

ジオシンセティックを用いた液状化変形抑制工法の遠心模型実験と解析

Centrifuge Model Tests and Numerical Analyses for a Deformation Control Method during Liquefaction by Utilizing Geosynthetic

大河内 保彦 (おおこうち やすひこ)
㈱NOM 代表取締役

松本 正士 (まつもと まさし)
㈱NOM

久保 幹男 (くぼ みきお)
エターナルプレザープ㈱ 代表取締役

村上 清基 (むらかみ せいき)
エターナルプレザープ㈱ 開発主席

1. はじめに

従来、液状化対策工法は、液状化が懸念される対象層の液状化を発生させないことを目的としたものがほとんどで、結果的に対策工費が非常に高額となるため、重要構造物以外への広範な適用が難しい面があった。

しかし、近年の設計コードの性能規定化もあいまって、液状化発生時にも盛土の変状を修復限界以下に抑えることで、より低廉な対策工費を実現することにより、広範に適用可能な対策工法を開発できる可能性が出てきた。

本報告は、高強度ジオシンセティックを碎石で挟み込む構造を盛土下部に構築する事により、液状化時の盛土の変形を抑制するという新しい発想の液状化対策工法に関して、遠心模型実験とUWLCを用いた動的有効応力解析を実施し、その効果を検討した。

また、設計への適用性を検討する目的で、液状化時の地盤変形を静的なFEM解析で予測するALIDと、円弧すべり法による試算を実施した。

2. 遠心模型実験

ジオシンセティックを碎石で挟み込んだ対策工の変形抑制効果を検証するため、動的な遠心模型実験を実施した。実験ケースは①無対策、②盛土と基礎地盤との境界にジオシンセティックのみを敷設、③ジオシンセティックを碎石で挟み込んだ構造の合計3ケースである。

2.1 遠心模型実験モデル

動的遠心模型実験には模型寸法で795(L)mm×350(W)mm×393(H)mmのせん断土槽を用いた。遠心加速度は50Gである。

実スケール表記の地盤モデルを図-1に示す。このケースではジオシンセティックを碎石で挟み込んでいる。

盛土の形状は高さ4m、天端幅8m、法勾配1:1.5で、豊浦砂を用いて $D_r=80\%$ に空中落下法で作製した。基礎地盤は層厚11mの液状化層を想定して7号珪砂を $D_r=50\%$ の緩詰めで作製した。液状化層の下には基礎層として $D_r=90\%$ の3号珪砂を厚さ2.5mで敷設した。

ジオシンセティック模型にはオレフィン系材料を用いた。実スケールでの引張り剛性が $EA=3000$ kN/mとなるように、相似則を考慮し1G場の引張り試験でEA

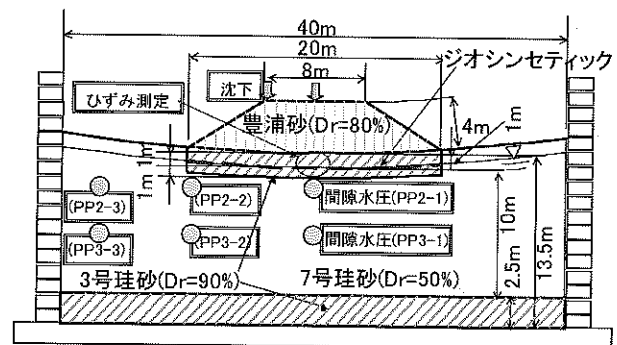


図-1 せん断土槽と模型地盤 (実スケール表記)

=60 kN/m 程度の材料を選定した。加振中および加振後の地盤の挙動を把握するため各種計測を行った。代表的な測定項目と位置を図-1に示した。

2.2 動的遠心模型実験ケース

実験ケースを表-1に示す。無対策のCase 1、盛土と基礎地盤の境界にジオシンセティックを敷設したCase 2、および、ジオシンセティックを碎石層で挟み込んだCase 3の3種類である。

加振は実換算1.2 Hzの正弦波を、漸増10波、実換算3.0 m/s²強一定で50波、漸減10波で加えた。

2.3 動的遠心模型実験結果

(1) 地盤変形

最終的な法肩沈下量を表-1に示す。無対策のCase 1が約1.2 mであるのに対し、Case 2は約1 m (87%)、Case 3は約0.8 m (66%)と対策工により沈下が抑制されている。

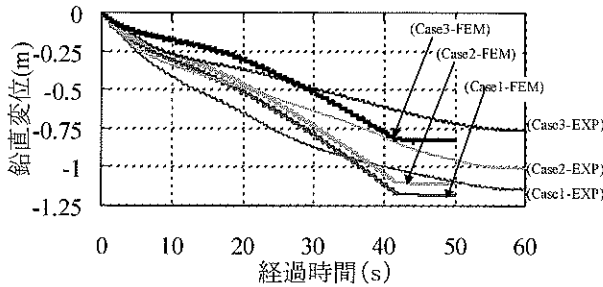
1G場に戻した後、最終的な盛土形状を測定した(図-3)。盛土底盤下部の沈下差はCase 1で80 cm、Case 2で85 cmであるのに対し、Case 3は40 cmと明確に差があり、盛土幅全体の平坦性が向上している。法尻の拡幅量も、Case 1の50 cmに対し、Case 2およびCase 3は5~15 cmと10~30%以下と小さく、法尻の水平変位も大幅に抑制される。

遠心模型実験で加えた地震エネルギーは、現実の地震よりはるかに大きいため、累積損傷理論と、神戸海洋気象台の波を入力した動的有効応力解析による沈下量比較から、神戸波の2倍程度のインパクトが加振20波程度と評価できた。このレベルで沈下量を比較すると表-1

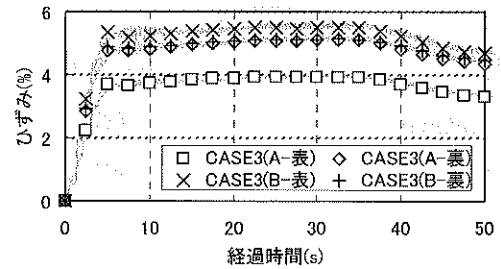
表一 実験ケースおよび結果の概要 (実スケール表記)

Case	対策	ジオシンセティック敷設位置	最終変形			加振20波 ¹⁾
			盛土中央沈下	法肩沈下	法尻拡幅 ²⁾	法肩沈下
1	無対策	—	1.13m	1.16m (100%)	0.5m (100%)	0.55m (100%)
2	盛土底部ジオシンセティック敷設	GL±0m	—	1.01m (87%)	0.05m (10%)	0.44m (80%)
3	碎石挟みジオシンセティック	GL-1m	0.82m	0.77m (66%)	0.15m (30%)	0.33m (60%)

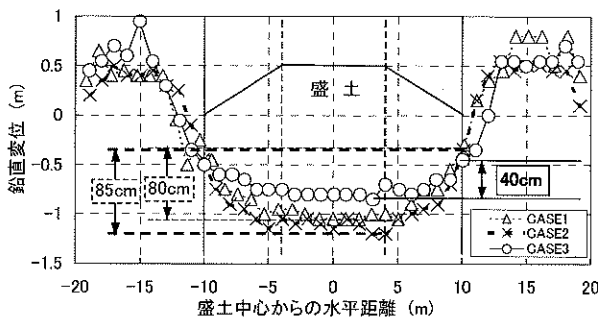
()内は無対策との割合, 1)神戸地震波の約2倍相当の加振エネルギー(累積損傷度等から安全側に評価), 2)1G場測定



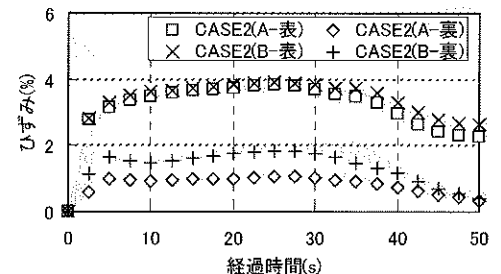
図一 各ケースの法肩沈下量と経過時間 (実スケール)



図四 Case 3 のジオシンセティックひずみと時間



図三 地表面沈下分布 (1G場の標点計測: 実スケール)



図五 Case 2 のジオシンセティックひずみと時間

に示すように, 無対策の法肩沈下 55 cm に対し, ジオシンセティックのみの Case 2 では 44 cm と無対策の 80% に, Case 3 では 33 cm と無対策の 60% まで沈下量が減少し, 沈下量の低減割合はより大きくなる。

(2) ジオシンセティックのひずみ

盛土直下中央部で測定した Case 3 のジオシンセティックのひずみを図一 4 に Case 2 を図一 5 に示す。A は通常のひずみゲージ, B は大ひずみゲージを示すが, 両者に有意な差は無い。ジオシンセティックに生じるひずみは Case 3 の約 5% に対し, Case 2 は約 2.5% と半分程度である。図一 3 の変形状から予測されるのと異なり Case 2 の方が Case 3 よりひずみが小さいのは, ジオシンセティックと盛土や基礎地盤の間の摩擦が十分でなく相対的なすべりが生じた可能性が考えられる。一方, Case 3 は碎石でジオシンセティックが挟まれているため摩擦が大きいと同時に過剰間隙水圧の消散効果があり, 補強材としての機能が液状化時にも十分発揮されていると考えられる。

3. 動的有効応力解析によるシミュレーション

3.1 UWLC による動的有効応力解析

動的遠心模型実験を実施した3ケースについて

UWLC によるシミュレーションを実施した。実験では実換算 1.2 Hz の正弦波を, 漸増10波, 実換算 3.0 m/s² 強一定で50波, 漸減10波であったが, 解析では簡略化し 3.15 m/s² の正弦波を50波底盤に入力した。

3.2 解析モデル

盛土と碎石は Mohr-Coulomb で, 液状化層である $D_r = 50\%$ の硅砂7号を PZ-Sand でモデル化した。具体的な入力パラメータは参考文献^{1),2)}に詳しい。液状化層の液状化特性は, 参考文献³⁾より, せん断応力比0.15で繰返し回数4, 0.1で繰返し回数14回と設定した。ジオシンセティックに関しては $EA = 3000 \text{ kN/m}$ とした。

3.3 解析結果

(1) 地盤変形

Case 1 の法肩沈下量と経過時間との関係を図一 2 に示す。加振波数が小さい時点では, FEM の変位が小さく危険側の結果を示すが, 最終変位量は実験結果と解析結果がよく一致することが確認された。また, 対策を施した Case 2, Case 3 ともに解析と実験の最終沈下量はおおむね一致し, 対策の効果をほぼうまく表現できている。

(2) 間隙水圧

6か所の間隙水圧測定位置に関して実験値と解析値を比較した。20波載荷時の過剰間隙水圧比分布について, 図一 6 には Case 1 の実験値, 図一 7 に解析値の分布を

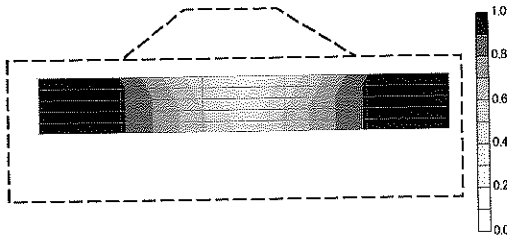


図-6 Case 1 の過剰間隙水圧比分布 (実験結果)

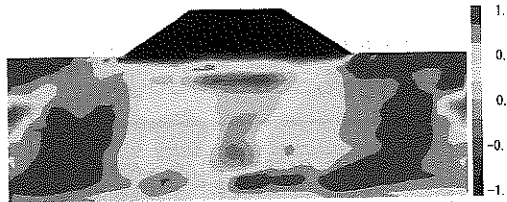


図-7 Case 1 の過剰間隙水圧比分布 (解析結果)

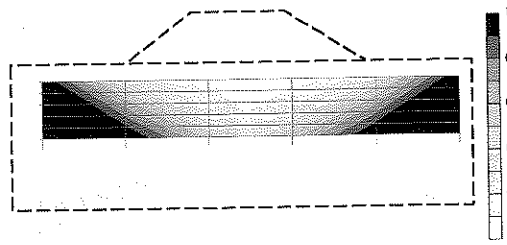


図-8 Case 3 の過剰間隙水圧比分布 (実験結果)

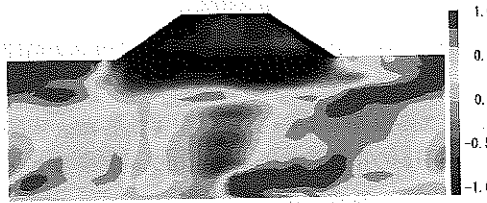


図-9 Case 3 の過剰間隙水圧比分布 (解析結果)

示す。実験は地盤全体の過剰間隙水圧比がほぼ 1 に達して完全液状化するが、盛土直下は 0.4 程度とこれより小さい。解析結果は一部に負圧が生じているが、全体的な分布形状は実験結果と類似で、全体的な過剰間隙水圧比の分布の傾向はある程度表現できている。

碎石層で挟み込んだ Case 3 の実験値を図-8 に、解析値を図-9 に示す。実験では碎石層を設置した影響により、盛土直下の過剰間隙水圧比が小さい領域が広がり液状化の発生が抑制される。解析も全体としては類似な傾向を示しており、対策工を適用した場合も過剰間隙水圧分布の傾向はある程度表現できる。

4. 動的有効応力解析 FEM 以外の方法の適用性

UWLC による検討の結果、実験の地盤変位が比較的精度良くシミュレートできることがわかった。ここでは、静的 FEM 解析 ALID を用いる方法と円弧すべり法の適用性について検討するため、試計算を行った。

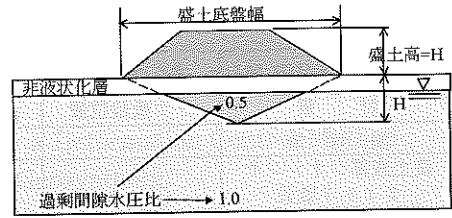


図-10 Case 1, 2 の過剰間隙水圧比分布モデル

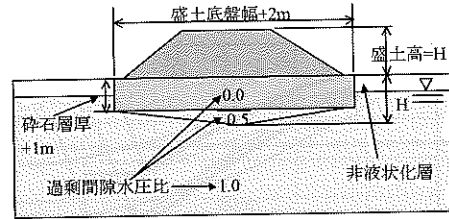


図-11 Case 3 の過剰間隙水圧比分布モデル

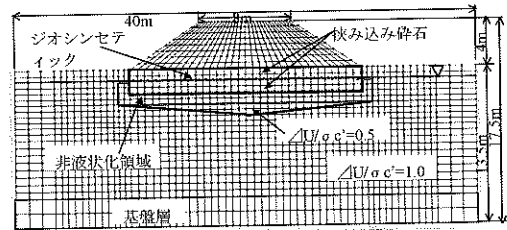


図-12 ALID 解析モデルと有限要素分割 (Case 3)

表-2 ALID に用いた主な地盤パラメータ

地盤種類	材料	γt (kN/m^3)	E (kN/m^2)	ν	C (kN/m^2)	ϕ ($^\circ$)	ψ ($^\circ$)	備考
盛土	豊浦砂	20	5,000	0.33	1 ¹⁾	30	10	弾塑性体
非液状化層	7号珪砂	18	1,000	0.33	1 ¹⁾	25	5	弾塑性体
液状化層	7号珪砂	18	1,000	0.33	-	-	-	弾性体
基礎層	3号珪砂	19.6	5.0×10^6	0.33	-	-	-	弾塑性体
挟み込み砕石層	3号珪砂	19.6	500,000	0.33	1 ¹⁾	35	15	弾塑性体

1)弾塑性計算を安定させるためわずかなcを見込む

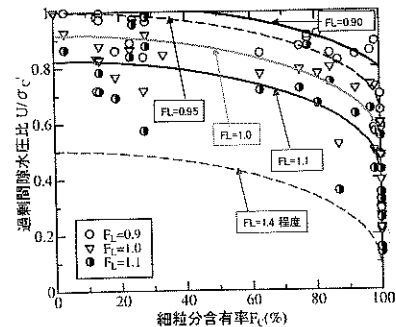


図-13 F_L と過剰間隙水圧比の関係 (文献 4) に加筆

4.1 ALID を用いた試計算

ALID を適用する場合は、基礎地盤の液状化の程度が地盤変形量に大きな影響を与えるため、過剰間隙水圧分布の発生状況の設定が極めて重要となる。ここでは、実験および UWCL の解析結果から、Case 1, 2 は図-10、Case 3 は図-11の過剰間隙水圧比分布を仮定した。

ALID の解析モデルおよび有限要素分割図を図-12 に示し、主要な入力パラメータを表-2 に示す。また、過

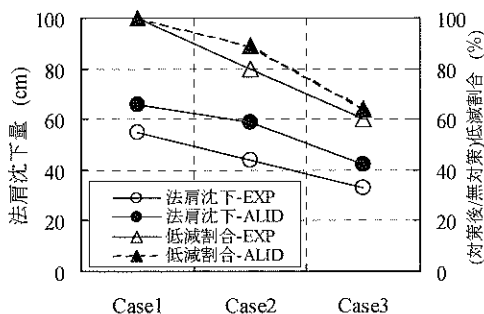


図-14 各ケースの法肩沈下量と沈下低減割合

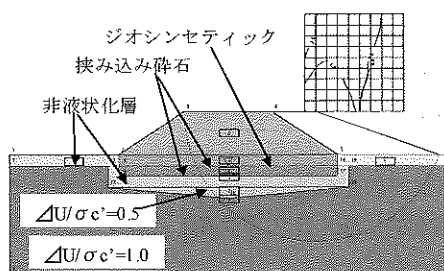


図-15 円弧すべり検討モデルと結果の一例 (Case 3)

表-3 円弧すべり計算に用いた入力パラメータ

地盤	γt (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	備考
液状化層 ($\Delta U/\sigma'_c=1.0$)	18	0	0	強度ゼロ
液状化層 ($\Delta U/\sigma'_c=0.5$)	18	0	12.5	強度半分
非液状化層	18	0	25	
盛土	20	0	30	
砕石	19.6	0	35	

剩間隙水圧比と液状化抵抗率 F_L 強度比の関係 (図-13)⁴⁾から、過剰間隙水圧比1.0は $F_L=0.95$, 0.5は $F_L=1.4$ と仮定した。

各ケースの法肩沈下量を図-14に示すが実験結果より全体的にやや大きめの沈下量となっている。同図には無対策のCase 1に対する沈下量の低減割合も併せて示す。

ALIDによる計算値は実験値とほぼ同じレベルで若干安全側に評価しており、無対策時の変形量を適切に予測することができれば、変形抑制効果のある程度適切に表現できそうである。過剰間隙水圧分布を適正に評価する事により、ALIDに基づく検討が可能と考えられる。

4.2 円弧すべり法を用いた試算

大規模な液状化が生じる際に有効応力法の円弧すべり安全率はきわめて小さくなることが知られている。ここでは、計算で求められる最小安全率と沈下量の相関性を検討した。円弧すべりモデルを図-15に示し、地盤パラメータを表-3に示す。ジオシンセティックを安定対策に用いた場合、計算上引張り強度を設定するが、今回は遠心模型実験に用いたジオシンセティックのひずみと引張り力の関係 (図-16) と、図-4、5で確認したひずみからCase 3では100 kN/m, Case 2では60 kN/mを

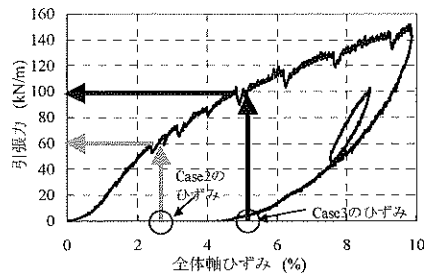


図-16 すべり検討に用いたジオシンセティック引張り力

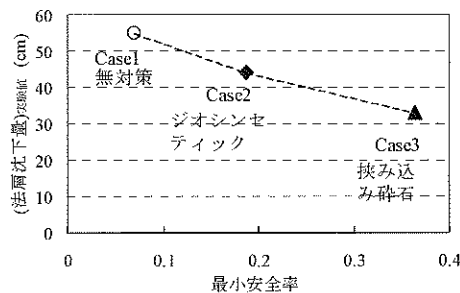


図-17 最小安全率と沈下量の関係

計算に用いた。

最小安全率と遠心実験の加振20波の法肩沈下量との関係を図-17に示す。

安定問題の基準値 $F_s=1.0$ をはるかに下回る小さな値ではあるが、最小安全率と沈下量とは相関が認められる。

これより、円弧すべり安全率を指標に盛土の沈下量の抑制効果を予測する手法の可能性がうかがわれる。

5. おわりに

遠心模型実験とUWLCにより、砕石でジオシンセティックを挟み込んだ構造による液状化時の盛土の変形抑制効果が確認できた。また、過剰間隙水圧の発生状況を適切に評価する事により、ALIDや円弧すべりによる変形抑制効果を表現できる可能性が確認された。今後、この工法の実用的な設計法の構築を目指し、砕石層厚やジオシンセティックの剛性などの設計諸元が変形抑制効果に与える影響等、種々の検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 松本・久保・村上・大河内: UWLCによるジオシンセティックを用いた液状化変形抑制工法遠心模型実験の解析, 土木学会65回年次学術講演概要集, 投稿中, 2010.
- 2) 村上・久保・松本・大河内: ジオシンセティックと砕石を用いた対策工法の液状化時における盛土変形抑制効果, 国際ジオシンセティック学会, 第25回ジオシンセティックシンポジウム, 投稿中, 2010.
- 3) 岡 克彦: 振動台実験による砂の液状化強度特性, 大阪市立大学地盤研究室卒業論文, 2003.
- 4) ALID研究会: 2次元液状化流動解析プログラムALID (Win) マニュアル解説書 (改定第四版), 2007.

(原稿受理 2010.7.30)