

溶液型薬液注入工法を用いた盛土直下の液状化対策効果とその数値解析

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効果的な対策が可能になる。そこで、筆者らは、盛土直下を直接改良した液状化対策効果を確認するため、1G場の模型振動実験を実施し、2つの動的な有効応力解析コードから盛土挙動の再現を試みた。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、無対策ケースを有効応力解析で概ね再現できる一方で、改良層のパラメータ設定に課題があることを示した。

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

1. はじめに

盛土構造物は、常時において大きな偏差応力が地盤中に作用しているため、地震時の液状化によって大きな残留変形が生じ易い。通常、既設の河川堤防で実施される液状化対策は、堤体を傷つけないよう、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、法尻地盤のせん断変形を抑制することで液状化による被害の発生を軽微に留めている。しかし、盛土直下に存在する液状化地盤を直接改良できれば、さらに対策効果が期待できると考えられる。

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（例えば、浸透固化処理工法¹⁾）が注目されている。この工法は、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、間隙水をゲル化した薬液で置換することにより、地盤に繰返しせん断力に対する粘り強さ^{2),3)}を付加し、地震時に発生する過剰間隙水圧の発生を抑える工法である。したがって、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可能である（図-1）。

河川堤防の耐震対策は、平成7年の兵庫県南部地震を契機に全国的に耐震点検が行われ、その対策が進められてきている。耐震評価手法は、円弧すべりの安全率と沈下量との被災経験に基づく関係を用いて、円弧すべり法から間接的に沈下量を求める方法が適用されている。しかし、この方法は安全側に評価するため、沈下量を過大評価する傾向が強く⁴⁾、近年では有効応力解析や自重解析に基づく変形解析法に移行されている。

河川堤防を対象とした有効応力解析手法のうち、実務で多く用いられている解析コードとしてFLIP⁵⁾、LIQCA⁶⁾がある。前者は、土の構成式に双曲線モデ

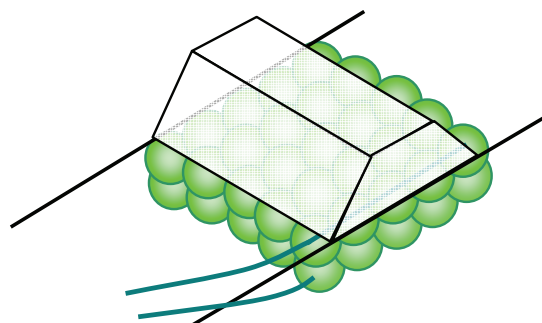


図-1 盛土直下の液状化対策イメージ

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ものである。なお、非排水条件を課しているため、過剰間隙水圧は土骨格の体積ひずみ増分で表現される。一方、後者は、岡らの繰返し弾塑性モデルを構成式とし、支配方程式をu-p形式とした排水を考慮できる有効応力解析である。どちらの解析コードについても、河川堤防を対象とした変形予測手法として実務で利用されている⁷⁾。

本論文は、溶液型薬液注入工法を用いて盛土直下を直接改良した盛土の1G場模型振動実験を実施し、その対策効果を検討したものである。さらに、2つの有効応力解析コード（FLIP, LIQCA）を用いて、実験の再現解析を実施し、解析コードの適用性について考察している。

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。盛土構造物は、高さ0.35m、天端幅0.4m、法尻幅1.6mとし、液状化層を1mとした。模型スケールの縮尺を10分の1と仮定すると、支配方程式から導かれた1G場の相似則⁸⁾は、表-1に示すような関係となる。なお、実験は通常の水道水を用いている。実験ケースは、無対策および盛土直下を液状化対策した2ケースである。液状化対策ケースの模型断面・平面図を図-2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%を目標に投入重量を管理しながら水中落下方式で作製した。なお、不透水層は、数値解析で用いるFLIPが、非排水条件を仮定しているため、できるだけ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、地盤作製後に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。ここで、改良率とは設計改良範囲に対する純改良体積の割合を指し、設計改良範囲の土が全面的に改良されている状態が100%と定義される。

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計測した。

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(Disp.)の代表点における時刻歴波形を図-3に示す。なお、過剰間隙水圧の図中に示した水平の実線は、Osterbergの台形帯状荷重

表-1 相似則と縮尺比

パラメータ	相似則	縮尺比
長さ	λ	10
密度	1	1
時間	$\lambda^{0.75}$	5.62
応力	λ	10
間隙水圧	λ	10
変位	$\lambda^{1.5}$	31.62
ひずみ	$\lambda^{0.5}$	3.16
加速度	λ	1
透水係数	$\lambda^{0.25}$	1.78

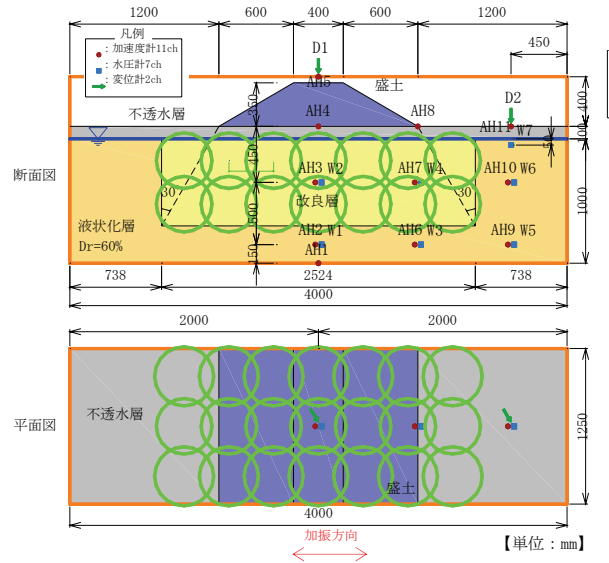


図-2 実験模型（液状化対策ケース）



写真-1 実験全景

による地盤内応力を考慮した初期の有効土被り圧である。

図-3より、加振と同時に過剰間隙水圧が上昇し始め、有効土被り圧に達した $t=4.5s$ あたりから、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砂地盤は、せん断波を伝達できないため応答が減衰するが、その傾向は無対策ケースで顕著である。過剰間隙水圧は液状化層で有効土被り圧に達し、概ね液状化に至っていることが分かる。無対策の水圧計W2は、盛土荷重の影響を直接受けるため、設置深度の深い水圧計W1に比べて、過剰間

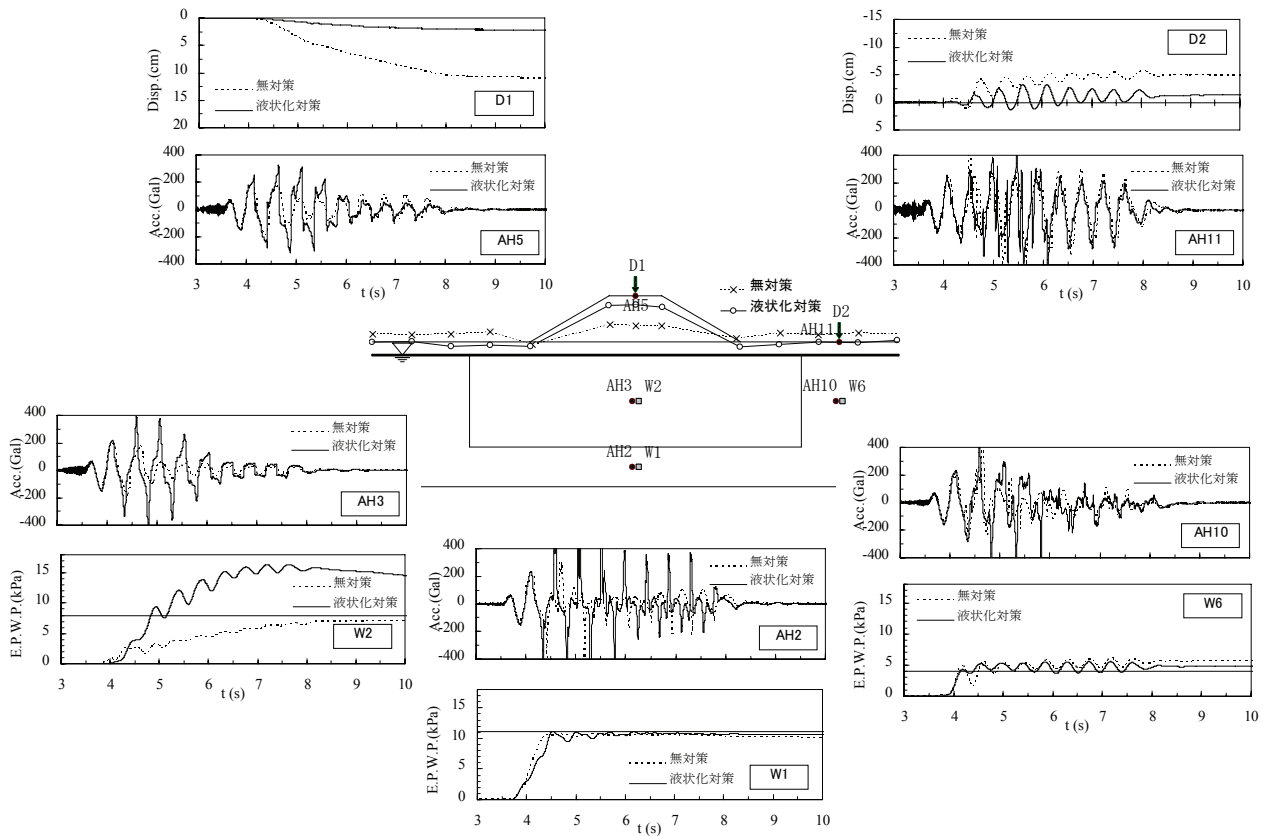


図-3 地表面形状と代表点の時刻歴波形

隙水圧の上昇が遅れている。また、液状化対策ケースの改良層内に設置された水圧計W2は、実線で示した有効土被り圧を大きく超えて上昇している。この原因として、周辺地盤の液状化により盛土および改良層が下方にたわみ、改良層中央にクラック等が発生することで、下部の過剰間隙水圧が鉛直上向きに伝播した可能性が考えられる。しかし、下部の水圧計W1に低下傾向がみられないこと、実験後の土槽解体時にクラック等が確認されなかったことから、現時点では、再現性も含めて水圧計W2の挙動解明について課題が残されている。

次に、地盤の変形に着目する。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。一方、液状化対策を施したケースでは、液状化に対して粘り強さ^{2),3)}のある改良層の存在や、それに伴う液状化層の縮減から、地盤のせん断変形が小さく抑えられ、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-1.3 cm（隆起）に抑えられている。なお、両ケースとも変形のほとんどは、加振中に生じた非排水変形である。

以上より、溶液型薬液注入工法により盛土直下を直接改良することで、地震時における盛土直下地盤の液状化の発生を抑え、盛土天端の沈下を無対策ケースの2割程度に低減する効果が明らかになった。

3. 模型振動実験の再現解析

(1) 解析条件

FLIPはFLIPver.7.1.9を用いた。盛土、不透水層、液状化層、改良層を非線形のマルチスプリングモデルとし、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⁹⁾。また、数値解析上の安定性を確保するために用いた初期剛性比例型のReyleigh減衰 β は、自由地盤部の一次元非液状化解析を実施し、最大水平変位が安定する程度の小さい値として0.0004を用いた。一方、LIQCAはLIQCA2D07を用い、盛土、不透水層、液状化層、改良層を弾塑性モデルとし、各層について透水係数、圧縮指数、膨潤指数、塑性基準ひずみ、弾性基準ひずみの5つを変化させることで表現した。なお、初期剛性比例型のReyleigh減衰 β は、公開版⁹⁾で推奨されている0.001を用いた。

解析に用いるパラメータは、両解析コードとも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-ひずみ関係を参考に設定した。各々の解析パラメータを表-2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。

液状化層は、両解析コードともに平均有効応力がゼロ付近まで減少し、せん断剛性を失ってせん断応力比-せん断ひずみ関係の履歴曲線が扁平形状となる傾向が、三軸試験結果とよく対応している。一方、

改良層の三軸試験結果では、平均有効応力は減少するもののゼロにはならず、履歴曲線が扁平ではなく一定のせん断剛性を保持するなど、脆性的な破壊に至らない粘り強さ^{2),3)}を示しているが、どちらの解析コードもその傾向を表現できていないことが分かる。通常、液状化解析コードは砂地盤を対象にしているため、粘性土のような粘りを発揮する改良土のパラメータを設定することは想定されていない。したがって、本検討では、過剰間隙水圧の高い領域で

改良層の粘り強さ^{2),3)}を過小評価しているが、有効応力の低下程度がよく再現されているパラメータを用いている。

液状化対策ケースの解析メッシュと境界条件を図-5に示す。拘束条件は、模型実験に倣い底面を全方向拘束、両側面をx方向拘束の鉛直ローラーとした。ここで、解析コーディングの違いにより、FLIPでは要素間の水の移動は拘束されているが、LIQCAでは水面下の要素間で自由である。

表-2 解析に用いたパラメータ

(a) FLIP

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	1.900	1.868	1.868
基準拘束圧	σ_{ma} (kN/m ²)	1.982	0.713	4.680	7.667
せん断弾性係数	G_{ma} (kN/m ²)	5.55E+03	1.00E+04	9.87E+03	9.87E+03
体積弾性係数	K_{ma} (kN/m ²)	1.45E+04	2.62E+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_i (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

(b) LIQCA

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	1.900	1.868	1.868
透水係数	k (cm/s)	1.33E-04	8.50E-07	1.33E-04	3.75E-07
初期間隙比	e	0.859	0.859	0.859	0.859
圧縮指数	λ	0.0049	0.0049	0.0049	0.0074
膨潤指数	κ	0.0025	0.0025	0.0025	0.0037
擬似過圧密比	OCR	1.0	1.0	1.0	1.0
無次元化初期せん断係数	G_0/σ_m'	372	372	372	372
変相角比	M_m	0.945	0.945	0.945	0.945
破壊応力比	M_f	1.150	1.150	1.150	1.150
硬化関数中のパラメータ	B_0	800	800	800	800
硬化関数中のパラメータ	B_1	310	310	310	310
硬化関数中のパラメータ	C_f	0.0	0.0	0.0	0.0
塑性基準ひずみ	γ_{τ}^p	0.1	0.1	0.1	-
弾性基準ひずみ	γ_{τ}^e	0.05	0.05	0.05	-
ダイレイタンシー係数	D_0	0.7	0.7	0.7	0.7
ダイレイタンシー係数	n	5.1	5.1	5.1	5.1
異方性消失のパラメータ	C_d	2000	2000	2000	2000

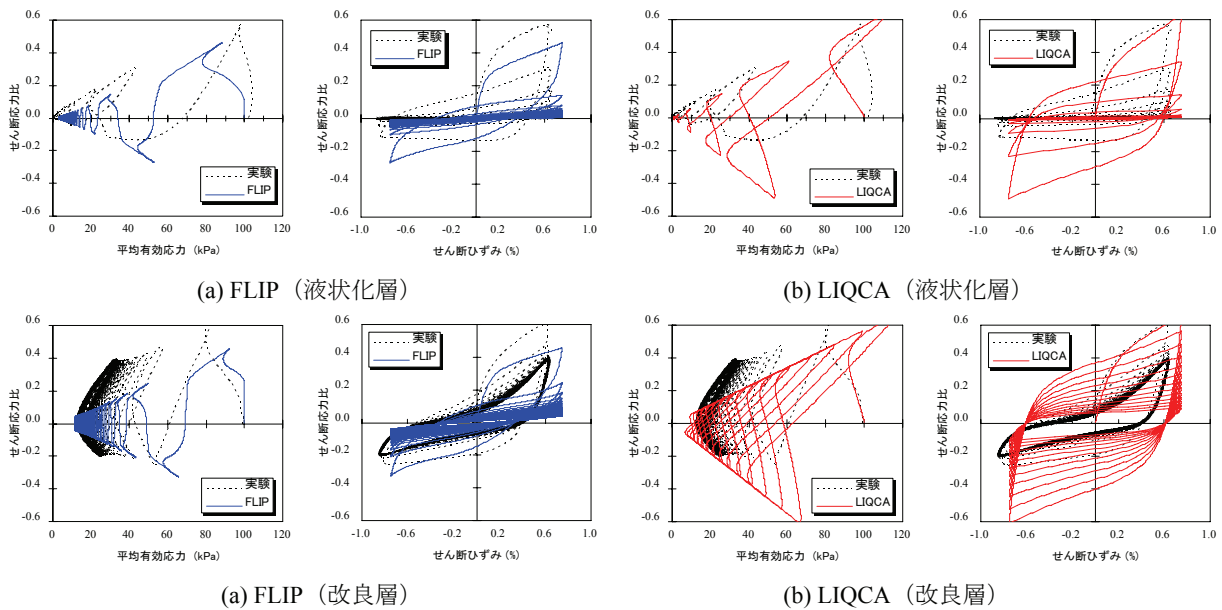


図-4 要素シミュレーション結果

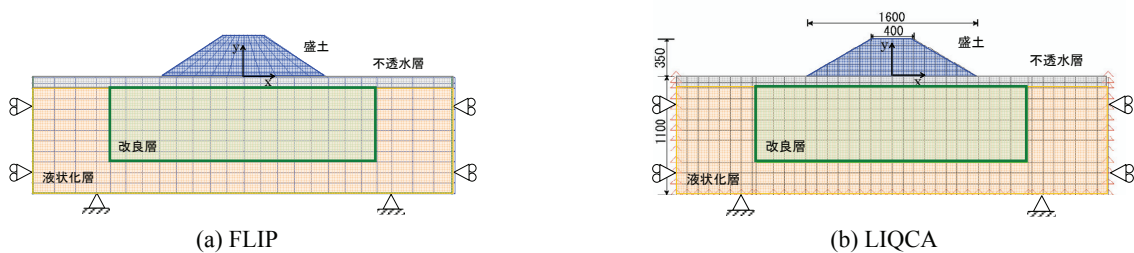


図-5 解析メッシュと境界条件 (液状化対策ケース)

(2) 解析結果

解析最終ステップの残留変形と過剰間隙水圧比のコンターを図-6に示す。図中より、FLIPとLIQCAの解析結果は、いずれも同様の傾向を示していることが分かる。無対策のケースでは、液状化対策ケースに比べて盛土法尻部の水圧比が高いため、地盤のせん断強度が低下し、残留変形が大きく発生している。液状化対策ケースでは、改良層の水圧比が低いと同時に、改良層に保持されているせん断剛性で残留変形が抑制されている。このように、盛土直下を改良することで、改良効果が十分に発揮される。

次に、代表点における実験と解析の時刻歴比較について、無対策ケースと液状化対策ケースのそれぞれを図-7および図-8に示す。無対策ケースを見ると、盛土天端の変位D1をFLIPが若干過大評価しているものの、両解析コードとも良い整合を示している。加速度応答は、FLIPが液状化後に減衰する傾向を比較的良く再現しており、水圧挙動は両解析コードとも概ね整合していると言える。液状化対策ケースを見ると、盛土天端の変位D1は両解析コードともに過大評価しており、LIQCAの方がその傾向は強い。加速度応答は両解析コードともスパイク的な応答は再現されておらず、いずれも過大に評価する傾向が強いが、水圧挙動は先に述べた理由により、水圧計W2の挙動を除いて非常に高い再現性が確認できる。

改良層で設定した解析パラメータは、図-4に示したように、改良体の粘り強さ^{2),3)}を過小評価しているため、盛土天端の変位を過大に評価した可能性が

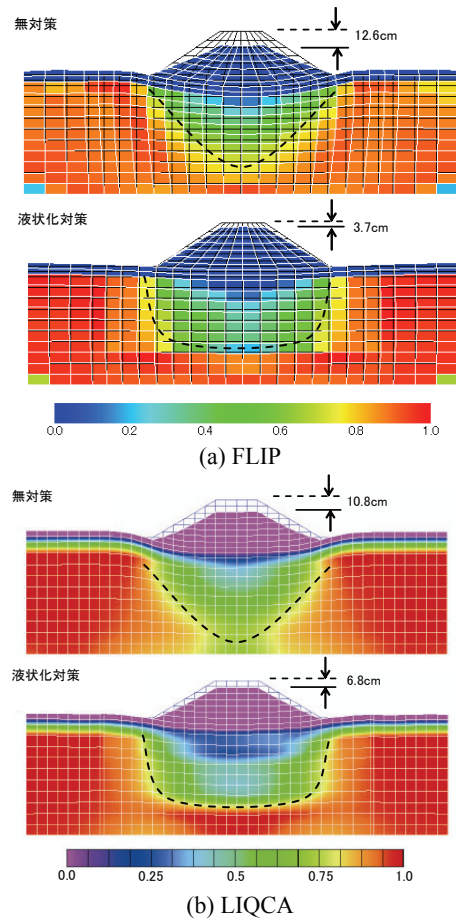


図-6 残留変形図と過剰間隙水圧比

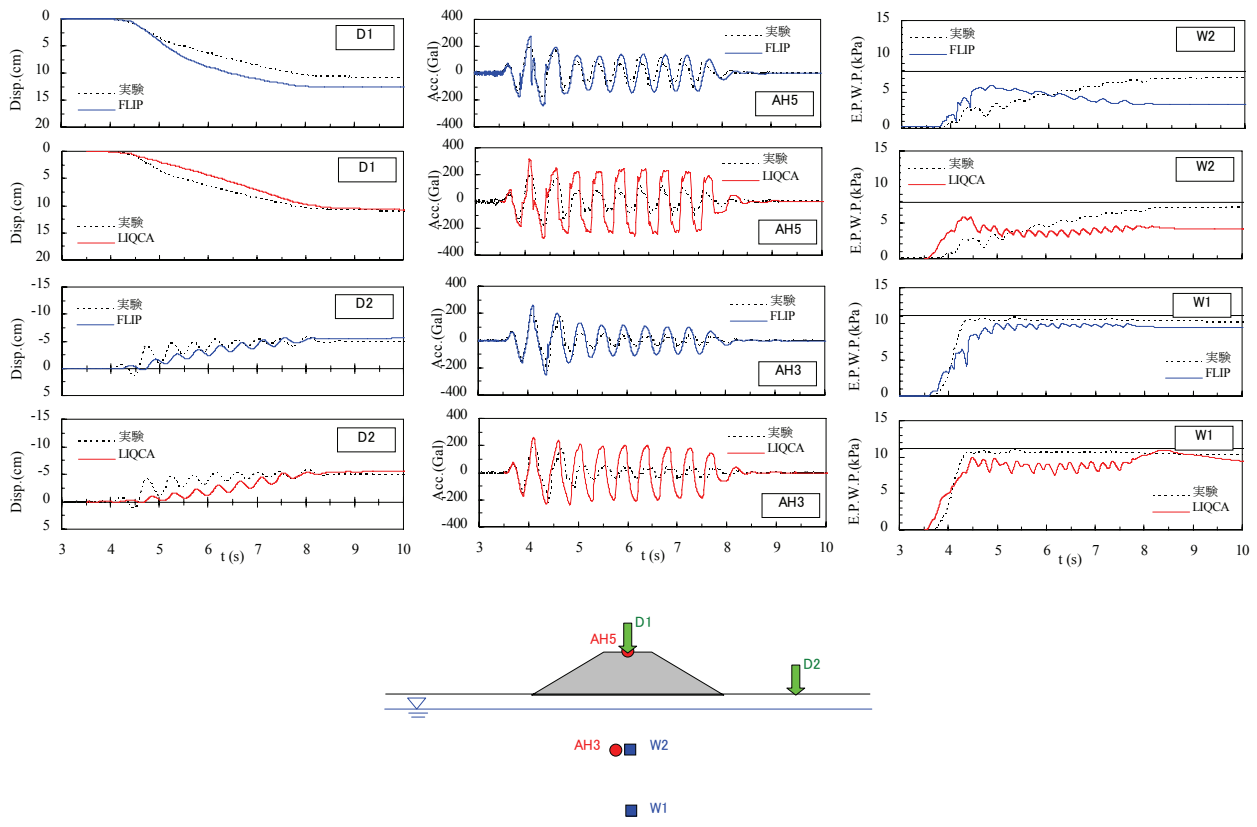


図-7 実験と解析の時刻歴比較（無対策ケース）

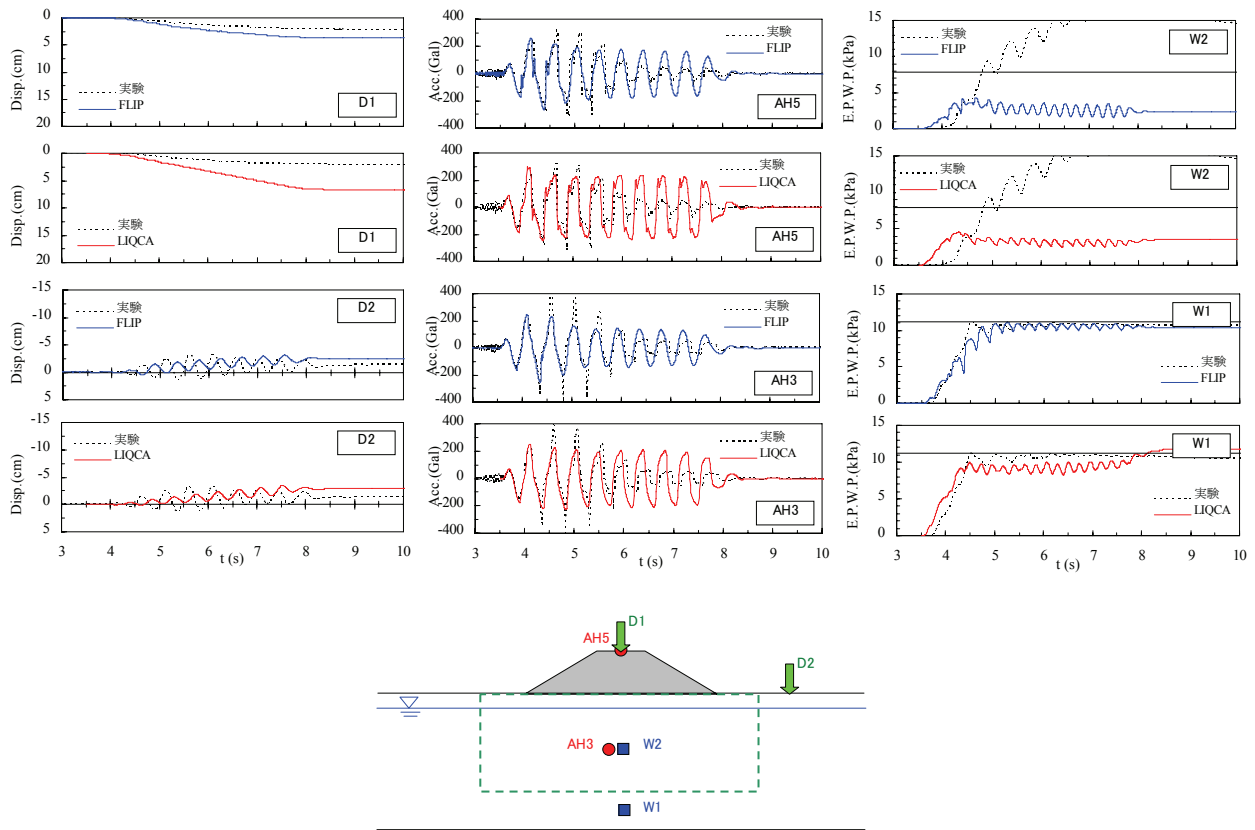


図-8 実験と解析の時刻歴比較（液状化対策ケース）

高いと考えられる。これにより、設計的には安全側の結果を示すことが予想されるが、より精度の高い変形予測を行うためには、改良層の解析パラメータについて詳細な検討が必要である。

従来から実施されている河川堤防の法尻地盤改良は、盛土天端の沈下量を半分程度に抑えることが遠心実験などで確認されている¹⁰⁾。しかし、盛土直下を直接改良することで、液状化層厚が縮減されると同時に、地震時において過剰間隙水圧がある程度上昇しても剛性が保持されるため、盛土の変形抑制が更に期待できるものと考えられる。図-9は、溶液型薬液注入工法（以下、CGM）による(a)直下改良と、セメント系固化工法（以下、CDM¹¹⁾による(b)法尻改良について、盛土の沈下量をFLIP解析で比較したものであるが、(b)に比べて(a)は更に25%程度の沈下抑制効果が確認できる。なお、解析に用いたパラメータおよびモデルは先述の検討と同様であり、(a)および(b)で示した改良面積は概ね一致している。このように、同じ改良面積を有していても、盛土直下の地盤を改良した方が沈下の抑制効果は高いことが推察される。しかし、一般的に薬液が高価であることから、地盤そのものを改良する比較的高価な対策と、シートパイルのようなせん断変形を抑制する安価な対策を併用するなど、異なるメカニズムの相乗効果に期待する対策も考えられる。今後、コスト面も含めて、直下改良と法尻改良、あるいは併用時における費用対効果を検討していく予定である。

なお、本論文では、地震後の地盤の圧密変形には着目していないが、継続時間の長い地震動が作用する場合には、盛土直下を直接改良して液状化層厚を低減する必要性が更しく高くなると考えられる。

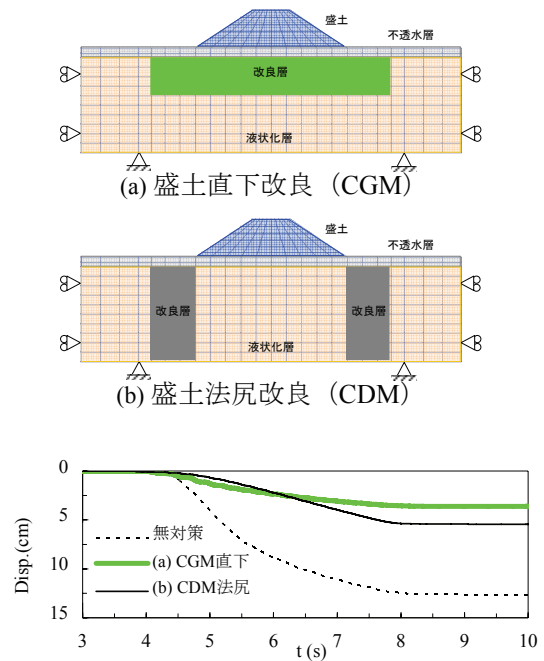


図-9 盛土天端沈下量の比較

4. 結論

本論文では、盛土構造物の液状化対策として、盛土直下を溶液型薬液注入工法で直接改良する工法を提案し、その効果を模型振動実験で確認した。また、FLIPおよびLIQCAを用いた有効応力解析で実験の再現解析を実施し、その適用性について考察した。さらに、盛土の直下地盤と法尻改良の解析的な比較検討として、前者に溶液型薬液注入工法を後者にセメント系固化工法を適用したFLIP解析を実施した。主要な結論は以下の通りである。

(1) 本実験では、盛土直下を直接改良した液状化対策ケースが、地震時における盛土直下地盤の液状化を抑え、天端の沈下量を無対策ケースの2割程度に抑えることが分かった。

(2) 2つの有効応力解析 (FLIP, LIQCA) は、室内試験の応力-ひずみ関係や有効応力経路を表現できるパラメータを適切に設定することで、実験結果を概ね再現できることが分かった。なお、改良層については、両解析コードとも過剰間隙水圧の高い領域における粘り強さを表現するに至らなかった。

(3) FLIPによる解析的な検討により、盛土構造物の液状化対策は、従来の法尻地盤改良よりも、直下地盤を直接改良した方が、盛土天端の沈下量を小さく抑えることが推察された。

今後は、溶液型薬液注入工法による改良体の粘り強さを適切に表現できるパラメータの設定方法について検討し、変形予測における精度を向上する必要がある。また、コスト面も含めた合理的な盛土構造物の液状化対策工法について、沈下量等の改良効果のみならず、費用対効果の観点から総合的に検討する必要がある。

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) 山崎浩之，善功企，河村健輔：溶液型薬液注入工法の液状化対策への適用，pp.119-151，港湾空港技研報告，第41巻，第2号，2002。
- 3) 大島貴充，風間基樹，仙頭紀明，河村健輔，林健太郎：溶液型薬液改良砂の液状化抵抗および繰返しせん断後の変形特性の評価，土木学会論文集C，Vol.64，No.4，pp.732-745，2008。
- 4) 酒井久和，吉澤睦博，岡島充典：液状化流動解析を用いた河川堤防の耐震性評価におけるFL算定法の影響，第12回地震工学シンポジウム論文集，No.126，pp.610-613，2006。
- 5) Iai,S., Matsunaga,Y. and Kameoka,T. : Analysis of undrained cyclic behavior of sand under anisotropic consolidation, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.16-20, 1992.
- 6) 液状化解析手法LIQCA開発グループ：LIQCA2D07 (2007年公開版)資料，2007。
- 7) (社)地盤工学会：土構造物の地震時における性能設計と変形量予測に関するシンポジウム発表論文集，No.139，平成19年7月。
- 8) Iai,S. : Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure Model in 1G Gravitational Field, Report of the Port and Harbor Res.Inst. Vol.27, No.3, pp.3-24, 1988.
- 9) 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。
- 10) 常盤敏，中山修，倉橋智，宮本高行，八嶋厚：木曾三川下流部堤防での地震時変形解析手法の比較検討，第40回地盤工学研究発表会，pp.1357-1358，2005。
- 11) (財)沿岸技術研究センター：海上工事における深層混合処理工法技術マニュアル (改訂版)，2008。

(原稿受理2009年6月28日)

EFFECTS OF GROUND IMPROVEMENT AGAINST LIQUEFACTION BY CHEMICAL GROUTING METHOD UNDER EMBANKMENT

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 and LIQCA.