

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

柏谷太郎* 小幡常雄** 三木 甫*** 丸山忠克****

Taro KASUYA, Tokio OBATA, Hajime MIKI, Tadakatsu MARUYAMA

The curved boring is an effective method for creating underground space. One of the key points for making this method more effective is the connection technique of curved pipes. A powerful solution is the shape memory alloy (SMA) joint. With this joint, sure connection can be achieved by high frequency heating in a short time, offering an improved work environment with good air quality, free from risk of fire. In addition to the demonstrating tests already conducted, the authors carried out experiments aiming at enhanced quality of this technique with higher tensile strength and better bending performance. This paper discusses the results of these investigations.

「keywords」 underground space, curved boring method, Shape Memory Alloy

1. まえがき

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、今後ますます、地下空間の有効的利用が望まれてくる。そ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。そのひとつとして、小さな空間から曲線ボーリング装置を使用して、曲線管を埋設し、その管を利用した凍結工法や注入工法等で地盤改良を行うことにより、地下空間創出、トンネルの部分拡幅等が可能な曲線ボーリング工法がある(山岳トンネルにおける扁平大断面の支保工としても利用可能)。

本工法をさらに有効的な技術とするための課題の一つとして、曲線パイプの接続方法がある。この有力な解決策として無溶接パイプ継手である形状記憶合金(SMA: Shape Memory Alloy)継手があり、本継手は有資格者でなくても、高周波加熱により短時間の締結ができること、地下空間での換気、火気の恐れも等も少なく良好な作業環境を創造できる等の多くの特徴を持つ。著者らは本継手の有効性を引張強度試験、実証実験工事等の適用で、すでに確認しているが、今回はその特性の研究を深度化するため、引張強度の向上、品質の確立、曲げ特性の研究を目的とした試験等を実地した。本稿はこれらの成果の概要を報告するものであり、研究は①100Aの引張試験で継手特性、強度の向上、品質の確認を行い、②100A引張試験の結果のよいもの複数選定して100A曲げ試験を行い、③250A管曲げ試験は②の結果の径厚比(R/t)等を参考に継手形状を決定して行った。

キーワード：地下空間、曲線ボーリング工法、無溶接パイプ継手、形状記憶合金、曲げ試験

* 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

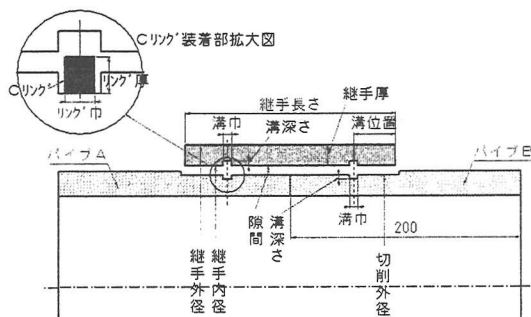
*** 正会員 山九(株) 建設技術部

**** 淡路産業(株) 開発部

2. SMA 継手・試験計画概要

2.1 パイプ用 SMA 継手概要

SMA 継手はネジ式、ボルト継手等と同様な無溶接パイプ継手である。本継手に使用する SMA は日本で開発された鉄をベースとする 28Mn-6Si-5Cr-Fe 系の材質であり、これはチタン・ニッケル合金より経済的で、大型部材の製造も可能な合金である。本 SMA 継手メカニズムは約 300℃の加熱で 2.5～3.0%の内径収縮率を引き起す特性を利用してパイプを機械的に接続する摩擦接合と強度向上のため、継手間にせん断キーの機能持つ C 型リングを挿入した構造である（図－1 参照）。本 SMA 継手は直線管のみならず曲線管にも十分適用できることは、既に、曲線パイプルー工の実証実験の中でも確認されており、その試験状況を写真－1 に示す。



図－1 SMA 継手による接続部の断面図



写真－1 曲線パイプルー工での SMA 継手試験

また、本継手の遠心鋳造法による製作の研究開発も進め、実用化の目処もついた。この製作法は板材から製作する場合と比べ、小ロット多品種でも、その製作コスト、品質の向上等でメリットがある。今回の試験用に製作した SMA 継手(100A、250A)も、すべて遠心鋳造法で製造した物である。本継手特性はこれまでの引張試験の結果から、つぎのような要因が相対的に、継手部分の強度に影響することが確認されている。

- (1) SMA 継手の特性：素材特性（耐力、収縮率、弾性定数）、継手長、継手厚
- (2) 鋼管定着部の特性：鋼管外径、厚、強度特性
- (3) 接合面の特性：形状寸法（精度）、隙間、シール材、せん断キー（C型リング）、溝形状

2.2 試験計画の概要

これまでの試験結果では、引張試験における継手の破壊形態は鋼管溝底の破断、鋼管溝のせん断破壊、鋼管溝からのキーの外れ、キー切断の4種類であり、引張荷重に対して弱点部から継手が破壊している。破壊形態により継手強度は異なり、強度のバラツキもあった。この原因として、継手特性が微妙に関係しており、とくに継手の加工精度、素材公差等が影響していると考えた。

また、パイプが曲げ荷重を受ける場合には、その変位が大きくなると引張側の SMA とパイプとの隙間が生じるため、キーが SMA 溝またはパイプ溝から外れないことが継手の構造上から重要であると思われた。

以上のことを考慮して、今回の試験は次の3段階に分けて行うことにした。

[ステップ1]：100Aパイプの引張試験

高強度の得られる継手形状を研究するため、上記の(1)～(3)の特性を変えて比較検討する。形状の種類は13 ケースとし、品質の安定性を確認するため、各4体とし、また、鋼管（素管）と比較するため、それを1体行う（試験体計 13×4 体＋（素管）1 体＝53 体）。なお、品質の安定性を確保するため、使用するパイプは STPG370 のΦ114.3×8.6(sch80)の同一ロットからとし、その機械加工精度にも配慮した。

* 整理の都合上、試験体番号は頭に継手有り試験体 No：B、E、F、G、H、I、J、K、L、M、N、O、P、継手無し試験体 No：Q として、それぞれに1から4と付記した。（例：0-1、0-2、0-3、0-4）。管厚は No：B、E、F、G、Q が $t=6.0\text{mm}$ 、 $t=8.6\text{mm}$ が H、I、J、K、L、M、N、O、P である。

[ステップ2]：100A パイプの曲げ試験

[ステップ1] の試験結果から曲げ荷重に適した継手形状を鋼管厚毎 ($t=6.0、8.6\text{mm}$) に1 ケースづつ選定し、かつ、品質の安定性を確認するため、各3 体行う。また、鋼管（素管）そのものの曲げ試験も併せて管厚毎に各1 体行い、比較検討する（試験体計8 体）。＊試験体番号は管厚 $t=6.0\text{mm}$ の継手有り試験体 No：45、46、47 継手無し試験体：60 とし、管厚 $t=8.6\text{mm}$ の継手有り試験体 No：54、55、56、継手無し試験体 No：80 とした。

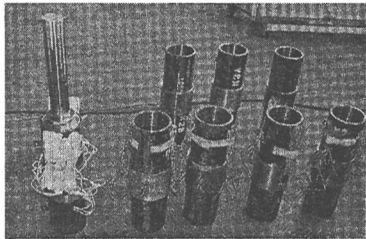
[ステップ3]：250A パイプの曲げ試験

250A パイプの曲げ試験は【ステップ2】試験結果の良い方の継手形状を1 ケース選定して、鋼管厚 $t=9.3\text{mm}$ (STK-400) で行う。試験体は品質確認のため、継手あり3 体と鋼管（素管）を1 体行う。さらに、管径と管厚(径厚比： R/t) と曲げ耐力の関係を調べる目的で、同一 SMA 継手仕様で鋼管厚 $t=12.7\text{mm}$ のものを1 体行う。＊試験体番号は管厚 $t=9.3\text{mm}$ の継手有り試験体 No：11、12、13、継手無し試験体：10 とし、管厚 $t=12.7\text{mm}$ の継手有り試験体 No：00 とした。

3. 100A パイプの引張試験

3.1 試験体形状

試験体は写真－2 に示すようなパイプ中央に SMA 継手を装着し、把持部を $\Phi 52\text{mm}$ 鋼棒とした。鋼棒とパイプの定着は端部でネジ定着した構造である。その一部の仕様を表－1 に示す。パイプは STPG370 の $\Phi 114.3\times 8.6$ (sch80) を使用し、管厚 6mm 管は規格差異をなくするため同ロットのパイプ内面を切削して、 $\Phi 114.3\times 6.0$ を製作した。



写真－2 100A 鋼管の引張試験体

SMA 継手厚は管厚を考慮し 5.2mm、7.3mm の2 種類を用いた。

3.2 最大荷重と破壊形態

試験は 2000kN 万能試験機を使用し、荷重 10－20kN ピッチ毎に変位および抜け出し量を測定した。最大荷重（各ケースの4 体平均値）を表－1 に示す。破壊形態はキーによるパイプ溝のせん断破壊を生じたのちキーの移動を生じた。パイプ溝のせん断破壊はパイプの規格 STPG370 の引張強さ 406N/mm^2 （規格 370N/mm^2 以上）が SMA 素材の引張強さ 630N/mm^2 と比較して小さいことが原因である。せん断キーの幅厚比（幅／厚）の小さい試験体はせん断破壊でなくキーのパイプ溝からの外れを起し易いので最大荷重が小さく、反対に幅厚比が大きい試験体はせん断破壊を生じるので最大荷重も大きい傾向である。なお、キーの装着位置は試験体 B のみが SMA 継手側であり、その他はすべてパイプ側である。

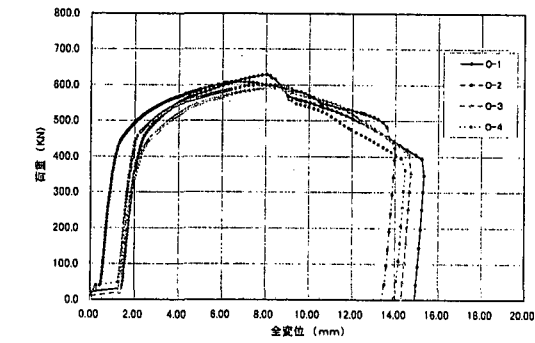
表－1 引張試験の試験体仕様と試験結果（単位：mm）

試験体 ケース No.	SMA 継手				パイプ				せん断キー		最大荷重 KN	破壊形態
	長	厚	溝幅	溝深	外径	厚	溝幅	溝深	幅	厚		
B, E, F, G	100	5.2	5.3	1.5	113.5	5.5	5.3	1.5～ 2.5	5.0	2.5～ 4.0	416.8～ 440.0	せん断破壊
H, I, J	100	5.2	5.3	1.5～ 2.0	113.5	7.7	5.3	1.5～ 2.5	5.0	2.5～ 4.0	526.0～ 572.5	せん断破壊
K, L, M	100	7.3	5.3	2.0	113.5	7.7	5.3	2.0～ 3.0	5.0	3.0～ 4.5	564.5～ 595.8	せん断破壊
N, O, P	100	7.3	8.5	2.0	113.5	7.7	8.5	2.0～ 3.0	8.0	3.0～ 4.5	506.3～ 695.3	せん断破壊 パイプ破断
Q	-	-	-	-	114.3	6.0	-	-	-	-	789.0	-

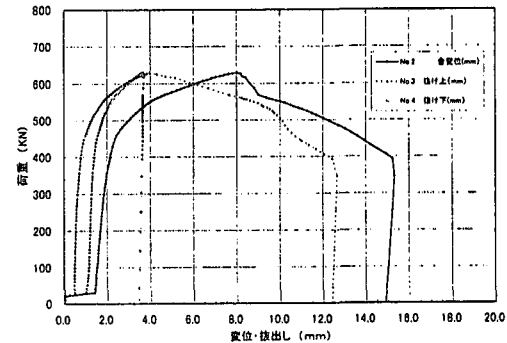
3.3 荷重－変位

試験体 No.O グループの荷重－全変位曲線は図－2 に示すように4 体とも曲線形状、降伏点および最大荷重もほぼ同じで、安定した形状である。曲線は約 40kN までの荷重で初期変位を生じて摩擦接合からせん断キー

継手に移行している。図－3は試験体 No.O-1 の部位別の荷重－変位曲線である。管部上下が変位をともな
って最大荷重を実現した後、管部上側でせん断破壊を生じて荷重低下とともに変位（No.3）が増大している
が、管部下側の変位（No.4）は一定である。全変位 No.2 は No.3 および No.4 の変位を合計したものである。



図－2 試験体 No.O グループの荷重－全変位曲線



図－3 試験体 No.O-1 の荷重－変位曲線

4. SMA 継手の曲げ試験(100A、250A)

4.1 曲げ試験体の仕様と試験結果（最大荷重）

100A パイプ曲げ試験用の継手仕様は、100A パイプの引張試験結果の最大荷重が大きく荷重－変位曲線が安定し、せん断破壊を起こしたキー形状のものを選定することとした。採用した継手仕様は表－1 等の比較検討の結果から径厚比(R/t)の異なる 2 種類の形状：No. E (t=6.0mm)および試験体 No. O (t=8.6mm)である。一方、250A パイプの曲げ試験体は 100A パイプの径厚比(R/t)を基本にしてサイズアップした 250A パイプの継手形状とした。鋼管の種類は曲線ボーリング工法で、一般的に使用されているΦ267.4×9.3(STK400)およびΦ267.4×12.7(STK400)用い、継手仕様はそれを対象にした形状のものとしている。

100A および 250A 曲げ試験の試験体仕様（継手仕様）とその試験結果（最大荷重）および、引張試験体の No. E、No. O の試験体仕様（継手仕様）とその試験結果（引張荷重）も参照のため、併せて表－2（抜粋）に示す。

なお、大口径パイプは小口径パイプと比べて座屈を生じやすいため、その指標の一つとして、径厚比(R/t)だけでなく座屈を考慮した径厚比パラメータ(R_i)を求めた。径厚比パラメータの計算は規格の公称値を使用して次式より求め、その結果も表－2 に示す。

$$R_i = \frac{R_c}{t} \frac{\sigma_y}{E} \sqrt{3(1-\nu^2)} \quad \text{ここに } R_c : \text{パイプの管芯半径、} \sigma_y : \text{降伏点、} E : \text{弾性定数 } \nu : \text{ポアソン比}$$

表－2 引張及び曲げ試験体仕様（継手仕様）と試験結果（抜粋）

試験 区分	試験体 No.	鋼 管			SMA	C リング			径厚比 パラメータ (R/t)	最大 荷重 (kN)	
		外径×厚 (R) (t)	規格強度 (N/mm ²)		長×厚 (L×T)	幅×厚 (w×h)	w/h				
			降伏点	引張強さ							
引張 試験	E	114.3×6.0	215	370	100×5.2	5.0×2.5	2.0	9.53	0.020	440	65 70 78 79 677 590 699
	O	114.3×8.6	215	370	100×7.3	8.0×3.5	2.28	6.72	0.011	610	
曲げ 試験	45	114.3×6.0	215	370	100×5.2	5.0×2.5	2.0	9.53	0.020		
	60	114.3×6.0	215	370	継手なし	—	—	9.53	0.020		
	55	114.3×8.6	215	370	100×7.3	8.0×3.5	2.28	6.72	0.011		
	80	114.3×8.6	215	370	継手なし	—	—	9.53	0.011		
	10	267.4×9.3	235	400	継手なし	—	—	14.38	0.026		
	12	267.4×9.3	235	400	180×10	12.0×6.0	2.0	14.38	0.026		
	00	267.4×12.7	235	400	180×10	12.0×6.0	2.0	11.01	0.018		

4.2 100Aパイプの曲げ試験状況

曲げ試験は2000kN構造物載荷試験機を用い、図-4に示すような支間2000mm、載荷幅700mmの4点曲げ試験により、荷重、変位、継手とパイプの相対変位(拔出し量)およびひずみ等を測定した。載荷は単調載荷とし、荷重制御で約2kN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え、降伏荷重および最大荷重を確認した。なお、たわみが150mmを超えた場合には試験を終了とした。

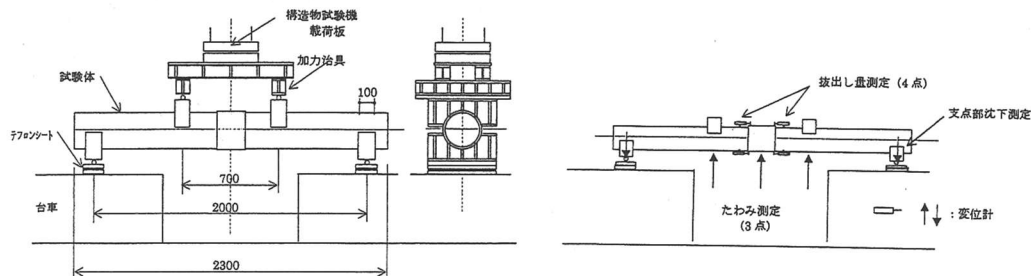


図-4 曲げ試験計画図

図-5は管厚 $t=8.6\text{mm}$ の継手有り試験体No.54,55,56、継手無し試験体No.80の荷重—変位曲線であり、最大荷重および荷重曲線はほぼ類似している。しかし、継手有り試験体(No.54,55,56)は降伏点の変位が約2倍であることから曲げ剛性が約半分である。この変位は引張試験でも述べたように摩擦接合からせん断キー継手に移行するまでの初期変位、パイプの外径切削による断面係数の減少等が複雑に関係していると推察している。写真-3は試験体No.55の変位が150mmのときの載荷状況であり、継手とパイプは一体となっており、継手部の異常はとくに見られなかった。

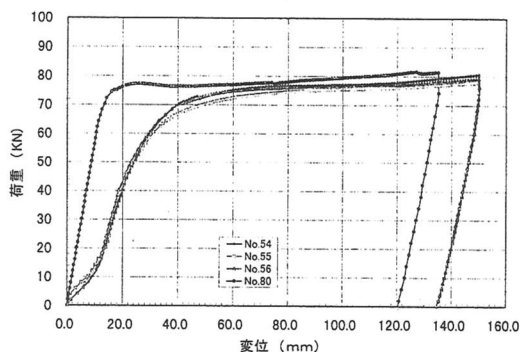


図-5 管厚 $t=8.6\text{mm}$ 荷重—変位曲線(No.80は素管)

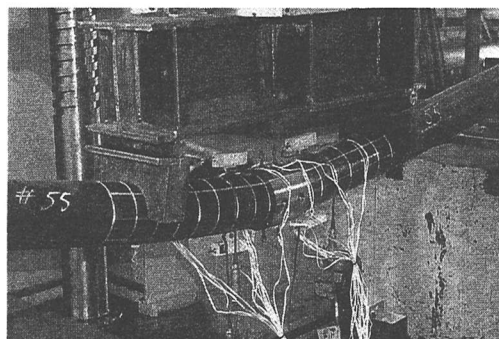


写真-3 試験体No.55の載荷状況

4.3 250Aパイプの曲げ試験状況

曲げ試験は載荷治具を代えて100Aパイプの曲げ試験と同様の支間2000mm、載荷幅700mmの4点曲げ試験により、荷重、変位、継手とパイプの相対変位(拔出し量)等を測定した。250Aパイプの継手は載荷幅700mmで十分な純曲げ状態となっており、継手曲げ試験として問題はない。250Aパイプの試験体No.10,12および00の荷重—変位曲線を図-6に示す。写真-4は試験体No.12($t=9.3\text{mm}$)の載荷状況であり、変位40mmで最大荷重590kNののち急激に荷重が低下して変位も進行し、継手は外観上の損傷はないもののキーが外れて片方の拔出しが20mmに達したので除荷した。同様に、試験体No.00($t=12.7\text{mm}$)は変位44mmで最大荷重699kNののち荷重低下を生じ、片方の抜け出しが20mmに達したので除荷した。試験体No.10($t=9.3\text{mm}$)は継手無しパイプであり、変位49.7mmで最大荷重677kNののち荷重は少しずつ低下し、変位76.7mmで載荷点近傍に圧縮座屈の発生を認めた。

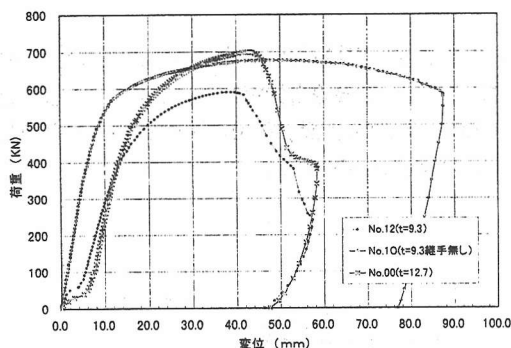


図-6 試験体 No.10、12 および 00 の荷重-変位曲線

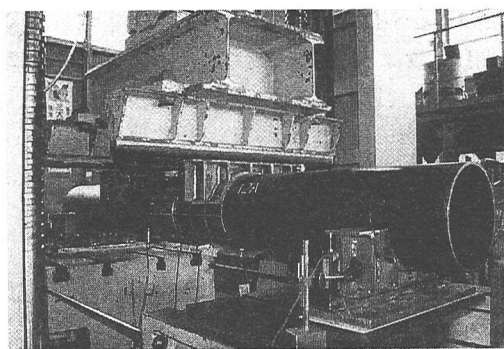


写真-4 試験体 No.12 の載荷状況

4. 4 曲げ試験 (100A、250A)の結果と考察

(a) 100A パイプの曲げ試験

継手無しに比べて、管厚 8.6mm の継手は最大強度は同程度であるが曲げ剛性が 50%程度であるものの継手の外観的な損傷はない。一方、管厚 6.0mm の継手は変位/スパン=3.25~5.10%でキーが外れ、荷重が低下するが 6.0~7.5%まで変位を生じる。変位 40mm のとき、最大荷重はほぼ同等の値である。

(b) 250A パイプの曲げ試験

径厚比(R/t)および径厚比パラメータ(Rt)が曲げ特性の重要な指標となると判断して、それを参考にして継手仕様を決めた。その試験体の試験結果も予想した範囲であった。曲げ強度は荷重-変位曲線から継手なしパイプと比較して試験体 No.12($t=9.3$)では 87%、No.00($t=12.7$)では 103%であり、変位 40mm の範囲では最大荷重を設計的に評価できるものと推定している。継手部は変位 40 数mmでのキーの外れから荷重が急激に低下するが、継手なしパイプも変位約 70mm で載荷に座屈現象が認められており厳しい載荷条件である。

パイプの曲げ剛性は試験体 No.00 の初期変位は大きいものの管厚 12.7mm なので剛性が大きく、試験体 No.10 と同程度の剛性があるが、試験体 No.12 は試験体 No.10 の 50%程度の剛性である。

5. おわりに

SMA 継手の性能確認試験は過去に多くの引張試験により高強度継手を実現していたが設計資料を整備する上からデータのバラツキ原因を明らかにする必要性があった。今回はいままでの結果を踏まえて、継手特性に注目し、鋼管素管の品質、形状、加工精度等に配慮して安定した結果が得られた。高強度継手の要件は、加工精度がよく継手がせん断破壊を起すこと等である。

曲線ボーリング工法は鋼管支保工の無溶接パイプ継手 (SMA 継手) の使用による作業環境の改善と施工能率の向上を目標にして経済的合理性を追求している。今回、SMA 継手は性能確認試験により小口径(100A)から大口径(250A 等)までの高強度継手を実現するための継手特性の因果関係が明らかにすることができたので、今後は実用化を目指した径厚比パラメータ(Rt)の研究、安定した高品質の継手製品の規格化を進めたい。

参考文献

- [1] 粕谷、小幡、三木、丸山：曲線ボーリング工法を利用した地下空間構築技術(形状記憶合金継手)の開発：土木学会年次学術講演大会共通セッション、2000 年 9 月, pp. 212-213
- [2] 粕谷、小幡：曲線ボーリング技術を用いた新しい地下空間創出技術の開発：土木学会地下空間シンポジウム論文・報告集、2000 年 1 月, pp. 35-44
- [3] 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