

小口径中尺先受け工法の開発

蛭子清二* 阿久津秋秀** 高橋信行**
中村英樹** 栗田猛志***

1. はじめに

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傾向にある。大型の施工機械が効率的に動作するには、1回の掘削断面積が、全断面や上下半2分割掘削などと必然的に大きくなる。すなわち、切羽の大型化と形状の偏平化が伴われ、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効果を期待できる切羽安定化補助工法のニーズが生じてくる。ここで、大型機械の導入による工期短縮が狙いであるから、施工サイクルへの変化が少ない補助工法を駆使する切羽安定化対策が好ましい。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⁾の適用が増大してきた。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、鋼管の内部と周辺の地山に注入が行われる。この方法は、特殊な施工機械や仮設備、また、専門要員を必要とせずに、通常の掘削機械（油圧削岩機）で施工できる点が特長である。

ジェオフロンテ研究会で行われたAGF工法の実態調査によると²⁾、鋼管長：12.5m、縦断方向鋼管打設角度：5～10°、横断方向鋼管打設間隔：45～60cm、縦断方向鋼管打設間隔：9m（鋼管のラップ長：3.5m）とした長尺先受け方式が多く採用されており、同研究会から提案されている鋼管配置標準パターンの根拠になっていると考えられる。標準パターンを採用すると、鋼管打設後の9m区間は補助工法なしの通常掘削ができる。また、設計法³⁾については、トンネル縦断方向に鋼管の曲げ剛性によってゆみ荷重が支持されるとする梁構造モデルが主として採用され、理解が容易である。

しかしながら、上述の長尺方式では次のような点に改善の余地が考えられた。

①切羽前方地山に長尺鋼管を低角度で打設するためにトンネル断面の拡幅が必要とされ、相対的に不安定になる切羽周辺が拡幅されることは、切羽安定化を目的とする工法にはそぐわない

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削孔用の拡径ビット、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⁴⁾

そこで当社では、上記の課題を解決し、長尺方式と同等以上の性能を有してより安価な先受け工法を目標に、小口径中尺先受け工法の開発を進めてきた。本報告では、同工法のハードウェアの概要を報告する。

2. 開発の経緯

1. の①、②に示した課題を解決するために、鋼管長：6m程度、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が施工の経験から浮上してきた。両方式の鋼管打設パターンを対比して図-1に示す。中尺方式は長尺方式と異なり、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とされない点と、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、地山が悪質の場合にトンネル縦横断方向に鋼管を多層に配置できる点が特徴である。表-1に当社の中尺方式の施工実績を示す。いずれの現場においても、鋼管打設量の適否はともかく、切羽の安定化は図られて工法としての性能が実証された。ただし、鋼管や削孔用のビットは長尺方式の場合と同じ品質と形状の製品が使用されたため、1. の③に示した課題は解決されていない。

表-1に示した東山トンネルと登尾トンネルでは、中尺先受け方式による地山支持機構を明らかにするために、鋼管の挙動計測を行った。それらの結果から、中尺先受け方式の場合の地山支持機構は、鋼管軸直角方向には口元が切羽後方支保工で固定された片持ち梁モデルとして、鋼管軸方向には鋼管の周囲先端方向に向かうせん断抵抗モデルとして解釈できることを明らかにした。さらに、同方式の場合の地山支持力が切羽に向かう地山変形から誘起され、これが前者のモデルの鋼管軸直角方向曲げ剛性ではなく、後者のモデルの鋼管軸方向垂直剛性から主体的に発揮されることを示した^{5)~8)}。この事実は、長尺方式で使用される程に大きな口径と肉厚の鋼管が中尺方式の場合には必要でない可能性を示している。

鋼管に作用する曲げモーメントから生じる縁端応力は

*地盤研究室 **技術開発部 ***東北支店土木部

表-1 当社の中尺先受け工法の実績

トンネル名	東山トンネル (京都市営地下鉄東西線)			登尾トンネル (国道426号)	高取山トンネル (神戸市高速2号線)	双海トンネル (松山自動車道)	冠岳トンネル (九州新幹線)
施工位置	京都府			兵庫県	兵庫県	愛媛県	鹿児島県
時期	H11.11~H17.10			H7.12~H9.12	H6.9~H12.1	H7.10~H11.9	H8.2~H12.2
発注者	日本鉄道建設公団			建設省	阪神高速道路公団	日本道路公団	日本鉄道建設公団
トンネル断面積 (m ²)	22.2~25.3 (単線部)	41.6~106.7 (複線部)	106.7~147.2 (大断面部)	79.2~99.6	71.4~96.0	110.0~147.0	73.0
トンネル延長(m)	計1,567.5			650	1,289	2,556	2,150
施工場所	坑内	坑内	坑内	坑内	坑内	坑口付近	坑内
地形・地質 トンネル条件	洪積層 市街地直下	粘板岩主体層 (中〜古生界) 市街地直下	低土被り、破砕帯 (中〜古生界) 市街地直下	低土被り、破砕帯 (白亜紀〜古第三紀) 国道直下10m	強風化花崗岩 粘土質破砕帯 住宅地直下	地すべり層	弱層部 地質不良箇所 住宅直下
採用の目的	切羽安定化	地表沈下低減 切羽安定化	地表沈下低減 切羽安定化	切羽安定化 地表沈下低減	地表沈下低減	地表沈下低減 地すべり抑制	地表沈下低減 切羽安定化
打設パターン							
打設範囲(度)	120	120	180	180	180	180	120
1断面本数	14~15(千鳥)	多層(千鳥)	24~25(千鳥)	18~19(千鳥)	24~25(千鳥)	30~31(千鳥)	25~26本(千鳥)
横断ピッチ(cm)	40	45	90	90	80	60	40
縦断ピッチ(m)	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0
鋼管長(m)	3.0	4.0	6.0	6.0	6.0	6.0	4.0
鋼管径(mm)	54	54	101.6	101.6	114.3	114.3	114.3
注入材の種類	ウレタン系 セメント系		ウレタン系	ウレタン系	ウレタン系	ウレタン系	ウレタン系
施工延長(m) (シフト数)		40 (40)	70 (70)	50 (50シフト)	59.5 (30)	73 (73)	9 (10)

式(1)で与えられる。一方、鋼管周面に作用するせん断力から生じる垂直応力は式(2)で与えられる。ここで、 σ_e : 縁端応力、 M : 曲げモーメント、 e : 縁端距離、 I : 断面二次モーメント、 Z : 断面係数、 r_1, r_2 : 鋼管の外径と内径、 σ_s : 鋼管軸方向応力、 τ_s : 鋼管周面せん断力、 K_s : せん断力に関する断面係数、 k : 相互作用係数、 $\xi_s - \gamma_s$: 鋼管と地山の相対変位である。

$$\sigma_e = \frac{Me}{I} = \frac{M}{Z}, \quad Z = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{r_1^4 - r_2^4}{r_1} \quad (1)$$

$$\sigma_s = -\frac{2r_1}{r_1^2 - r_2^2} \int \tau_s ds = \frac{1}{K_s} \int k(\xi_s - \gamma_s) ds \quad (2)$$

両式の断面係数はそれぞれの耐荷力と読み替えることができるので、曲げに対する耐荷力は内外径の4乗差に比例し、鋼管周面せん断に対する耐荷力は内外径の2乗差。両式の断面係数はそれぞれの耐荷力と読み替えることができるので、曲げに対する耐荷力は内外径の4乗差に比例し、鋼管周面せん断に対する耐荷力は内外径の2乗差

に比例する。すなわち、鋼管径の変化に対する耐荷力の変化は曲げに対して大きく現れる。図-2は、長尺方式で標準的に使われている外径：114.3mm、肉厚：6mmの鋼管の場合を基準にして、鋼管径による断面係数の変化を示したものである。同図から、鋼管径が小さくなるときの曲げに対する耐荷力の低減は顕著であり、曲げ剛性に期待する長尺方式では鋼管径の縮小が難しいことが分かる。一方、鋼管周面せん断に対する耐荷力の低減は曲げに対するもの程に極端ではないことが分かる。この点に着目して、鋼管軸方向の垂直剛性に期待する中尺方式では鋼管径の縮小化が可能と判断した。図-2に矢印で示した外径：76.3mm、肉厚：4.2mmの規格品の鋼管を使用すると、その断面性能は長尺方式の鋼管の70%を確保できる。この鋼管を打設できる装置の開発からコストダウンを目指すとともに、鋼管軸方向の剛性に期待する設計法の確立を進めた。

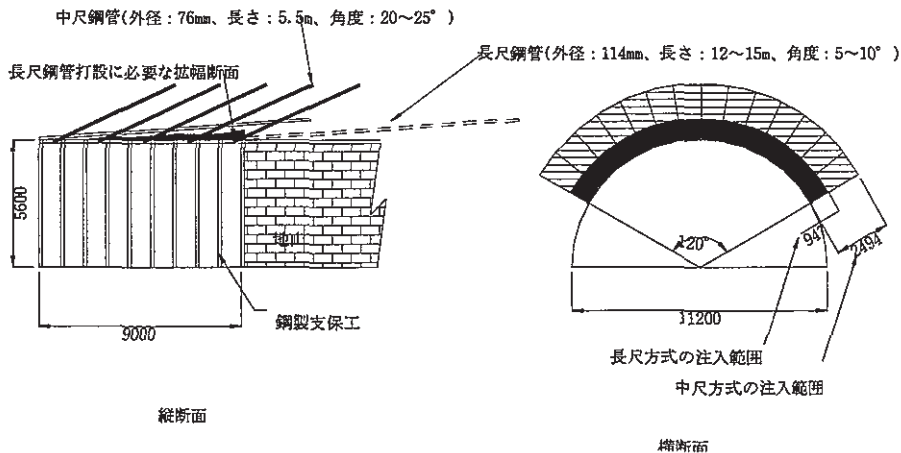


図-1 中尺方式と長尺方式の鋼管配置の比較例

3. ハードウェアの構造と性能

3.1 小口径鋼管打設システム

鋼管の打設に際して、拡張ビットを最先端に配置し、その後方に鋼管を接続して鋼管よりも少し大き目の削孔が行われるのが一般的である。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費用が高価になるため、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、鋼管の肉厚分を含むその外側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-3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。この内、インナービットとロッドは規格品である。

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-4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に工夫した。

鋼管は定尺 5.5m 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-5の下図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。鋼管の後端には図-6に示すキー部を設け、打設装置からの回転力を伝達するとともに、鋼管の脱落を防止した。後述する

鋼管削孔実験では、後端部の断面にドリフターからの大きな打撃力が作用して鋼材の塑性変形が生じた。これを低減するために、図-6に示した補強リングを付加した。なお、インナービットは、図-5の上図に示す規格品のクロスビットを使用する。また、図-3に示す油圧ジャンボのガイドシェルは、鋼管長：5.5m 全体を支持できる長さが好ましい。

以上に述べたシステム構成要素の材質を表-2に示しておく。

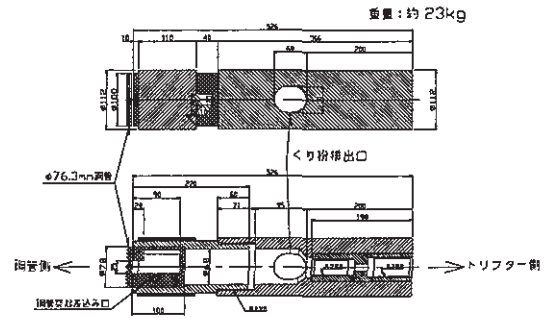


図-4 鋼管打設装置

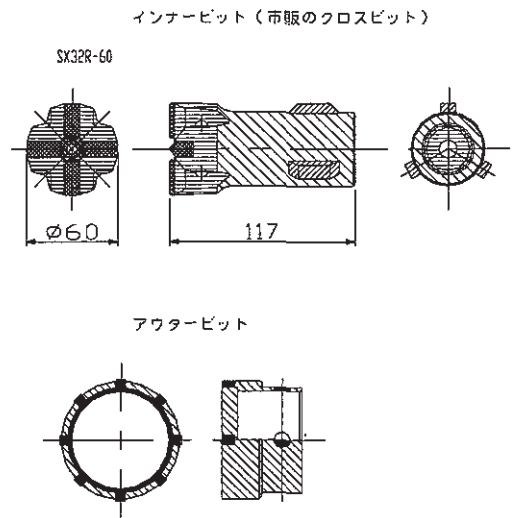


図-5 ビットの構造

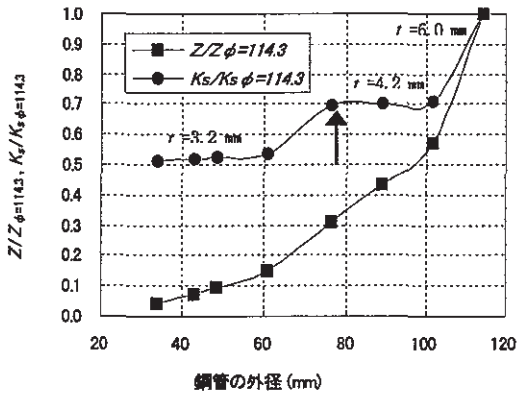


図-2 断面係数の比較

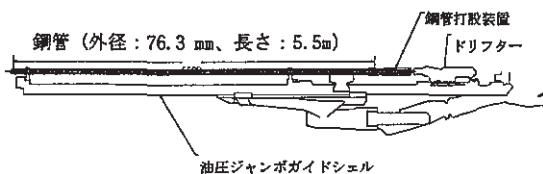


図-3 鋼管打設システム

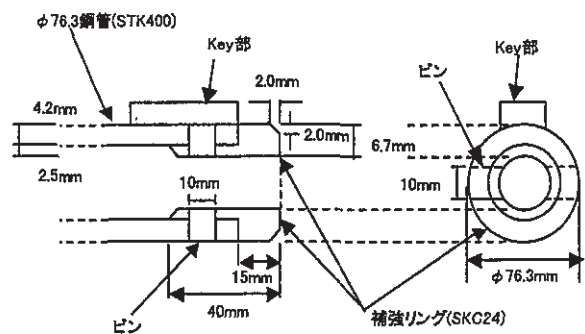


図-6 鋼管後端部の構造

表一 打設システム構成要素の材質

構成要素	名称	記号
鋼管	一般構造用炭素鋼鋼管	JIS G 3444 STK400
鋼管補強リング	中空鋼鋼材	JIS G 4410 SKC24
超硬チップ	鉸山工具用超硬チップ	JIS M 3916 E4
打設装置	機械構造用炭素鋼鋼材	JIS G 4051 S45C

3.2 削孔の機構と性能

先受け工法は、通常の場合には軟質な地山に適用されるので、極端に高い削孔性能は必要とされない。しかし、切羽前方の地質を正確に知ることは一般に難しい。切羽位置の地山が軟質であっても、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る。すなわち、計画長さを確実に削孔できて鋼管を所定の位置に設置できる性能が、補助工法として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。

長尺方式の削孔が先端の掘径ビットだけで行われるのに対し、小口径中尺方式の場合には鋼管先端に取付けたアウタービットとこれよりも少し前方に配置したインナービットの2種類で削孔を行う。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负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弱である。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

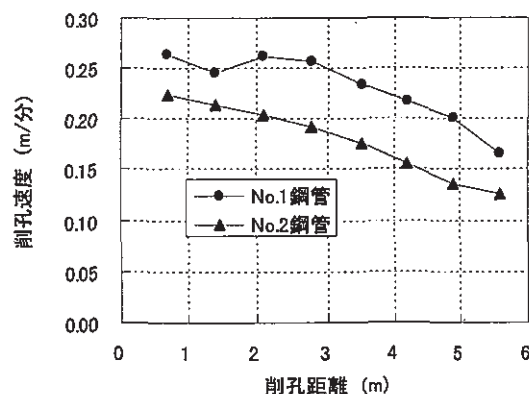
①のビットに関しては、近い位置に配置した2種類のビットを同時に打撃することで、両者による岩石破壊の相互作用効果が生じて、アウタービットの負担が低減されることを期待している。2つのビットを鋼管軸方向の同じ位置に配置すれば、打撃によって岩盤に生じる引張破壊面が最も連絡しやすく、最大の相互作用効果を期待できる。しかし、この配置にすると、鋼管内へのくり粉の排出が十分に行われず、削孔性能が極端に低下することが経験的に知られていた。そこで、2つのビットの離隔距離が3cmと6cmの場合について、削孔実験を行った。その結果によると、離隔距離が6cmで削岩対象が硬質な場合には、くり粉の排出に問題はなかったが削孔速度が極端に低下し、実用には耐えないと判断した。実験後のアウタービットのチップには、相対的に大きな磨耗が認められ、2つのビットによる相互作用効果が発揮されずにアウタービットの負担が大きかったこと、また、削孔性能がアウタービットに支配されていたことが想像された。一方、離隔距離が3cmの場合には、削岩対象の硬軟にかかわらず、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、表一に示した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。開発初期の鋼管の補強を行わなかった段階には、打撃力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、後端部には図一六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（図一五下図参照）を接続し、鋼管先端部での応力集中の緩和を図った。

3.1に述べた打設システムは、トンネル現場や工場で行った複数回の削孔実験の経験を経て構造を絞り込んできたものである。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、鋼管長さ：5.5m分の削孔性能を実機の実験から調査した。ドリフターの出力を一定に保った条件（フィード圧力：6 MPa、打撃圧力：13 MPa、回転圧力：4 MPa）で鋼管2本分の削孔を行った。図一七はそのときの削孔速度と削孔距離の関係である。2本の鋼管ともに、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本目比べて低下した。

花崗岩ブロックの削孔状況を写真一に、打設装置と鋼管後端部の状況を写真二に示す。ドリフターの左回転で鋼管後端部の突起が打設装置のキー溝に噛み、ドリフターの右回転と後進で打設装置から鋼管が外れる。鋼管先端のインナービットとアウタービットの状況を写真三に示す。内側のインナービットは規格品のクロスビットであり、外側のアウタービットには超硬チップが



図一七 削孔速度と削孔距離の関係

8ヶ設置されている。

本打設システムでは、小口径鋼管と通常のトンネル施工で使用される規格品のロッドを使用する。このため、口径の大きな長尺方式に較べて、鋼管の内空断面積が相対的に小さくなり、くり粉の排出性能が懸念された。しかし、複数回の現場削孔実験では、くり粉の排出不能が原因で削孔に不具合が生じた例はなく、基本的に削孔速度の調整によって対処可能と判断した。ただし、ハード面においては、図-4に示したように、鋼管打設装置のくり粉排出孔をできるだけ大きくし、その形状も装置軸方向を長軸とする楕円形とする配慮を加えた。

3.3 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。しかし、鋼管内部については、構造に工夫を加えた。

長尺方式で用いられる鋼管径の場合、鋼管内にインサート管が挿入されるのが一般的である。インサート管は、鋼管内の内空断面積を小さくして注入材の流速と周囲地山の注入範囲を大きくすること、また、注入量の節約を目的に使用される。小口径中尺方式では、最初に安価な塩ビパイプをインサート管の代用品として適用することを考えた。ただし、樹脂系の注入材を使用する場合には、鋼管内部が高温・高圧状態になるので、塩ビパイ

プの耐性と適応性を実験から調べた。実験の方法は次のとおりである。先端を密閉した注入材吐出口のない中尺鋼管の中に塩ビパイプを挿入し、後端部で塩ビパイプと鋼管の間をパッキングして試験体を作成した。注入ホースは塩ビパイプの内部を通して先端キャップのホースと同径の孔から鋼管内に出し、注入材が塩ビパイプの中に流入しない構造とした。この試験体を打設角度と同じ傾斜角で気中に固定し、鋼管内空体積の1/3のウレタンを注入した。

実験終了後に鋼管を横断で切断して塩ビパイプの状況を観察した。写真-4はその状況であり、塩ビパイプに激しい変形が生じ、内部の注入ホースも破損した。この結果から、塩ビパイプに適応性がないと判断し、耐圧性能のある注入ホースのみを用いて図-8に示す構造を採用した。注入材吐出口を鋼管の先端と中央の2ヶ所に設け、それぞれ独立した2台のポンプで圧力注入することにより、流速の向上を期待している。

上述の実験に際して、鋼管内部の圧力と温度を測定した。圧力の経時変化を図-9に示す。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、ウレタン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。

鋼管後端部のキャッピングは、通常の削孔方法では鋼管に打撃力が加えられないので、ねじ込み式の鋼製キャ

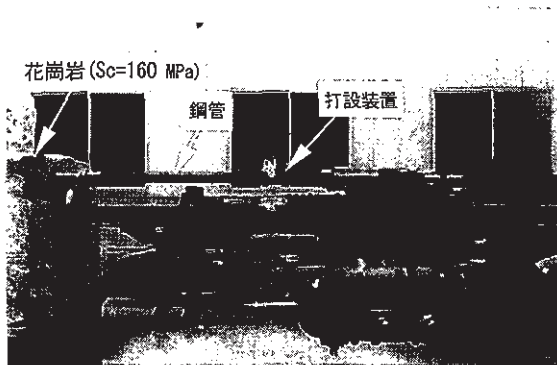


写真-1 花崗岩ブロックの削孔状況



写真-3 インナービットとアウタービット

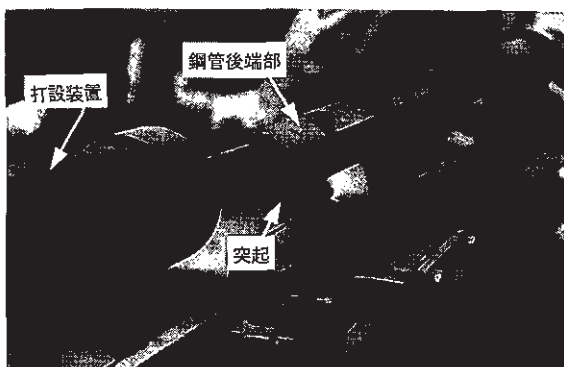


写真-2 打設装置と鋼管後端部の状況

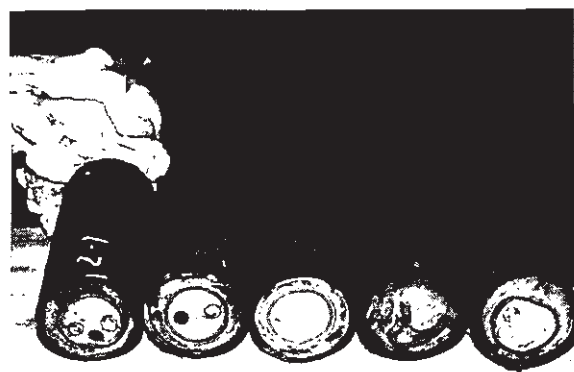


写真-4 塩ビパイプの破損状況

ップが用いられる。しかし、3.2 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他の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-8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。ゴム栓は先細りのテーパ形状として、鋼管後端部の変形に追従できるようにした。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-10に示す。

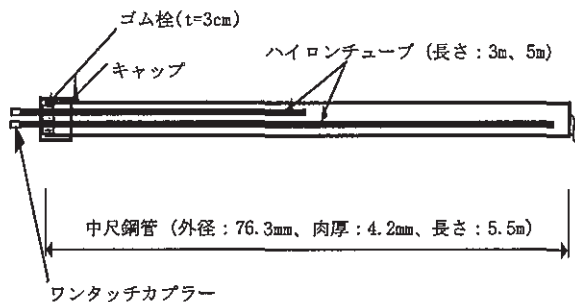
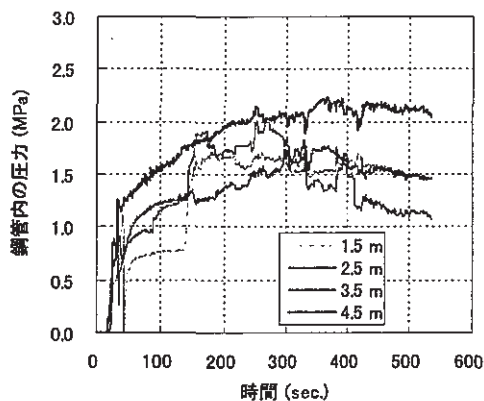


図-8 注入システムの構造（鋼管内部）



凡例内は鋼管後端部からの距離

図-9 鋼管内部圧力の経時変化

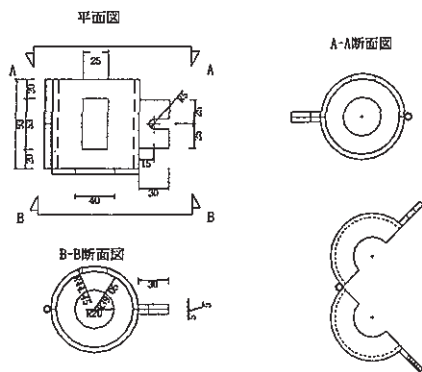


図-10 鋼製キャップの構造

片方をピン止めした半割れの回転可能な構造であり、周面に設けた矩形の溝を鋼管後端部の突起に嵌め込んで、鋼管内部から作用する圧力を支持する。この構造の耐圧性能は、水圧負荷実験から4 MPa以上であることを確認した。また、この鋼製キャップは注入終了後に取外しできる構造であり、複数回の利用が可能である。

5. おわりに

独自技術として開発を進めている小口径中尺先受け工法のハードの概要を紹介した。長尺方式と鋼管打設延長が同じならば、材料費だけで数10%のコストダウン効果があると試算された。設計法についても、従来とは異なった連続体解析の切口でまとまりつつあり、性能の向上とサイクルの短縮効果を加えれば、さらに大幅なコストダウンが見込まれる。また、実プロジェクトへの適用も近日中に実現予定であり、次の機会に報告したい。

最後に、鋼管打設システムの開発には古川ドリルテック株式会社と東邦金属株式会社の協力を得た。また、注入システムの開発には東海ゴム工業株式会社の協力を得た。記して感謝の意を表す。

【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)技術資料(三訂版)」、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)標準積算資料(案)改訂版」、1997。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 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。