拘束効果を考慮した地盤改良による盛土の液状化対策工法の開発 DEVELOPMENT OF A NEW LIQUEFACTION COUNTERMEASURE FOR EMBANKMENT BY GROUND IMPROVEMENT CONSIDERING CONSTRAINT EFFECT

スレン ソッキアン*・大河内 保彦**・小林 浩二*・三木 博史***・牧野 昌巳**** Sokkheang SRENG, Yasuhiko OKOCHI, Koji KOBAYASHI, Hiroshi MIKI and Masami MAKINO

This paper presents the results of a series of centrifugal model tests using a new liquefaction countermeasure for embankment foundation and their numerical simulations. In order to investigate the basic behavior of embankment during liquefaction with and without countermeasure, three cases of centrifuge model tests were conducted in 70g of centrifugal acceleration. A newly developed countermeasure which considers the constraint effect and conventional TOFT method were adopted in the experiment. Numerical simulations using fully coupled effective stress 3D FEM were carried out to evaluate the experimental results and applicability of the analysis program to solve the practical problem. It is found that the analysis results showed reasonable agreement with the results of experiments; therefore it is suggested that the analysis method has potential applicability to practical design.

Keywords: dynamic centrifuge model test, embankment, liquefaction, countermeasure, effective stress 3D FEM

1. はじめに

信頼性の高い液状化対策工法の一つとして、わが国では、 格子状地盤改良工法(TOFT)が採用されてきた。この工法 では、格子状の壁の改良体が地中に構築され、通常液状化 層すべての深度まで改良される。

格子の間隔に関しては、格子内の未改良部の過剰間隙 水圧を有効に抑制するために、従来設計では液状化層厚の 1/2~1/3とすることが提案されている¹⁾。結果として改良率 は50%前後となる。しかしながら、地盤の変形抑制が主要な 目的であれば、静的なケースで三木ら²⁾によって確認された、 改良体による未改良地盤の拘束効果を考慮することによって、 より大きな格子間隔を採用できる可能性がある。

この拘束効果を考慮する新しい地盤改良工法は CGI 工法と 呼ばれており、これを用いることによって、より大きな格子間隔 のみならず、下部に未改良部を残すことも可能である。結果と して、対策工法のコストは大幅に縮減可能となる。

CGI工法を用いた液状化対策工法の一連の遠心模型実験 (半断面モデル)と三次元動的有効応力解析がSrengら³⁾ によって実施されている。従来のTOFT工法とCGI工法を比 較すると、CGI工法がより大きな格子間隔でありながら、変形 と過剰間隙水圧を有効に抑制できることが確認された。 ここでは、半断面モデルにおける境界の影響を避けるために、全断面モデルの遠心模型実験の3ケース(無対策、 CGI工法およびTOFT工法)を実施し、CGI工法の有効 性を確認する。さらに、実験結果を評価し、プログラムの実 務への適用性の検討についても完全二相系の動的有効応力 3DFEMを実施した。

2. 遠心力模型実験

(1) 実験装置

遠心力模型実験は 70G 場で実施した。本研究に用いた遠 心力装置は日本工営(株)の自社製であり、有効半径 2.6m のビーム型装置である(図-1)。図-2は模型地盤に地震波 形を与えるための加振装置である。加振装置の仕様は表-1



図-1 遠心力模型実験

^{*} 技術本部 中央研究所 総合技術開発部

^{**} 株式会社NOM

^{***} 株式会社三木地盤環境工学研究所

^{****} 株式会社加藤建設

に示すとおりである。加振実験の目標入力波形は 30 波の正 弦波、周波数 2Hz、最大加速度 350gal 程度である。

(2) 模型地盤作製と計測

模型実験に用いた材料は豊浦砂と硅砂3号である。材料の 主な特性は表-2に示すとおりである。豊浦砂は液状化層に 用い、硅砂3号は基礎の作製に用いた。

実験ケースは表-3に示す無対策と対策(CGI工法、 TOFT工法)の3ケースを実施した。CGI工法とは本研究が 提案している新しい格子状地盤改良工法である。

図-3は模型実験の概要(模型寸法)を示したものである。



図一2 加振台

表一1 加振性能

項目	仕様
加振制御システム	電気油圧サーボ制御方式
最大遠心力加速度	100 G
最大加振加速度	25 G (1/30 model 818gal)
最大搭載模型重量	250kg
最大振幅	\pm 3.0mm
周波数	10 -400Hz
最大速度	40 cm/s

表-2 実験材料の物理特性

物理特性	豊浦砂	硅砂3号	
最大粒径, D_{\max} (mm)	0.425	2	
50% 粒径, $D_{50}(m mm)$	0.169	1.46	
均等係数, $U_{\rm c}$	1.44	1.47	
曲率係数, U_{c}	0.974	0.975	
最小乾燥密度, $ ho_{dmin}$ (g/cm ³)	1.343	1.490	
最大乾燥密度, ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.649	1.673	
土粒子の密度, $ ho_{\rm s}$ (g/cm 3)	2.641	2.636	

表-3	実験ケース	(70G)
-----	-------	-------

Case	液状化対策工法
Case 1	無対策
Case 2	CGI 工法
Case 3	TOFT 工法



液状化層は実物換算で 10m である。改良体は豊浦砂とセメントを混合した後、格子状地盤改良の型枠に入れて作製した。改良体の目標強度は一軸圧縮強度 (q_n) が 1000kN/m²とした。

改良率(改良体の面積/盛土の面積)は平面で CGI 工法が 33%、TOFT 工法が 45% である。TOFT 工法では G.L. – 10m まで、CGI 工法では G.L. – 8m までの改良となるため、改良体 数量の比較では、TOFT 工法が CGI 工法の約 1.7 倍となる。

模型地盤は1000 × 490 × 200mmの剛土槽を用いて作 製した。模型地盤の作製手順は次のとおりである。①硅砂3 号を用いて、相対密度95%で基礎地盤を作製する。②型枠 から改良体を取り出し、基礎地盤の上に設置する(図-4)。 ③豊浦砂を用いて、空中落下法で相対密度60%になるように 液状化層を作製する。正方形格子状の改良体は所定の地盤 深さに設置した。改良体の形式や仕様の詳細については大河 内らの文献⁴⁾が詳しいので参照されたい。

盛土は豊浦砂 80% とカオリン 20% (重量比)の配合材料を 用いて、盛土作製用の型枠に乾燥密度 1.9g/cm³ になるように 作製した後、冷凍した。模型地盤は真空層内でシリコンオイル (70mm²/sの粘性係数)を用いて飽和した。初期水位は地表 面より換算水位で 1m 低いところに設定した (図-3参照)。

(3) 実験結果

1) 応答加速度、過剰間隙水圧および鉛直変位

図-5(a)~(c)は両実験ケースから得られた基盤、盛

土天端、盛土法肩の応答加速度の時系列データを比較したものである。基盤の最大応答加速度(図-5(a))は約400galであったが、Case3がやや小さめである。

盛土天端および盛土法肩の応答加速度は Case1 の値より、 対策工法を施した Case2、3 が大きくなっている。これは、対 策により、液状化による地盤の軟弱化が抑制されているためと 考えられる。特に Case3 の TOFT 工法における法肩の加速 度は、Case2 よりも格段に大きい。これは、Case2 が、改良 体下部に未改良層を残してあるため、ここが液状化した結果、 免震層的な役割を果たしたと考えられる。

図-6(a)~(c)は両実験ケースから得られた砂地盤内 の応答加速度を比較したものである。Case2の地盤の応答加 速度はCase1より大きくなるが、Case3では、やや抑制され ている。地盤加速度に関しては、剛土槽による境界と、改良 部との相互作用的な影響がある可能性もある。また、初期継 続時間帯でCase1とCase2の加速度が大きくなったのは無 対策とCase2は改良体が非着低であるためと考えられる。

図-7は発生過剰間隙水圧と経過時間の関係を比較したものである。対策ケース(Case2、3)の過剰間隙水圧は改良体により過剰間隙水圧の発生が抑制されることにより、無対策ケース(Case1)よりやや小さくなっている。ただし、CGI工法ではG.L.-8mまでしか改良体がないため、この深度での過剰間隙水圧抑制効果はTOFT工法より少ない。

図-8は盛土天端、盛土法肩および地表面の鉛直変位と



(a) 液状化作製前



(b) 液状化層作製後図-4 改良体の設置例(Case2、CGI工法)



経過時間の関係を比較したものである。図-8(a) に示すと おり、Case2(CGI工法)とCase3(TOFT工法)の盛土 の鉛直変位はCase1(無対策)より小さい。

また、砂地盤の鉛直変位(図-8(c))では加振時の盛 土載荷による Case1 の地表面の隆起現象が生じたものの、 Case2 と Case3 の最終鉛直変位はほぼ隆起しない結果となっ た。これらの結果から対策法による液状化対策の効果が確認 された。

2) 加振前後の地盤と盛土の変形

図-9(a)~(c)に加振前後の変形画像を用いてスケッ チした図を示す。対策ケースの変形は、Case1(無対策)と比 較して、盛土天端中央、法肩ならびに盛土周辺地表面の鉛直 変位が抑制されており、天端の沈下は、Case3がCase2より 小さいことが見て取れるが、Case3では盛土中心部の未改良層 に、大規模な滑落が生じており、実スケールで10cmを超える と思われる空隙が出現している。これは、最終的には盛土天端 の沈下につながると考えられる。この現象を見ると、盛土天端 や法肩の測定沈下量はTOFT工法がもっとも抑制されているも のの、盛土体内部に損傷などが起きる可能性が示唆された。

3) 加振後の地表面の鉛直変位分布

加振実験後の地表面の鉛直変位分布を、実験前後(1G場) に土槽上に設置されたレーザー変位計を用いて計測した。こ れによって、より詳細な対策工法による変形抑制効果が測定さ れたが、この結果については、後述の数値シミュレーションと の比較で示す。



図-6 液状化層の応答加速度





図-8 鉛直変位



Case	液状化対策	シミュレートした遠心実験			
Case A-1	無対策	Case 1			
Case A-2	CGI 工法	Case 2			
Case A-3	TOFT 工法	Case 3			



(c) TOFT 工法(節点数:8154, 要素数:6624)

図-10 有限要素メッシュ図

表-5 構成モデル

材料	構成モデル
盛土	Mohr-coulomb
豊浦砂(乾燥)	Mohr-coulomb
豊浦砂(飽和)	繰返し弾塑性(液状化)
改良体	Mohr-coulomb
珪砂3号	Ramberg-osgood

表-6 豊浦砂の入力パラメータ

ρ	eo	λ	K	$G_{\theta}/\sigma'_{m\theta}$	k/γ_w	M^*_m	M^*_f	K_{f}
1.8	0.754	$9.1 \\ \times \ 10^{\cdot 3}$	$5.2 imes 10^{\cdot 4}$	1324	$1 \\ imes 10^{-3}$	0.77	1.12	2×10^{6}
$B^*{}_{ heta}$	$B^*{}_1$	C_{f}	C_d	OCR^*	$D^*{}_{ heta}$	n	$Y^{P^*}r$	Y^{E^*r}
4089	54.5	0.0	2000	1.0	0.6	5.1	0.002	0.012

ては、岡らの文献 5) を参照されたい。

他の材料に用いるパラメータは、既往の設計で用いられる一般的な値と仮定した。改良体はセメントで固化されているため、 c材でモデル化した。現在のところ、LIQCA3Dでは、大きな 粘着力の材料の引っ張り強度を規定できないため、一般的に、



(a) Case1:無対策



(b) Case2:CGI 工法



(c) Case3:TOFT 工法

図-9 盛土および基礎地盤の変形状況

3. 数値シミュレーション

(1) 解析条件

実験結果をシミュレートするために、LIQCA⁵⁾の三次元バージョンを用いた。LIQCAは完全二相系の液状化解析 FEM である。実施した解析ケースを表-4に示した。

使用した有限要素メッシュを図-10に示す。要素は、積分 点1の8節点立体要素を用いている。対称性を利用して、半 分をモデル化した。

各材料に使用した構成モデルを表-5にまとめて示す。

繰返し弾塑性モデルの入力パラメータは、LIQCAに付属の室内試験シミュレーションユーティリティーで決定した。使用した入力パラメータを表-6に示す。パラメータの詳細につい

圧縮強度の $10 \sim 20\%$ の強度と言われる改良体の引張強度 を過大評価する可能性がある。このような状況を考慮すると、 引張強度が小さい場合は、より改良体が変形しやすくなること を表現するために、改良体の粘着力を q_u の 1/4 と仮定した。

(2) 解析結果

鉛直変位でコンタリングした変形図を図-11に示す。対策 ケースでは、明らかに変形が抑制されている。対策ケースで は、1 点積分要素が原因と思われるアワグラスモードが多数 の要素で生じていることに注意が必要である。

最終鉛直変位分布の実験と解析の比較を図-12に示す。 Case 1(無対策)に関しては、FEMによってかなり良くシミュレートされている。しかしながら、対策工法の効果は多少過大評価となっており、改良体の粘着力をquの1/4としても、まだ引張強度が小さいことによる変形しやすさを表現できていない可能性がある。

鉛直変位~時間関係に関する実験と解析の比較を図-13、 図-14に示す。Case 1 については、FEM によって、かな り良くシミュレートできている。Case2 に関しては、法肩の鉛直 変位は良くシミュレートされているものの、盛土中央での鉛直









変位は過小評価している。Case3 に関しては、盛土天端中央 においては、やや過小評価であるが、法肩においてはかなり 安全側のシミュレーションとなる。

ただし、実験での滑落が最終的な盛土の変形に及ぼす影響が明らかでないため、実験におけるような不連続な変形が生じなかったと仮定した場合は、より鉛直変位が大きくなる可能性が高く、法肩での沈下も必ずしも安全側とは言えない可能性もある。

盛土中心下液状化層中心部の過剰間隙水圧の比較を図-15に示す。実験における過剰間隙水圧のピーク値は FEM よ りかなり大きいが、加振中の平均値(約10秒)は約60 kN/m² 前後である。FEM の結果は約55kN/m²のため、加振中の 過剰間隙水圧の平均値は類似している。

盛土天端中心における加速度の比較を図-16に示す。液 状化後の急激な応答加速度の低下傾向は似ているが、絶対 値に関しては、FEM がかなり過大評価している。







4. 結論

新しい格子状地盤改良工法(CGI工法)を用いた盛土の 液状化対策工法を検討するために一連の動的遠心力模型実 験を実施した。また、遠心模型実験を評価し、プログラムへの 実務への適用性を検討するために、完全二相系動的有効応 力 3D FEM を実施した。その結果次のような結論が得られた。

- TOFT 工法は、改良体数量が CGI 工法よりかなり大き いため、より良い沈下抑制効果を示す。しかしながら、 実験でも観察されたような、盛土体内部の損傷などが 起きる可能性もあり、必ずしも全体として効果が高いと は言えない。
- 2) CGI 工法においては、盛土に顕著な損傷が見られず、 均等な沈下抑制効果が見られた。また、盛土の応答加 速度は TOFT 工法よりかなり小さく、改良体非着底部 の液状化層が、免震層のような効果を発揮していると考 えられる。
- 3) FEMは、無対策のケースに関して、実験結果を比較的良くシミュレート可能であった。このことから、実務設計に適用可能である。
- FEMは対策工法の効果をやや過大評価するが、その 理由は改良体の引張強度が大きすぎるためと考えられる。

CGI工法では、格子状改良による未改良土の拘束効果を 期待することにより、従来のTOFT工法では想定できなかった 非着底、かつ間隔を拡大した格子状改良でも、必要十分な変 形抑制効果が得られることを、遠心模型実験、3D動的有効 解析 FEM によって示した。

CGI工法は、改良体による未改良土の拘束効果、また、 種々の作用による変形状況、主応力方向の考慮等により、理 想的な改良体形状、配置を設計していくものである。

例えば、CGI工法において、より沈下抑制効果を期待する には、未改良層の層厚をより小さくすることも考えられる。その 場合でも、液状化層を残すことで、ある意味免震層のような効果が得られるのも大きなメリットである。

今後は、実験、解析を通じ、種々の土構造物や、変形抑 制が求められる構造物等に対し、適用法を検討していきたい。 また、CGI工法の実用化に向けては、従来設計手法を改良 することで、拘束効果を簡易的に表現できる簡便法の開発に 取り組んでいきたい。

参考文献

- Taya Y, Uchida A, Yoshizawa M, Onimaru S, Yamashita K, Tsukuni S: Simple method for determining lattice intervals in grid-form ground improvement, Japanese Geotechnical Journal 2008 3(3), pp.203-212
- 2) Miki H, Okochi Y, Makino M: Basic study for a new design concept of ground improve method evaluating constraint effect by the stabilized bodies, Proc. of GEOTEC Hanoi 2011, Hanoi, pp.107-112
- Sreng S, Kobayashi K, Tanaka H, Okochi Y, Miki H, Makino M: Dynamic centrifuge model tests of embankment with a new liquefaction countermeasure by ground improvement considering constraint effect, Proc. of the 5th Asia Conference on Earthquake Engineering 2014, p.223
- 4) Okochi Y, Miki H, Sreng S, Kobayashi K, Makino M: Centrifugal model tests on the effect of a liquefaction countermeasure using enlarged spacing of the lattice shaped ground improvement method, Proc. of the 5th International Geotechnical Symposium-Incheon 2013, pp.521-526
- 5) Oka F, Kodaka T, Kimoto S, Kim Y-S, Yamasaki N: A multiphase coupled FE analysis using an elasto-viscoplastic model for unsaturated soil, Geomechanics II, Geotechnical Special Publication, ASCE, Proc. 2nd US-Japan workshop on Geomechanics Ambrose 2006, pp.124-131