

地下空間構築に用いる曲線パイプ接合技術の開発 CONNECTION METHOD OF CURVED PIPE FOR CONSTRUCTION OF UNDERGROUND SPACE

粕谷 太郎・ 小幡 常雄・ 三木 甫... 丸山 忠克...

Taro KASUYA, Tokio OBATA, Hajime MIKI and Tadakatsu MARUYAMA

Recently, curved boring is carried out from the space of shield tunnel or TBM silot tunnel. Combination of curved boring and existing construction methods are enable combination of larger underground space.

This paper reports on the development of connection method named joint of SMA (Shape Memory Alloy) for curved pipe which are used for underground construction.

SMA joint is a kind of simple mechanically joints.

We report the results of some measure on pull strength of SMA joints and discuss them in this paper.

「key word」 underground space, curved boring method, shape memory alloy

1. まえがき

近年、建設分野での技術革新は目覚ましい進歩を遂げている。このなかで、大都市部におけるトンネルの構築技術は、地上部の構造物や輻輳する地下施設に影響を及ぼすことなく、また地域の都市機能をできる限り阻害することのないように、かつ、効率よく建設することが望まれている。

さらに、地下空間の適用範囲が拡大していることからトンネルの大断面化・複雑化、大深度化、長距離化等に対応できることが重要な技術課題であるといえる。

このようなニーズのなかで、山岳トンネルの偏平な大断面施工（三車線道路トンネル）および都市での大空間の創出（地下駅、地下駐車場、共同溝等）あるいは都市トンネル等の内部から曲線ボーリングを円弧状に施工し、既存工法との組合せにより大断面の地下空間構築が実用化されつつあり、コスト縮減工法と期待されている。

本稿は、ここで使用する曲線パイプの接続方法である形状記憶合金継手(SMA: Shape Memory Alloy)の開発について述べるものであり、その内容については、鋼管を接合したときの引張試験強度の結果と接合した鋼管をトンネルの支保工等として使用する場合の評価に必要な曲げ試験方法(計画)を記述する。

「キーワード」 地下空間、曲線ボーリング工法、形状記憶合金継手

・ 正会員 フェロー 鉄建建設(株) エンジニアリング本部
.. 鉄建建設(株) エンジニアリング本部
... 正会員 山九(株) 建設技術部
.... 淡路産業(株) 開発部

2. 開発概要

2.1 曲線ボーリング用パイプの接続方法

曲線ボーリング装置(図-1)はすでに開発されており、(社)日本建設機械化協会による建設機械化審査証明を平成6年8月に取得している。曲線ボーリングの有効性は試験施工・実施工において確認されており大規模な都市トンネルへの適用も検討されている。

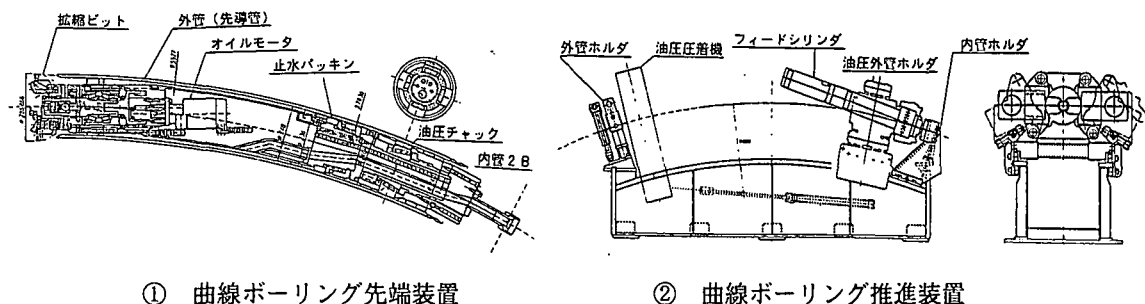


図-1 曲線ボーリング先端装置図および推進装置図

従来、曲線ボーリング用パイプの接続方法は現場溶接継手を使用していたが、溶接時間が長いこと、地下空間での換気が必要であること、冷間加工した曲線パイプは溶接入熱により変形することなどの課題があった。そのうえ、曲線パイプはボーリング用先端装置のさや管であるため接合部の内外面が滑らかであること、接合部の強度が十分であることが必要である。

この有力な解決策である形状記憶合金(SMA: Shape Memory Alloy)継手は、締結時間が短いこと、作業環境がクリーンであること、熟練工でなくても作業ができること、継手の強度が期待できること等の特長を有しており、現場への適用性もすでに報告されている。

曲線パイプの加工は、曲げ半径およびパイプ素材である口径、肉厚の公差等の要因が複雑に関係している。鋼管支保工の曲げ加工は継手強度が重要であることから口径および管厚も大きくなるので管厚内部に残留ひずみを生じない熱処理加工法(高周波加熱)を採用することとしている。

2.2 形状記憶合金(SMA)継手の製作と用途

SMA 継手に使用する日本で開発された鉄をベースとする Fe-28Mn-6Si-5Cr 系形状記憶合金はチタン・ニッケル合金より経済的であり、溶接性および加工性等に優れた新素材である。現在、SMA 継手は継手形状の改良を重ね、写真-1に示すようなC型リングタイプの大口径(300A)用も製作され、継手として実用化を進めている。

曲線ボーリング工法により曲線管を布設することにより、都市土木工法および山岳トンネル工法への応用として次のような可能性があると考えられる。また、写真-2に SMA 継手による曲線管の締結状況を示す。

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| ①曲線管埋設 | ⑦シールドトンネルの地中接合 |
| ②曲線管を利用した地盤改良(凍結工, 注入工) | ⑧鉄道トンネルの駅部拡幅等 |
| ③曲線ルーフ工 | ⑨道路トンネルの分岐合流, 非常駐車帯部拡幅等 |
| ④立坑の地中拡幅等 | ⑩扁平大断面トンネルの支保工等 |
| ⑤大断面地下空間の支保工 | ⑪トンネルの部分拡幅(排水ポンプ室等の築造) |
| ⑥地下街, 地下駐車場 | ⑫ケーブル等のさや管 |

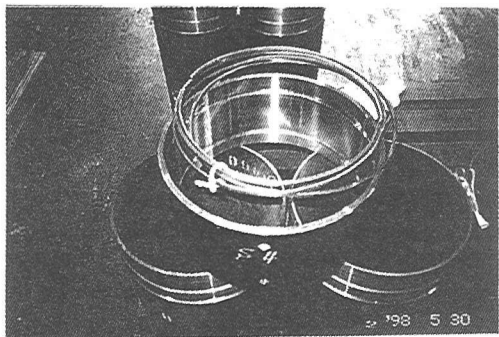


写真-1 300A SMA継手とC型リング

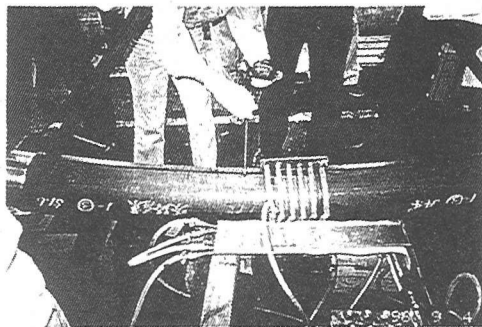


写真-2 SMA継手の加熱締結と温度測定(曲線管)

3. SMA継手の性能確認試験(引張強度)

3.1 SMA継手の試験概要

SMA継手の原理は、約300℃の加熱で約3%の内径収縮を引き起こす特性があり、この内径収縮力によってパイプを機械的に締結する摩擦接合である。継手特性は部位別に下記の3項目で構成される。

- (1)SMA継手の特性：継手長、継手厚
- (2)パイプ定着部の特性：パイプ外径、管厚
- (3)接合面の特性：形状寸法(精度)、隙間、シール材、
せん断キィー(非円形C型リング)

SMA継手の強度特性は引張強度により評価することが適当であると判断し、継手特性のパラメーターを変えて段階的に合計9回の試験を行った。

【ステップ1】SMA継手の基本特性である継手長、継手厚と引張強度との関係から継手収縮力による摩擦接合であることを明らかにした。すなわち、引張強度は継手長および継手厚に比例関係にある。

【ステップ2】さらに摩擦接合の高強度継手を求めてシール材塗布による摩擦力向上、接合面の傾斜等による粗度向上等をはかるも約40%の強度改善に終わったが、シール材による継手の水密性(294Mpa)が期待できることが判明した。

【ステップ3】摩擦接合とボルト締結、スポット溶接、突起付き、C型リング等による抜本的な高強度継手の比較試験から摩擦接合の3～4倍の高強度が得られたC型リング型のせん断キィー方式を高強度継手の基本形式に選定した。

【ステップ4】ステップ3で製作したたせん断キィー(C型リング・溝)を改良し、SMA継手の内面の溝に装着したものをパイプ定着部の溝に挿入・嵌合させ、加熱締結した試験データの蓄積により信頼性のある高強度継手が得られた。詳細内容は次項に述べる。

3.2 C型リングタイプSMA継手の試験計画と結果

(a) 【ステップ3】の中で実地した大口径SMA継手引張試験

曲線管を支保工としてする場合大口径の鋼管が求められる。大口径用にC型リングタイプを適用したときの課題や作業性を把握する目的で行った大口径SMA継手(300A)と鋼管Φ318.5×9.3(STK400)との引張荷重と抜け出し量との関係を図-2に示す。曲線は初期移動ののち、C型リングが噛み合って強度の上昇を伴い鋼管溝部で最終的に損傷した。

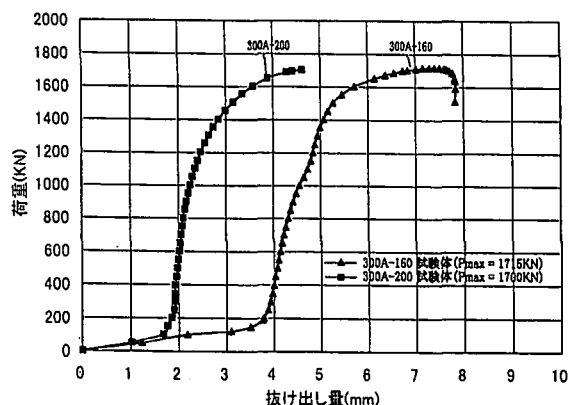


図-2 大口径SMA継手(300A)の引張試験・荷重-抜け出し量曲線

(b) [ステップ4]で実地した100A用C型リングタイプSMA継手の引張試験

[ステップ3]の試験結果では、強度にばらつきがあったこと、引張強度が母管の約40%にとどまったことから、供試体のN数を増やすとともに、C型リングの形状等を改良して、100A用SMA継手で試験を実地した。100AサイズのSMA継手とSTK400鋼管の締結状態を図-3に示す。

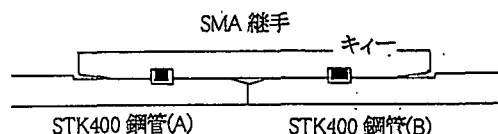


図-3 100A用SMA継手と鋼管の締結状態

試験体は鋼管 $\Phi 114.3 \times 6.0$ (STK400)のミルスケールを除去した定着部外径 $\Phi 113.5\text{mm}$ とSMA継手〔内径 $\Phi 116.0 \times 5.2$ 、継手長96mm〕との隙間を2.5mmに設定し、C型リング〔幅(5,8,10mmの3ケース)×厚み2.5mm、硬度Hv250〕を取り付ける溝をそれぞれ加工した。リングは損傷防止のためSMA継手側に事前に装着して鋼管定着部に差し込んだものを350℃で加熱締結を行った。

リング幅と引張強度との関係を図-4に示す。引張強度はバラツキが小さく、各ケースとも $\sigma=10\text{KN}$ に収斂している。リング幅の狭い5mmの引張強度が幅8mmおよび幅10mmより大きい値を得た。

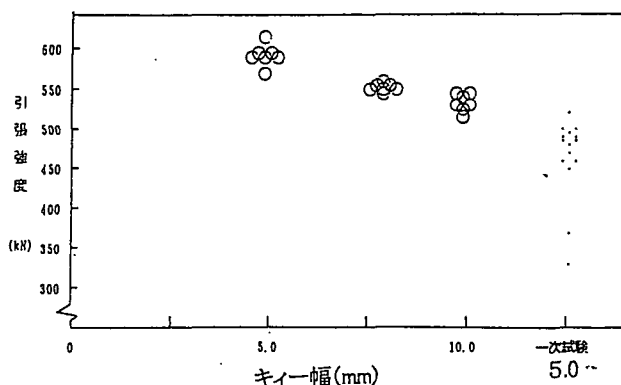


図-4 C型リング幅と引張強度との関係

4. SMA継手接合管の曲げ試験

SMA継手による接合管を支保工として利用する場合は、SMA継手の曲げ特性を把握する必要がある。この目的で計画した曲げ試験計画について述べる。

4. 1 試験体及び試験項目

(a) 試験体

鋼 管 : 250 A ($t = 9.3, 12.0$) STK - 400 で直管および曲線管

継 手 : C型リングタイプ

①直管 : 図-5 参照

引張用 $L=1100\text{mm}$

曲げ用 $L=2300\text{mm}$

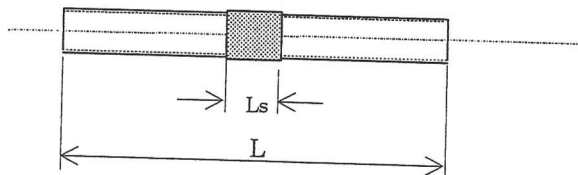


図-5 直管寸法図

②曲線管 : $L^{\sim} = 1500 \times 2$

(図-6 参照)

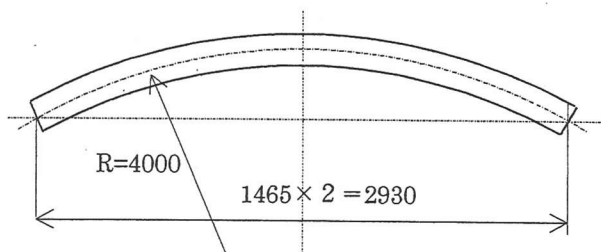


図-6 曲線管寸法図

4. 2 試験種類・試験項目

計画した試験の内容を表-1 に示す。

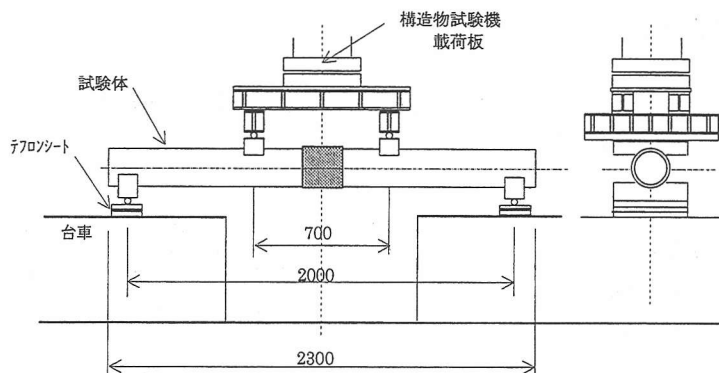
表-1

	試 験 名 称	試 験 体	測 定 項 目
①	250 A SMA 鋼管 (直管)の曲げ試験	・ 267.4 ϕ $t = 9.3$(SMA 無し)$L=2300$ ・ 267.4 ϕ $t = 9.3$ $L=2300$ ・ 267.4 ϕ $t = 12.0$ $L=2300$	・ 荷重～変位 (SMA 継手中央) ・ 荷重～滑り (管 - SMA 相対変位) ・ 荷重～応力 (鋼管・SMA)
②	250 A SMA 曲線管 ($R=4\text{m}$) の曲げ試験	・ 267.4 ϕ $t = 9.3$(SMA 無し)$L=2930$ ・ 267.4 ϕ $t = 9.3$ $L=2930$ ・ 267.4 ϕ $t = 12.0$ $L=2930$	・ 荷重～変位 (SMA 継手中央) ・ 荷重～滑り (管 - SMA 相対変位) ・ 荷重～応力 (鋼管・SMA)

4. 3 SMA継手により接合した直管の曲げ試験方法

試験は 2000 KN 構造物試験機により、図-7 に示すように 4 点曲げ載荷を行う。

載荷は単調載荷とし、荷重制御で約 10 KN ピッチ毎にデータ収集しながら加力し、降伏付近からは変位制御に切替、降伏荷重及び最大荷重を確認する。なお、たわみが 200 mm を超える場合、また、荷重～拔出し量の関係から片側の拔出し量が約 30 mm を超えた場合には試験は終了とする。

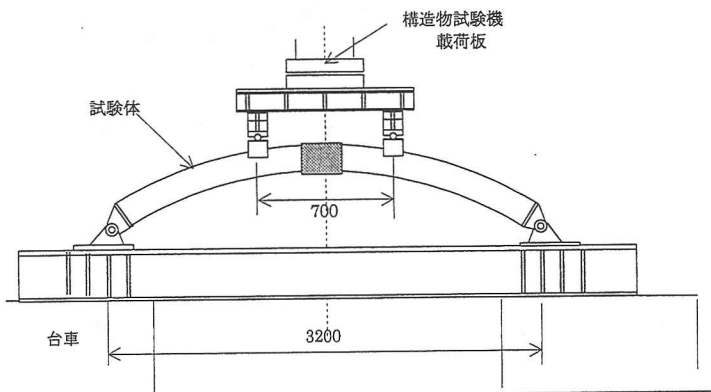


図－7 直管曲げ試験計画図

4.4 SMA継手により接合した曲線管の曲げ試験方法 ($R=4.0m$)

試験は2000 KN 構造物試験機により、図－7に示すように2点を加力する。

载荷は単調载荷とし、荷重制御で約20 KN ピッチ毎にデータ収集しながら加力し、降伏付近からは変位制御に切替、降伏荷重及び最大荷重を確認する。なお、たわみが200 mmを超える場合、また、荷重～拔出し量の関係から片側の拔出し量が約30 mmを超えた場合には試験は終了とする。



図－8 曲線管の管曲げ試験計画図

5. おわりに

本研究では、基本的に摩擦接合である SMA 継手の基本特性を明らかにし、より高強度継手としてC型リングタイプのせん断効果を併用して実用化を目指した試験結果について述るとともに、さらに実用化にむけて曲げ試験の計画についても報告した。今後の研究は、これまで得られた研究結果を生かし、品質管理等を目的とした供試体のNの増加や曲げ試験を行って、SMA継手の実用化を進める計画である。

6. 参考文献

- 1) 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,1999年1月,pp.275-282
- 2) 丸山、大塚：ここまできた形状記憶合金：金属,vol.66(1996)No.12,pp.1079-1088
- 3) 亀岡、粕谷：曲線ボーリング工法(TULIP 工法)の開発：土木学会誌,1995年4月,pp.36-39