

サンプリング試料を用いた脈状地盤改良工法の効果確認

(公財) 鉄道総合技術研究所
西日本旅客鉄道 (株)

正会員 ○井澤 淳、小島謙一
正会員 速見 直紀、前田 友章
非会員 半井 恵介
正会員 中谷 紘也

ジェイアール西日本コンサルタンツ (株)

1. はじめに

筆者らは、線路直下の道路ボックスカルバートの浮き上がり対策として脈状地盤改良工法¹⁾を適用する地点において、試験施工と各種の地盤調査を実施し、液状化対策効果の確認を行っている²⁾。脈状地盤改良工法に限らず、各種の密実化工法では、土の密実化による改良効果を期待しているが、実際には拘束圧の増加 (K_0 の増加) にも起因しており、その効果の方が大きいという報告もある³⁾。今回の試験施工においても、 N 値の増加に対して、密度増加の影響が支配的な層と拘束圧の増加の影響が支配的な層の2つの層が確認できた。このうち、拘束圧増加の影響について、同箇所でのサンプリング試料を用いて検討したので報告する。

2. 調査結果概要

当該地点での調査結果の例を図1に示す。改良範囲のうち、12~18m 付近の礫混じり砂層と砂層の換算 N 値および V_s を見ると、改良効果に多少の差はあるものの全体として同等の増加傾向が見られている。一方、密度検層結果に着目すると、砂層の増加に比べて、礫混じり砂層の増加が小さいことが分かる。逆に、孔内水平載荷試験 (LLT 試験) から得られた K_0 に着目すると、13.5m 付近の礫混じり砂層の K_0 は改良前 0.33 から改良後 0.81 まで増加しているのに対して、17.5m 付近の砂層の K_0 は改良前 0.10、改良後 0.13 となっており、ほとんど増加していない。今回はセルフボーリングタイプの孔内水平載荷試験を実施していないため、 K_0 値の計測精度は高くないが、拘束圧増加の傾向は把握できていると考えられる。今回、LLT 試験を実施した深度でトリプルチューブによる試料採取を実施できたため、改良前後の応力状態を再現した液状化試験を実施し、密実化工法における拘束圧増加による改良効果について検討した。

3. 液状化試験概要

今回の地盤調査で見られたような地盤内の拘束圧と密度の変化を、 e - $\log \sigma'_v$ 関係を用いて模式的に図2に示す。13.5m 付近の地盤は間隙比の減少が小さい分だけ拘束圧が大きく発生し、17.5m 付近はその逆の関係にあったと考えられる。また、改良後は応力緩和により拘束圧が改良直後よりも低下する可能性があり、密実化による対策を恒久対策とする場合は、このような応力緩和に配慮する必要がある。これについては、豊田ら⁴⁾の指摘するように改良直後の拘束圧の状態から初期状態まで除荷した状態で液状化試験を実施することで、安全側の判定が可能となる。このとき期待できる改良効果としては、初期状態に戻した時点で残存している密度増加の効果と過圧密の効果になる。今回、拘束圧の増加が顕著であった 13.5m 付近の礫混じり砂層の採取試料を用い、現場の状況を再現した液状化試験を中空ねじり試験装置を用いて実施した。なお、採取した試料に密

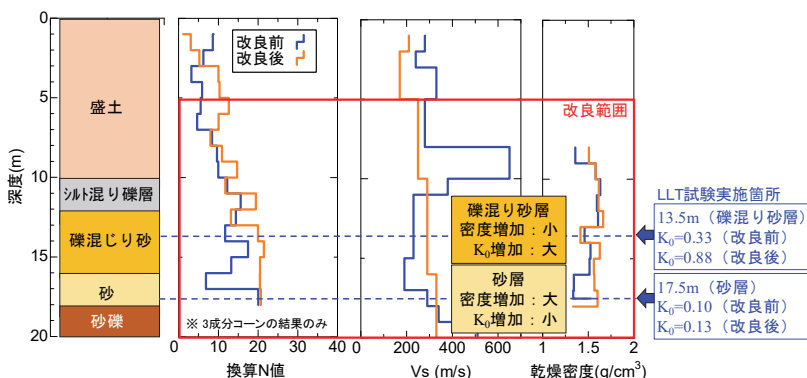


図1 改良前後の各種地盤調査結果

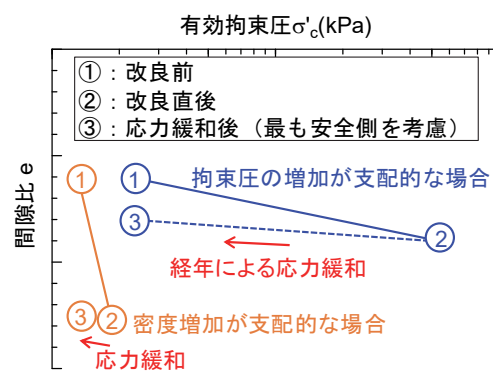


図2 改良前後の地盤の応力状態

キーワード 液状化、地盤改良、液状化試験

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 地震動力学 TEL042-573-7394

度のばらつきが見られたため、安全側に配慮して密度の低い部分を使用した。与えた応力履歴を以下に示す。

ケース 1 改良前想定： $\sigma'_v=175\text{kPa}$, $K_0=0.33$ で圧密後、液状化試験を実施

ケース 2 改良後想定： $\sigma'_v=175\text{kPa}$, $K_0=0.33$, $K_0=0.81$ の 2 段階圧密後、 $K_0=0.33$ に戻して液状化試験を実施
当初、すべての試験を改良前の試料を用いて実施することを想定していたが、必要量が確保できなかったため、改良後を想定した試験（ケース 2）では

現場で改良した後に採取した試料を用い、ケース 1, 2 で 3 供試体ずつ実施した。なお、各圧密終了後の段階で供試体の微小繰り返しによる初期せん断弾性波速度 V_s についても計測した。

4. 液状化試験結果

液状化試験実施前までの各ケースの密度等の条件を表 1 に、 $e\text{-}\log\sigma'_c$ 関係および $V_s\text{-}\log\sigma'_c$ 関係を図 3, 4 にそれぞれ示す。試料ごとにばらつきはあるものの

表 1 圧密前後の供試体密度等

供試体 No.	K_0	有効拘束圧 $\sigma'_c(\text{kPa})$	OCR	乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$	間隙比 e	V_s (m/s)	R (τ_d/σ'_c)	N_c
ケース 1 改良前	① 0.33	96.8	1.00	1.358	0.936	135.1	0.281	79.1
	② 0.33	96.8	1.00	1.273	1.065	126.4	0.386	12.3
	③ 0.33	96.8	1.00	1.291	1.036	130.8	0.340	38.4
	0.33	96.8	1.00	1.254	1.053	130.9		
	① 0.81	152.0	1.00	1.267	1.032	143.6	0.371	35.4
	0.33	96.8	1.58	1.266	1.034	133.0		
ケース 2 改良後	0.33	96.8	1.00	1.297	0.985	129.0		
	② 0.81	152.0	1.00	1.307	0.970	145.8	0.434	15.9
	0.33	96.8	1.58	1.305	0.973	133.3		
	0.33	96.8	1.00	1.311	0.964	130.1		
	③ 0.81	152.0	1.00	1.322	0.948	152.0	0.309	109.4
	0.33	96.8	1.58	1.319	0.952	137.1		

※ 上載圧 $\sigma'_v=175\text{kPa}$, 平均有効応力 $\sigma'_c=(1+2K_0)/3\sigma'_v$

※ N_c : 両振幅軸ひずみ 7.5%到達時の繰り返し回数

圧密による間隙比の減少、応力緩和によるリバウンドが多少確認できる。 V_s については圧密により凡そ 130m/s から 145m/s 程度の増加（1 割程度）が見られるが、除荷後はほぼ初期と同等の値に戻っている。なお、図 1 に示した PS 検層による V_s (230m/s 程度) と比較すると半分程度の値になっている。これは採取時の乱れの影響と、密度の低い部分を選定して使用したことが主な原因と考えられる。液状化試験の結果得られた $R\sim N_c$ 関係を図 5 に示す。20 回繰り返しの液状化強度比 R_{20} ($DA=7.5\%$) で比較すると、改良前 0.363 から改良後 0.415 まで増加しており、拘束圧の増加がすべて緩和された状態、すなわち最も安全側に考慮した場合でも 1.15 倍程度の改良効果を確認した。なお、本地点での液状化判定の結果、改良後には浮き上がりの影響を無視できるレベルまで改良が実施できていることを確認できている。

4. まとめ

本稿では、地盤の密実化による液状化対策における拘束圧の増加と応力緩和の影響について、サンプリング試料を用いた液状化試験を実施して検討した。その結果、すべての拘束圧増加を緩和させ、安全側に配慮した場合でも改良効果が得られた。限られた予算内での適用地盤調査手法の選定、試験数の関係で十分な評価を実施するには至っていないが、今後、同様の手法を様々な現場で適用しながら、適用する地盤調査手法の選定も併せて検討し、密実化工法の効率的な評価方法を検討していきたい。
参考文献 1)井澤ら：脈状割裂注入による効率的な液状化対策工法の開発，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.75, No. 4, pp. 454-468 2)速見ら：脈状地盤改良工法適用箇所の試験施工と品質確認試験，第 75 回年次学術講演会，2020. 3) Nishimura et al.,:Experimental Study of Stress Changes due to Compaction Grouting, , Soils and Foundation, Vol. 51, No. 6, pp. 1037-1049, 2011. 4)豊田ら，室内要素試験による既存の液状化被害調査結果の解釈，日本獅子工学論文集，第 15 巻，第 7 号，pp. 114-120, 2015.

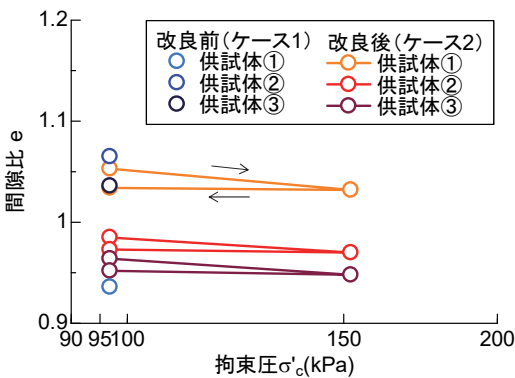


図 3 $e\text{-}\log\sigma'_c$ 関係

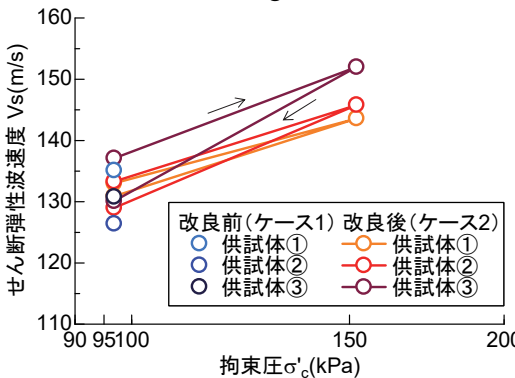


図 4 $V_s\text{-}\log\sigma'_c$ 関係

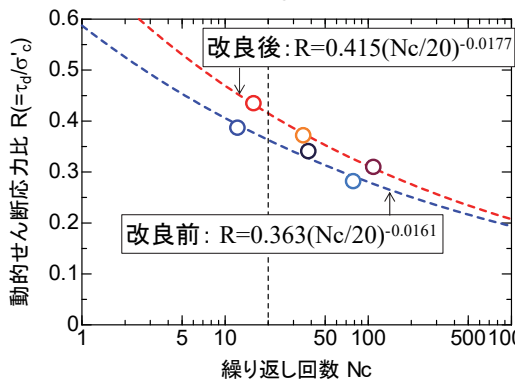


図 5 $R\text{-}N_c$ 関係