

中尺鋼管による先受け工法の適用結果

EFFECT OF THE NEW FORE PILING METHOD WITH MIDDLE LENGTH PIPES

山本拓治¹⁾・北本幸義²⁾・伊達健介²⁾・岡本道孝²⁾

Takuji YAMAMOTO, Yuki Yoshi KITAMOTO, Kensuke DATE and Michitaka OKAMOTO

With regard to the current practice of tunnelling construction for railways and roads it is desired that a more practical method be developed so as to save time and cost as well as more safety. Recently, long forepiling method has been used widely so that the tunnel crown settlement in soil ground, can be restrained. On the other hand, cost by such method is generally high in case special technique or machine must be adopted. In addition, the effect by reinforcement using forepiling method is difficult to be made clear theoretically.

We developed a new forepiling method using middle length steel gas pipes for the purpose of lowering the construction cost with enough reinforcement effect. These reinforcement can be easily installed by conventional tunnelling machine. This paper reports the technical features and construction procedure. Next, the practical measuring results are shown. As a result, it is proved that the new forepiling method is effective in cost and reinforcement.

Key Words : tunnel, fore piling, fore poling, measurement, surface settlement

1. はじめに

近年、山岳トンネルを取り巻く施工環境には急激な変化がみられ、都市化、大断面化が進み、それに伴いあらゆる地質に対応できる効率的かつ多様な補助工法の適用が求められている。

現在の山岳トンネル工事では天端安定対策、地表面沈下防止対策として、長さ 3~5m のロックボルトを打設し、ウレタンやモルタルを注入するフォアポーリングと、長さ 12m 程度の鋼管を打設・注入するフォアパイリング (AGF 工法等) が、専用機械を利用せず地山の状況に応じて経済的に施工できるという理由により、多用されているのが現状である。しかし、AGF 工法は効果も高いが、費用も比較的高く、フォアポーリングとフォアパイリングの中間に位置づけられる補助工法は意外に少ないと言えよう。

そこで筆者らは、山岳トンネル工事のコスト削減と急速施工をめざして、汎用のトンネルジャンボと一体型特殊親子ビットを利用した中尺鋼管先受け工法を開発し¹⁾、その効果と合理性を検証した。

2. 地質状況

新しい先受け工法を適用したトンネルは、新生代第四紀の洪積世に属する段丘裾部を貫くトンネルであり、土被り 10m 以下の区間が 200m 程度連続している。地質は、有機質土、砂質シルト、砂礫などからなる、

1) 正会員 工修 鹿島建設(株) 技術研究所 土木技術研究部 地質・岩盤グループ

2) 正会員 工修 鹿島建設(株) 技術研究所 土木技術研究部 土質・基礎グループ

いわゆる崖錐堆積物、段丘堆積物がほとんどを占め（図-1 参照）、地表面沈下、切羽崩落、脚部沈下などの土砂トンネル特有の課題が存在する。

したがって、このトンネルでは、これらの問題に対処するため、当初は、施工実績の多い AGF 工法を採用し、安全に施工を行っていたが、その後、より合理的な施工をめざして、新しく開発した小口径・中尺鋼管による先受け工法を適用したので、その結果と工法の概要を以下に示す。

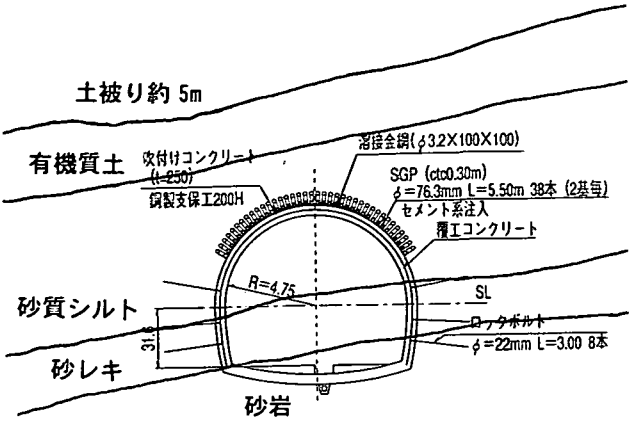


図-1 地質断面図

3. 中尺先受け工の概要

(1) ビットの概要

図-2 に示す小口径、中尺鋼管の削孔に使用したビットは、今回新たに三菱マテリアル（株）と共同で開発したもので、パイロット部と特殊形状のリーマー部から構成されており、それらが一体化した形状となっていることより、一体型特殊親子ビット（仮称）と呼ぶ。パイロット部のビットは、孔曲がりを防止するために、鋼管の中央に位置し、後方のリーマー部は、鋼管外径より若干大きい掘削断面を確保し鋼管が挿入できるように、片側に突出しており、所定の削孔長まで到達したらケーシング内壁に沿ってビットを回収することが可能である。

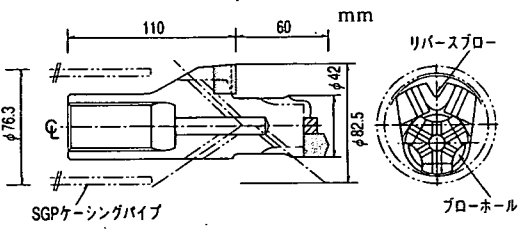


図-2 ビットの形状

特徴は、刃の間にも繰り粉排出用の溝とリバースブローと呼ばれる水孔があるため、繰り粉のスムーズな排出が可能なことと、形状が単純なため、従来の二重管先受け工法に用いられる拡翼ビットに比べて安価なことである。

(2) 先受け工の配置

図-3 には通常の AGF 先受け工法と汎用鋼管である SGP (Steel Gas Pipe) を使った中尺先受け工の鋼管配置断面図を示し、図-4 には、鋼

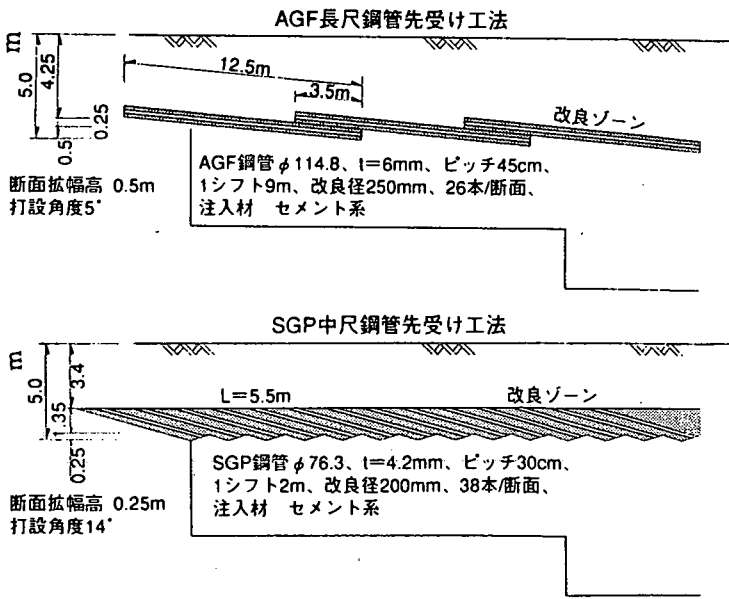


図-4 先受け鋼管配置図

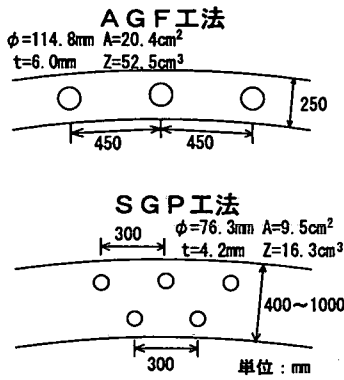


図-3 鋼管配置断面図

管配置縦断面図を示す。図－5には、今回適用した中尺先受け工の縦断面詳細図を示す。

鋼管の配置は、通常の AGF 工法の設計と同様に、パイプルーフの設計法を用いた。その結果、図－3に示すように、中尺鋼管の配置は、単位幅あたりの断面剛性が、ほぼ AGF 工法と同じになる 30cm ピッチ、ダブル配置となった。

(3) 先受け工の特徴

図－4の下図に示す今回適用した工法は、フォアボーリングとフォアパイリングの境界に位置する長さ 5.5m、外径 76.3mm の小口径中尺管による先受け工法である。通常の AGF で使用されているφ114.8mm の鋼管を小口径、短尺化することにより 1 本当たりの削孔時間を短縮し、ロッド接続作業をなくすことにより施工の安全性と急速化を可能とした。

また、外径を小さくすることで、長尺の先受け工法では掘削に時間がかかっていた硬質の転石が混入した地山、あるいは破碎帯でもスムーズな削孔が可能となり、長さを短くすることで、孔曲がりによる鋼管の挿入不備やロッドやピットの回収不能を回避することが可能となった。

さらに、小口径鋼管を円周方向に密に設けた結果、セメント系注入材では、鋼管間から土砂の抜け落ちが生じると思われた砂質地山でも、今回の地山の場合は、安全に施工ができた。

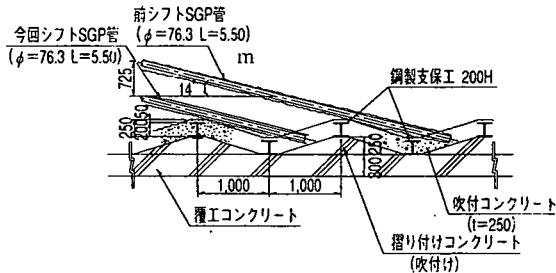
4. 計測結果

(1) A 計測結果

図－1に示すように、土かぶり が 4～6m で、地質もほぼ同一（地表から有機質土が 1.5m 程度、その下は砂質シルト）の施工区間（L＝50m、計測断面それぞれ 3 断面）において AGF 工法と中尺先受け工法の計測結果を比較した。なお、この断面では下半盤に岩盤が出現しており、脚部の沈下はほとんど生じていない。以下では、中尺先受け区間のことを SGP 区間と呼ぶ。

表－1 は、上、下半掘削時の平均変位量の発生比率を示す。AGF 区間の地表面沈下量は平均 48mm、SGP 区間では平均 15mm となり、AGF 区間は SGP 区間の 3 倍の地表面沈下が発生している。天端沈下量は、ほぼ同じ値、内空変位は、両工法ともほとんど発生していない。また、天端沈下、内空変位の発生比率は、AGF 区間、SGP 区間ともほぼ同一比 6（上半）：4（下半）となるのに対し、地表面沈下の発生比率は、AGF 区間が 9：1、SGP 区間が 8：2 となり若干の相異がみられた。

図－6 は、切羽接近、通過に伴う先行変位率、掘削影響範囲を推定するために、AGF 区間および SGP 区間の地表面沈下モードを切羽（上半）進行要素毎に分析した結果である。横軸は切羽進行、縦軸は上半掘削後の収束値を 100％とした変位率を表す。図に示すように、AGF 区間の掘削影響範囲は－10m（－1.0D）～＋15m（＋1.5D）で、切羽到達以前の先行変位率は 60％程度となっている。これに対して、SGP 区間の掘削影響範囲は－5m（－0.5D）～＋20m（＋2.0D）で、切羽到達以前の先行変位率は 25％程度となり、明らかに両者の沈下発生モードは異なっており、AGF 区間では、先行沈下が早期に現れ、先行変位率も



図－5 鋼管配置詳細図

表－1 変位発生比率

		AGF区間		SGP区間	
		mm	%	mm	%
地表沈下	上半	43.1	89	12.4	81
	下半	48.3	11	15.4	19
天端沈下	上半	12.0	59	11.2	59
	下半	20.5	41	19.0	41
内空変位	上半	1.3	57	3.4	64
	下半	2.3	43	5.3	36

大きいのに対し、SGP 区間では、先行沈下がやや遅く現れ、先行変位率も少ない結果となった。

また、表－1に示すように、AGF 区間と SGP 区間の地表面沈下に大きな差異があるにもかかわらず、天端沈下量はほぼ同一となっている。したがって、地表面沈下と天端沈下の関係をさらにくわしく分析した。

図－7は、AGF 区間および SGP 区間における地表面沈下と天端沈下の関係を示したもので、横軸に上半切羽進行、縦軸に沈下量をとってプロットしたものである。図に示すように AGF 区間では上半切羽到達前の応力解放が著しく、解放がかなり進んだ後からの支保工の建込みとなっている。

一方、SGP 区間では、発生する地表面沈下量自体が AGF 区間に比べて少なく、支保工の建込みも早期に行うことができる。支保工建込み後の地表面沈下、天端沈下量は、両区間ともほぼ同程度で、10mm 程度のごく少ない値となっている。沈下比率も AGF 区間の方が大きく、天端沈下の影響が直接地表面近くまで及んでいることがわかる。

この原因は、図－3に示すように、2m 掘削毎に角度を持たせて短くて細い鋼管を全区間ラップしダブルで打設・注入していく中尺先受け工法が、AGF 工法よりも厚い改良ゾーンを構築することができるためではないかと推察している。

地表面沈下を抑制するためには、切羽到達前の先行変位をいかに少なく抑えることができるかということが重要になる。

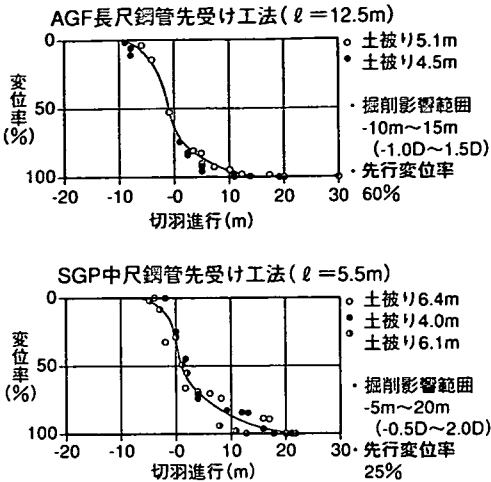
今回適用したようなルーズな地山においては、削孔自体が周辺地盤をみだし、沈下を引き起こしている可能性もあるが、SGP 鋼管による中尺先受け工法は、変位抑制効果の面でも優れている工法であることが、今回の計測結果からは確認できた。

(2) B 計測結果

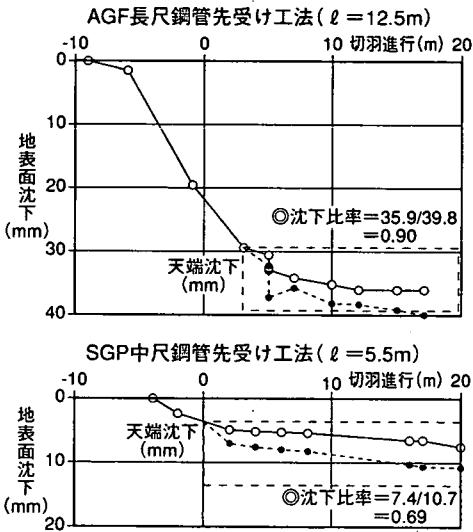
SGP 区間において、図－8に示すとおり坑内より水平傾斜計を1m ピッチ (L=12m) で埋設し、上半掘削に伴うトンネル天端近傍の地中沈下挙動を計測した。この計器では、水平傾斜計により先端での累積変位量が計算され、絶対沈下補正を行うことで計測区間の絶対変位量を把握することができる。

また、先受け鋼管の0.5、2.0、3.5、5.0mの位置での鋼管応力と鋼製支保工の応力も測定した。

図－9に、SGP 区間の上半切羽進行に伴う地中沈下分布を示すが、各切羽進行毎の地中沈下分布の変化が極めて明確に現れている。図－10に示す切羽位置 11m の地中沈下分布によれば、上半切羽進行に伴うトンネル天端の地中沈下は、先受けによる改良ゾーン上部の中間部が最も沈下する傾向にある。改良ゾーン



図－6 切羽進行と地表面沈下の関係



図－7 地表面沈下と天端沈下の関係

と地表部はこの中間部に比べて沈下量は少ない。
すなわち、改良体部分が1つの層となって上部の
地中沈下に対抗していることがわかる。

図-11 は切羽から3m進行時の先受け鋼管の応力
と鋼製支保工の応力の測定結果である。上半切
羽進行に伴う先受け鋼管の曲げ応力は、切羽位置
において、極めて明確に凹凸の傾向が現れており、
その凹凸は、鋼製支保工のジグザグな建込み形状
に添う形で生じている。また、発生応力は許容を
超えるほど大きい値となっている。

一方、この先受け鋼管の曲げ応力の大きさや、
極めて明確なジグザグ変化に対して、鋼製支保工
の応力は、軸力の最大値が-130kN、曲げモー
メントの最大値が11kN-m 程度（最大応力値では
 $\sigma = 28 \text{ N/mm}^2$ 程度）しか現れず、非常に小さい
値であった。

この現象は、密に配置された先受け鋼管が注入
によって地山と一体化し、ゆるみに対抗する幅広
い支保ゾーンを鋼製支保工とは別に形成したもの
と推定される。

一般に、鋼管は、トンネル縦断方向に着目する
と支保工と地山で支持された梁材として機能し、
鋼管の曲げ剛性によって切羽天端地山の沈下を抑
制すると考えられる。また、トンネル横断方向に
着目すると、鋼管打設間隔を適切に設定すること
によって、鋼管間に「地山アーチ」が形成され、
土砂の抜け出しが防止されるものと考えられる。

つまり、今回の場合の横断方向には、切羽上部
近傍地山に剛性の高い改良体ゾーンが形成され、
そこに極めて強い圧縮ゾーンが形成され、脚部ま
で応力が伝達された結果、坑内支保部材への荷重
分担は極めて少なくなっていると考えられる。

また、縦断方向には、切羽前方の仮想支点を支
点とした一端固定梁としての応力以外にも、ジグ
ザグな支保工の建込み位置を支点とした応力の発
生が確認できたことより、支点間を小さくした鋼
管の曲げ剛性によって、掘削後もより大きな変位
抑制効果を発揮しているものと考えられる。

今回は鋼管の軸応力の測定はできなかったが、
中尺先受け工法は、打設角度が斜めボルトに近い
打設角度となっていることより、切羽前方の地山
が切羽方向に押し出す動きに対して、引張り部材

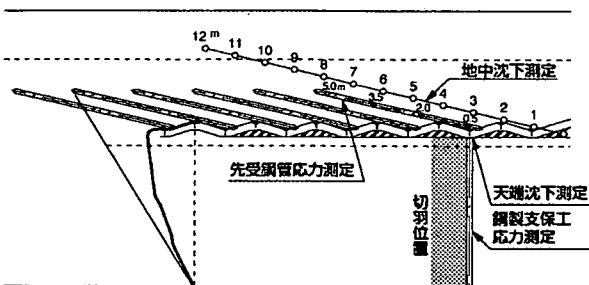


図-8 計器配置図

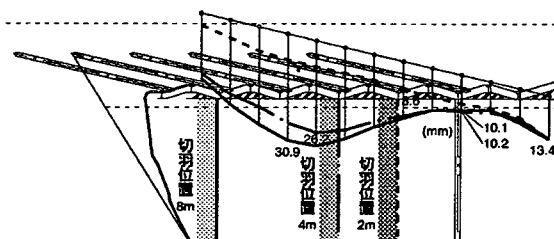


図-9 切羽進行に伴う地中沈下分布の変化

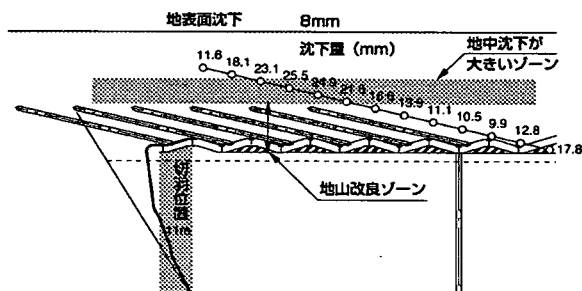


図-10 地中沈下測定結果

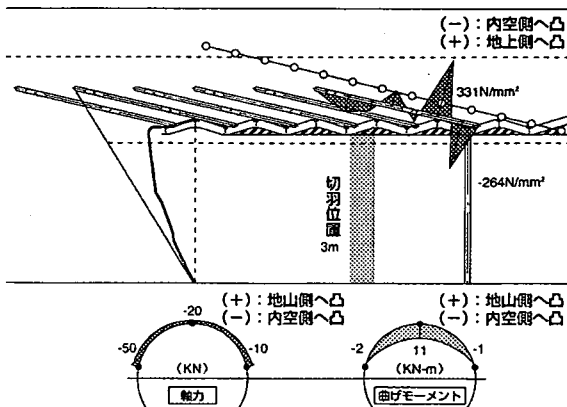


図-11 先受け鋼管の応力と鋼製支保工の応力

として有効に作用していることも考えられる。

従来、鋼管先受け工法の設計は、鋼管の曲げ剛性による梁効果のみに着目した設計法が多かったが、今回適用した小口径・中尺鋼管を使った先受け工法においては、切羽前方により剛性の高いシェルゾーンを形成することが可能となるため、今後はこの点に着目した設計法の見直しを図り、より合理的な鋼管配置を提案していく予定である。

鋼管を小口径化することで鋼管自体の剛性は低下していくが、より合理的配置によるシェル効果を高めた経済的な鋼管配置を提案していくためには、今後さらに、この先受け工法の適用をはかり、計測データを収集し、地質や地形条件による鋼管や地盤の挙動を把握する必要がある。

5. おわりに

この工法の特徴をまとめると以下のようである。

- ・トンネルジャンボへの搭載、安価な一体型特殊親子ビット、安価な鋼管等の使用によって、中尺の先受け工を経済的に施工することが可能となった。
- ・ロッド接続作業のいらぬ中尺削孔のため、施工のスピードが向上するとともに、接続作業に伴う危険、苦渋作業が軽減された。
- ・今回の計測では、切羽前方地山に強固な支保ゾーン（ライニング）を形成することにより AGF 工法と比較しても遜色のない変位抑制効果を確認できた。

先受け工については、効果のメカニズムが十分解明されているとはいえず、簡易に計算できる合理的な設計法の確立には至っていない。また、本研究では、ほぼ同一の地質・地形条件とはいえ、限られた地山条件でのデータの紹介や分析にとどまった。この例だけで前述のような考察をするのは言い過ぎかもしれないが、今後は、経済性のみならず、この工法の変位抑制効果を確認するための計測や解析、模型実験を実施し、有効性を確認するとともに、改良ゾーンの厚さなど改良効果を組込んだ評価手法について検討する予定である。また、最適注入材の研究についても検討を進めて行く予定である。

【参考文献】

- 1) 山本・西岡・一條・反り目：中尺鋼管先受け工法の開発と適用結果について、土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 6 部、pp. 424～425、1999. 9