

脈状地盤改良による液状化対策工法の提案

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○井澤 淳, 上田恭平, 小島謙一, 舘山 勝
 ライト工業(株) 正会員 大西高明, 林田 晃, 入山 修
 東日本旅客鉄道(株) 正会員 藤原寅士良

1. はじめに

従来採用されている液状化対策工法は、液状化の発生を完全に防止することを前提とした高コストの工法が一般的であり、限られた予算内で広範囲を対象とした対策を実施することが困難である。本稿では、図1に示すように動的に薬液注入を行うことで地盤内に脈状の改良体を作成し、周辺地盤の密実化による液状化抵抗の増大を期待した低改良率で効率的な脈状地盤改良工法を提案する。

2. 動的注入による脈状地盤改良工法

脈状地盤改良では、懸濁系の非浸透薬液（高炉スラグ+ケイ酸塩系）を使用し、地盤への割裂注入が主体の注入を行う。ここで、注入速度一定の静的注入工法で割裂注入を行う場合、図2(a)に示

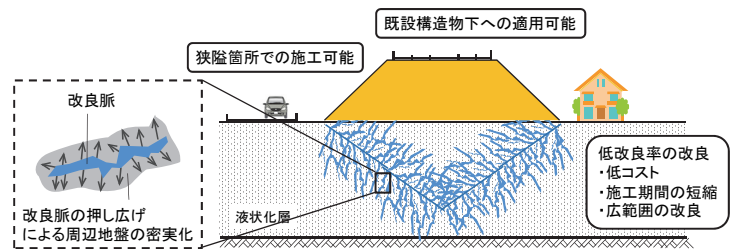
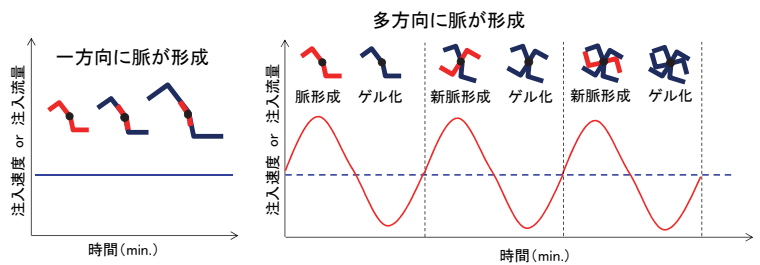


図1 狭隘な既設鉄道構造物下の脈状注入工法のイメージ



(a) 注入速度一定 (b) 動的注入
 図2 動的注入による脈の作成イメージ

すように地盤の弱部に薬液が集中的に注入される。長結薬液を用いた場合は、割裂脈は1～2方向にしかできず、薬液到達範囲も制御することが困難である。また、瞬結薬液を用いた場合は、注入孔周囲に薬液が集中し、注入圧力が異常高圧となったり、注入管周囲地盤の変位が著しく大きくなるといった弊害が起りやすい。一方、注入圧力の振幅や周期、注入速度、注入薬液のゲルタイム最適値に設定して動的注入を行うことにより、図2(b)に示すように割裂脈形成→薬液固結→新たな割裂脈形成→固結というプロセスを繰り返し、割裂脈を多方向へ形成することができ、薬液到達範囲の限定も可能となる。ここで、割裂脈を多方向に形成させるためには、注入薬液の性状が非常に重要となる。薬液のゲルタイムは、脈形成→ゲル化を逐次実現させるために、振幅周期と同等もしくは短い時間でゲル化することが望ましい。また、ゲル化前の薬液は、低粘性であるほうが抵抗は小さくなり、より低い注入圧力で脈状改良体の効率的な形成が可能となる。

本工法は、浸透系薬液注入工法や高圧噴射攪拌工法のような完全に液状化を防止することは期待せず、低改良率（およそ10%程度）の注入率で対象領域を改良することで周辺地盤よりも液状化の被害を低減させることを目的とするため、コストの削減や施工期間の短出が期待できる。一方で、小型施工機械を用いるため狭隘地や軟弱地盤での施工が容易であること、注入圧力を抑えることが可能であるため注入による周辺地盤の変位を抑制出来ること、改良体を脈状に配置されるため地下水阻害の影響が小さいなどの利点を有している。図3および4に土槽ピットを用いた注入試験時¹⁾の掘り起し状況とミニラムサウンディング結果をそれぞれ示すが、脈状の改良体が作成出来ており、密実化に起因すると考えられる N_d 値の増加も確認出来ている。

3. 密実化および液状化対策効果の評価手法

地盤の密実化による液状化対策効果を期待する工法としてすでに実績のある「液状化対策としての静的圧入締固め工法技術マニュアル」²⁾に示されている手法を参考に、液状化対策効果の評価手法および注入率の算定手法を検討した。脈状改良体を注入により、改良体の体積分だけ地盤が密実化すると考え、注入率 A_s （対象改良域体積に対する注入量の割合）を以下の手順で算定する。

① 細粒分含有率 F_c を用いて、式(1)より e_{max} 、 e_{min} を求める

キーワード 動的注入、締固め、液状化対策

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 Tel: 042-573-7266

$$e_{\max} = 0.02F_c + 1.0 \quad e_{\max} = 0.008F_c + 0.6 \quad (1)$$

② 改良前の N 値: N_0 より、改良前の間隙比 e_0 を求める。

$$e_0 = e_{\max} - 0.21(e_{\max} - e_{\min}) \sqrt{\frac{98N_0}{69 + \sigma'_v}} \quad (2)$$

③ 鉄道構造物等設計標準 耐震設計³⁾にしたがって液状化判定を実施し、要求性能を満たす液状化対策に必要な改良後の N 値: N_1 を設定する。

④ 細粒分による増加 N 値の低減率 β ($=1.05-0.51\log F_c$) を考慮して、目標 N 値: N'_1 を設定する。

$$N'_1 = N_0 + \frac{N_1 - N_0}{\beta} \quad (3)$$

⑤ N'_1 に対応する目標間隙比 e'_1 を式(4)より求める。

$$e'_1 = e_{\max} - 0.21(e_{\max} - e_{\min}) \sqrt{\frac{98N'_1}{69 + \sigma'_v}} \quad (4)$$

⑥ 目標注入率 A_s を式(5)より求める。

$$A_s = \frac{e'_1 - e_0}{1 + e_0} \quad (5)$$

本手法の妥当性を確認するため、図4に示したミニラムサウンディング結果を用いて検討した。ここでは、上記の注入率の設定とは逆に、計測した N_d 値からとした場合の改良後の間隙比 e_1 および N_{d1} 値を式(6)および(7)から算定した。なお、実測値との比較となるため、低減率 β については考慮しない。

$$e_1 = e_0 - A_s(1 + e_0) \quad (6)$$

$$N_{d1} = \frac{69 + \sigma'_v}{98} \left\{ \frac{e_{\max} - e_1}{0.21(e_{\max} - e_{\min})} \right\}^2 \quad (7)$$

土槽ピット試験に用いた鬼怒川砂は $G_s=2.698$ 、 $F_c=6.4\%$ 、 $D_{50}=0.775\text{mm}$ 、 $U_c=8.4$ 、 $U'_c=1.02$ で、式(1)より $e_{\max}=1.128$ 、 $e_{\min}=0.651$ と算定される。また、単位体積重量は地盤作成時の充填率より地下水以浅 $\gamma_t=15.5\text{kN/m}^3$ 、地下水以深 $\gamma_{\text{sat}}=19.6\text{kN/m}^3$ として設定した。表1に改良前・後の N_d 値から逆算した間隙比および実質注入率を示すが、平均的には

5%前後の実質注入率となった。目標注入率は10%であり、注入試験では所定量を注入出来ているが、密実化効果が改良対象外にも伝播することを考慮すると当然改良効果は低下する。その結果として、目標注入率10%に対して5%程度の改良が実施されていたと考えることができる。別途、密度検層等を用いた改良地盤の品質確認手法の検討⁴⁾をしており、それらの結果も用いて本手法の適用性をさらに確認していく予定である。

4. まとめ

本稿では、動的注入により地盤内に脈状の改良体を作成し、低改良率で液状化被害の軽減が可能な脈状地盤改良工法を提案し、その液状化対策効果の評価手法について検討を行った。土槽ピット試験により、脈状改良脈が作成出来ること、 N_d 値が増加すること、評価手法により注入率を算定出来ること等を確認した。

謝辞：本研究は「国土交通省平成26年度交通運輸技術開発推進制度」の助成を受けて実施致しました。

参考文献：1)大西ら、脈状注入工法による液状化対策の提案，第□□回地盤工学研究発表会，2015. 2)沿岸技術研究センター，液状化対策としての静的圧入締固め工法技術マニュアル 3)（公財）鉄道総合技術研究所，鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012. 4) 水野ら、脈状注入改良地盤の品質確認手法に関する検討，第□□回地盤工学研究発表会，2015.



図3 土槽ピット注入試験の掘り起し状況

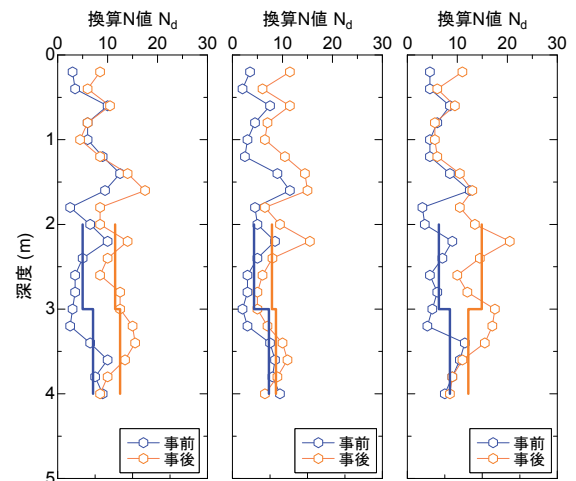


図4 ミニラムサウンディング結果(3箇所実施)

表1 土槽ピット試験における注入率の評価結果

【改良域 2.0-3.0m】						
計測点	σ'_v (kN/m ²)	事前 N_{d0}	事前 e_0	事後 N_{d1}	事後 e_1	実質注入率
No.1	30.2	5.0	0.905	11.5	0.791	6.0%
No.2	30.2	4.3	0.922	7.9	0.848	3.8%
No.3	30.2	6.3	0.878	14.9	0.744	7.2%
平均注入率 = 5.67%						
【改良域 3.0-4.0m】						
計測点	σ'_v (kN/m ²)	事前 N_{d0}	事前 e_0	事後 N_{d1}	事後 e_1	実質注入率
No.1	30.2	5.9	0.886	13.5	0.762	6.6%
No.2	30.2	5.8	0.888	8.4	0.840	2.6%
No.3	30.2	8.0	0.847	14.0	0.756	4.9%
平均注入率 = 4.69%						