

低土被り・土砂トンネルにおける軽量鋼矢板付き鋼管 先受け工の切羽安定効果の研究

The Study of Cutting Face Stabilization Using by Fore Polling Attached with Steel-Sheet-Pile
in Shallow Earth Tunnel

北川 隆¹・佐原 圭介²・後藤 光理³・小西 真治⁴・奥津 一俊⁵

Takashi Kitagawa, Keisuke Sahara, Mitsutaka Goto, Shinji Konishi and Kazutoshi Okutsu

¹正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部新幹線部長 (住所:神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

²正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部盛岡支社七戸鉄道建設所長
(住所:青森県上北郡七戸町策田川久保32-2)

³正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部盛岡支社七戸鉄道建設所

⁴正会員 財団法人 鉄道総合技術研究所 鉄道技術推進センター次長 (住所:東京都国分寺市市町2-8-38)

⁵正会員 日本国土・日産・古久根・田中 東北幹、牛鍵T共同企業体所長 (住所:青森県上北郡上北町大字大浦字鳥谷ヶ崎17-3)

This report describes to mechanism of cutting face stabilization with Steelpipe Steel-Sheet-Pile Pressfit Blow Method (SSPB) in shallow earth tunnel. This method is a kind of fore polling and is using of steel pipe attached with steel-sheet-pile. The purpose of this method is preventing for losing degree of adhesion of soil around cutting face. Autores study on the effect of cutting face stabilization of this method using by analysis of 3-D FEM in comparison between fore polling without steel-sheet-pile and fore polling with steel-sheet-pile and research in some measured data of strain about steel-pipe and steel-sheet-pile in actual execution of this method. So, autores confirm that it is an effective method preventing for losing degree of adhesion of soil around cutting face in shallow earth tunnel.

Key Words : shallow tunnel, earth tunnel, stability of cutting face, forepolling, SSPB

1. はじめに

低土被り条件での土砂地山のトンネルの掘削は、従来より開削工法を主として行われてきているが、近年の施工技術向上により、地上環境や経済面で有利なNATMを採用した事例が多くなりつつある。その場合、NATMでは、地上部への影響の軽減対策、切羽安定対策、等が大きな課題となっており、加背割の工夫、先受け工および地山補強等の様々な対策が地上条件や地質条件等に応じ選択、採用されている。

研究の対象とした牛鍵トンネルは、図-1に示すように東北新幹線八戸～新青森間のうち、八戸から約30km北西に位置する台地を1D(D=10m)以下の低土被りで土砂地山中を掘削する延長2,070mの鉄道複線断面トンネルである。このうち、図-2の計画平面図に示すように、施工起点である終点方から700mの区間では、地上条件が田畑で比較的平坦で起伏が少ない区間であるため、地表面からトンネル天端部分を改良してからNATMで掘削を行う地山改良工法¹⁾で施工した。

残りの地山改良工法区間より起点方については、主要道

路と3箇所で交差する等の地上制約条件により、坑内からの掘削対策工を選択した。このとき、複数の既往の掘削対策工法²⁾を比較検討したが、切羽安定性、施工性、経済性および工期等の要因をすべて満足するため、新たに鋼管鋼矢板圧入打撃工法(SSPB工法:Steelpipe Steel-sheet-pile Pressfit Blow Method)を開発し採用した。この工法は、

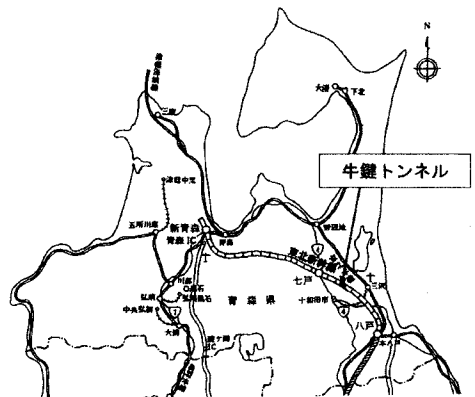


図-1 牛鍵トンネル位置図

掘削に先立って鋼管と鋼矢板で構成された先受材をアーチ状に形成することで、切羽前方地山の補強を目的とするものである。

本研究では、鋼管鋼矢板圧入打撃工法を採用した区間において、各種計測から得られたデータおよび数値解析により、切羽の安定化のメカニズムを考察した。数値解析には三次元線形解析を用い、新工法を用いた場合と用いない場合の切羽の安定性を比較評価した。

2. 既往の研究

トンネルの掘削に先立ち、切羽の安定を目的として切羽前方にアーチシェルの薄肉構造体を構築する先受け工は、大別して水平ジェットグラウト方式、長尺鋼管フォアパイリング方式およびスリットコンクリート方式に分類される^{2,3)}。これら先受けに関する研究は三次元模型実験を中心とする室内実験および三次元解析に基づいておこなわれてきたが、本研究のように先受け材として軽量鋼矢板付き鋼管先受け工を用いた例は既往の研究^{4,5)}にはほとんどないものと考えられる。

3. 地形地質概要

牛鍵トンネルは、図-3の地質縦断面図に示すように、標

高 30～70m 程度の台地の下を土被り=2m～10m（平均 8m）で通過する。

地上条件は、図-2に示すように水田と畑が大部分を占めており、交通量=2,500 台/日程度の主要地方道など幹線道路と途中3箇所で交差している。

地質条件は、上位より新期火山噴出物である黒ボク(im)、ローム(ta)、扇状地堆積物である粘性土(tc)、砂質層(ts)、第四紀更新世野辺地層である砂質土(Nos)および粘性土(Noc)等で構成されている。高館火山灰層(ta)は、N値が10以下の軟質層であり、浮石や石英砂の混入が見られる。本トンネルの掘削対象地層は高館段丘構成層の砂(ts)と粘性土(tc)および野辺地砂層(Nos1)である。

高館段丘構成層の砂(ts)は、シルト混じりの砂礫を主体とし、粘着力 $c=23 \text{ kN/m}^2$ 、細粒含有率 $F_c=8\sim20\%$ であり、湧水に伴った流砂が懸念される物性を有している。高館段丘構成層の粘性土(tc)は、有機質シルトや火山灰質シルトを主体とするもので、N値が10以下の軟弱層で変形係数 $E=7 \text{ MN/m}^2$ 程度であるため、大きな沈下が懸念される。一方野辺地砂層(Nos1)は、全体的にはN値が30以上の比較的締まった砂層であるが、一部均等係数が低くルーズな層もあり、近傍の他のトンネル掘削では湧水による流砂現象も発生している⁶⁾。

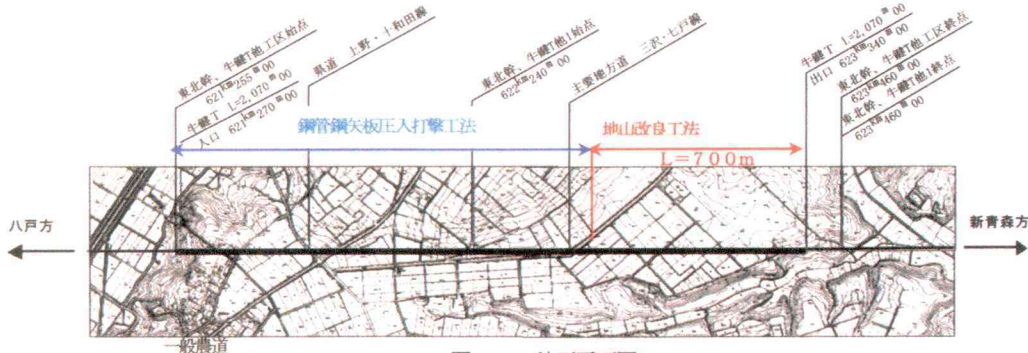


図-2 計画平面図

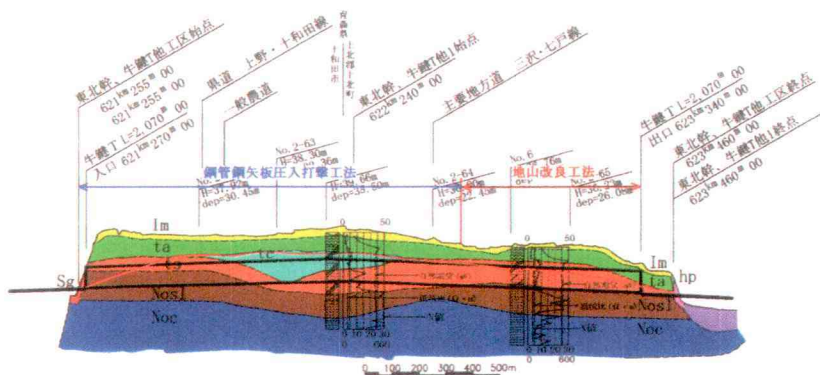


図-3 地質縦断面図

4. 掘削対策工の選定

牛鍵トンネルの地質条件や既施工区間における計測結果より、掘削にあたっては以下に示す対策が必要と考えられた。

- ① 流砂にともなった切羽崩壊。
- ② 切羽解放直後（1D 程度）に数 cm 程度の沈下が、とも下がりとして発生する現象。
- ③ 地山強度不足による切羽自立性欠如。
- ④ 地上部に位置している主要道路に対しての影響。

上記で示した①の対策は、地山改良工法施工区間の実績より、地上部からの揚水井設置で自然水位（トンネル天端+50cm～2m）を下半盤以下まで低下させる水位低下工法で対応した。

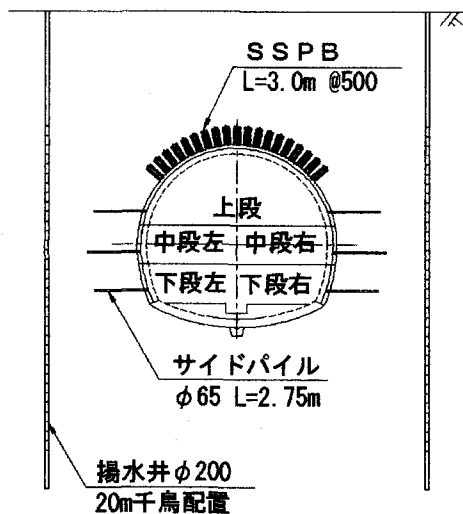
また、②、④の対策については、背面地山のせん断補強による見かけの地山強度増加および引張耐力による内圧効果等を期待するため、ドリフターによる圧入力・打撃力を介してφ65mmの鋼管を設置する圧入打撃式サイドパイル（Pressfit Blow Sidepile）で沈下量を抑制す

ることと主要地方道を一部迂回させる対策、等で対応した。

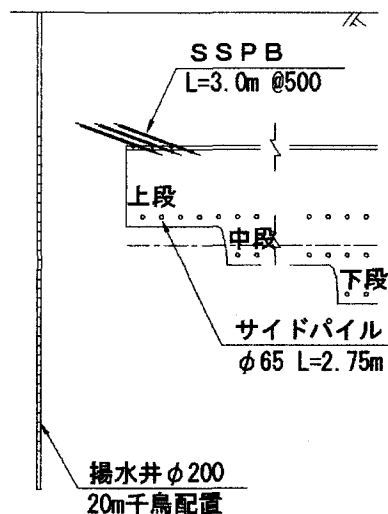
さらに、地下水低下工法で処理できない部分的に介在する残留水による流砂対策、切羽前方変位の抑制および切羽天端部の安定対策等のため、トンネルアーチ部補強が必要と考えられた。しかし、従来から多用されている鋼管や異形棒鋼で剛性を高めて注入材によって周辺地山を改良する工法^{2,3)}では、牛鍵トンネルにおける施工条件と照査すると以下に示す欠点を有していると考えられた。

- ① 注入作業に多大の時間を要するため、施工サイクルが長い。
- ② 大量の注入材使用に伴って、不経済となる。
- ③ 即時沈下を呈する牛鍵トンネルでは、注入式フォアボーリングのような早期に対策工の効果が期待できない先受工では、注入の養生時間が確保できる前にトンネル掘削することになる。

このようなことから、上記の欠点を克服すべく鋼管鋼矢板圧入打撃工法を開発し採用した。

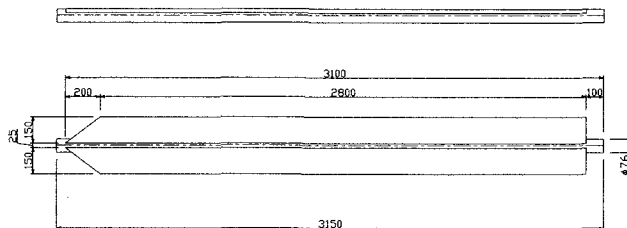


(横断面図)

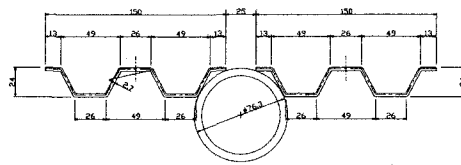


(縦断面図)

図-4 掘削対策工のパターン図



(縦断面図)



(横断面図)

図-5 軽量鋼矢板付き鋼管仕様図

5. 鋼管鋼矢板圧入打撃工法の概要

鋼管鋼矢板圧入打撃工法は、図-4、図-5に示すように、 $\phi 65\text{mm}$ の鋼管に幅 150mm （長さ $=3.0\text{m}/\text{枚} \times 2\text{枚}$ ）の軽量鋼矢板を取り付けた先受材（軽量鋼矢板付き鋼管：SSPB材）を、ジャンボのガイドセルに搭載し、ドリフターの圧入力と打撃力で切羽前方に打設・設置していく工法である（打設ピッチ 0.5m ）。

鋼矢板は、従来工法の注入による改良体より信頼性が高いこと、周辺地山との摩擦抵抗が期待できることおよび剛性が高いこと等の優位性を有しており、確実なアーチを形成できる。

また、対象地質である砂層には、打撃圧入時の振動に

より周辺地山を締め固める効果も期待できる。

鋼管は、鋼矢板を連続的なアーチを形成するためのガイド効果、先受材の剛性を高める効果、周辺地山との摩擦抵抗が期待できることおよびドリフターの能力を最大限に発揮できる効果等がある。

なお、流砂が懸念される地質の場合は、打設断面方向の打設間隔を狭めることで対応可能である。

そのほか、本工法は、従来工法と比較して以下に示す様な優位性がある。

- i) 低コスト；AGF（セメントミルク注入）の60％程度
- ii) 施工タイムが短い；AGFの50％程度
- iii) 施工直後から効果を期待できる

図-6に鋼管鋼矢板圧入打撃工法の作業手順を示す。

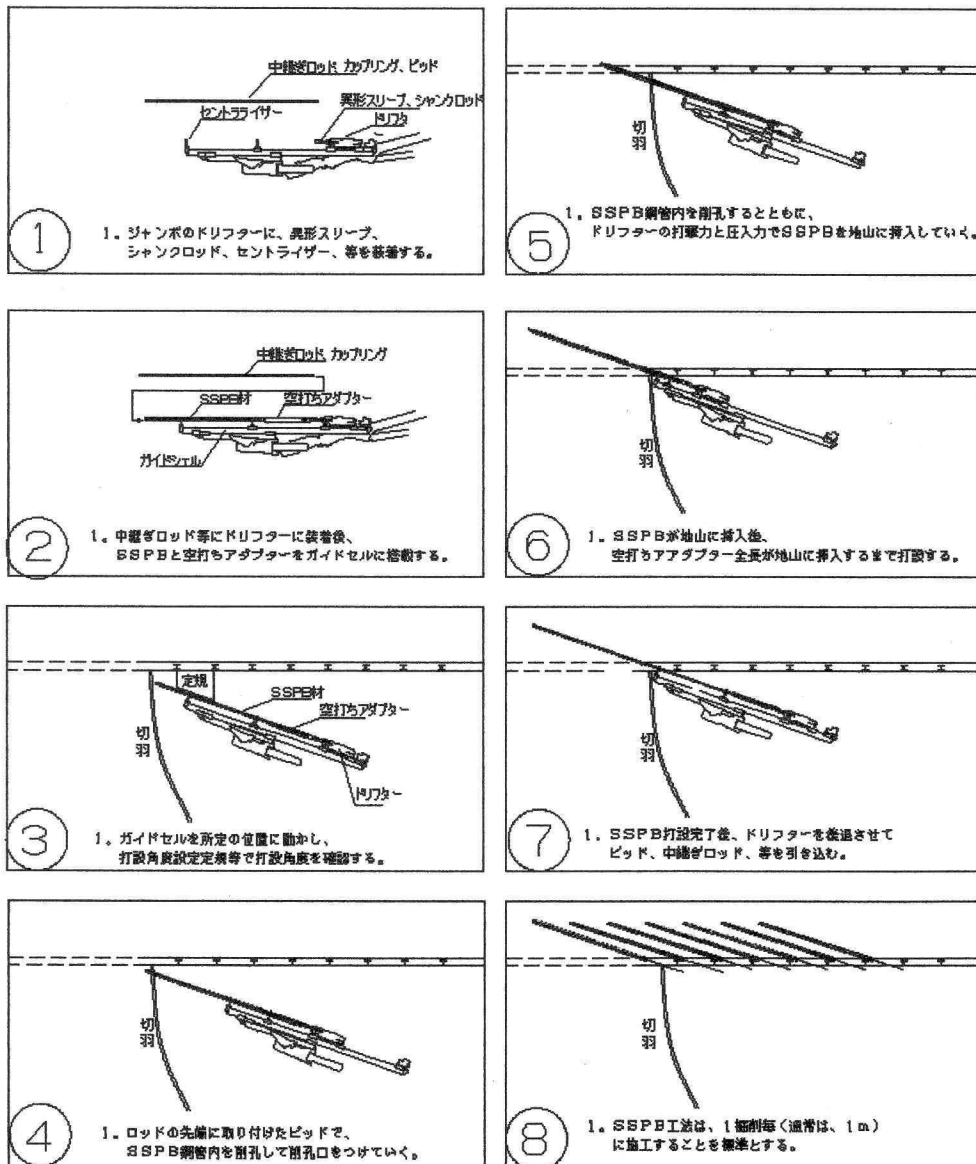


図-6 鋼管鋼矢板圧入打撃工法施工手順図

6. 鋼管鋼矢板圧入打撃工法の効果発生メカニズムの分析

(1) 分析方法

三次元有限要素法解析を用いて、軽量鋼矢板付き鋼管の作用効果に関する分析を行う。

a) 軽量鋼矢板付き鋼管の形状効果

軽量鋼矢板付き鋼管の最大の特徴は鋼管に軽量鋼矢板のウィングが付いていると云うことであり、土砂地山で先受け鋼管では防げない鋼管間の地山の抜け落ちを防止する効果が期待できる。

図-7は、先受け鋼管に鋼矢板のウィングが付いた場合（鋼管鋼矢板圧入打撃工法のモデル）と付かない場合（鋼管のみによるモデル）の差異を確認すべく行った三次元弾性解析モデルである。

モデル幅は実際の軽量鋼矢板付き鋼管打設ピッチと同じ0.5mとした。

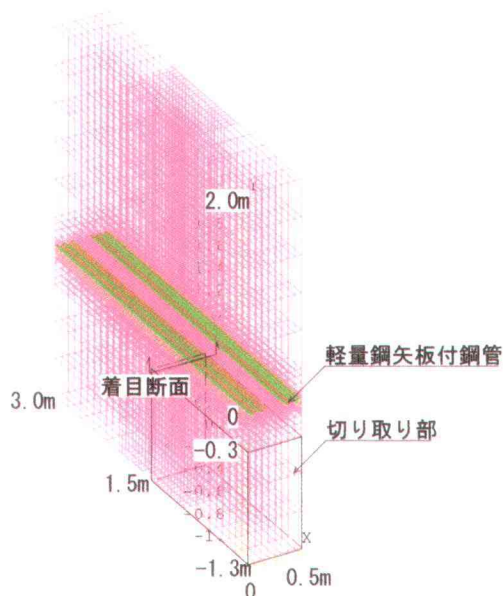


図-7 軽量鋼矢板付き鋼管の形状効果評価モデル

軽量鋼矢板付き鋼管は、実際に用いている断面とし、鋼管のみのモデルは、軽量鋼矢板付き鋼管と同等の曲げ剛性になるよう、鋼管厚さを割り増している。

地山モデルは、変形係数 $E=10\text{MPa}$ 、 $\nu=0.4$ の単一粘性土地山を想定し、ここでは、図中の黒く囲った部分を切り取った場合の鋼管間の地山安全率を比較した。

掘削面直前のモール・クーロンの破壊条件に基づく安全率分布を、図-8に示す。

軽量鋼矢板の効果を明確にするため安全率は定性的に表現しているが、鋼管のみの場合は、安全率の高い領域が鋼管の近傍にわずかに発生するものの、鋼管の間は一律な安全率となっており、改良効果が局所的であることを示している。

一方、軽量鋼矢板付き鋼管の場合は、鋼矢板間地山の上

部にアーチ状に安全率の低い領域が形成されるのみで全体に安全率が上昇していることが判る。すなわち、鋼矢板端部を支点とする地山アーチが形成されることを示している。鋼矢板の下は逆に安全率が低くなり、矢板の高さまで部分的な崩落の可能性を示しているが、この地山アーチによって崩落が上部にまで拡大しないことが解析から示されている。

実際の施工では各切羽で施工される軽量鋼矢板付き鋼管が重層しており、さらに図-6⑧にあるように切羽から1m奥まで打ち込んでいることから、切羽掘削時の崩落は局部的なものに限定できることが推測できる。

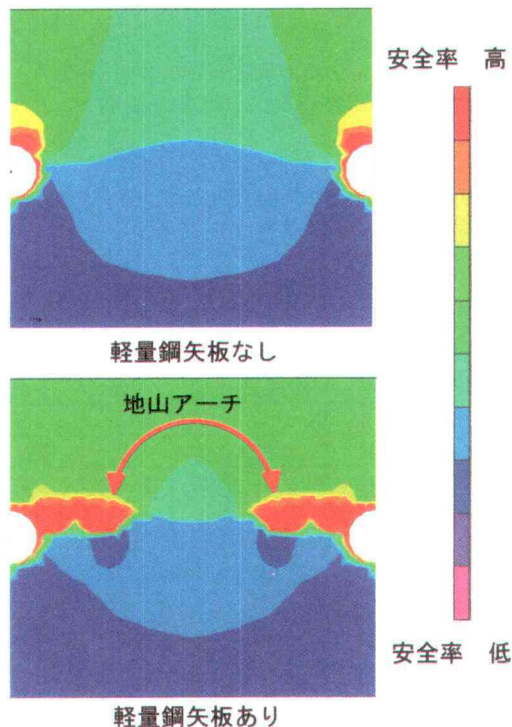


図-8 先受け鋼管間の地山安全率分布

b) 鋼管鋼矢板圧入打撃工法の地山改良効果

三次元有限要素法線形解析を用いて、鋼管鋼矢板圧入打撃工法の地山改良効果に関する分析を行う。

解析モデルは、本工法を採用した直後の622km410m付近を想定し、地質縦断面図に基づき僅かしか分布しないtc層は考慮せずトンネル部分は一律なts層とした。

軽量鋼矢板付き鋼管は、a)で述べた効果は表現できないが、モデル化の関係で鋼矢板を考慮した断面積、曲げ剛性を持った梁部材とした。

一次支保は、同じくモデル化の関係で吹付けコンクリートのみをシェル要素として定義した。

三次元モデルを、図-9に示す。

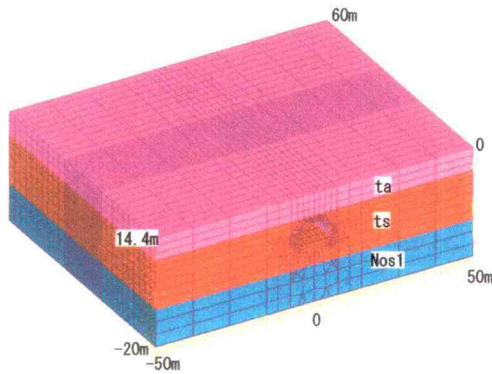


図-9 三次元有限要素法線形解析モデル
(節点数:23,500, 要素数:24,500)

入力地山物性値は、東北幹、牛鍵T他1工事(観測井設置C)地質調査報告書^⑧の結果を基に、表-1のように設定した。また、支保の物性は表-2のように設定した。

表-1 地山入力物性値

名称			ta	ts	Nos1
変形係数	E	MPa	2.4	26	50
単位体積重量	γ	MN/m ³	0.016	0.018	0.019
ポアソン比	ν		0.35	0.35	0.35
粘着力	C	MPa	0.045	0.045	0.060
内部摩擦角	ϕ	°	0.01	30	35

表-2 支保要素入力物性値

名称			吹付けコンクリート
弾性係数	E	MPa	3,400
ポアソン比	ν		0.3
厚さ	t	m	0.2
名称			SSPB
弾性係数	E	MPa	210,000
ポアソン比	ν		0.3
断面積	A	m ²	0.0015
断面二次モーメント	I	m ⁴	7.46×10^{-7}

側圧係数 K_0 は、土被りが浅いことを考慮し、NATM設計施工指針^⑧の考え方に準拠して $K_0 = 0.4$ とした。

あらかじめこの側圧係数になるようなポアソン比を用いて初期応力解析を行い、各解析モデルに初期応力として与えた。

解析ステップは、モデル中央断面まで一度で掘削し、その後は実際の施工と同様、

- 切羽より1m奥から3mの軽量鋼矢板付き鋼管打設
 - 上段・中段一基(進行長1m)掘削(図-4参照)
 - 一次支保・サイドパイル打設
- を2サイクル繰り返し、さらにi) ii)を行った。

今回は先受け工に関する分析のため、掘削は中段までとしている。

解析ステップの一部を図-10に示す。

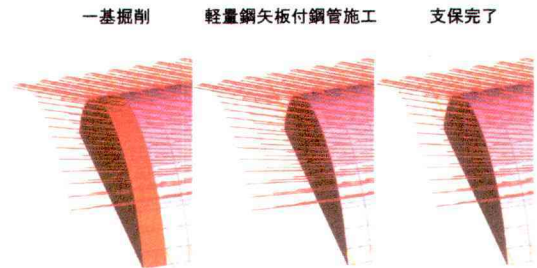


図-10 施工ステップ

三次元解析は、軽量鋼矢板付き鋼管の無い場合と、ある場合の二通りで実施した。

(2) 評価

解析結果のうち、切羽縦断面のモール・クーロンの破壊条件に基づく安全率分布を、図-11、図-12に示す。

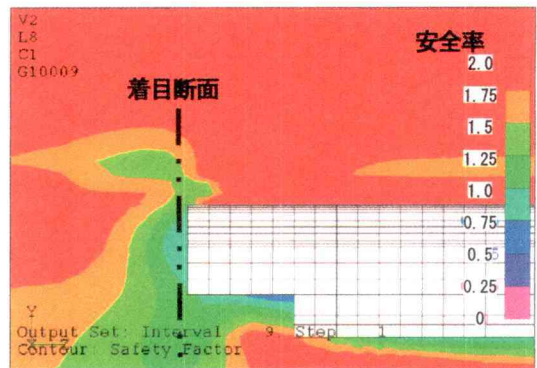


図-11 トンネルCL断面安全率分布
(軽量鋼矢板付き鋼管なし)

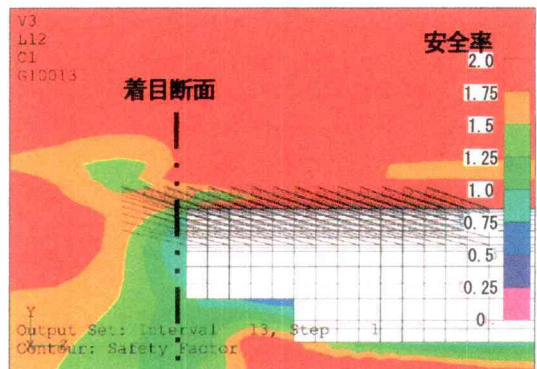


図-12 トンネルCL断面安全率分布
(軽量鋼矢板付き鋼管あり)

切羽直上における安全率は、図-11 に示す軽量鋼矢板付き鋼管を設置しない場合に比べて、軽量鋼矢板付き鋼管を設置した図-12 に示すように、1.5 以上に向上した領域が形成されており、切羽直上地山の安定性が明らかに向上していることが判る。

なお、図-12 に示す切羽面から後方の天端地山における安全率は、図-11 に比して掘削直後の天端地山安全率が低下している。この要因は、軽量鋼矢板付き鋼管によって縦断方向の応力集中が前後に分散されたためと考えられ、一次支保が施工されている時点であることからトンネル天端の安定性には影響ないと考えられる。

軽量鋼矢板付き鋼管による改良効果を横断面で表現するため、図-13 は、切羽前方 0.5m 断面における安全率分布を比較したものであるが、軽量鋼矢板付き鋼管を施工することによって、天端 120° の範囲に安全率の高いシェル状の改良領域が形成されていることが判る。さらに、改良域の内圧効果によって直上地山の安全率も向上している。

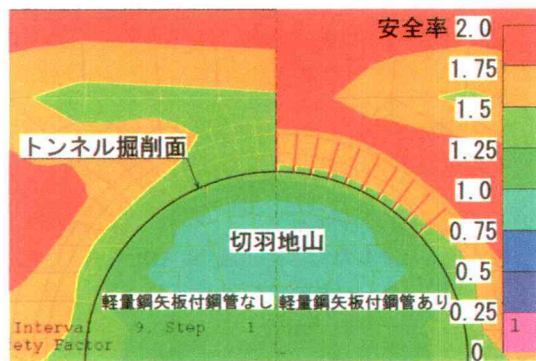


図-13 切羽 0.5m 前方断面安全率分布比較

次に、切羽安定の目安となる、縦断方向せん断ひずみ (γ_{yz}) 分布を図-14、図-15 に示す。

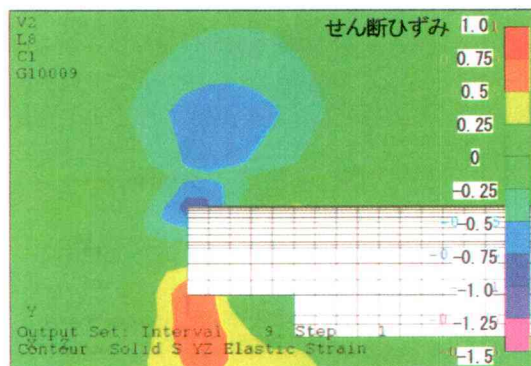


図-14 トンネル C-L 断面せん断ひずみ分布 (軽量鋼矢板付き鋼管なし 単位: %)

せん断ひずみ分布を見ると、天端上のせん断ひずみは減少しているが、切羽面に発生するせん断ひずみの最大値

は軽量鋼矢板付き鋼管の有無によって変化していない。これは、これまで発表されているように⁹⁾、トンネル天端地山への先受け工は切羽の押し出し対策としてはあまり効果が現れないことを示しており、切羽の押し出しが懸念される場合は鏡止め工を併用する必要があることがわかる。

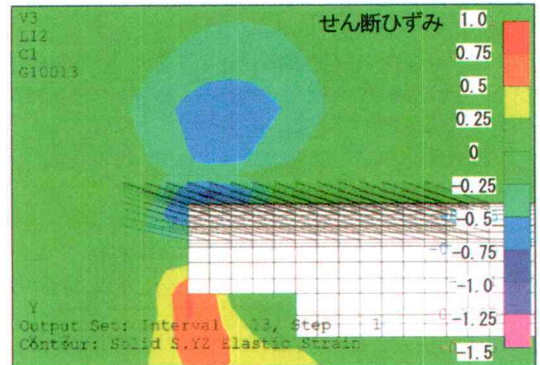


図-15 トンネル C-L 断面せん断ひずみ分布 (軽量鋼矢板付き鋼管あり 単位: %)

なお、これら縦断図を見ると、軽量鋼矢板付き鋼管を施工することによって、せん断ひずみの極端に大きい部分が小さくなっており、ひずみのピークが軽量鋼矢板付き鋼管によってその前後に分散されて天端の安定が保たれている。

軽量鋼矢板付き鋼管に発生する軸力、曲げモーメント分布を、図-16、図-17 に示す。

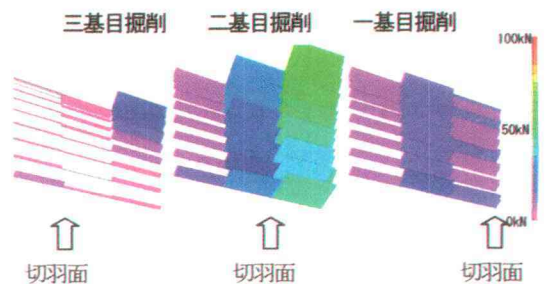


図-16 軽量鋼矢板付き鋼管軸力分布変化

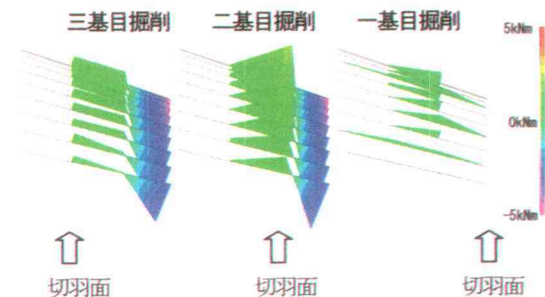


図-17 軽量鋼矢板付き鋼管曲げモーメント分布変化

一基（軽量鋼矢板付き鋼管打設後一基目）掘削時は、切羽が軽量鋼矢板付き鋼管の口元に到達した時であり、切羽方向に引っ張られて軸力が発生している。

二基（軽量鋼矢板付き鋼管打設後二基目）掘削時は、直下の掘削となり、口元から1m間の軸力が最大70kN程度と大きくになっている。曲げモーメントは、中央付近では上に凸の、口元付近では一次支保の支持によって逆に下に凸の極性となっている。

三基（軽量鋼矢板付き鋼管打設後三基目）掘削時は、直下の一次支保が施工されることから、その内圧効果によって断面力は減少している。

天端の断面力が相対的に大きくなっているのは、側圧係数が小さいためと考えられる。

これらの図を見ると、先端の2m～3mには軸力・曲げモーメントとも殆ど発生していないことが判る。これは、1m掘進する毎に下層に新たな軽量鋼矢板付き鋼管が施工されるためいわゆる定着部として働いていることを示すものである。このことと、先のせん断ひずみ分布からも、鋼管鋼矢板圧入打撃工法のような天端地山に対する先受け工は、より脆弱な地山における切羽せん断ひずみの低減効果は低いことから、軽量鋼矢板付き鋼管の打設長を長くするよりもリング補強等の切羽前方地山自体の補強工の採用が望ましいことが判る。

7. 鋼管鋼矢板圧入打撃工法施工区間の計測結果

(1) 計測の概要

鋼管鋼矢板圧入打撃工法の妥当性を評価するために、図-18に示すB計測を実施した。

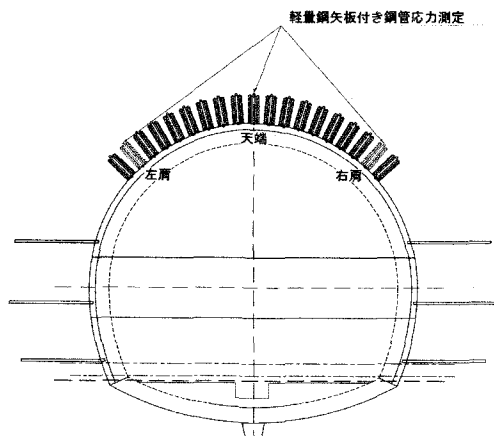


図-18 計測断面図 (622km413m)

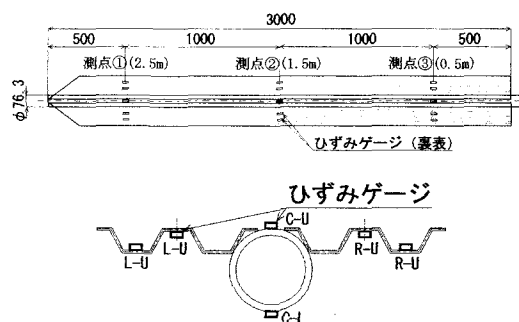


図-19 軽量鋼矢板付き鋼管ひずみ計

本計測断面付近の切羽に出現した地質は、切羽上部に厚さ1m程度のtc層であるN値=5程度の有機質シルト、その下位にN値=20程度のts層である砂層が厚く分布していた。

切羽状態は、鋼管鋼矢板圧入打撃工法の効果により上半切羽の自立性はよいが、軽量鋼矢板付き鋼管施工部以下の側壁部については部分的な崩落が見られた。また、tc層とts層との層境には、滲み程度の湧水があるものの流砂現象は見られなかった。

軽量鋼矢板付き鋼管応力は、打設後六基目掘削までは3時間毎に、その後は1回/1日の頻度で測定した。

(2) 計測結果および分析

応力変化の最も大きかった天端軽量鋼矢板付き鋼管（測点 C-U, C-L）の応力・軸力・曲げモーメント経時変化を、図-20～図-22に示す。

打撃時の衝撃に対応する仕様や円滑施工が可能な形状等により決定している軽量鋼矢板付き鋼管は、許容応力である $\sigma_{sa}=140\text{N/mm}^2$ を下回る発生応力（最大 80N/mm^2 程度）であり、健全性が十分に確保されていると考える。

さらに、切羽の進行に合わせた軸力及び曲げモーメント分布の変化を、図-23、図-24に示す。

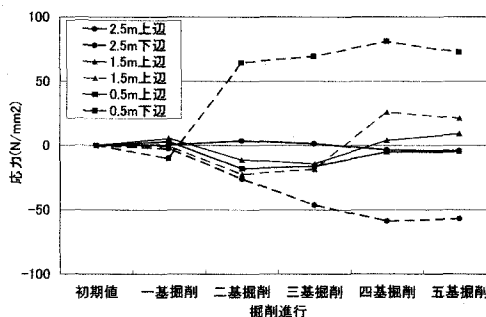


図-20 軽量鋼矢板付き鋼管の応力変化

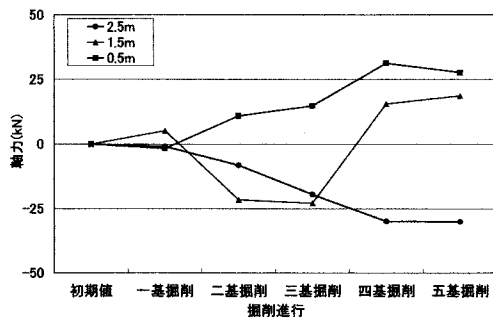


図-21 軽量鋼矢板付き鋼管の軸力変化

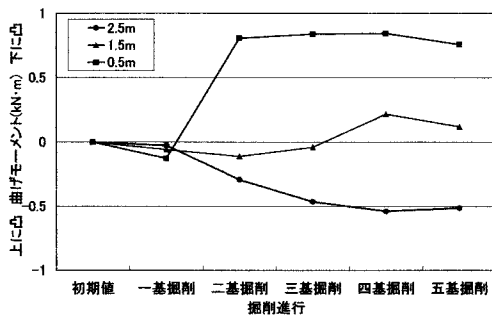


図-22 軽量鋼矢板付き鋼管の曲げモーメント変化

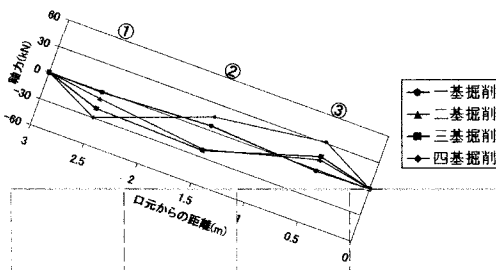


図-23 軽量鋼矢板付き鋼管の軸力分布

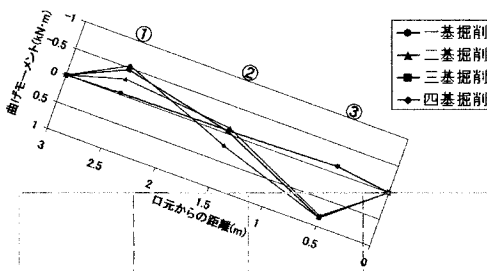


図-24 軽量鋼矢板付き鋼管の曲げモーメント分布

一基（軽量鋼矢板付き鋼管打設後一基目）掘削した時点では、大きな変化は見られない。二基（軽量鋼矢板付き

鋼管打設後二基目）掘削時に軸力が若干増加し、手前側が内空側に凸の、先端付近が地山側に凸のモーメントが発生している。三基（軽量鋼矢板付き鋼管打設後三基目）掘削時には殆ど変化していないが、四基掘削時に軸力が増加している。

これらの傾向は、解析結果に比べ、

- ・三基掘削以降もモーメントの増加が見られるなど、変化時期が想定よりも遅れている。
- ・先端付近にも地山側に凸のモーメントが発生し、仮想定着部が想定よりも奥になっている。
- ・軸力と比べてモーメントが小さい。

等の違いが見られる。

全体的な挙動はほぼ合っているが、このような違いが出た原因としては、

- ①地山に粘性土分が含まれているため、応力解放による挙動発生に遅れが生じる。
 - ②弾性解析のため物性低下を考慮していないが、実際には地山のゆるみ等による強度劣化が生じ、影響範囲が大きくなった。
 - ③実施工では解析上考慮していない側壁部サイドパイルによって低減されているものの、一次支保の脚部沈下が大きいと、軽量鋼矢板付き鋼管口元の沈下が拘束されていない。
- 等が考えられる。

7. まとめ

三次元有限要素法解析を用いた鋼管鋼矢板圧入打撃工法の作用効果の分析結果を整理すると以下のようになる。

- ①鋼管鋼矢板圧入打撃工法の特徴であるウィング間に地山アーチが形成されることが、先受け鋼管間の地山安全率分布から確認され、本工法の形状効果が裏付けられた。
- ②切羽天端周辺に安全率の高いゾーンが分布することから、本工法の切羽周辺に対する地山改良効果が確認された。
- ③切羽面のせん断ひずみ分布によると、鋼管鋼矢板圧入打撃工法の切羽押え効果はあまり期待できず、地山状況に応じて鏡ボルトが必要となる。
- ④軽量鋼矢板付き鋼管の軸力・曲げモーメント分布から先端の2m～3m間には大きな応力の発生はなく、定着部として機能していることがわかる。

また、鋼管鋼矢板圧入打撃工法の実施工の計測結果から次のことが明らかになった。

- ①軽量鋼矢板付き鋼管に発生する応力は最大 80N/mm²程度であり、有効に機能していると同時に鋼材の健全性は確保されていると考えられる。
- ②凸の曲げモーメントが解析結果よりも先端付近に発生していることから、軽量鋼矢板付き鋼管長さは少なくとも3mは必要と判断される。

以上のことから鋼管鋼矢板圧入打撃工法は、低土被り

で未固結な土砂トンネルにおいて、経済的に切羽直上先端地山を安定させるには良い工法であると考えられる。

参考文献

- 1) 北川隆他:低土被り土砂地山における地山改良工法の検討, 土木学会構造工学論文集, Vol. 50A, 2004 年 3 月
- 2) ジェオフロンテ研究会:アンブレラ工法選定上の要点, 1996 年
- 3) 土木学会:トンネル・ライブラリー10 プレイニング工法, 2000 年 6 月
- 4) 田口善文他:逆T型プレイニングの形状及び補強効果に関する基礎的研究, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集, 第2巻, pp. 179-184, 1992 年 11 月
- 5) 田口善文他:プレイニングトンネルの補強効果に関する三次元模型実験, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集第4巻, pp. 371-376, 1994 年 11 月
- 6) 社団法人 日本トンネル技術協会:東北新幹線トンネルの設計施工の研究報告書, 2002 年 3 月
- 7) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構:東北幹, 牛鍵T 他 1 工事(観測井設置C)地質調査報告書, 2004 年 3 月
- 8) 日本鉄道建設公団:NATM 設計施工指針, 1996 年 3 月
- 9) 竹林亜夫他:切羽安定対策工に関する解析的考察, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集, 第 10 巻, pp. 2-8, 2000 年 11 月