

液状化地盤上の盛土の沈下抑制を目的とした 対策工の効果に関する実験的検討

富永真生¹・澤田 亮²

¹ジェイアール九州コンサルタンツ 技術本部設計2部
(元 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部研究員)
(〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東1-13-6)

E-mail:tominaga@jrqc.co.jp

²鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部主任研究員
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:sawada@rtri.or.jp

液状化による盛土被害の大部分は、盛土の支持地盤が液状化することによる盛土全体の沈下に代表される。既存の対策工では液状化地盤に対して広範囲で大規模な対策が必要であり、供用後の鉄道盛土に対する適用は困難な場合が多い。本研究では既存の対策工に比べて鉄道近接条件における施工性、対策範囲の自由度などで有利な薬液注入工法による対策を中心に、小規模で効果的な対策工を検討することを目的としてせん断土槽を用いた模型振動実験を実施し、液状化程度の指標として盛土支持地盤のせん断剛性の低下に着目した沈下抑制効果の評価を試みた。

Key Words : liquefaction, embankment, countermeasure

1. はじめに

液状化地盤上の盛土の被害は、盛土を支持する地盤が液状化し沈下・流動することによる盛土全体の沈下に代表される。鉄道盛土に対して液状化対策工を検討する上では、列車走行性の観点から盛土の沈下量を抑制することが重要である。本検討では、鉄道に近接した条件での施工性、対策範囲の自由度などで比較的有利とされる薬液注入工法を中心に、せん断土槽を用いた1G場における模型振動実験から沈下抑制効果についての検討を行った¹⁾²⁾³⁾。

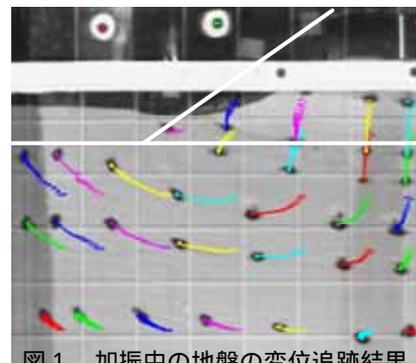


図1 加振中の地盤の変位追跡結果
(対策工なし)¹⁾

2. 対策工の検討

図1は液状化地盤上に盛土を構築し、加振した直後の模型の状況である。写真中には加振前の盛土の形状及び支持地盤中に設置した標点(色砂)の軌跡を示している。この軌跡から盛土直下では鉛直下向き、法尻付近では水平方向への移動量が大きいがわかる。また、比較的 support 地盤の浅い所が大きく流動しているため、盛土体自身も大きく変形しており底面付近が左右に大きく広がっている。このことから盛土下部及び法尻付近の比較的浅い範囲に剛性の大きい改良域を設けることにより地盤の変形を抑

制できる可能性があることが示唆された。そこで、前述したように対策範囲で自由度の高い薬液注入工による対策工を中心に沈下抑制効果を指標とした検討を行った。

図2に対策工の概要を示す。改良範囲は、無対策実験の様子から流動量が大きいと予測される盛土直下及びのり尻の比較的浅い範囲に設定した。地盤の流動を抑える効果及び液状化地盤を拘束する効果によりせん断ひずみを低減し、液状化程度を抑える効果を期待するものである。対策ケース1は盛土と支持地盤の境界を盛土全幅にわたって改良するケース、対策ケース2は鉄道への影響が大きい盛土中心部を

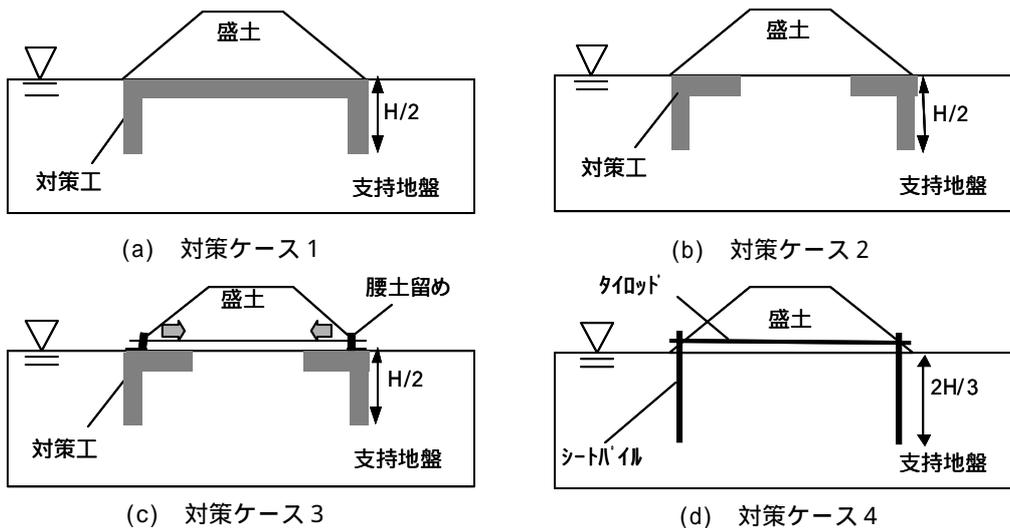


図2 対策工の模式図

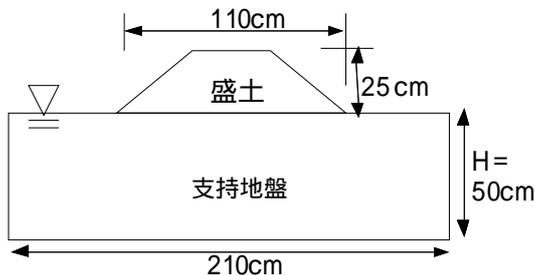


図3 実験模型の模式図

表1 地盤条件

	盛土	支持地盤
使用砂	珪砂6号(最上珪砂) ($s=2.652, e_{max}=0.903, e_{min}=0.582$)	
相対密度 D_r (%)	80	60
含水比 w (%)	10	(飽和)

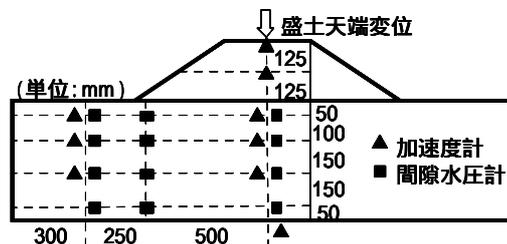


図4 計測機器の配置状況

表2 加振条件

振動波形: 正弦波	
最大加速度(gal)	400
周波数(Hz)	3
波数	20
サンプリング周波数(Hz)	500

改良しないケースとした。また、対策ケース3は法尻に既設の土留め壁（腰土留め）を想定したものであり、両側の土留め壁同士をタイロッドで結ぶことにより法尻が外側へ流動するのを止める効果を期待して補助的に併用したものである。タイロッドとして細径のワイヤーを用い、受働土圧を超えない範囲で加振前にプレストレスを作用させた。改良範囲は対策ケース2と同じである。また、対策ケース4は既往の対策工である鋼矢板締切工法を想定したものである。本検討においてはシートパイルを非液化化層に根入れさせない設定とした。液化化地盤への根入れ長は側方流動量が最も大きくなる液化化層厚の1/2付近より深くなるように地表面からの根入れは液化化層厚の2/3までとした。

3. 実験概要

(1) 実験模型の概要

実験模型の概要を図3に示す。実験は、鋼製のせん断土槽（長さ：2.1m、幅1.1m、高さ1.4m）を用い

て実施した。模型地盤は、盛土と液化化層からなる支持地盤で構成した。模型のスケールは実際の鉄道盛土の約1/30である。模型地盤の材料物性を表1に示す。盛土及び支持地盤は、珪砂6号を用い、相対密度がそれぞれ80%及び60%となるように空中落下法により作成した。また、支持地盤は砂の間に二酸化炭素を充填させた後、地盤底面より水を注入して飽和させた。盛土は、含水比10%になるよう調整し、盛土と支持地盤の境界にはモビロンフィルムを配置して、支持地盤からの水の流入を遮断した。

薬液注入改良域は実際の改良地盤と液化化地盤との剛性比及び相似則を考慮した模型の改良体で模擬することとし、ここでは適切な剛性及び強度を持つポリマー材を用いた。また、シートパイルは模型地盤との剛性比が合うように設定した薄厚のアルミ板を用い、盛土左右のシートパイルの上端同士をワイヤーで結んだ。

(2) 計測および加振条件

図4に示すように地盤の各部に加速度計、間隙水圧計、変位計を設置し、加振中の動的応答値を測定

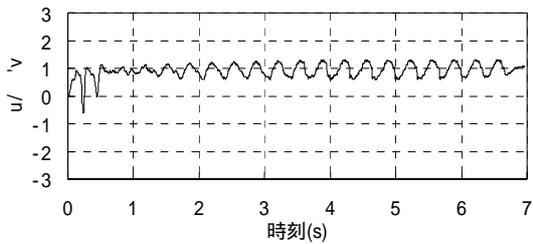


図5 盛土外側の地盤における過剰間隙水圧比 (対策ケース3)

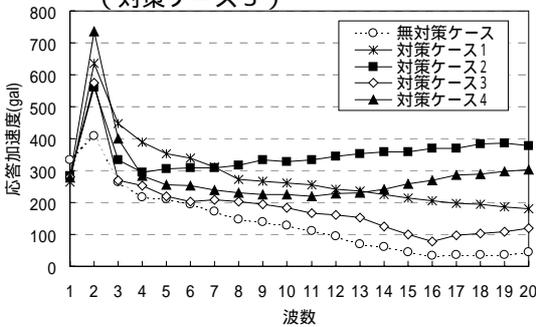


図6 盛土天端における応答加速度

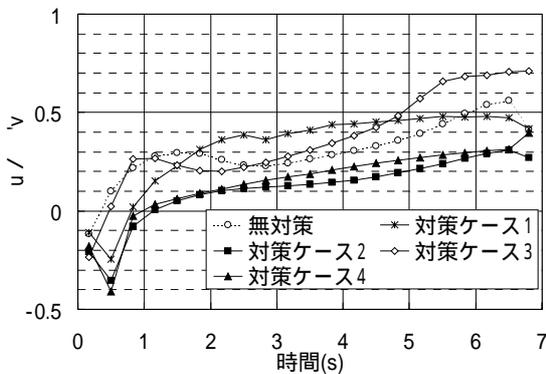


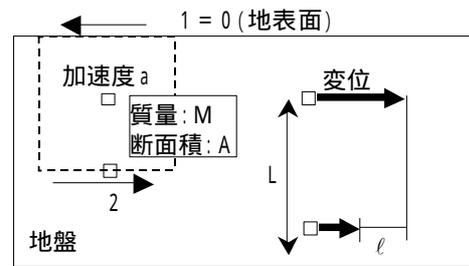
図7 盛土直下における過剰間隙水圧比の推移

した。実験に用いたせん断土槽は、前面に透明な強化ガラスを設置することにより、加振中の地盤の動きを観察することができる。盛土及び支持地盤にはガラス面側に色砂を配置し、色砂の移動を高速度カメラにより測定した(図3を参照)。加振条件を表2に示す。加振は300gal, 4Hz, 20波の正弦波で実施した。本実験では、確実に支持地盤を液状化させることに主眼をおき、十分なせん断ひずみが生じる条件で加振した。

4. 実験結果

(1) 盛土の応答と地盤の過剰間隙水圧

図5及び図6に加振中における盛土直下及び盛土外側の地盤の過剰間隙水圧比の推移を示す。また、盛土の応答加速度を図7に示す。図5より盛土外側の支持地盤は過剰間隙水圧比がほぼ1に達し、加振後すぐに液状化していることがわかる。他のケースでも同様なデータが得られた。しかし、これらのデータからは明確な対策効果を判断することが困難であった。この理由として、模型実験の再現性が考えられる。地盤を空中落下法で作成しているため、飽



$$1 \cdot A - 2 \cdot A = M a = \ell / L$$

図8 加速度データを使った、の算出法

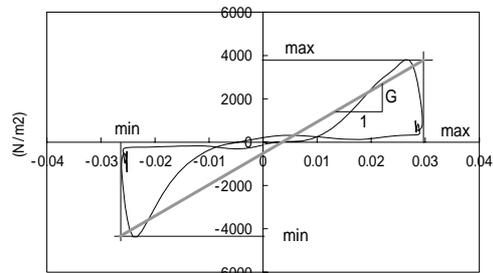


図9 せん断剛性の定義

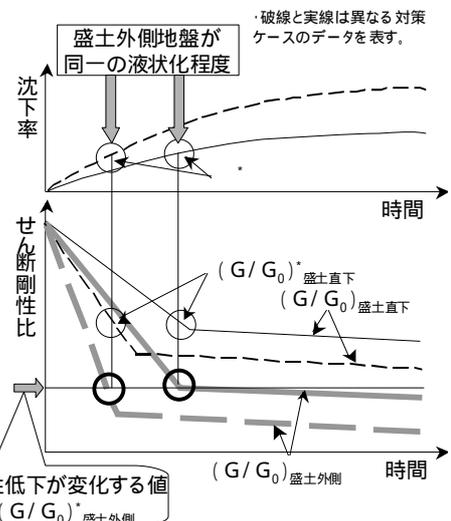


図10 対策工の沈下抑制効果の評価手法の概念図

和度に各ケース間でばらつきがある。そのため地盤の液状化程度が異なることが推測された。そこで液状化程度の指標として支持地盤のせん断剛性に着目し、液状化程度が同一の条件において対策工の沈下抑制効果を比較した。

(2) せん断剛性による評価

模型地盤のせん断剛性は加速度計データを用いて図8に示す想定土塊の運動方程式を使って求めた。せん断応力とせん断ひずみ()は加速度を2回積分して変位を求め、加速度計間の距離で除して求めた。またせん断剛性Gは図9に示すように1つのループにおける及びのそれぞれの最大値、最小値を結んだ線の勾配とした。また次のループにおけるシフト量を考慮して、 γ_{max} 及び γ_{min} は次のループの値との平均値を用いた。

対策効果の評価方法は盛土外側と盛土直下地盤では有効上載圧の違いにより液状化程度が異なる。そ

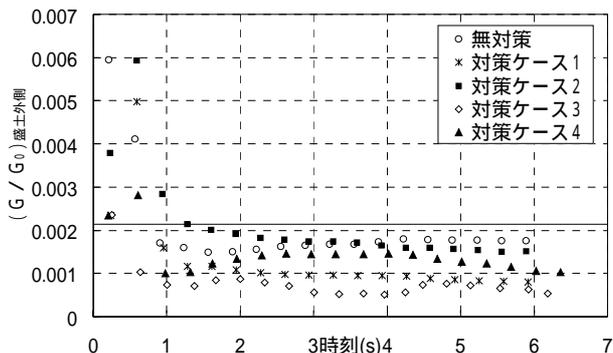


図 1.1 盛土外側地盤のせん断剛性比の推移

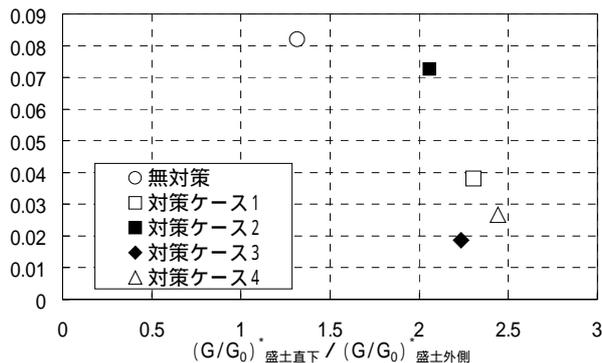


図 1.2 対策工の沈下抑制効果

ここで、図 1.0 に示すように盛土外側の地盤のせん断剛性が同程度に低下したら同じ液状化程度となったと考え、その時点での盛土の沈下率で比較した。図 1.1 は盛土外側地盤のせん断剛性比 (G/G_0) の 1 波毎の推移である。ここで初期せん断剛性 (G_0) は文献⁴⁾を基に推定した。初期せん断剛性 (G_0) はひずみレベルが $10^{-4}\%$ のオーダーであるのに対し、加振中の模型地盤のせん断ひずみは数%に及び、剛性比のオーダーはかなり小さい。図 1.1 によると盛土外側においては全ケースで加振開始直後に剛性比は急速に低下し、2 ~ 4 波程度で低下が収まり時間変化がなくなる。これは盛土外側の過剰間隙水圧比の変化と整合し、加振後早い段階で完全液状化の状態になっていることを示している。図 1.2 に盛土外側地盤と盛土直下地盤の同じ時刻におけるせん断剛性の比率 $((G/G_0)_{盛土直下} / (G/G_0)_{盛土外側})$ と、盛土の沈下率 ($* = \text{沈下量} / \text{盛土高さ}$) の関係を示す。これによれば盛土直下のせん断剛性は外側に

比べて 1.5~2.5 倍程度大きいことがわかる。全てのケースで無対策に比べて盛土直下地盤の剛性が大きくなっており対策工による拘束効果が発揮されていると考えられる。各ケースの比較によれば、薬液注入工に腰土留めを併用した対策ケース 3 がもっとも沈下が少なくなっている。薬液注入の形状が同一の対策ケース 2 と比べると沈下が抑えられており、腰土留めの利用による盛土の側方拘束が、盛土自体の沈下を軽減する要因となったと考えられる。また、全幅改良の対策ケース 1 及びシートパイルの対策ケース 4 では支持地盤が拘束効果されることによって盛土直下地盤のせん断剛性は比較的保たれているものの、沈下抑制効果はケース 3 と同等か若干劣る結果となった。

5. まとめ

液状化地盤上の盛土に関して支持地盤のせん断剛性を指標とした評価手法を用いて対策効果の検証を行った。その結果、異なる地盤条件においても相対的に対策効果の比較が行えた。今後は盛土の液状化対策の設計において支持地盤の液状化程度と盛土の要求性能に応じた対策工の選定が行えるようにしていきたい。

<謝辞>

本研究は、国土交通省からの補助金を受けて得られた研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 金口, 弥勒, 大木, 澤田: 過剰間隙水圧の上昇に伴う盛土の挙動に関する実験的検討, 土木学会地震工学シンポジウム, 2003.12
- 2) 金口, 弥勒, 大木, 澤田: 液状化時における盛土の沈下対策効果に関する実験的検討, 第39回地盤工学研究発表会, 2004.7
- 3) 富永, 渡辺, 澤田: 盛土を対象とした液状化対策工の沈下抑制効果に関する検討, 第40回地盤工学研究発表会, 2005.7 (投稿中)
- 4) 清田, 萩原, 田村: 珪砂 6 号の動的変形特性に関する研究 ~ その 2 上載応力と相対密度の影響 ~, 第31回地盤工学研究発表会, 1996.7

(2005. 6. 16 受付)

EXPERIMENTAL STUDIES OF LIQUEFACTION-INDUCED SUBSIDIENCE OF EMBANKMENT BY GROUTING METHOD

Masao TOMINAGA, Ryo SAWADA

A damage of embankment due to liquefaction represents its settlement on the liquefied ground. From the point of view of the safety railway service, it is important for selecting a countermeasure against liquefaction to evaluate the ground deformation during and after liquefaction. To have a better insight into the function of a rational countermeasure against liquefaction, a series of shaking table tests was performed. The research reported here focuses specifically on the evaluation of relationships between the settlement of embankment and the degree of liquefaction.