

軟弱地盤やシラスへの泥濃式推進工法の適用性

Application of Deyno Slurry Pipe Jacking Method on Weak Soil and Volcanic Ashes

酒井栄治*・松元文彦**・森田 智***・島田英樹****・松井紀久男*****

Eiji SAKAI, Fumihiko MATSUMOTO, Tomo MORITA, Hideki SHIMADA and Kikuo MATSUI

Pipe jacking is a tunneling method by pushing pipe into the ground from a specific pit. The size of the tunnels in this method ranges from less than 900mm (micro-tunneling) to more than 3,000mm. The method of excavation also ranges from hand digging to the use of any kind of tunnel-boring machines, such as slurry and earth pressure balance (EPB) machines. Deyno slurry pipe jacking was firmly established as a special method for the non-disruptive construction of underground pipelines of sewage systems.

During pipe jacking and micro-tunneling process, jacking load is an important parameter, as well as the controlling of the pipe wall thickness, the need for and location of an intermediate jacking station, the selection of jacking frame and lubrication requirements. The main component of the jacking load is due to frictional resistance. In this paper, the effect of the TRS (Tail void Restructuring) system used for reducing frictional force around the pipes during pipe jacking was investigated by field data. Evidence shows that this system was mainly effective in Deyno slurry pipe jacking system and the predicted frictional forces of the projects tend to be overestimated.

Key Words: Deyno slurry pipe jacking method, TRS system, subsidence, thrust, lubricant

1. はじめに

推進工法を無水層地山に適用する場合、地山の粘着力が極めて小さいことから、切羽前方地山が掘削に伴い切羽内に流入し易くなる。また、掘進時における泥水の切羽への加圧により、地山土粒子間隙への泥水の逸泥現象が発生し、後続する推進管周辺の余掘り部（以下、テールボイドと呼ぶ）に泥水成分が保持し難くなる。このため、テールボイドに存在する泥水および滑材混合物と地山の細粒土粒子との混合が生じ易くなり、テールボイドの塑性化による管外周面抵抗値の上昇を引き起こし、最悪の場合には推進不能となることが実績から確認されている。本報告では、無水層に長距離推進工法を適用した場合の施工例および種々の問題点を抽出し、検討した結果について述べる。

* 非会員 株式会社 アルファシビルエンジニアリング 開発部門(九州大学大学院博士後期課程)

** 非会員 株式会社 アルファシビルエンジニアリング 技術部門 計画担当

*** 非会員 株式会社 アルファシビルエンジニアリング 技術部門 技術担当

**** 正会員 博士(工学) 九州大学大学院助教授 工学研究院地球資源システム工学部門

***** 正会員 工学博士 九州大学大学院教授 工学研究院地球資源システム工学部門

2. 泥濃式推進工法の概要

泥濃式推進工法の掘削切羽は、液性限界から塑性限界の範囲の土砂性状で、高濃度泥水と掘削土砂の流動性の良好な混合体で構成されている。この際、地下水圧+20kPa以上の加圧状態でカッター室内を維持し、連続して掘進を行うため、地山に対する止水性ならびに掘削地山の力学的な安定性を確保することができる。また、推進管外周部に平均25mm程度のテールボイド部を設け、そのテールボイド部には、地山土粒子、高濃度泥水、目詰材および固結型滑材の混合体に加圧充填されることにより、掘削地山壁面から肌落ちが防止され、地山の安定性が確保されている¹⁾。

3. 工事概要

本現場は、鹿児島市吉野町地内に位置する。掘進対象土質は風化シラスやシルト質砂層であり、N値1～5程度の軟弱地盤であった。また、これらの地山は、無水層と呼ぶことができる程度に乾燥しており、特に風化シラス部においては溶結組織の存在しない灰状の土質で構成されていた。以下に、本現場の施工条件を示す。

- ① 推進管径：Φ1,200mm（呼び径） JSWAS・A-2・50N：管軸方向耐荷力=5,309kN
- ② 推進延長：524.87m ただし、縦断曲線半径R=200mを含む。
- ③ 土被り条件：3.49m（発進部）～12.00m（中間部最大）～2.67m（到達部）
- ④ 土質条件：風化シラス、シルト質砂層、N値=1～5程度の無水層
- ⑤ 推進工条件：元押推進工
- ⑥ 推進工法：泥濃式推進工法
- ⑦ 特殊条件：長距離推進用補助装置による対応（テールボイド拡幅再構築装置）

本現場の特徴としては、低土被りの無水軟弱地盤を含む長距離推進工事であること、施工途中から縦断勾配4.9%の急勾配路線となること、等が挙げられる。縦断路線のおよび土質柱状図を図-1に示す。

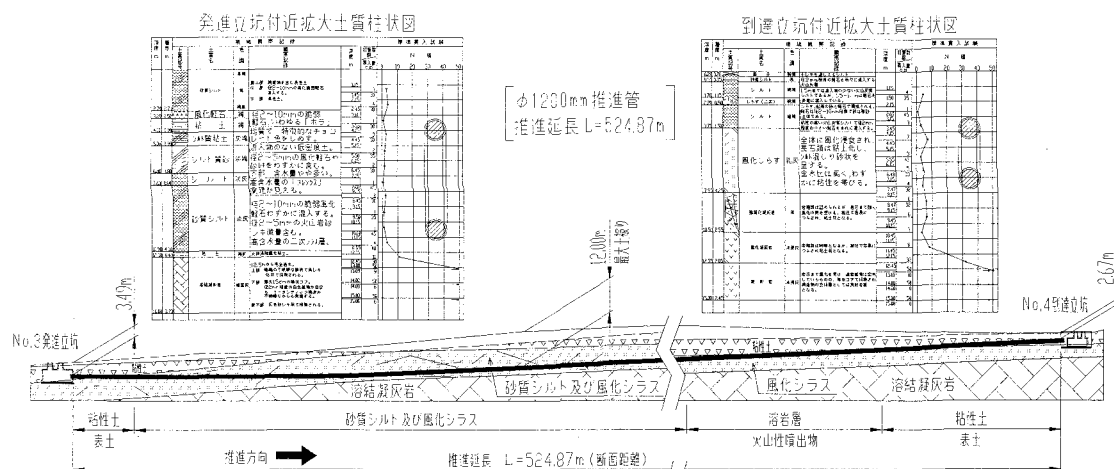


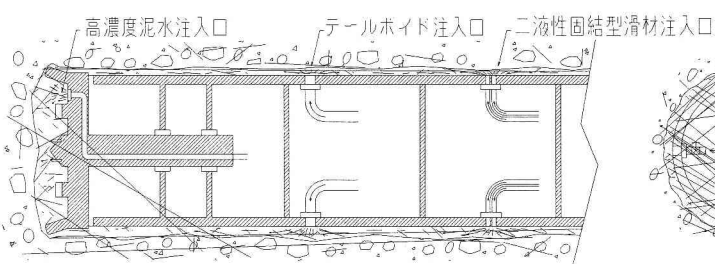
図-1 縦断路線概要図・土質柱状図

4. 新しい長距離推進用補助装置の概要

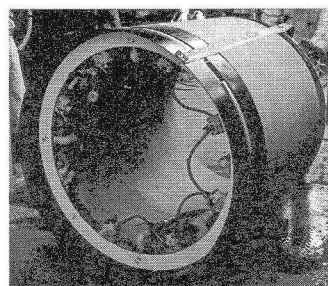
推進工法は、元押装置からの元押推進力により推進管が埋設されるため、低推進力を維持しながら施工す

ることが重要である。したがって、施工中に推進力が急増し始めると推進不能となる恐れがあるため、推進力を低減させるために、補助工法として推力減摩滑材注入方式が一般的に適用される。この方式は、推進中に推進管のグラウト注入口から管外周面のテールボイドに推力減摩滑材を注入するもので、注入装置や注入方法に若干の相違が認められるものの約 20 年前から実施されている。しかし、この推力低減滑材注入方式は、粒度分布の良好な土質に対する推進力低減には効果的であるが、透水係数が 10^{-2}cm/sec 程度以上の高透水性土質や、均等係数が小さい土質、礫率の高い土質、巨礫を含んだ崩壊性砂礫土質等に対しては、その効果は明瞭ではない。また、このような土質に対して滑材注入方式を適用した場合には、対象土質の諸性質にも依るが、滑材注入後の推進力安定期間が短く、注入後 2～3 日で注入前の高推進力に戻る事例が多いことがこれまでの実績により示されている²⁾。これは、テールボイドが一旦崩落すれば、滑材の注入のみでテールボイドを復元することが困難であることを意味している。

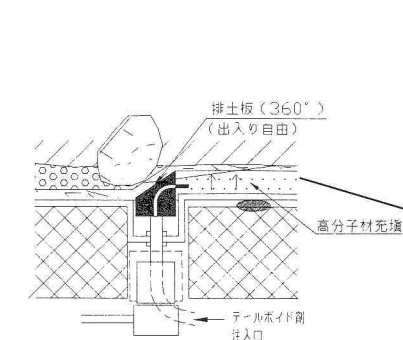
そこで、このような問題点を克服するために改良された工法が泥濃式推進工法である。すなわち、図－2 に示すように、掘削機前方から高濃度泥水を切羽に注入し、切羽前方地山を加圧することにより切羽前方地山を保持するとともに、テールボイドにも泥水および二液性固結型滑材を加圧注入し、土被り圧の保持および低推進力の維持効果を発揮させる工法である。この工法の採用は、崩壊性の高い地山に対しても有用であることが明らかにされている。しかし、推進距離が増大する一途を辿り、また急曲線施工に対する要求に応えるためには、テールボイドのより確実な形成が必要不可欠である。そこで、テールボイド中に地山土粒子が崩落した状態を機械的に復元させることを目的として、TRS 装置(テールボイド拡幅再構築装置; Tailvoid Restructuring System)を考案した³⁾。図－3 に TRS 装置の概要、写真－1 に TRS 装置を装着した推進管、図－4 に TRS 装置のシステム図をそれぞれ示す。TRS 装置は、写真－1 のように推進管に装着され、推進終了後内部装置のみ回収される。装着された TRS 装置外径は管外径より 10mm 大きいため、推進管が推進されると図－3 のように強制的にテールボイドが拡幅され、その拡幅部に滑材が再充填される。これにより、推進管と接触した地山土粒子を含むテールボイド中の混合物から再充填された滑材に置き換わり、推進力が確実に低減される。



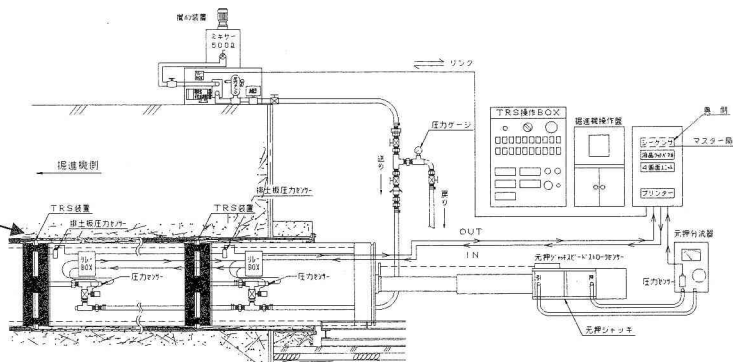
図－2 掘進機注入口配置図



写真－1 TRS 装置



図－3 TRS 装置の概要



図－4 TRS 装置取り付け時のシステム全体図

5. 施工経過

掘進機の実運転日数は56日であり、推進を開始してから到達するまで70日を要した。また、1日8時間当たりの平均日進量は9.40m程度であり良好な進捗状態であった。最終的な元押推進力は1,813kNであり、管軸方向耐荷力の34%程度の低推進力であった。ただし、本現場は一方8時間の施工であり、作業終了後から翌日の作業開始まで16時間の推進休止期間があったため、翌日の推進開始時に得られる推進力（以下、初期推進力と呼ぶ）は、日平均推進力の65%に増大していた。一般的な有水層における初期推進力は、これまでの実績より概ね日平均推進力の15%以下であることを考慮すると、この結果は溶結組織の少ない土粒子が卓越した地山を推進したため、推進休止中にテールボイド中の水分が逸水したことに起因すると推察される。なお、先述のTRS装置を装着したにも関わらず、本現場においてこのような高い初期推進力が得られたことから判断すると、本装置の未装着の状態で通常の施工法を適用した場合には、推進延長の半分程度以下で推進力が管の軸方向耐荷力を超過し、推進管が破損していた可能性が高いと思われる。写真-2に本現場で使用した掘進機、写真-3に溶岩層の破砕片、写真-4に掘進機の到達状況を示す。

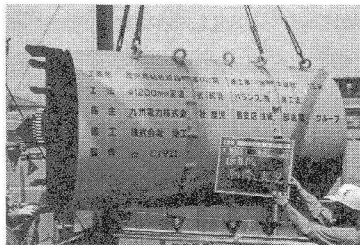


写真-2 センター駆動方式掘進機



写真-3 溶岩層の破砕片

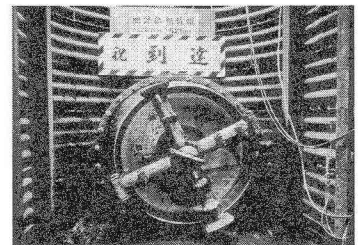


写真-4 到達状況

6. 施工結果

(1) 元押推進力管理・管外周面抵抗値の実態

図-5に推進距離と元押推進力の関係を示す。なお、図中の●印は初期推進力、×印は日平均推進力、点線は計画推進力である。また、図-6には管外周面抵抗値を示す。この管外周面抵抗値は、日平均推進力から切羽抵抗値を差し引き、管外周面積で除した値である。なお、切羽抵抗値は、これまでの実績より一般軟弱土質では70kN、溶岩や火山性噴出物含有層では120kNとしている。

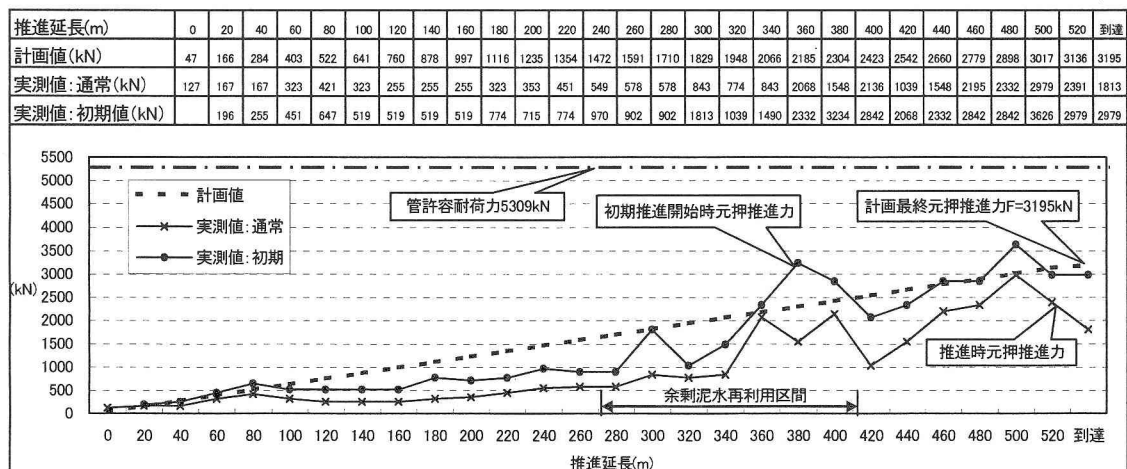
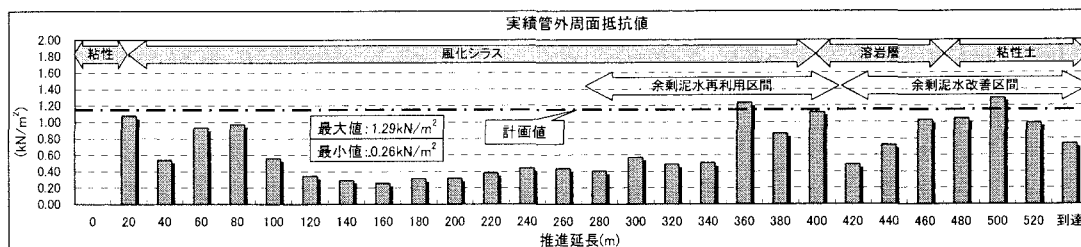


図-5 推進距離と元押推進力の関係



図－6 推進距離と管外周面抵抗値の関係

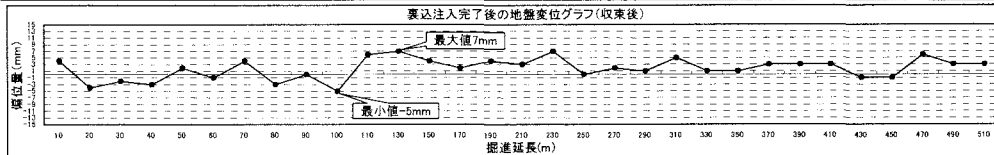
(2) 無水層における風化シラス掘進時の地表面への影響

表－1 に各測点における推進距離と地表面沈下量の関係を示す。また、図－7 に推進が完了し裏込め注入を実施した後の各測点における地表面沈下量を示す。これら図表から、T R S 装置を用いることにより、テールボイド中に存在する滑材等の充填物によって土被り圧を効果的に支持し、地表面沈下量が許容管理値である 15mm 以内に抑制することができたことが分かる。なお、シラス盛土のパイプルーフ実績⁴⁾や、土被り 1.0m 以下の砂層の従来の実績⁵⁾ から地盤改良等の対策工は行わなかった。

これらの結果より、適切な高濃度泥水材やテールボイド材の選定、適切な切羽圧力の保持、掘進機外周部への過不足のない固結型滑材の連続充填、T R S 装置によるテールボイドの確実な復元により、本現場のような軟弱地盤や特殊土が賦存する無水層に対しても効果的な施工が可能であることが判る。

表－1 各測点における推進距離と地表面沈下量

推進距離	5/14	5/17	5/21	5/25	6/1	6/11	6/17	6/22	6/29	7/12	7/26	8/4
測点	30m	50m	100m	130m	190m	280m	330m	350m	410m	465m	5日後	14日後 ※裏込め注入後
10m	0	-3	-3	-2	-1	-2	-4	-1	-1	0	-1	4
20m	1	-3	-5	-1	-2	-6	-5	-4	-3	-3	-2	-4
30m	2	-1	-2	-1	2	0	-2	1	1	-1	2	-2
40m	1	-2	0	-2	-1	-2	-3	1	0	-2	-2	-3
50m	3	-5	-2	0	1	-5	-3	-2	1	0	3	2
60m	—	-1	3	2	5	2	5	3	0	-3	-4	-1
70m	—	—	3	1	3	3	2	5	2	1	0	4
80m	—	—	-1	-4	-4	-4	-5	-1	-2	-4	-4	-3
90m	—	—	-5	-5	-3	-5	-4	-1	-1	-2	-4	0
100m	—	—	—	-2	-4	-8	-10	-4	-9	-6	-3	-5
110m	—	—	—	4	0	-1	-4	-2	-2	-4	-2	6
130m	—	—	—	3	4	0	-3	-3	1	1	3	7
150m	—	—	—	—	-1	1	-5	-2	2	2	0	4
170m	—	—	—	—	4	4	-2	-2	6	-3	-2	2
190m	—	—	—	—	3	6	-3	0	4	0	1	4
210m	—	—	—	—	1	3	-2	-2	7	2	2	3
230m	—	—	—	—	-1	2	-1	-1	7	5	6	7
250m	—	—	—	—	—	1	-4	-4	4	-1	-1	0
270m	—	—	—	—	—	3	0	2	7	2	1	2
290m	—	—	—	—	—	—	2	4	6	3	3	1
310m	—	—	—	—	—	—	—	4	5	6	3	5
330m	—	—	—	—	—	—	—	0	1	2	2	1
350m	—	—	—	—	—	—	—	4	1	2	3	1
370m	—	—	—	—	—	—	—	—	2	4	4	3
390m	—	—	—	—	—	—	—	—	2	4	3	3
410m	—	—	—	—	—	—	—	—	2	4	1	3
430m	—	—	—	—	—	—	—	—	2	-1	-1	-1
450m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	-3	-1
470m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	2	6
490m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	3
510m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	3



図－7 推進距離と裏込め注入後の地表面沈下量の関係

7. 考察

前述のように本現場では、初期推進力が日平均推進力の 1.6 倍程度増加した。これは、推進休止期間中に

テールボイド中に存在する滑材が周辺地山中に逸水し、推進管表面に接触する滑材の含水比が低下して推進管と滑材の摩擦抵抗が増大したことに起因していると考えられる。この現象は一般的な土質でも見られるが、無水層のようにテールボイド中の充填物が逸水しやすい環境では顕著に認められる。したがって、このような環境下では、本現場で採用したT R S装置のような機能を有する機器を用いることにより、この問題を解決できると判断される。

また、本現場では、前掲図－5および6に示したように、コスト縮減対策の一環として余剰泥水の再利用も行った。一般に泥水式推進工法では、掘削泥水を切羽に加圧注入後、掘削機に取り付けられたカッターで泥水と地山土粒子を攪拌しながら掘削されるが、掘削された土砂は、注入泥水とともに地表面に輸送され、調整槽で比重や粘性が調整された後、泥水（余剰泥水）として再利用することが行われる。このシステムを本現場にも適用したが、発進から360m地点以降で推進力が急増したため、420m以降では泥水の比重や粘性を調整するだけでなく成分の調整を加えた。すなわち、余剰泥水に粉末粘土、粘性材、目詰材や高分子材を再添加したところ推進力の回復が認められた。これは、本現場のような無水層中に一旦泥水を注入すると、泥水中のこれらの成分が地山に浸透して泥膜の形成に用いられ、余剰泥水中にはほとんど存在しなくなることによって起因していると考えられる。このことは、無水層に余剰泥水を再利用して推進する場合には、調整槽で再度、目詰材、高分子材や粉末粘土の再添加を図って泥水調整する必要があることを示している。

一方、地表面沈下量に関しては、無水層であるにも関わらず、地表面沈下量が許容沈下量の1/3以内、最大地表面沈下量が5mmで収束したため、T R S装置を用いることによる効果が認められた。しかし、従来の傾向とは異なり、土被りの大きな箇所における地表面沈下量が、小さい土被り箇所のそれよりも大きくなった。これは、土被りの大きな箇所における管周面地山抵抗値が高かったことや余剰泥水の再利用を行った箇所と一致することから、掘削後の地山の擾乱や泥水の風化シラスへの逸泥現象に伴う沈下がより顕著に認められたためと考えられる。

8. まとめ

無水層に長距離推進工法を適用した場合の施工例および種々の問題点を抽出し検討した結果、T R S装置を用いてテールボイドを強制的に復元することにより、従来では施工が困難であった無水層に対して低推力で施工でき、地表面沈下量も許容沈下量以内で推進することが可能であることを示した。

推進工法はシールド工法とは異なり、掘進機が到達立坑に到着するまで後続の推進管全体が移動しなければならないことから、これによる地盤変状への影響は無視できないと考えられる。このため、推進期間中のテールボイドの安定性および低推進力が常に要求される。この要求に応えるために、今後もあらゆる土質や施工条件に対して、効率的・効果的で急速施工が可能な工法の研究開発を行っていく予定である。

謝 辞

元請会社として、本現場の直接的指導や計測管理を行い、次施工への迅速なフィードバックの資料を提示頂いた株式会社地工の出雲所長をはじめ、発注者の立場から本現場の地盤の特徴や施工性について説明頂いた九州電力株式会社鹿児島支店、技術部送電グループの関係諸氏、本現場の計画・立案・設計・施工に関し御協力頂いた全ての皆様に心から謝意を申し上げる。

参考文献

- 1) 濱田和人：月刊推進技術，Vol.10，No.11，pp.23-25，1996
- 2) 高根昇：第12回推進工法講習会，長距離推進工法，pp.1-16，日本プロジェクトリサーチ，1991
- 3) 酒井栄治・森田智：非開削技術協会誌，No.47，pp.29-36，2004
- 4) 松本雄二他：トンネルと地下，Vol31，No.12，pp.7-15，2000
- 5) 超流セミシールド協会：文献集改訂6，2003