

非開削地下空間構築方法の提案

Proposal for building underground spaces by a non-open-cut method

粕谷太郎

Taro KASUYA

Various difficulties are encountered in urban areas in Japan when creating underground spaces, such as existence of many buildings, a high groundwater level, and unconsolidated geology.

Under these adverse conditions, the major problem to be considered is impact of tunneling work upon the surface and underground structures. The open cut method will inevitably cause traffic jams, noise and vibration, air pollution, and troubles for inhabitants due to displacement of buried structures and objects.

Suitable techniques must be developed to avoid these troubles. Non-open-cut methods will alleviate environmental impact, thereby significantly reducing the total cost.

The curved boring method (TULIP), a technique developed for this goal, has been used in various projects. This paper reports some cases, and proposes work methods.

「keywords」 Non-open-cut methods, underground space, curved boring method, Section width,
Curved pipe

1. まえがき

我が国の都市域は建物等が密集した市街地であり、地下水位が高く、かつ、施工位置周辺の地盤は未固結地質である。

このような条件下での施工にあたっては、地表および既設地下埋設物等への影響等が強く懸念される。また、開削工事に伴う社会環境への影響として考えられる交通渋滞、騒音・振動、大気汚染、施工位置の埋設物や支障物の移設による周辺住民への迷惑等の発生回避が重要なファクターとなる。

これらの視点から工事の計画を進めるためには、その対応技術の開発が必要である。また、非開削施工による周辺の環境負荷軽減によるコストは、トータルコストの縮減に大きく貢献するものと考えている。

これらの課題を解決するために開発した曲線ボーリング技術（TULIP工法）は、近年、各所の計画に用いられており、本論文では、いくつかの施工事例と施工法の提案、要素技術の深度化の状況等について述べる。

2. 曲線ボーリング技術の概要

2.1 技術の概要

地下の限られた狭隘な作業空間において、曲線ボーリング装置を用いて円弧形状（単心円）の曲線管を精

キーワード：非開削工法、地下空間、曲線ボーリング工法、断面拡幅、曲線管

正会員 フェロー 鉄建建設(株) エンジニアリング本部

度良く設置する技術である。また、疑似円の曲線管の設置も可能な指向性ボーリング技術の開発を進めている。

設置した曲線管を利用して、凍結（曲線内管を挿入）、注入（予め注入ノズルを加工）等の地盤改良工を施工、あるいは、セクション付き曲線管を連続に設置して、リング状の壁の造成を行い、これによりシールドトンネルの地中接合やトンネルの拡幅、分岐・合流、立坑の拡幅等を可能とする。また、大断面トンネルや双設トンネルの先行支保工等の補助工法としても利用可能である。

2.2 システム構成

曲線管を精度よく設置するためのシステム構成は、以下に示す通りである。

①先端装置

- ・砂質層、粘性土層、砂礫層、玉石層、硬質土層等の地盤を切削するため、先端駆動のビットを装着した回転ヘッドを有する止水構造付先端装置。
- ・硬質土層、岩盤等を掘削するため、パーカッション等の打撃型機構を有する先端装置。
- ・砂質層を掘削するため、ウォータージェット等による噴射機構を有する先端装置。 等

②先導管

先端装置を収納する外管

③接続用曲線管

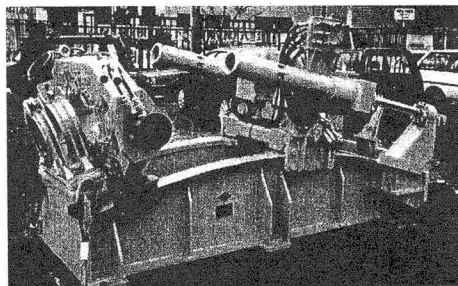
- ・外管（注入工を併用する場合は注入ノズル付、あるいは接続施工の場合はセクションジョイント付等）
- ・内管（送排泥管用、先端装置推進・引戻し用、駆動用、 エア・高圧水用等）

④推進用、引戻し用設備

- ・推進装置（ジャッキを用いた押し引き装置、ギア等を用いたチェーン駆動装置、ワイヤ・ロッド等を用いた装置等）
- ・一定曲率を保持するガイドベース付き架台（写真－１）

⑤後続設備

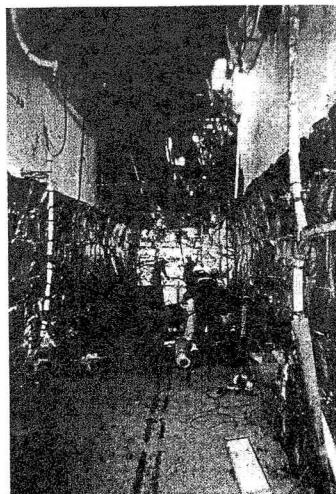
- ・送排（泥）水ポンプと排泥処理設備
- ・バキューム設備
- ・泥土排出装置と処理設備
- ・エア設備



写真－１ 一定曲率保持ガイドベース付き架台

2.3 工法の主な特徴

- ①単心円の円弧形状をした曲線管を精度良く埋設できる。また、推進装置を据え付ける角度により任意の方向に曲線管を埋設できる。
- ②各種材質の管の使用が可能であり、曲率・管径の自由度が大きい。埋設した曲線管を利用した地盤改良工である凍結工法・注入工法や管自体で地盤を支える支保効果等を組合せることができ、適用範囲が広い。
- ③地下水位以下での施工ができるため、非開削施工が可能となる。
- ④曲線管を非開削で埋設でき、最小限の改良範囲で施工することが可能となるため、シールドの地中接合やトンネルの拡幅等を施工する場合、工期・工費の削減が可能である。
- ⑤坑内から管の埋設、凍土の造成、維持管理が可能であり、地上の既設構造物や地中埋設物等の影響を回避して、部分拡幅が可能である。
- ⑥TULIP凍結工法では、写真－２に示すように、掘削部分に凍結管



写真－２ 凍土内掘削完了

がなく、凍結管の盛替えが不要のため、凍土の機械掘削ができ、大幅な工期の短縮となる。

⑦砂質層では、先端装置の選択により高速施工が可能となる。

⑧最小曲率は、ボーリング先端装置の場合は、油圧モータの大ききで決定されるため、現状では、曲線管 8 B で、曲率半径 $R = 3 \text{ m}$ である。

3. 施工事例

3.1 支障とう道の移設

図-1 に示すように、既設とう道が神戸市交通地下鉄海岸線工事のシールドトンネルの掘進に支障をきたすことから、既設とう道の一部を撤去し、図-2 に示すイメージのように、その直下に新設とう道を構築する地中切下げ（拡幅）工事である。支障となる円形とう道は、セグメント外径 4550mm、土被り深さ約 19m で、重要な通信ケーブルが多数収容されている。また、工事場所は繁華街に位置していることから、長時間の道路占用による工事は困難である。また、掘削深度が $GL - 25 \text{ m}$ であり、既設とう道上部に矩形地下河川が埋設されていることから、開削工法によるとう道の付け替え工事は極めて困難であるため、非開削工法である本工法が採用された。また、既設とう道下部に位置する地盤を凍結するために必要な凍結管の設置は、路上から施工することが不可能である。このため、図-3 に示すように、既設とう道内（写真-3）より、掘削坑内に凍結管が露出することなく、計画範囲に凍土が造成できるように曲線ボーリングにて、曲線管を設置（写真-4）した。

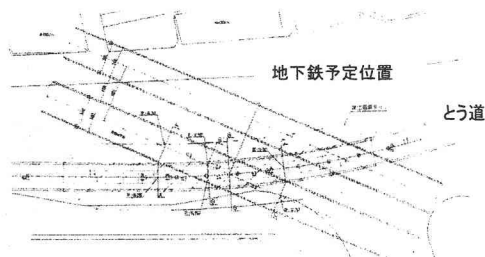


図-1 施工位置図

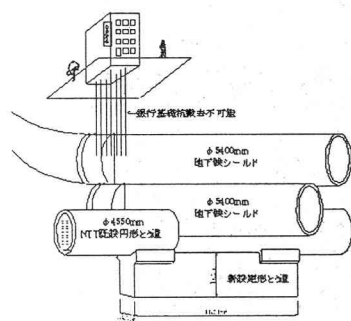


図-2 施工位置イメージ

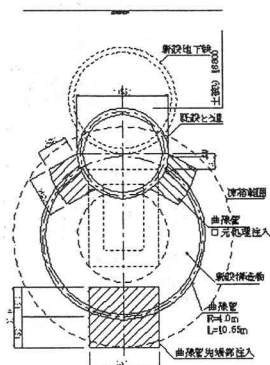


図-3 施工位置断面図

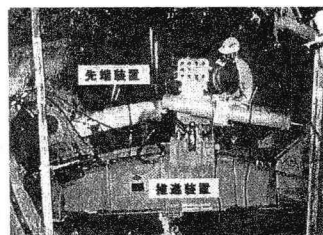


写真-3 坑内推進装置設置状況



写真-4 坑内曲線管設置状況

3.2 先行支保工の設置

本工事は、東日本旅客鉄道株式会社発注の東京都北区王子堀船地先・東北本線王子駅構内首都高速道路新設工事（飛鳥山トンネル）に伴う支保工敷設を曲線ボーリング技術（TULIP工法）を用いて行った。

施工場所は、飛鳥山トンネルの拡幅・延伸部で、地上部は JR 営業線と近接し、かつ急斜面で最小土被りが約 3m であり、環境保全上の配慮等も求められた。そのため、トンネルの拡幅部の施工（けん引工法の作業基地）に先立ち、地盤の改良・補強が必要であった。

本工法の施工手順は、図-4、図-5 に示すように、曲線管（注入孔付き曲線管：外径 $\phi 267.4 \text{ mm}$ 、曲率 $R = 8.0 \text{ m}$ 、左右 8 列の計 16 列、1 列の埋設延長は 17.5 ~ 18.0m）を敷設し、次に、この管を利用した薬液注入（二重管ダブルパッカ方式）を行い、トンネル上半アーチ部を改良補強するものであり、新しいトンネル

先受鋼管支保工（TULIP管）の敷設は、図－５の断面図に示すように、中央導坑内から推進装置（写真－５）により、掘削上半部へ屋根上に埋設する。

地盤改良後のトンネル掘削は、上部半断面を上段、下段分けて行う。写真－６はその上段部を掘削した状況である。写真－７では、曲線管と交差した既施工のロジンジェット工法による改良部（白い部分）が確認できる。このように地盤改良工は 曲線支保工と一体となった地山の補強効果が確認できた。また、この工法は、掘削の前に支保工の敷設、地盤改良工が実施できるため、施工、安全に対して高い効果があった。

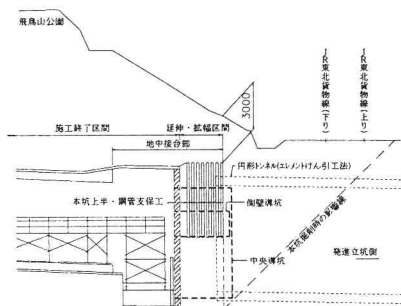


图-4 施工位置横断面

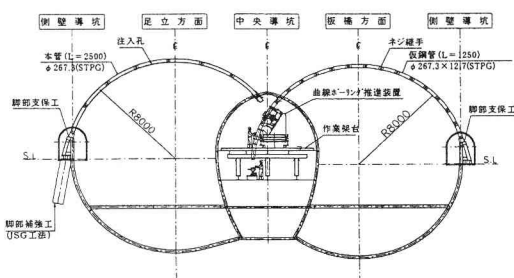


图-5 施工位置断面

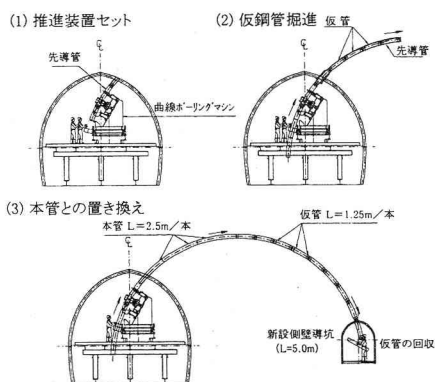


図-6 主な施工手順



写真-5 中央導坑施工状況

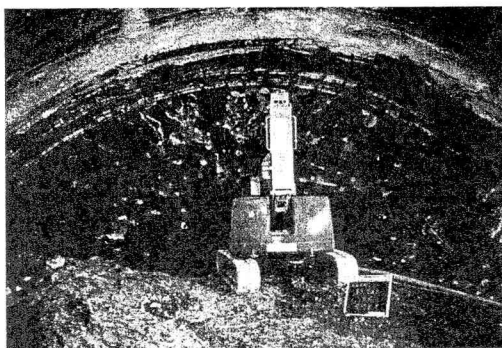


写真-6 上段部掘削状況

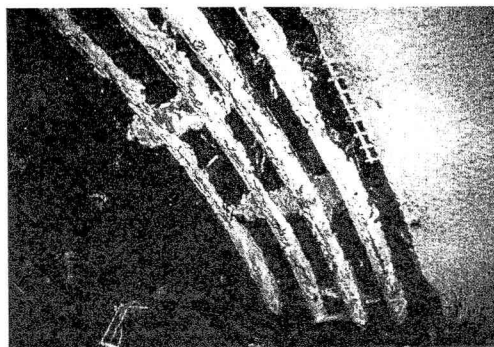


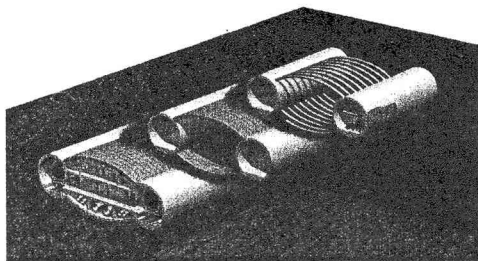
写真-7 注入効果確認

4. 計画事例

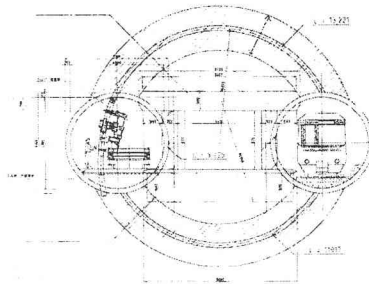
4.1 鉄道トンネルの地下駅部の築造（写真－8）

地下駅を開削工法でなく、TULIP工法で地盤改良工を施し、坑内から駅部を築造する。施工は単線断面トンネルの場合でも、複線断面トンネル（図－7）の場合でも可能であり、本工法の主なメリットは次の通りである。

- ①単線断面トンネルの中央部や、複線断面トンネルのサイド部など、任意の位置に駅部を築造できる。
- ②大深度の地下水位であっても、TULIP管を利用した凍結工法等の採用により、信頼性の高い地盤改良ができ、改良範囲も必要最小限でよい。
- ③すべての作業が坑内から可能である。（非開削工法であり、地下障害物を回避できる。）
- ④特殊なシールド機が要らず、機械費が大幅に低減できる。



写真－8 駅部施工イメージ



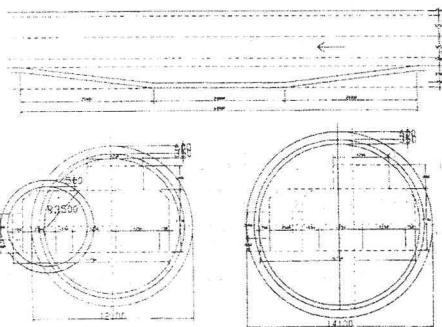
図－7 駅部施工イメージ

4.2 道路トンネルの拡幅

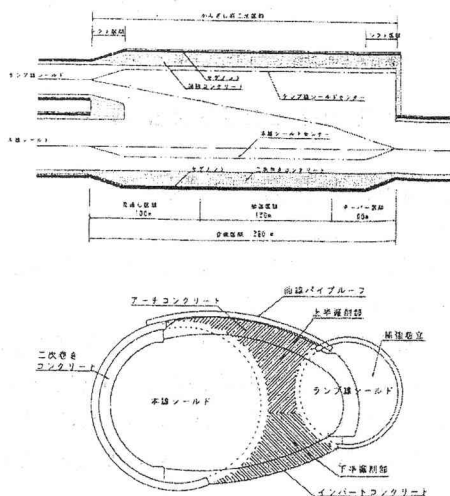
シールドトンネルで築造する道路の非常駐車帯や分岐または合流部等の拡幅部にTULIP工法で地盤改良工を施し、必要最小限の掘削で、構造物を築造できる。

本工事におけるTULIP工法の主なメリット次の通りである。

- ①本線のトンネル内から施工できる。
- ②地上からの施工がほとんどない。
- ③地下障害物に関係なく作業が可能。
- ④地下水位下でも施工可能である。
- ⑤地盤改良工は、地質により、注入工、凍結工など合



図－8 非常駐車帯計画図



図－9 分岐・合流部計画例1

理的な方法が選択でき、TULIP管と一体となった支保効果がある。

- ⑥TULIP管は、掘削土内に出現せず、掘削が効率的にできる。

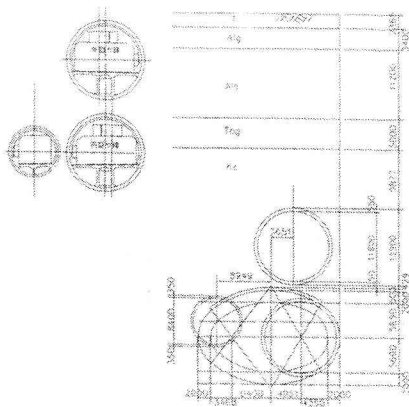


図-10 分岐・合流部計画例2

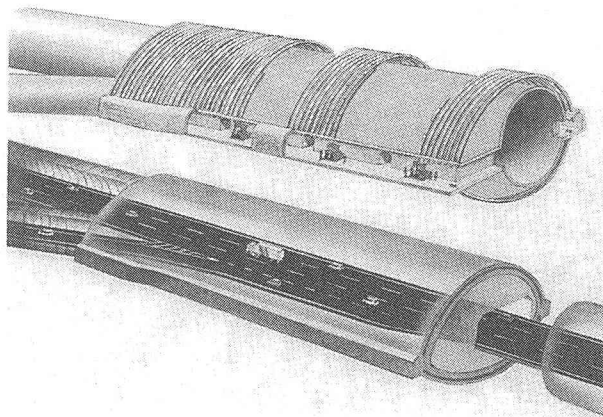


写真-9 分岐・合流部イメージ

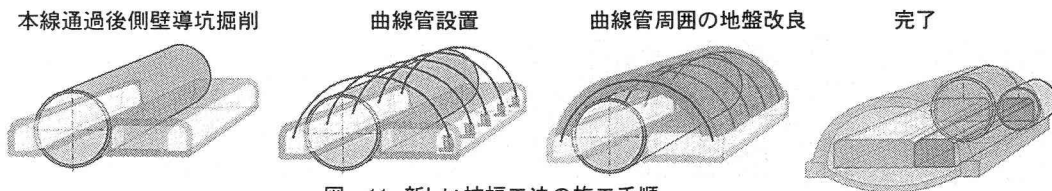


図-11 新しい拡幅工法の施工手順

4. 3 地下鉄のポンプ室築造 (図-12)

シールド工法で築造した地下鉄トンネルの排水ポンプ室の築造に、補助工法として凍結工法を適用するとき、地上からの作業がなく(地下障害物あるいは道路等の占有の回避が可能)、また、凍結管も凍土掘削内に発生しない(凍結管の盛替えがなく、機械掘削が可能)。

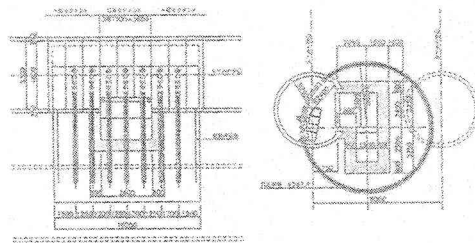


図-12 地下鉄排水ポンプ室築造

5. コスト縮減を目指した管接合法の開発

5.1 形状記憶合金継手開発の背景

鋼管を利用した建設工事等には、パイプルーフ工、鋼管杭工、トンネルの支保工、注入工、凍結工、ドレーン工等があり、これらの工事において、管の接合作業は、強度・精度・施工速度・コストを大きく左右する大きな要因の一つとなる。

従来、強度等が求められ、かつ、管と同径で接合する場合は現場円周電気溶接による方法が一般的であった。しかしながら、この電気溶接による管接続方法は、①溶接時間、②接合内面の凹凸、③狭隘な地下空間での換気、④冷間加工した曲線管の溶接時の入熱による変形、⑤溶接火花や高熱の発生により、曲線管内のボーリング先端装置用油圧ホース等の焼損および周囲の火災の恐れ、⑥技量のある溶接工が必要等の課題が挙げられる。

特に、狭隘な作業空間で行う本工法では、曲線管の接続回数が多くなり、合理的な接続方法の開発が望まれている。これらの解決策として、鉄系形状記憶合金継手(SMA: Shape Memory Alloy)を使った構造用パイプの新しい接合法に着目して開発を進めた。

5.2 鉄系形状記憶合金の特性

形状記憶合金とは、この合金に変形を加えた後、ある温度に加熱すると、あたかもそれ自身が以前の形を覚えていたかのように、自力で変形前の形に戻ってしまう性質を示す金属のことをいう。日本で開発された鉄をベースとする 28Mn-6Si-5Cr-Fe 系形状記憶合金はチタン・ニッケル (Ti-Ni) 合金より経済的であり、大型部材向きの素材である。

しかし、その特性を活かした材料としての使用はほとんどされていなかった。そこで、その特性を活かすべく、上述の条件を満たすことが可能であると判断して、研究開発を進めることにした。

この 28Mn-6Si-5Cr-Fe 系形状記憶合金継手の主な特徴は下記のとおりである。

- ①作業（加熱締結）が短時間である。
- ②作業環境がクリーンである。
- ③熟練工でなくても作業ができる。
- ④締結部の管内面が滑らかである。
- ⑤継手の強度が期待できる。
- ⑥溶接火花や高熱の発生による火災の恐れがほとんどない。

5.3 形状記憶合金（SMA）継手締結の概要

SMA継手は形状が単純で、かつ、取扱いが容易である。パイプを円筒状に切削した部位にSMA継手を装着したのち、一定温度（約 300℃）の高周波加熱により継手を収縮させ、短時間（約 3分）で締結を完了する。このための作業は熟練工でなくても可能であり、クリーンな作業環境も創造できる。また、曲線管での適用も可能である。

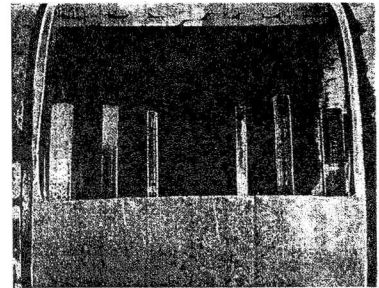


写真-10 せん断キー付継手

5.4 開発したSMA継手の概要

SMA継手の開発は、強度を向上させる要素として継手の特性を下記の項目に着眼して行った。

- (1) SMA継手の特性：継手長、継手厚
- (2) 鋼管定着部の特性：鋼管定着部の外径、管厚
- (3) SMA継手と鋼管定着部との特性：形状寸法（精度）、隙間、シール材、C型リング（せん断キー）、点溶接
- (4) 素材パイプの口径・肉厚・公差および曲率

SMAの継手は板材からの製法と、遠心鋳造による方法が考えられる。従来は、板材からの製法に頼っていたが、小ロッド・多品種には、遠心鋳造による方法の方が、工程も少なくコストが安くなることが予測されたので、遠心鋳造法での製法に着目して開発を行った。

SMA継手は基本的にSMA継手の収縮力による摩擦接合を応用した機械式継手である。このため、定着部の強度アップに向けた各種試験を行い、写真-10に示す、せん断キー（Cリング3条）を用いた構造を選定した。

5.5 曲線ボーリング工法と形状記憶合金継手

曲線ボーリングより埋設された曲線管は、管それ自体の利用、凍結管、注入管、支保工、ルーフ管として利用可能である。

これらの場合、一般的には、限られた作業空間で施工するため、管の接続回数が多くなり、電気溶接による管接続方法では、溶接時間が作業のサイクルタイムの大半を占め、合理的施工の障害になっていた。

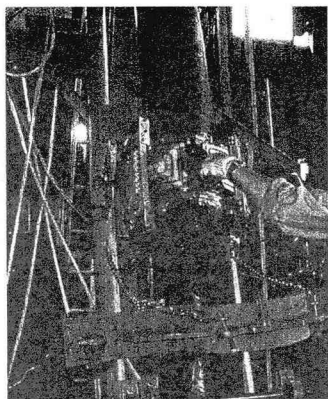
この解決策として、多くの特徴を持つ形状記憶合金継手を曲線管の接合にも適用すべく研究開発を進め、引張り強度試験・曲げ試験、曲線ルーフ工等における実証実験においてもその有効性が確認された。

この接続法は強度、作業環境、施工性に優れて、特にサイクルタイムの大幅な低減となり、工期、工事コストの縮減につながる事が確認された。

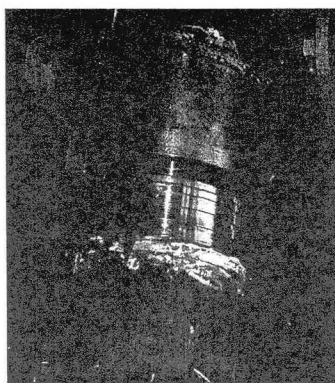
5.6 施工性の確認

管の接合は、管の使用目的、管径、作業状況等に合わせて継手の形状（機能）を適合させる必要がある。そのために、SMA継手の基本特性の研究と併せて、製造コストの削減、規格の標準化、品質管理、加熱装置のコンパクト化、低コスト化等の研究開発をすすめ、写真－11、写真－12に示す施工性の確認試験により、原位置での施工も可能となっている。

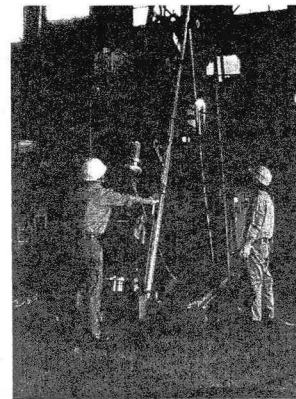
この管の新たな接合技術は、直線管、曲線管の急速施工等を可能にする。その中でも特に、本接合法を曲線ボーリング技術と併せて、総合化およびシステム化し、かつ継手部の可縮性を活かすことにより、図－13に示す大断面地下空間の構築等を経済的、安全に創出することが可能であり、実プロジェクト化を目指していく。



写真－11 コンパクト化した加熱装置



写真－12 継手部詳細



写真－13 施工性試験

6. おわりに

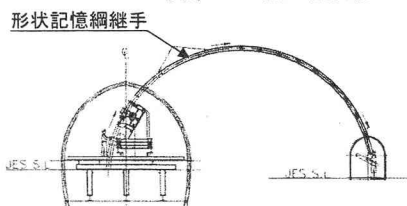
「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」が平成12年5月19日に成立し、平成13年4月から施行しており、今後は、ますます地下空間の有効利用が望まれてくる。このような中で地下空間を構築する技術に対しても、安全、環境、コスト等により配慮した技術が必要となる。これらニーズに対し、本工

法は、大都市部でのトンネル、地下鉄道駅、道路トンネルの合流部等の構築を、地上部の構造物や輻輳する地下施設への影響、地域の都市機能への阻害を最小限にすることが可能であり、適用範囲が広いと考える。

また、報告した大断面の双設トンネル施工実績から、周辺の影響も少なく、本工法により設置した先行支保工の有効性は確認できたため、同様な施工事例が増えると考えている。今後は、その有効性が期待できる提案事例の実施工に向けて、太径管に対応できる施工法、玉石層対応等適応地盤の拡大、長尺管の施工精度管理方法、施工サイクル短縮に対応する管接合法の確立等に対する実証実験等を行っている。

【参考文献】

- 1) 粕谷、青木：都市部における大断面地下空間構築方法の提案、地下空間シンポジウム 論文・報告集、第8巻、pp237～242、2003.1
- 2) 粕谷、小幡、三木、丸山：地下空間構築に用いる曲線パイプ接合技術の開発、土木学会地下空間シンポジウム論文・報告集、2000年1月、pp.163-168



図－13 先行支保工形状記憶鋼継手接合