

都市トンネルにおけるプレライニング工法 (New PLS 工法) の概要と施工事例

荒木田 憲¹・長沢 教夫¹・鈴木 雅行¹・谷口 裕史²・喜多 達夫²

¹正会員 ハザマ 土木事業総本部トンネル統括部(〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

²正会員 ハザマ 技術・環境本部技術研究所(〒305-0822 茨城県つくば市荻間515-1)

New PLS 工法は、都市部のトンネルにおいて山岳工法で施工する場合に適用される工法で、プレライニング工法の1つである。プレライニングの構築は、切削と同時にコンクリートを即時充填するため、地山のゆるみを発生させることなく施工できる。New PLS 工法はプレライニングと支保を兼用できることから、都市部におけるトンネルの施工を合理的かつ経済的に施工できる工法であると考えている。本文では New PLS 工法の概要、施工機械、材料、施工事例及び今後の課題について述べる。

キーワード：トンネル、都市NATM、プレライニング、New PLS工法

1. はじめに

近年、都市部におけるトンネルの施工において、その経済性や断面制約の自由度等の特徴に着目して、山岳工法(NATM)を適用する事例が多くなっている。

一般的に都市部におけるトンネルは、①掘削対象地山が未固結地山であることが多い、②構造物が近接していることが多い、③土被りが小さく地山のグラウンドアーチが形成されにくい場合が多い、等の問題がある。このため一時的に切羽を解放する山岳工法を適用するには厳しい条件である。しかし、山岳工法の要素技術(特に補助工法)が進歩し、近年では都市部の未固結地山におけるトンネル施工の実績も多く報告されている。言い換えれば、従来シールドでしか施工できないと考えられていた周辺環境条件・地山条件においても山岳工法による施工例が多くなり、シールド工法と山岳工法における適用範囲の重複部分が拡大してきているといえる。

このような山岳工法の適用範囲の拡大は特に補助工法の進歩によるところが大きい。トンネル標準施工方書[山岳工法編]・同解説¹⁾においては山岳トンネルの補助工法を先受け工、鏡面脚部の補強、湧水対策・地山補強の3つに分類しているが、本論文では先受け工法に分類されるプレライニング工法のうち New PLS 工法の概要と施工事例について示す。

2. New PLS 工法の概要

New PLS 工法は山岳工法の補助工法の内の先受け

工法として分類されている。しかし New PLS 工法は山岳工法である吹付けコンクリート・ロックボルト工法(NATM)とは異なり、支保部材として、吹付けコンクリートやロックボルトは使用せず、プレライニング部材(スリットコンクリート)を支保部材とするという特徴がある。

(1) New PLS 工法の概要

New PLS 工法はトンネル掘削に先立って切羽前方のトンネル外周に長さ3m、厚さ40cmのアーチシェルのスリットコンクリート(プレライニング)を構築し、その後にトンネル掘削(1進行長3m)を行う工法である。スリットコンクリートは剛性が高いため、掘削後の支保は不要である。スリットコンクリ



図-1 New PLS 工法概念図

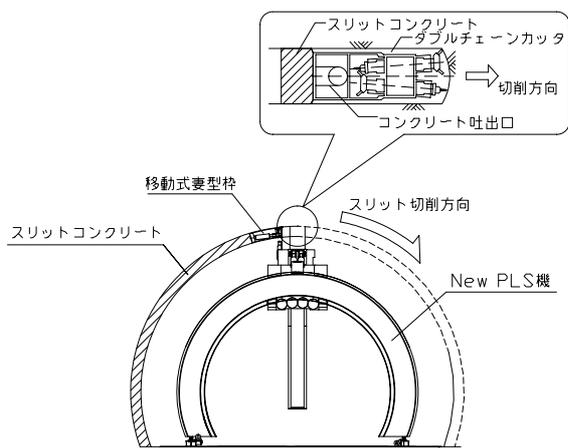


図-2 New PLS 工法施工概要図



写真-1 構築したスリットコンクリート

の構築は切羽前方のトンネル外周をチェーンカッタで切削し、同時にコンクリートを即時充填するため、地山の緩みをほとんど発生させることなく施工できる。図-1にNew PLS工法の工法概念図を、図-2にNew PLS工法の施工概要図を、写真-1に構築したスリットコンクリートを示す。

(2) New PLS 工法の特徴

New PLS 工法の特徴を以下に示す。

①切羽の安定性向上及び地山のゆるみ防止

掘削に先立ち、アーチシェル状のスリットコンクリート（通常は厚さ40cm、長さL=3.0m）を地山に構築するため、プレライニング効果により、切羽の安定性向上及び地山のゆるみ防止ができる。

②地表面沈下の抑止

プレライニング効果により、切羽の安定及び切羽前方の地山のゆるみを抑制させ、先行地表面沈下を抑制できる。また、全断面掘削ができることから、早期閉合が可能であり、掘削後の地表面沈下も抑制できる。

③近接構造物への影響緩和

周辺地山に発生するゆるみを抑制することにより、地表や地中に近接する構造物への影響を小さくすることができる。

④施工性の向上

施工サイクルが通常のNATMに比べ、シンプルである。また通常のNATMにおいては人力に頼る作業（鋼アーチ支保工建込みやロックボルト作業等）があるが、New PLS工法では少なく、作業員の負担が少ない。さらに粉じん発生作業（特に吹付け作業）が少ないという特徴もある。

⑤安全性の向上

重機の輻輳が少ない。また、掘削前にスリットコンクリートを構築するため、安全性が高い。

(3) New PLS 工法の施工方法

通常の施工におけるNew PLS工法の施工サイクルを図-3に示す。また、スリットコンクリート構築時の施工次第図例を図-4に示す。通常の施工においては、スリットコンクリートの構築と掘削のみであり、非常にシンプルなサイクルとなる。プレライニング長3.0mで、補助工法（鏡吹付け、鏡ボルト等）を使用しない場合は50～60m/月程度の進行を確保できる。

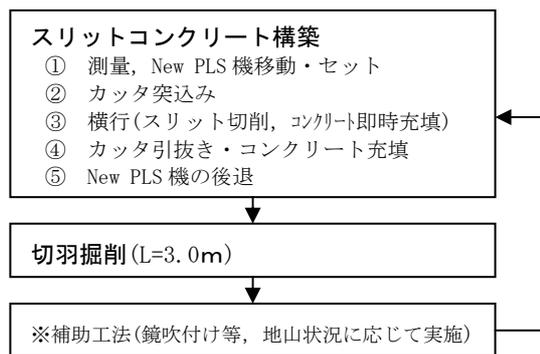


図-3 New PLS 工法施工サイクル

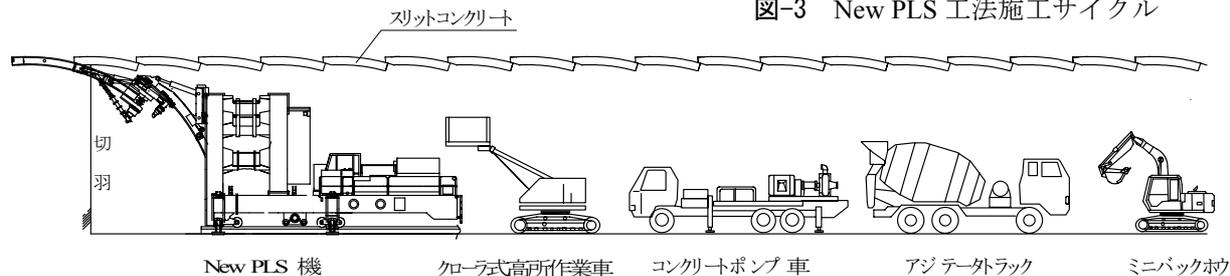


図-4 スリットコンクリート構築時施工次第図例

(4) 施工機械

New PLS 機の外観写真を写真-2 に、仕様例を表-1 に示し、構造図例を図-5 に示す。チェーンカッタは縦断方向にも湾曲していることから、直線的な先受けに比べ余掘りが小さくなるとともに、縦断的にもアーチ形成効果が発生すると考えられる。New PLS 機はレールにより移動可能であり、New PLS 機内部を使用機械(トンネル掘削機)等が通行可能である。

スリットコンクリート構築時のチェーンカッタの横行速度(地山切削及びコンクリート充填の速度、以下横行速度)は、吉井トンネル²⁾では10cm/minとした。ここで、New PLS 機の横行速度は機械の切削能力に依存するとともに、コンクリートの要求品質にも影響する。吉井トンネルで使用した New PLS 機では地山の軸圧縮強度 15MPa 程度までは、横行速度 10cm/min を確保できると考えている。ただし、地山中に大きな径(40cm 程度以上)のレキが存在する場合やレキ含有率が多い場合は検討が必要である。

トンネル内部の掘削・ずりだし機械は通常の NATM と同様であるが、New PLS 機内部の通行を考慮する必要がある。

表-1 New PLS 機的主要仕様

トンネル	吉井トンネル	保土ヶ谷トンネル ³⁾
断面	2車線	3車線拡幅
スリットコンクリート長	3.0m	2.0m
スリットコンクリート厚	40cm	40cm
油圧ユニット	132kW*400V*50Hz	90kW*400V*50Hz
横行速度	10cm/min	15cm/min
総質量	125t(レール含む)	111t(レール含む)

(5) スリットコンクリート

New PLS 工法においては、プレライニング及び支保はスリットコンクリートのみである。スリットコンクリートには以下の品質が要求される。

① 充填性

先受け及び支保として十分な品質を確保するために、切削したスリットの中に確実に充填されること。このため、スリットコンクリートは打設時に所定のスランプを有する必要がある。

② 妻型枠通過後のコンクリート端部の自立性

スリットコンクリートは移動式の妻型枠を用いて打ち込むが、移動妻型枠通過後にはコンクリートが流出しないような自立性を確保する必要がある(適正な自立時間の確保)。スリットコンクリートの自立時間はチェーンカッタの横行速度及び妻型枠の長さに関係して定まる。

③ 初期強度発現性

スリットコンクリート構築後、トンネル掘削作業を行うが、トンネル掘削時には支保としての強度を保持する必要がある。表-2 にスリットコンクリートの要求品質例を示す。

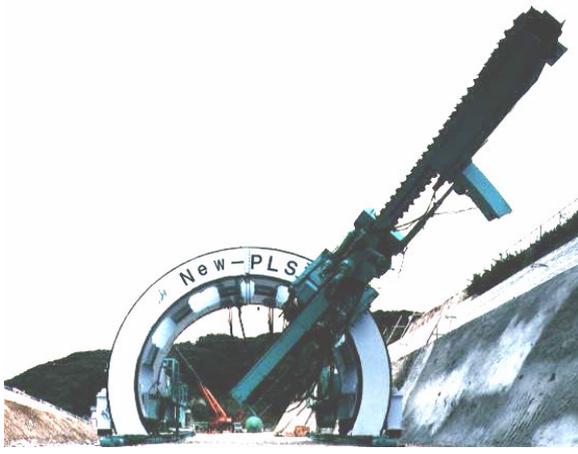


写真-2 New PLS 機

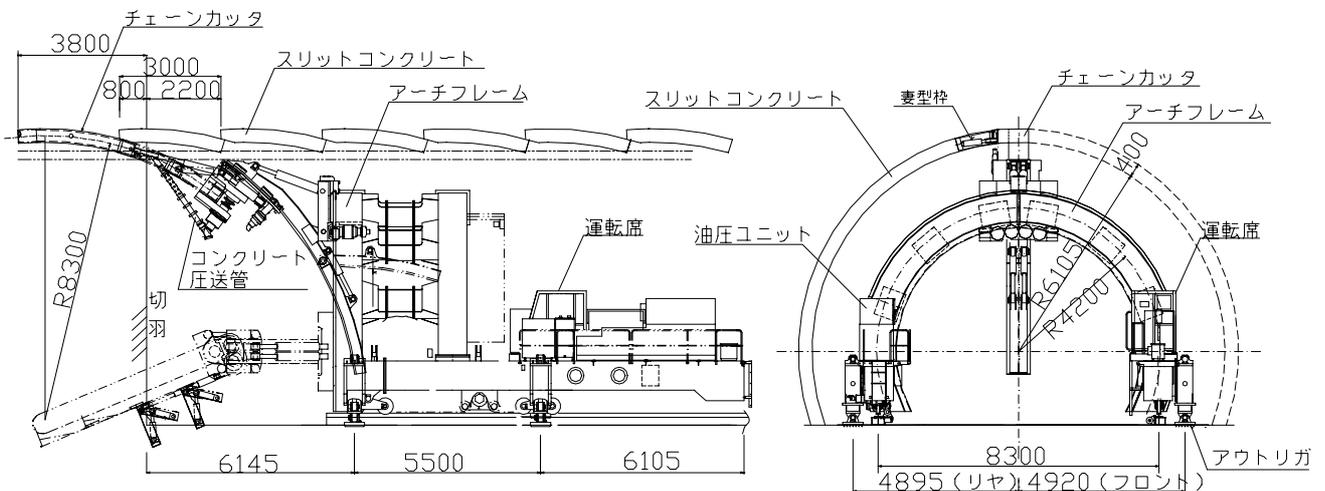


図-5 New PLS 機構造図例

表-2 スリットコンクリートの要求品質例

トンネル	吉井	保土ヶ谷	目的
スランブ	20±2.5cm	20±2.5cm	スリット内に確実に充填可能である
スランブ保持時間	90分	120分	
自立時間	12分後に自立	8分後に自立	妻型枠移動時に自立する
初期強度	$\sigma_{6h}=3N/mm^2$	$\sigma_{4h}=3N/mm^2$	掘削時の支保効果発揮
設計基準強度	$\sigma_{28d}=18N/mm^2$	$\sigma_{28d}=18N/mm^2$	吹付けコンクリートと同様

表-3 各目的別の特殊混和材

特殊混和材	目的	コンクリートへの添加方法例
凝結調整剤	スランブ保持	プラントで投入(スリー*)
急結剤	自立性の確保	打込み時に混入(液体)
急硬材	初期強度発現	プラントで投入(粉体)

※粉体の凝結調整剤を水に溶かして添加

これらの要求品質を満足するために、スリットコンクリートには、3種類の特殊混和材を使用する(表-3参照)。

表-3の特殊混和材はNew PLS工法のために開発された材料であるが、これらの材料は相反する品質(例えば流動性と自立性)を満足するためのものであるため、これらの特殊混和材を添加するスリットコンクリートは非常にデリケートである。すなわち、コンクリート温度や材料の特性(骨材・セメント)によ

り各混和材の効きが影響を受ける。このため品質・施工性及び経済性を確保するためには、各現場においてコンクリート温度毎の配合を決定しておく必要がある。吉井トンネルにおいて設定した温度別の5種類の配合を表-4に示す。

(6) コンクリート製造設備

スリットコンクリートの製造は、現場に設置したバッチャープラントにて行う。図-6にスリットコンクリートの製造・施工フローを示す。ここで、バッチャープラントで製造したコンクリートをベースコンクリート、急結剤を添加したコンクリートをスリットコンクリートと呼んでいる。ベースコンクリートの製造には、通常トンネルで使用されるバッチャープラントに急硬材のサイロ及び凝結調整剤の貯蔵・計量設備等を増設することが必要である。また、2車線道路トンネル、プレライニング長3.0mの場合、1回の施工で約30m³のスリットコンクリートを使用するため、工程(サイクル)及び配合を考慮した設備を計画する必要がある。

急結剤はNew PLS機に搭載した急結剤ポンプにより添加する。なおスリットコンクリートの吐出量や急結剤の運転操作はNew PLS機の運転室で制御可能である。

表-4 吉井トンネルにおける温度別の配合表(例)

対象温度(°C)	粗骨材の最大寸法 Gmax (mm)	水結合材比 W/C+P (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
				水 W	セメント C	急硬材 P	細骨材 S	粗骨材 G	凝結調整剤	急結剤	
7°C以下	20	50	45	200		340	60 (15%)	762	942	5.6 (1.4%)	28 (7%)
7~15°C										4.8 (1.2%)	16 (4%)
15~25°C										5.6 (1.4%)	
25~30°C										6.4 (1.6%)	
30°C以上											

※混和材における()表示は結合材(C+P)に対する重量比
 ※配合は材料が変わると変化する。

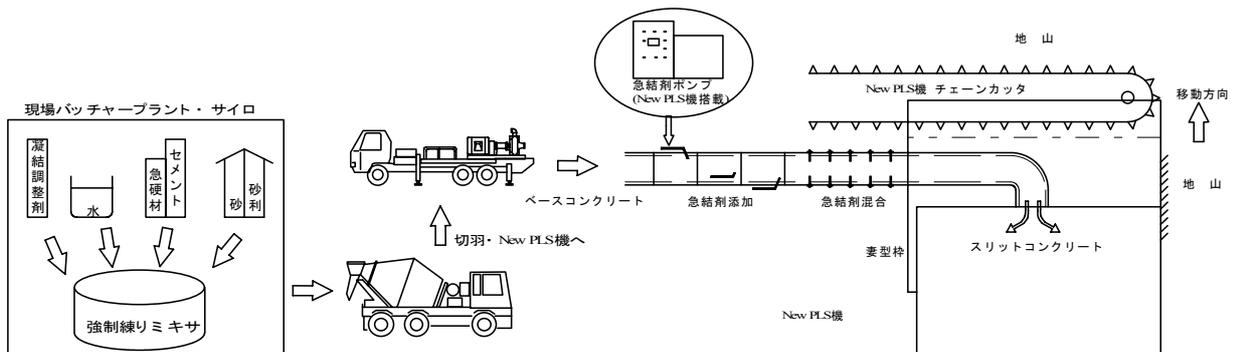


図-6 スリットコンクリート製造・施工フロー図

(7) 補助工法

New PLS 工法は山岳工法の1つであり、切羽の自立を前提としている。このため、切羽が自立しないような地山においては、補助工法が必要となる。例えば、鏡吹付けや鏡ボルトなどが挙げられる。また、プレイニング効果を十分に発揮するためには脚部地盤が重要となるため、支持力が不足する場合は脚部地盤を改良する補助工法も必要となる。

補助工法の施工は通常山岳トンネルと同様の施工が可能であるが、鋼アーチ支保工が無い場合、例えば、脚部補強ボルト等を施工する場合は、支保部材(スリットコンクリート)との接続方法(力の伝達方法)を検討する必要がある。

3. 施工事例

New PLS 工法の施工事例としては試験施工⁴⁾を含めて3例ある。このうち当社が施工に関与した2例について紹介する。

(1) 横浜新道保土ヶ谷トンネル³⁾

a) 概要

横浜新道(拡幅)峰岡工事は、神奈川県横浜市に位置する横浜新道保土ヶ谷トンネルを、上下4車線から上下6車線に拡幅する工事である。拡幅工事は3車線トンネルの新設及び既設2車線トンネルの拡幅により行われたが、このうち既設トンネルの拡幅

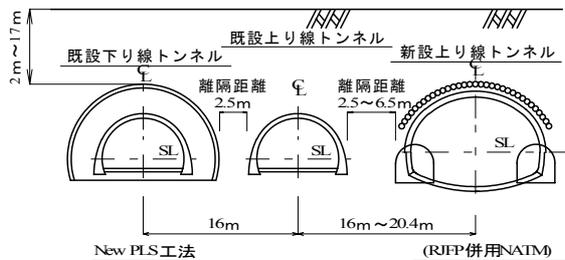


図-7 保土ヶ谷トンネル位置関係図



写真-3 保土ヶ谷トンネル坑口状況

工事に New PLS 工法が適用された。この拡幅工事は、供用中のトンネルに壁面離隔 2.5m に近接するうえ、軟質な地山に、土被りが薄い条件で施工された。図-7 に保土ヶ谷トンネルの位置関係図を示し、写真-3 に坑口状況を示す。

b) 地形・地質概要

付近の地形は、縦断地形にはトンネル中央部を頂点とした小山状で、横断地形はほぼ平坦である。トンネルの土被りは 2~17m 程度で、地表には民家や道路(重要埋設物含む)が存在している。地質構成は第三紀~前期更新世上総層群上星川層の泥岩を基盤とし、その上部に前期更新世の相模層群屏風ヶ浦層、関東ローム層、さらに軟弱な腐植土をはさみ、表層には粘性土を主体とした盛土が覆っている。

トンネル掘削対象地質は主に屏風ヶ浦層の固結シルトとローム層である。固結シルトは N 値 9~45 (代表 N 値 18)、一軸圧縮強度 0.5~0.8MPa 程度の軟質な地山である。

c) 工事の特徴

工事の特徴を以下に示す。

- ① 拡幅するトンネルは 3 車線トンネル(掘削断面積約 140m² 相当)の大断面トンネルである。
- ② 壁面離隔 2.5m で、供用中の道路トンネルが存在する。
- ③ 地表には民家、道路等の構造物が存在し、土被りは 2~17m と薄い。
- ④ 掘削対象地質は関東ローム層及び軟質な固結シルトである。

d) 施工概要

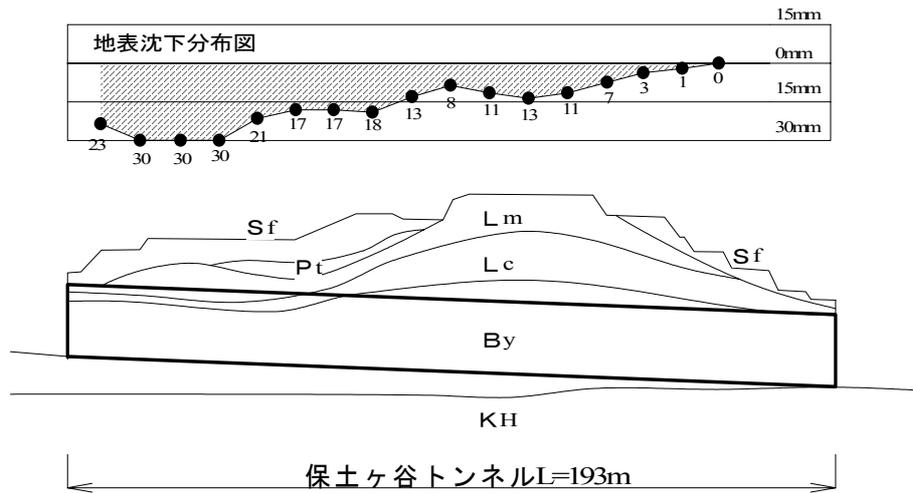
保土ヶ谷トンネルにおいては、1 掘進長 2.0m とし、プレイニング長 2.0m の New PLS 機を適用した。また、横行速度は 15cm/min とした。

切羽に出現した地山は軟質なローム層、腐植土層及び固結シルトであった。ローム層や腐植土層が出現した区間では、鏡吹付け及び鏡ボルト(L=5.0m)を施工した。また、脚部にローム及び腐植土層が出現する区間については、事前に RJP 工による地盤改良を実施した。

e) 施工結果

保土ヶ谷トンネルで得られた主な施工結果を以下に示す。

- ① 発生した地表面沈下は最大 30mm であり、道路及び構造物直下における管理基準(30mm と設定)以下であった。地表面沈下縦断図を図-8 に示す。
- ② 近接するトンネル(離隔 2.5m)への影響は小さく、トンネル内に異常は認められなかった。地表面沈下及び地中沈下横断図を図-9 に示す。



地質凡例

層名	記号	土質	代表N値
埋土層	Sf	有機質土 ローム 砂質土	3
腐食土層	Pt	黒ボク	4
新期ローム層	Lm	ローム	4
相模層群 屏風ヶ浦層	By	固結シルト	18
上総層群 上星川層	Kh	泥岩	50以上

図-8 保土ヶ谷トンネル地質縦断面図及び地表面沈下縦断面図

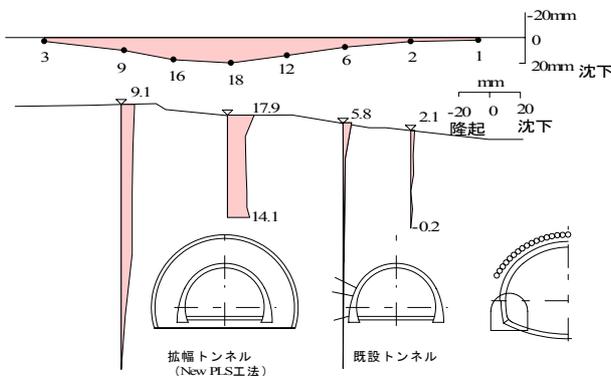


図-9 地表面沈下及び地中沈下横断面図(STA0+78)

(2) 横浜横須賀道路吉井トンネル²⁾

a) 概要

吉井工事は、宅地造成のために施工されたルーズな盛土中に2車線道路トンネルを構築する工事である。土被りは7~11mと薄く、地表には道路及び重要埋設物が横断していた。このため、地表面沈下低減対策及び切羽の安定確保を目的としてNew PLS工法が採用された。

b) 地形・地質概要

トンネル付近の旧地形は丘陵部と谷部が急斜面で接するような地形であったが、数年前に宅地造成工事が施工され、現在の地形は平坦に切土・盛土されている。トンネルの土被りは7~11m(1D程度)であり、道路を2カ所で横断し、道路下にはガス管、上下水道管、NTT管といった重要埋設物が敷設され、付近には新興住宅街が存在する。また離隔距離約7mで鉄塔と近接する箇所もある。

付近の基岩は三浦層群逗子泥岩層である。泥岩層の一軸圧縮強度は1.7~10.8MPaであり、新鮮部で平均7.0MPa、風化部で平均2.5MPa程度である。盛土部

はこれらの切土発生材を使用して盛土されているが、数年前の施工であり、未固結である(平均N値13)。この盛土層が切羽に出現する区間の延長はトンネル全線の約半分を占めていた(図-10参照)。

c) 工事の特徴

工事の特徴を以下に示す。

- ①全線で土被りが薄く、道路及び重要埋設管を横断する。
- ②トンネル延長の約半分が数年前に施工された未固結な盛土層である。

d) 施工概要

吉井トンネルにおいては、1掘進長を3.0m(プレライニング長3.0m)とし、切削横行速度は10cm/minとした。また、盛土層区間においては切羽安定化対策として鏡吹付け及び長尺鏡ボルトを、脚部沈下対策として事前のRJP工及び仮インバート吹付けを施工した。

e) 施工結果

地山と盛土の境界(RJP工未施工部)において、スリットコンクリート片側脚部の急激な変位(沈下)による崩落が発生したが、近接構造物等への有害な影響はなく、またその他の区間においては、良好な結果が得られた。吉井トンネルで施工結果や崩落を通じて得られた知見を以下に示す。

- ①崩落箇所以外の地表面沈下は最大21mmと小さな値であった。主要な計測値の縦断面図を図-10に示す。
- ②盛土区間において、道路と横断する箇所における沈下量は15mm程度と小さく、道路における許容沈下量(20mm)以下であった。盛土で道路が直上にある部分の沈下横断面図を図-11に示す。
- ③盛土地盤における切羽の安定性は、鏡吹付け及び長尺鏡ボルト(L=15m)を施工することで得られた。

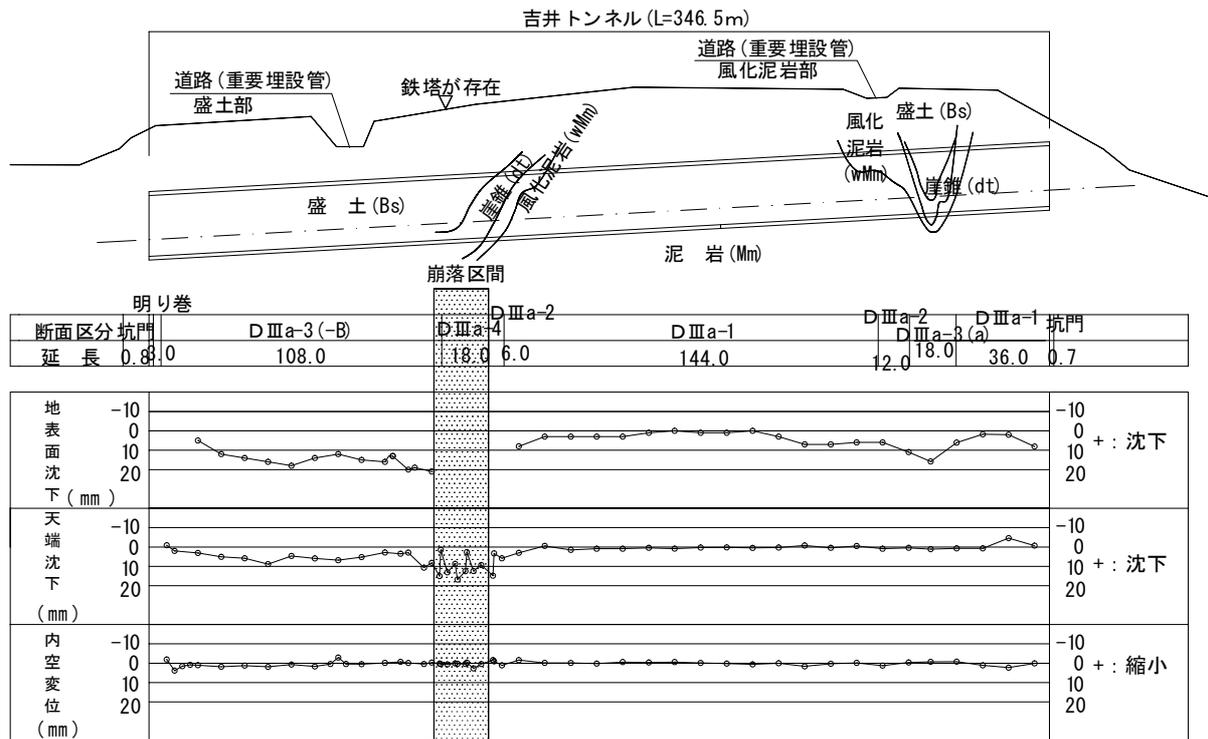


図-10 吉井トンネル地質縦断図及び主要計測結果の縦断図

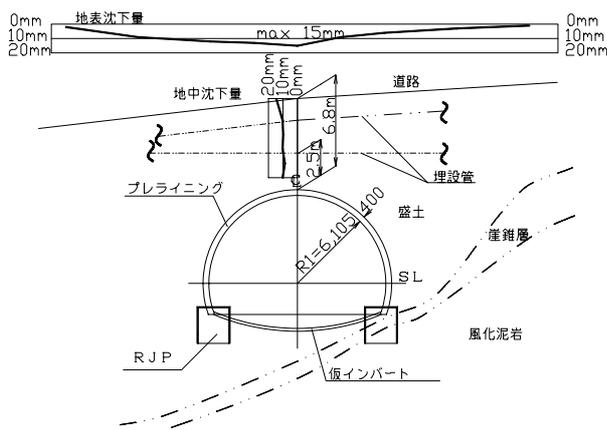


図-11 道路部(盛土区間)における沈下横断図

できたが、更に簡易な評価方法について検討する必要があることも課題としてあげられた。

4. まとめと今後の課題

(1) プレライニング効果について

土被り比と最大地表面沈下量を示した図⁵⁾に水平ジェットグラウト工法(以下 R J F P 工)の最大沈下量をプロットしたものが既存の文献⁶⁾に見られる。この図に New PLS 工法の施工事例を追加したものを図-12に示す。図-12では保土ヶ谷トンネルの各点及び吉井トンネルの盛土部における沈下量を示した。図-12より、New PLS 工法の地表面沈下抑制効果は、NATMの補助工法として比較的グレードの高い R J F P 工法と比べても、遜色がないと考えられる。特に New PLS 工法は全断面で掘削することから、断面の早期閉合が可能であるというメリットがある。

(2) 課題

a) 設計法の確立、適用範囲の明確化

プレライニング工法は、その施工事例が少なく、未だその効果等は明確になっていない。その設計法(地表面沈下予測手法、構造体の耐力検討等)については、土木学会プレライニング工法⁷⁾に示されているが、施工事例の増加に伴い、これも見直しされていくものと考えられる。また、New PLS 工法の適用範囲は図-12から考えると、シールドが適用される地山

- ④脚部沈下対策として施工した事前の R J P 工による地盤改良及び、崩落後に検討・実施した仮インバート吹付けにより、脚部沈下を抑制できた。特に追加施工した仮インバート吹付けは断面を早期に併合する効果も大きく、トンネルの安定性向上、地表面沈下抑制に寄与したと考えている。
- ⑤崩落部付近において、鋼アーチ支保工をスリットコンクリート内に建て込んだパターンの施工も行ったが、その施工が可能であること、及び今後適用するにあたっての課題が明確になった。
- ⑥崩落後の New PLS 工法の施工に当たり、脚部地山の評価が重要であることを再認識し、その評価方法を試行した。その結果、安全で合理的な施工が

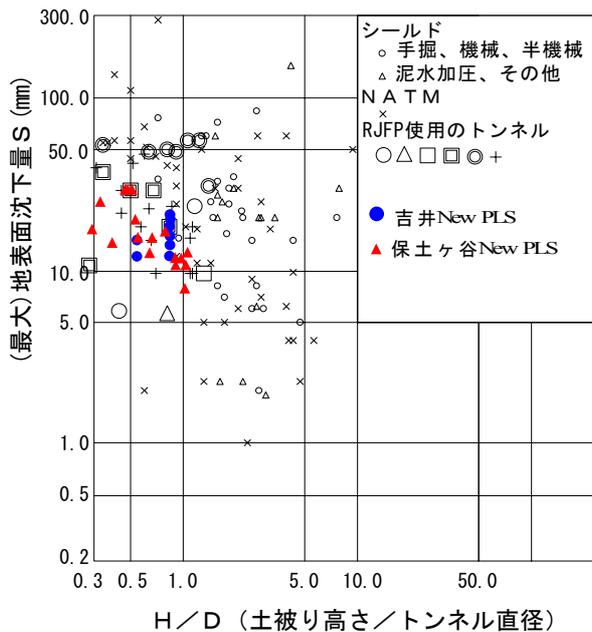


図-12 土被り比と地表面沈下量の関係 ⁶⁾に加筆・修正

における施工の可能性も示しているが、今後の施工例の増加及び設計法の確立により、その適用範囲も明確になっていくと考えられる。

b) 計測管理手法

New PLS 工法の支保は厚さ 40cm の無筋コンクリートであるため、その破壊性状は脆性的な破壊である。このため、NATM における計測による管理手法が適用しにくい。すなわち、剛性が高いため内空変位が発生せず、急激に破壊に至る場合があるため、内空変位による増し支保の設置などの対策をとりにくい。よって、これに変わる管理手法が必要である。吉井トンネルでは、特に脚部地山の状態が構造物の安定性に大きく関与すると考えたため、脚部地山の評価をサイクルに組み込み、合理的で安全な施工ができた。

施工実績が少ない現段階において New PLS 工法を適用する場合には、設計手法とリンクした管理手法を各現場毎に設定して、管理していくことが、経済性・安全性から考えて有利であると考えている。

c) 機械・設備

機械設備については、当社において 2 つの施工を経験し、ある程度完成されてきた。今後も実績を重ねることで、より良い機械になっていくものと考えられる。

d) 材料

New PLS 工法の主な材料はコンクリートであり、特殊な性能が必要であるが、現段階の技術で（3 種類の混和材により）要求性能を満足している。今後は新たな要求に対する性能を満足させていくことも

考えられる。例えば、鋼繊維の混入や高強度対応が考えられるが、現在の技術レベルで、十分対応可能である。特に鋼繊維の混入は、既に施工レベルに達しており、実機における試験も終了している⁸⁾。

これらの実施工への適用は、設計手法やコスト及び施工性等を考慮して、決定する必要があるものと考えられる。

5. おわりに

New PLS 工法の開発は New PLS 工法協会（社）日本建設機械化協会、(株)大林組、五洋建設(株)、東急建設(株)、日本国土開発(株)、ハザマ、三井三池製作所により開発を進められたものである。この工法はオープンな工法となっており、今後の都市部におけるトンネル施工の選択肢の 1 つとなっていくと考えられる。

最後になりましたが、保土ヶ谷トンネル、吉井トンネルの施工に当たり、ご指導頂きました日本道路公団の関係各位、横浜新道(拡幅)保土ヶ谷トンネル拡幅に伴う施工方法の検討会の委員の方々、横浜横須賀道路吉井トンネル施工技術検討委員会の委員の方々、New PLS 工法協会のメンバー各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説, 土木学会, 平成 8 年版
- 2) 及川 淳, 青山昌二, 市岡隆興: 低土被り未固結地山における New PLS 工法の施工報告-横浜横須賀道路吉井トンネル-, 第 24 回日本道路会議, 一般論文集(B)トンネル部会 NO. 8050, pp180~181, 2001
- 3) 例えば 藤下幸三, 本村均, 篠崎秀敏: New PLS 工法による市街地での近接施工-横浜新道(拡幅)保土ヶ谷トンネル-, トンネルと地下, 第 27 巻 1 号, pp19~26, 1996. 1
- 4) 例えば 櫻井裁之, 西尾宗雄, 米山秀樹, 河上清和: New PLS 工法の試験施工-北陸自動車道(II 期線)名立トンネル-, トンネルと地下, 第 24 巻 5 号, pp37~43, 1993. 5
- 5) 都市 NATM ワーキンググループ: 都市トンネルにおける NATM の適用に関する研究について, 土木学会関西支部講習会テキスト, 1985. 6
- 6) ジェオフロンテ研究会: R J F P 工法に関する検討報告書, 1992. 11
- 7) トンネルライブラリー第 10 号プレライニング工法, 土木学会, 2000.
- 8) 谷口裕史, 長沢教夫, 荒木田憲, 篠崎秀敏, 三瓶尚志, 喜多達夫: 鋼繊維を用いた New PLS 工法用スリットコンクリートの開発, ハザマ研究年報, Vol. 33, 2001