

近接トンネル工事における 小口径中尺先受け工法の適用

野間 豊志¹・蛭子 清二²・中村 英樹³・石原 基嗣⁴

¹正会員 株式会社奥村組 名古屋支店土木部（〒431-1414 静岡県引佐郡三ヶ日町三ヶ日96）

²正会員 工博 株式会社奥村組 技術研究所（〒300-2612 茨城県つくば市大字大砂387）

³正会員 株式会社奥村組 技術開発部（〒108-8381 東京都港区芝5丁目6番1号）

⁴正会員 日本道路公団 東北支社 山形工事事務所（〒990-2226 山形県山形市西越42-2）

山岳トンネル工事の新しい切羽安定化補助工法として、鋼管注入式小口径中尺先受け工法（MS先受け工法：Multi-Stage forepiling method）を開発した。注入による切羽周辺地山の強度変形特性の向上と鋼管に誘起される圧縮軸力によって地山が支持されるとする考え方が特徴であり、これから鋼管径の縮小と短尺化を実現した。ここでは、本工法のハード面の特徴を中心に紹介するとともに、近接トンネル工事の脆弱区間に本工法を適用した際の性能を示す。

キーワード：山岳トンネル, 切羽安定化, 補助工法, 鋼管注入式先受け工法

1. はじめに

最近の山岳トンネル工事では、急速施工によるコストダウンを目的に、大型で高性能な掘削機械、運搬機械が導入される。大型の機械が効率的に動作するために、掘削断面積も全断面や上下半2分割掘削などと大きくなる。切羽の大型化とその形状の偏平化が伴われることになり、従来断面の掘削方法に比較して切羽は相対的に不安定な状態となる。したがって、このデメリットを上回る切羽安定化補助工法のニーズが生じてきた。ここで、工期短縮が狙いであるから、施工サイクルに及ぼす影響の少ない切羽安定化対策が要求される。それらの中で、トンネル先受け工法の一つである鋼管注入式フォアパイリング、いわゆるAGF工法¹⁾の適用が増大し、数多くの実績が積み重ねられている。同工法では、切羽前方地山のトンネル軸方向に放射状に有孔の鋼管が打設され、鋼管の内部から周辺の地山に注入が行われる。

多くの実績が積み重ねたとは言え、この工法にもいくつかの弱点や改善の余地が見出された。それらの解決には、小口径中尺先受け工法が有効であるとの認識が現場の試行実績から得られ、新しい先受け工法としての開発に取り組んだ。ここでは、小口径中尺先受け工法（MS先受け工法：Multi-Stage forepiling method）におけるハード面の特徴を中心に紹介する

とともに、山形自動車道青野トンネル工事の脆弱地山区間に本工法を適用した際の性能を示す。

2. 開発の経緯

(1) 長尺方式の課題

AGF工法の実態調査によると²⁾、鋼管長：12.5 m、縦断方向鋼管打設角度：5～10°、横断方向鋼管打設間隔：45 cm、縦断方向鋼管打設間隔：9 mとした長尺方式が多く採用されており、鋼管配置の標準パターンとされている。これを図-1に示す。標準パターンを採用すると、鋼管打設後の9 m区間は補助工法なしの通常掘削が可能となり、好都合である。しかし、長尺方式の施工面には次のような点に改善の余地が考えられた。

- ① トンネル断面の拡幅が必要とされ、施工が複雑になるとともに、断面の拡幅が切羽の安定化に悪影響を及ぼすと考えられる
- ② 切羽前方の地山状態が変化する場合に支保増減の自由度が小さい
- ③ 削孔用の拡張ビット、リングビットや鋼管が特注品であり、それらの材料費が高価である³⁾

一方、設計については、鋼管の曲げ剛性によって、上方からのゆるみ荷重が支持されるとする梁構造モ

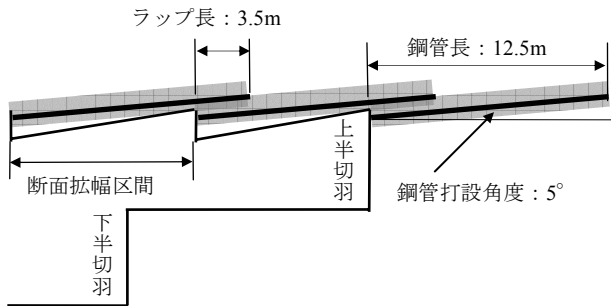


図-1 長尺方式の標準的な鋼管配置

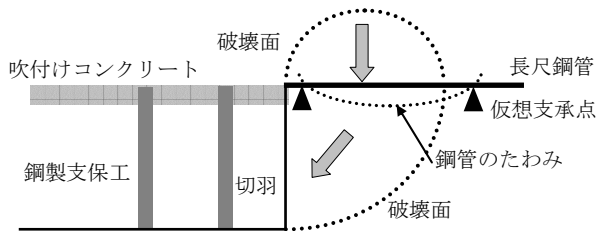


図-2 梁構造モデルの模式図

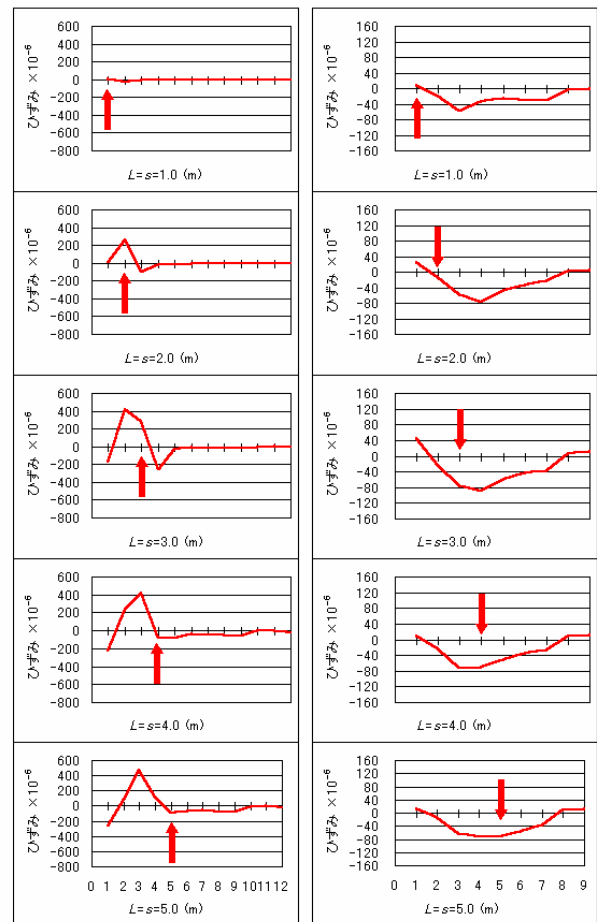
デルが簡易設計法として多く採用されている。これを図-2 に示す。同図のモデルでは、鋼管が切羽近くの 2 箇所、の仮想支承点から支持される見かけの梁構造を形成して、切羽進行に伴いこの構造が前進するとした考え方である^{4)~8)}。上方からの荷重を曲げ剛性から支持するために、鋼管の打設方向はできるだけトンネル軸と平行な方向が好ましく、打設位置で断面が拡幅される。切羽の前方に適当な破壊面⁹⁾が決められ、鋼管上方の経験的なゆるみ領域¹⁰⁾と連絡して破壊領域が設定される。切羽前方の仮想支承点がこの領域の外側に来るように、鋼管の長さが決められ、破壊領域の重量を支持するために必要な鋼管の曲げ剛性から、鋼管断面の設計が行われる。この考え方は、破壊に対する力の釣合いから導かれており、単純で理解が容易であるが、

④ トンネルの施工管理に際して最も重要となる変位を考慮できないことに課題が残る。

(2) 長尺鋼管の挙動分析

長尺鋼管軸方向のひずみ計測から、曲げモーメントに比例する差ひずみと軸力に比例する軸ひずみを推定した。切羽進行に伴う差ひずみおよび軸ひずみ分布の一例を図-3 に示す。差ひずみのマイナス符号はトンネル内空側へのたわみ、軸ひずみのマイナス符号は圧縮である。また、図中の矢印は切羽位置である。

差ひずみ分布を見ると、図-2 に示した見かけ梁構造が切羽前方に順次に形成される様子は認められ



(a) 差ひずみ

(b) 軸ひずみ

図-3 長尺方式鋼管のひずみ計測結果

ず、切羽後方位置に鋼管が地山側にたわむモーメントが生じている。

一方、軸ひずみ分布の場合には、鋼管のほぼ全長に渡って圧縮ひずみが生じる分布形が見出された。また、最大圧縮ひずみから軸力を推定すると約 60 kN になり、曲げモーメントから想像される荷重よりも大きな荷重が支持されていた。このことから、圧縮軸力に期待する設計の可能性が示唆された。

(3) 小口径中尺方式の発想

(1)の①~④に示した課題を解決するために、鋼管長：5.5 m、トンネル縦断方向鋼管打設角度：20°~25°、縦断方向鋼管打設間隔：1 切羽進行長の倍数、とした中尺先受け方式の発想が浮上してきた。この方式の鋼管打設パターンを図-4 に示す。長尺方式と異なり、先受け長さが半分程度で縦断方向鋼管打設角度は大きくなる。しかし、トンネル断面の拡幅が必要でない点と、地山条件に応じて鋼管の打設間隔を容易に変更できる点、特に、地山が悪質な場合にトンネル縦横断方向に鋼管を多層に配置でき、変位の抑制を期待する点が特徴である。工法名の

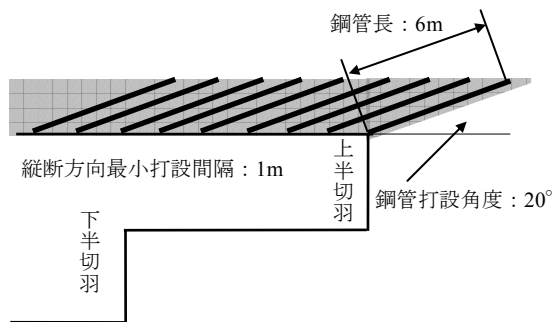


図-4 中尺方式の標準的な鋼管配置

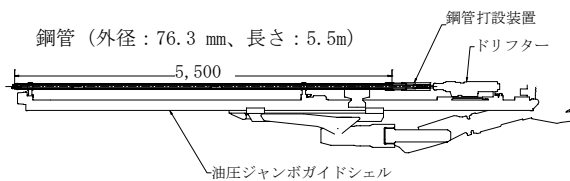


図-5 鋼管打設システム

Multi-Stage はこれに由来している。

現場で試行した従来鋼管径の中尺方式においても、鋼管の挙動計測を行った。それらの結果でも、鋼管には圧縮の軸力が支配的に発生しており、鋼管の軸方向垂直剛性から地山が支持されると解釈した^{11)~14)}。この事実から、中尺方式では鋼管径の縮小化が可能と判断した。外径：76.3 mm、肉厚：4.2 mm の規格品の鋼管を使用すると、垂直剛性は長尺方式（外径：114.3 mm、肉厚：6.0 mm）の鋼管の 70 % を確保できる。この鋼管を打設できる装置の開発から材料費の低減を目指すとともに、鋼管軸方向の垂直剛性に期待する設計法の確立を進めた。

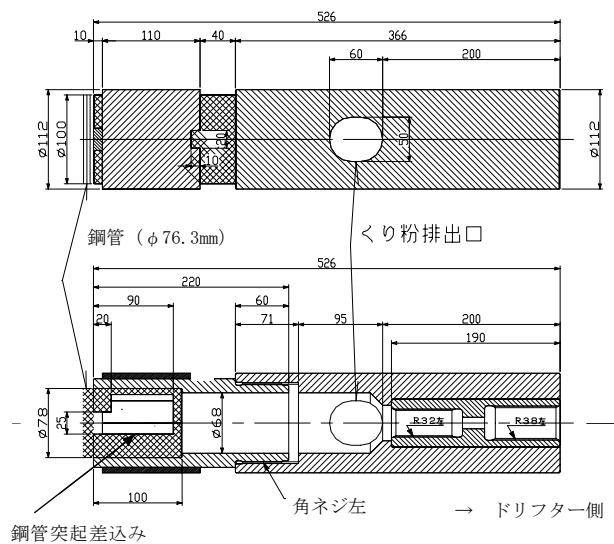
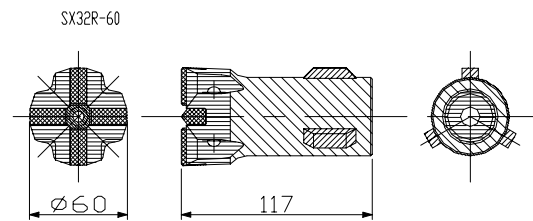
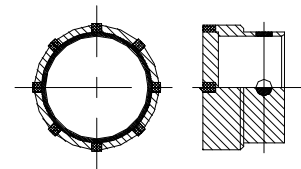


図-6 鋼管打設装置



(a) インナービット（市販のクロスビット）



(b) アウタービット

図-7 ビットの構造

3. 小口径中尺方式のハードウェア¹⁵⁾

(1) 小口径鋼管打設システム

鋼管の削孔には、一般に、拡張ビットが用いられる。しかし、この方法を踏襲して小口径の拡張ビットを作成すると、コストダウン効果が見込まれない。そこで、鋼管の内空側は規格品の削岩ビットで掘削し、鋼管の肉厚分は鋼管先端にアウタービットを接合して削孔することにした。

小口径鋼管打設システムの全体構造を図-5 に示す。同システムは、鋼管打設装置、鋼管、インナービットおよびロッドから構成される。鋼管打設装置は、ドリフターからの打撃力、回転力および推力を鋼管とロッドに同時に伝えるもので、その構造は図-6

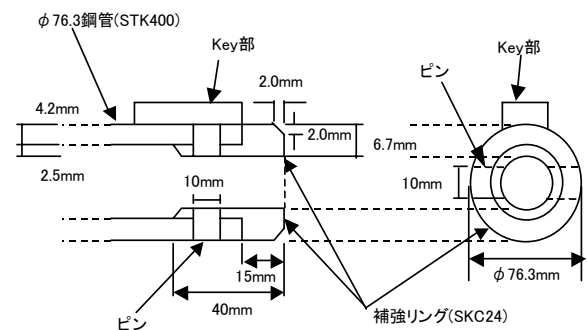


図-8 鋼管後端部の構造

のようである。同装置の鋼管側には、鋼管後端部に設けた突起（キー部）を差込むだけで固定できる矩形のキー溝を設け、鋼管の着脱が簡単にできるよう

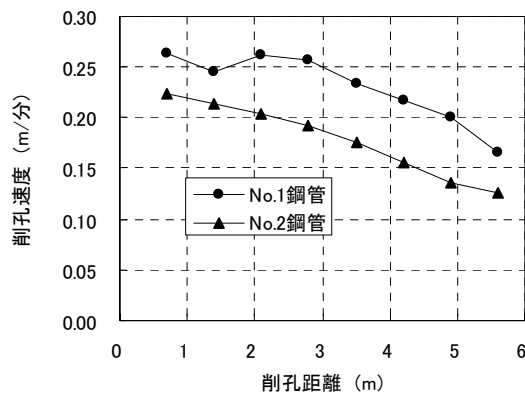


図-9 花崗岩の削孔実験結果

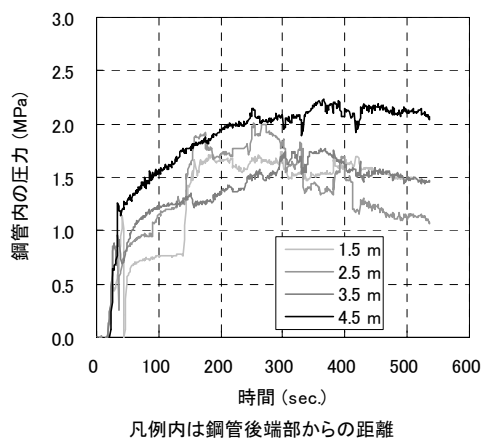


図-10 鋼管内部圧力の経時変化
凡例内は鋼管後端部からの距離

に工夫した。

鋼管は 5.5 m の規格品に簡単な加工を施して製作した。鋼管の先端には図-7(b)に示す超硬チップを溶接したアウタービットを接続・固定した。後端部には、図-8に示す補強リングを付加した。

(2) 削孔の機構と性能

軟質な地山であっても、切羽前方に硬質な岩塊などの削孔に不具合が生じる状況が予想外に現れることは、現場で良く経験されることである。このような地質状況に遭遇しても、多少の時間をかければ削孔できる性能が必要であり、先受け工法の種類を選定する際の重要な判断要因となる。

小口径中尺方式の削孔は、図-7に示した2種類のビットを近い位置で併用する点と、鋼管にドリフターからの外力の伝達を負担させる点が機構上の特徴である。また、材質に関しては、規格品の鋼管が他の構造材料に比較して軟質である。これらのことから、次の課題が生じてきた。

①アウタービットとインナービットの鋼管軸方向

の最適な離隔距離

②鋼管の補強方法

①に関しては、2種類のビットを同時に打撃することで、性能の劣るアウタービットの負担が低減されることを期待している。2つのビットを同じ位置に配置すれば、くり粉の排出が十分に行われずに、削孔性能が極端に低下することが経験的に知られていた。そこで、2つのビットの離隔距離が3 cmと6 cmの場合について、削孔実験を行った。その結果によると、離隔距離が6 cmの場合には、アウタービットの負担が大きくなり、削孔速度が極端に低下した。一方、離隔距離が3 cmの場合には、削岩対象の硬軟にかかわらずに、くり粉の排出と削岩性能に問題はなく、この離隔距離を採用することにした。

②の鋼管に関しては、構成要素の材質強度が打設装置：686 MPa、鋼管：400 MPaであり、鋼管がシステムの中で一番弱い要素となる。開発初期の段階には、打撃による応力集中が卓越する鋼管後端部と鋼管最先端部および超硬チップ周囲の鋼材に塑性変形が生じた。その結果、打設後の鋼管の取外しやインナービットの回収に不具合が現れた。これらを解決するために、後端部には図-8に示した内巻の補強リングを追加し、断面積を大きくして応力集中の緩和を図るとともに、補強リング外周部にテーパをつけて打撃による塑性変形が鋼管断面の外側に進展しないように工夫した。一方、先端部には鋼管よりも材質の強度が大きな鋼材で製作したリング形状のアウタービット（図-7(b)参照）を接続し、塑性変形の緩和を図った。

構造決定の最終段階の時期に、亀裂のない花崗岩ブロック（一軸圧縮強度 $S_c=160$ MPa）を現場で遭遇する硬質な岩塊と想定し、削孔性能を実機の実験から調査した。図-9は、鋼管2本分の削孔速度と削孔距離の関係である。削孔距離が大きくなると速度が低下したが、鋼管の全長分はトラブルなく削孔できた。また、インナービットを交換せずに使用したので、2本目の鋼管の削孔速度は1本目に比べて低下した。

(3) 注入システム

注入システムの内、注入ポンプから鋼管後端の注入ホース接続部までの構造は、一般的な鋼管注入方式の場合と同じである。

鋼管内部については、簡単な実験を行い、構造に工夫を加えた。先端を密閉した吐出口のない中尺鋼管の中で樹脂系注入材を3倍発泡させ、鋼管内部の圧力と温度を測定した。圧力の経時変化を図-10に

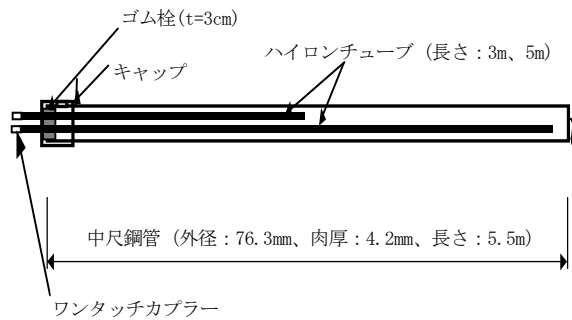


図-11 注入システムの構造（鋼管内部）

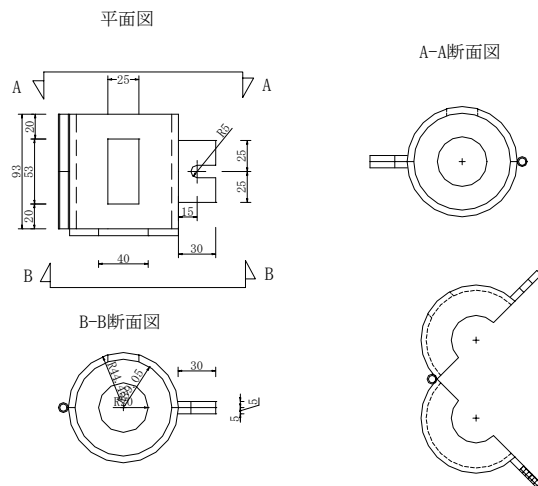


図-12 鋼製キャップの構造

示す。最大圧力：2.3 MPa、最高温度：110℃の測定結果が得られた。これらの値は、樹脂系注入で鋼管内部に生じる圧力と温度の上限値として、構造設計に利用できる。以上の結果を踏まえ、耐圧性能のある注入ホースのみを用いて図-11 に示す構造を採用した。

(2)で述べたように、小口径鋼管の後端部には打撃力が加えられ、ある程度の塑性変形の発生が避けられない。このため、後端部の断面が真円でない場合も想定したキャッピング方法が必要になった。試行錯誤を繰り返したのち、図-11 に示した円柱形状のゴム栓を円筒形状の鋼製キャップで固定する方法を採用した。また、ゴム栓を鋼管後端部に固定する鋼製キャップの構造を図-12 に示す。鋼製キャップは4 MPa以上の耐圧性能を有し、転用が可能である。

4. 小口径中尺方式のソフトウェア

先受け鋼管の挙動計測から、鋼管に圧縮ひずみが生じることを見出した。そのメカニズムは、切羽

表-1 青野トンネルの概要

トンネル延長	545 m
道路幅員	3.5 m
縦断勾配	2.42 %
最小半径	800 m
掘削断面積	77.3～81.9 m ²
掘削工法	上半先進ベンチカット
掘削方式	機械掘削タイヤ方式

表-2 脆弱地山区間の物性

	流紋岩	粘土層	凝灰岩
変形係数 (MPa)	125	75.5	130
粘着力 (MPa)	0.16	0.32	0.20
内部摩擦角 (°)	30	9.5	22.5

位置の地山が切羽進行に伴いトンネル軸方向に圧縮されることにありと解釈し、先受け工法の効果が鋼管と注入材による地山補強から発揮されると推定した。これを基に、地山補強効果を等価弾性係数で評価し、円形トンネル解析解と初期地圧解放曲線を組合わせた簡易設計法を提案した¹⁶⁾。トンネル縦断方向任意位置の変位を算出できる点、また、鋼管配置の変更を容易に検討できる点が最も大きな特徴である。また、切羽の安定性は、壁面変位から算出する周方向ひずみと限界ひずみの比較から行う。詳細は文献16)を参照されたい。

5. 近接トンネル工事における小口径中尺先受け工法の適応性^{17), 18)}

山形自動車道青野トンネル工事は、Ⅱ期線の新設である。このトンネルは、Ⅰ、Ⅱ期線間の離隔距離が小さな近接施工であり、供用中の既設トンネルへの影響低減が最重要の課題であった。同トンネルの概要を表-1に示す。

(1) 地質の概要

地質は、主に新第三紀中新世の流紋岩質凝灰岩類と流紋岩から構成される。凝灰岩類は全体的に軟質であり、熱水変質作用および風化作用によって粘土化している区間が多い。特に、トンネル中央部（STA462 付近）は粘土化が著しく進んだ脆弱地山区間である。

脆弱地山区間の手前で切羽を停止し切羽前方の地質構造と物性を調査した。熱水変質を受けた粘土層は、上位の流紋岩および下位の凝灰岩に挟まれ、切

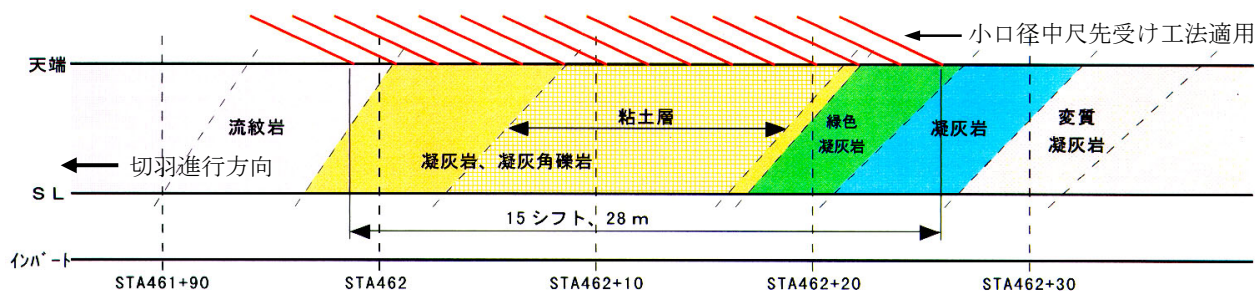


図-13 脆弱地山区間の地質縦断

表-3 既設トンネル覆工コンクリートに対する管理基準

管理レベル	引張応力増分 (MPa)	許容値に対する安全率
I	0.36	2.0 (許容値の 50%)
II	0.54	1.3 (許容値の 75%)
III	0.72	1.0 (許容値)

羽進行にともない上半左肩部から現れ、約 30 m の間に右下方に離れる。図-13 は脆弱地山区間の地質縦断である。また、種々の試験結果から想定した地山物性は表-2 のようになった。

(2) 管理基準と対策工

既設トンネルの覆工コンクリートにはひび割れが生じており、その健全度を A¹⁰⁾と判断した。また、トンネルの平均掘削幅は 11.6mであり、新旧トンネル間の離隔距離は 20 mである。これらに軟質地山の条件を加味すると、既設トンネルは新設トンネルの直接影響領域¹⁰⁾に含まれ、既設トンネルに対する影響予測と対策工の検討が必要となった。

既設トンネル覆工コンクリートの設計基準強度を 18 MPa、許容引張増分応力を 0.72 MPa とし、覆工コンクリートに対する管理基準を表-3 のように定めた。次に、脆弱地山区間を対象に有限要素法解析を行い、新設トンネルの坑壁変位と既設トンネル覆工の増分応力の関係を求めた。この関係から、新設トンネルの坑壁変位で表現した管理基準を表-4 のように定めた。同表には、予想変位と施工管理の目標にした管理レベル II に対する所要変位抑制比率も併記した。

対策工の選定は、表-4 に示した変位抑制比率を満足することを必要条件とし、次の条件を付加した。

表-4 新設トンネルの坑壁変位で表現した管理基準

STA	462+26	462+12	462+3	462+1	461+98
予想変位 (mm)	51.2	54.2	50.8	46.7	40.4
管理レベル I	25.9	23.2	25.5	26.4	27.6
管理レベル II	38.8	34.7	38.3	39.5	41.3
管理レベル III	51.7	46.3	51.0	52.7	55.1
レベル II に対する変位抑制比率 (%)	24.5	36.0	24.7	15.5	-

- ①変位の増長を招く断面拡幅が不要である
- ②切羽進行ごとの地質変化に迅速に対応できる
- ③粘土層を掘削するので施工速度が速い

上記の条件から、小口径中尺先受け工法を中心に据えた対策工を表-5 のように定めた。なお、注入材にはシリカレジンを用了。

(3) 適応性の評価

小口径中尺先受け工法を適用した脆弱地山区間とその前後の最終的な天端沈下の実測値および予想沈下量を表-6 に示す。流紋岩の場合には 15 mm 程度、風化変質の度合いがそれほど大きくない凝灰岩の場合には 20～30 mm 程度の天端沈下が予想された。また、有限要素法解析結果もあわせて判断すると、風化変質が著しく粘土化が進んだ脆弱区間では 38～46 mm の天端沈下が予想された。ここで、予想値は対策工がない場合の天端沈下である。

表-6 に示した STA462+17.8～STA461+97.8 の区間は、トンネル横断面において先受け鋼管が標準的な 3 段となる範囲に含まれる。この範囲以外では、実際の天端沈下と予測沈下量は概ね一致した。これに対し、先受け工法施工区間ではいずれも実測が予想

表-5 対策工

開始位置	終了位置	シフト数	対策工	変位抑制効果 (%)	地質との対応
STA462+26	STA462+24	2	小口径 中尺先受け	31	粘土層下部境界が切羽左上部に出現した時点で開始
STA462+22	STA461+98	16	ウィングリブ + 小口径 中尺先受け	37	粘土層下部境界が切羽左SLに達した時点でウィングリブ追加 粘土層上部境界が切羽から消えた時点で終了

表-6 天端沈下の予想値と実測値

STA	実測値 (mm)	予想沈下量 (mm)	実測／予想	岩 種
462+38.8	18.9	19	0.99	変質凝灰岩
462+28.8	30.3	27	1.12	凝灰岩, 緑色凝灰岩
462+17.8	20.3	38~46 (平均: 42)	0.48	凝灰岩, 凝灰角礫岩 STA462+10 を中心に粘土化 小口径中尺先受け工法適用
462+7.80	17.0		0.40	
461+97.8	15.4		0.37	
461+91.8	18.1	15	1.21	流紋岩
461+79.8	19.0	15	1.27	流紋岩

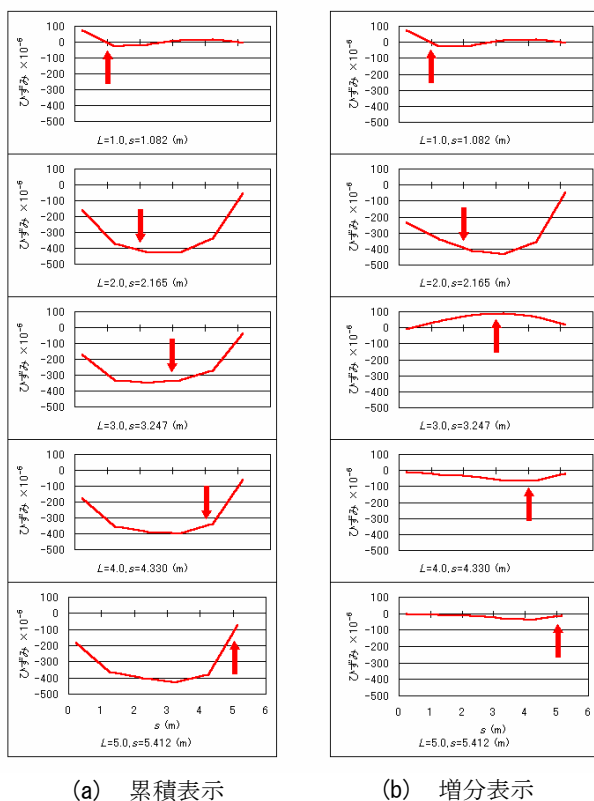


図-14 中尺鋼管の軸ひずみ計測結果

の半分以下であり、表-5 に示した以上の変位抑制効果が確認された。

図-14 は鋼管の軸ひずみ計測結果である。前掲の図-3 と同じ表示方法であるが、右側の(b)は1切羽進行ごとの増分で表した。同図(a)から、切羽位置に圧縮の軸力が大きく発生し、切羽後方でも鋼管がこの軸力を支持している様子が分かる。小口径鋼管の場合にも、2. (3)に述べた中尺方式の地山支持機構が確認された。また、同図の増分表示で見ると、最初の2切羽進行までに大きな軸力分担が終わっている。最も不安定になる切羽位置を厚く手当てできる中尺方式の特徴が現れたと解釈できる。

施工の実績からサイクルタイムとコストを把握できた。これを基に標準的な長尺方式とのコスト比較を試みた。ただし、同一性能の比較ではなく、両者ともに標準的な鋼管配置とし、切羽進行1 m当たりの注入量を同一とした。その結果、小口径中尺方式では、削孔時間の短縮が貢献して、長尺方式に比較して20 %のコストダウンが可能との試算が得られた。

6. まとめ

山岳トンネル工事の切羽安定化補助工法として多用されている鋼管注入式先受け工法に着目し、数多くの実績がある長尺方式の弱点を補える方法として、小口径中尺方式を開発した。その開発経緯について、ハードウェア技術を中心に紹介した。次に、変位の抑制が最重要の課題であった近接トンネル工事に本工法を適用した際の管理方法と結果を述べ、その性能とコストパフォーマンスが予想以上であったことを示した。

粘土質の脆弱地山に対する本工法の有利性が示された。しかし、切羽前方の先行変位が大きくてこれが切羽の安定性を左右するような地山条件では、やはり長尺方式が有利であると考えられる。両方式を組み合わせることによる性能の向上、あるいは、砂礫系脆弱地山に対する小口径中尺方式の性能については、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法分科会：アンブレラ工法選定上の要点(改訂版)，1999。
- 2) ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法分科会 AGF-WG 設計 SWG：注入式長尺先受け工法(AGF 工法) 実態調査に基づく設計パターン(案)―施工実態調査結果とその分析―，1997。
- 3) ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法分科AGF-WG：注入式長尺先受け工法(AGF工法)標準積算資料(案)改訂版，1997。
- 4) ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法分科AGF-WG：注入式長尺先受け工法(AGF工法)技術資料(三訂版)，1997。
- 5) 御手洗良夫，西間木朗：AGF 工法の簡易設計法に関する研究，土木学会第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.61～65，1996。
- 6) 青野宏，亀山寿仁，原田浩史，松田昭，青木俊彦：長尺先受け工法の設計，施工法に関する提案，土木学会トンネル工学研究論文・報告書，第 6 巻，pp.31～38，1996。
- 7) 亀野道夫，今井信二，小松敏彦，森田篤：計測結果からの長尺先受け工に関する一考察，土木学会トンネル工学研究論文・報告書，第 6 巻，pp.147～150，1996。
- 8) 佐々木武，多田哲夫，武内秀木，河上清和：注入式長尺先受け工法(AGF 工法)を適用したトンネルの地山挙動，五洋建設技術研究所年報，Vol.25，pp.1～6，1995。
- 9) 村山朔尾郎他：機械化シールドの掘進機能に関する土質力学的考察，第 1 回土質工学研究発表会，1966。
- 10) Terzaghi, K：Rock Defects and Loads on Tunnel Support, Rock Tunneling with Steel Supports, Commercial Shearing Co., Youngston, Ohio, 1946。
- 11) 蛭子清二，浜田修，井上昭治，斎藤敏明：AGF 工法の支保効果について―東山トンネルの分析例―，土木学会第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.144～148，1997。
- 12) 蛭子清二，浜田修，高橋信行，竹山信喜：AGF 工法における支保効果，奥村組技術研究年報 No.23，pp.19～24，1997。
- 13) 蛭子清二，浜田修，高橋信行，竹山信喜，斎藤敏明：トンネル先受け工法(中尺 AGF 工法)の地山支持機構について，第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.509～514，1998。
- 14) 蛭子清二，浜田修，高橋信行，高柳賢一，竹山信喜：山岳トンネル先受け工法(AGF工法)の地山支持機構：奥村組技術研究年報No.24，pp.31～35，1998。
- 15) 蛭子清二，阿久津秋秀，高橋信行，中村英樹，栗田猛志：小口径中尺先受け工法の開発，奥村組技術研究年報 No.26，pp.7～12，2000。
- 16) 蛭子清二，浅野剛，斎藤敏明：鋼管注入式トンネル先受け工法の簡易設計法の提案，第11回岩の力学国内シンポジウム，F12，2002。
- 17) 浅野剛，石原基嗣，清田康明，黒沢浩幸，蛭子清二：山岳トンネル近接施工における掘削管理，土木学会トンネル工学研究論文・報告集，第 10 巻，pp.153～158，2000。
- 18) 石原基嗣，清田康明，栗田猛志，川島優幸：情報化施工で既設トンネルへの影響を読む，トンネルと地下，Vol.32 No.7，pp.15～25，2001。
- 19) 日本道路公団編：設計要領第三集トンネル(1)トンネル本体工保全編（近接施工），1998。