and seismic behavior of embankment can be simulated by effective stress analysis FLIP.