法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-04

電力埋設管用鉄系形状記憶合金管継手の研究

山本, 英知 / YAMAMOTO, Hideaki

(発行年 / Year)
2009-03-24
(学位授与年月日 / Date of Granted)
2009-03-24
(学位名 / Degree Name)
修士(工学)
(学位授与機関 / Degree Grantor)
法政大学 (Hosei University)

2008 年度

修士論文

電力埋設管用鉄系形状記憶合金管継手の研究

RESEARCH OF FERROUS SHAPE MEMORY ALLOY PIPE JOINTS
FOR BURIED PIPING OF ELECTRIC POWER CABLES

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程
学籍番号　07R1129

山本 英知

指導教員　直井　久　教授

1. 緒言 2
1.1. 形状記憶合金 2
1.2. 鉄系形状記憶合金 4
1.2.1. 形状回復挙動および形状回復特性 5
1.2.2. 物理的特性および機械的特性 9
1.3. 無電柱化推進計画 10
1.4. 電力埋設管用継手 14

2. 供試材 15

3. 絶縁接着材の選定 16
3.1. 選定方法 16
3.1.1. 鋼板試験片を用いた絶縁接着試験 16
3.1.2. 鉄系形状記憶合金管状試験片を用いた絶縁試験 18
3.2. 試験結果 21
3.2.1. 鋼板試験片を用いた絶縁接着試験 21
3.2.2. 鉄系形状記憶合金管状試験片を用いた絶縁試験 22

4. 管継手強度 24
4.1. 試験方法 24
4.2. 試験結果 29

5. 管継手の形状回復応力 32
5.1. 試験方法 32
5.2. 試験結果 35

6. 電力埋設管への適用試験 38
6.1. 試験方法 38
6.2. 試験結果 40

7. 結言 42

参考文献

謝辞

1. 緒言

1.1. 形状記憶合金

形状記憶合金とは，いったん形状を記憶させると，形状を変形させても加熱もしくは冷却による温度変化を与えることで元の形に戻る形状記憶効果を持つ合金の総称である．形状が回復する際のひずみは 1～10%と完全には元の形に戻らないものの，変異を拘束させた状態で形状回復させた際に発生する応力（形状回復応力）は 150～400MPa であるため，実用化に際してはこの形状回復応力を利用することが多い．

一般に，金属材料に外力を加えると，最初は強い変形抵抗を示し外力に比例してひずみが増加する．外力を取り除くとひずみは無くなり，弾性変形で元の形状へと戻る．しかし，外力が材料の降伏点を越えると，材料は塑性変形し外力を取り除いても元の形状へは戻らない．塑性変形が起こるには，以下のどちらかが起こる必要がある．

(ⅰ)金属に見られる，転位を導入してすべりによるせん断変形が起こる．

(ⅱ)の原子の連帯運動によるもので，熱弾性型または応力誘起型マルテンサイト変態が起こる．

形状記憶合金は後者であり，転位によるすべり変形とは異なる．形状記憶効果とは母相へ戻るマルテンサイト逆変態に伴う形状回復現象である．このように，形状記憶合金とは温度および応力に依存して生じるマルテンサイト変態とその逆変態によって形状回復効果を有する合金である．

形状記憶合金に現われるマルテンサイト変態には熱弾性型と非熱弾性型があり，形状回復挙動により一方向性と二方向性に分類される．Ti-Ni 系および Cu 系は熱弾性型マルテンサイト変態であり，二方向性の形状回復挙動を示す．一方，鉄系は非熱弾性型である応力誘起型マルテンサイト変態であり，変態温度ヒステリシスが大きいため一方向性である．

図 1.1 に，熱弾性型マルテンサイト変態および非熱弾性型マルテンサイト変態を電気抵抗－温度関係の模式的な比較図[1)]に示す．

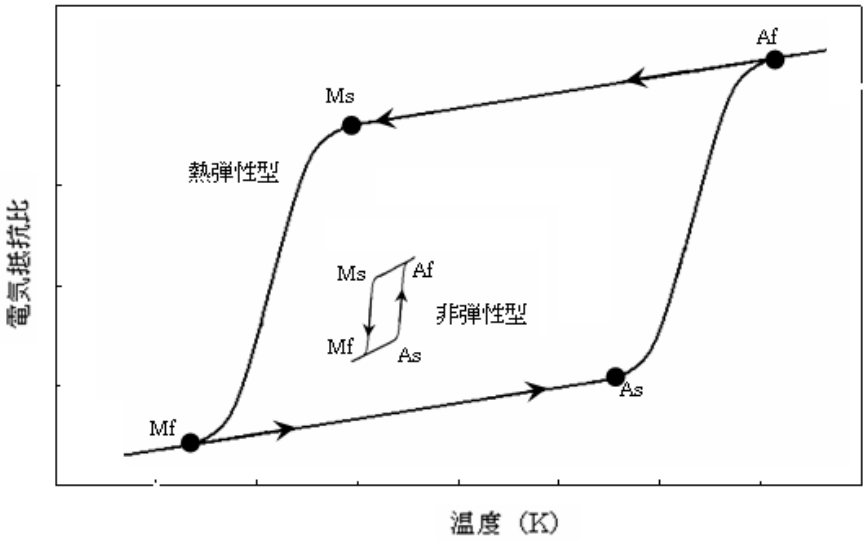


図 1.1　マルテンサイト変態における温度ヒステリシス[1)]

M_sはマルテンサイト変態開始温度，M_fはマルテンサイト変態終了温度，A_sは母相へ戻るマルテンサイト逆変態開始温度，A_fはその終了温度である．熱弾性型マルテンサイト変態の温度ヒステリシスが大きい理由の一つは，マルテンサイト相と母相の界面が整合性を保つために，多量の転位等の格子欠陥を導入して，塑性変形を行わなければならないためである．一方，非熱弾性型マルテンサイトの合金は，転位などによる塑性変形を起こさなくても，マルテンサイト相と母相の界面は整合しており，界面エネルギーが低く，塑性変形のためのエネルギーも要らないため，変態温度ヒステリシスは小さくなる．

表 1.1 に，代表的な熱弾性型の Ti-Ni 系合金と応力誘起型の鉄系合金とを比較する．

表 1.1　Ti-Ni 系形状記憶合金と鉄系形状記憶合金の比較 [2)]

	Ti-Ni 系	鉄系
形状回復ひずみ	8%	4%
形状回復力	400MPa	200MPa
形状回復温度	80℃	400℃
相変態	熱弾性型	応力誘起型
形状回復方向	二方向性	一方向性
加工性・溶接性	難	易
コスト	1	1/10～1/20

Ti-Ni 系合金は，形状回復量は最大 8%と大きく，形状回復を繰り返し行ったときの形状回復特性の劣化は少ない．しかし，鉄系合金と比べて単位重量当たりのコストが高く，加工性も劣るため，主として小型のアクチュエータ [3)]や，小型の精密機械，医療用器具，また，超弾性機能を利用して携帯電話用アンテナ，めがね用フレーム等にも実用されている．

1.2. 鉄系形状記憶合金

鉄系形状記憶合金の研究は，1982 年に佐藤・森らによって単結晶の Fe-Mn-Si 合金に形状記憶効果があることが発見された [4)]ことに始まる．その後，延性や強度，耐食性などの改善に向け数々の鉄系形状記憶合金が開発されてきた．その中でも実用化への期待が高まり，研究が進められているものが，Fe-28Mn-6Si-5Cr(mass%)合金である．

鉄系形状記憶合金は，Ti-Ni 系合金の代替として開発が進められてきたが，近年，一方向性の形状記憶効果を持ち，形状回復ひずみは最大で 4%程であること，Ti-Ni 系と比べ比較的安価であり加工性が良好であることから，大型の機能性構造用材への適用が期待され，形状記憶合金管継手 [5, 6)]や緩み防止ナット [7)]，レール間の隙間を縮めるための締結部材などへの適用が検討され始めている．また，更なる形状回復能を向上させるために Nb の添加や，Mn を減らしコストダウンと加工性の向上も試みられている [8)].

一般の金属のすべり変形と鉄系形状記憶合金が形状記憶効果を示すときに変形を担う原子の動きの模式図を**図 1.2** 及び**図 1.3** に示す.

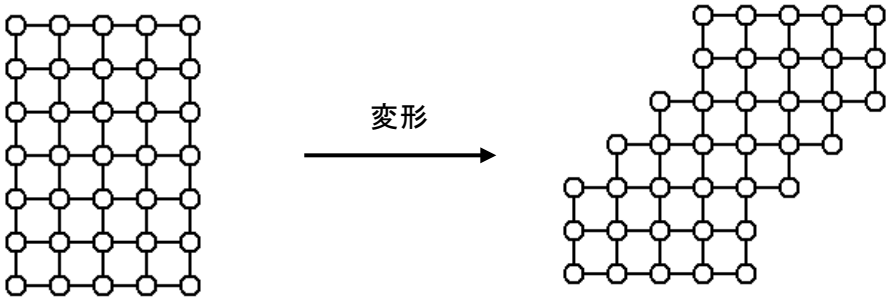


図 1.2 一般的なすべりによる変形

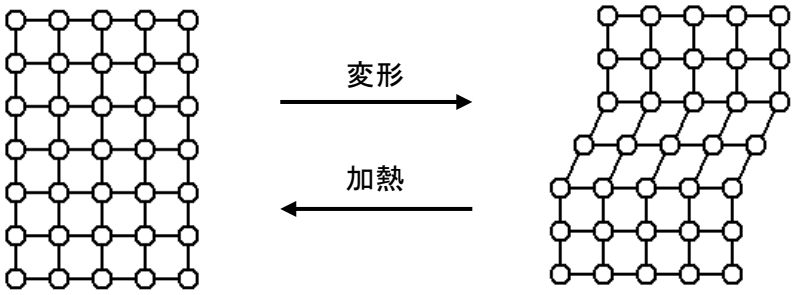


図 1.3 鉄系形状記憶合金の応力誘起マルテンサイト変態

このように鉄系形状記憶合金は，γ オーステナイト相から ε マルテンサイト相への応力誘起マルテンサイト変態とその逆変態により，形状回復が発現する．本合金における自由エネルギーに着目した相変態の概念 [9)]を**図 1.4** に示す.

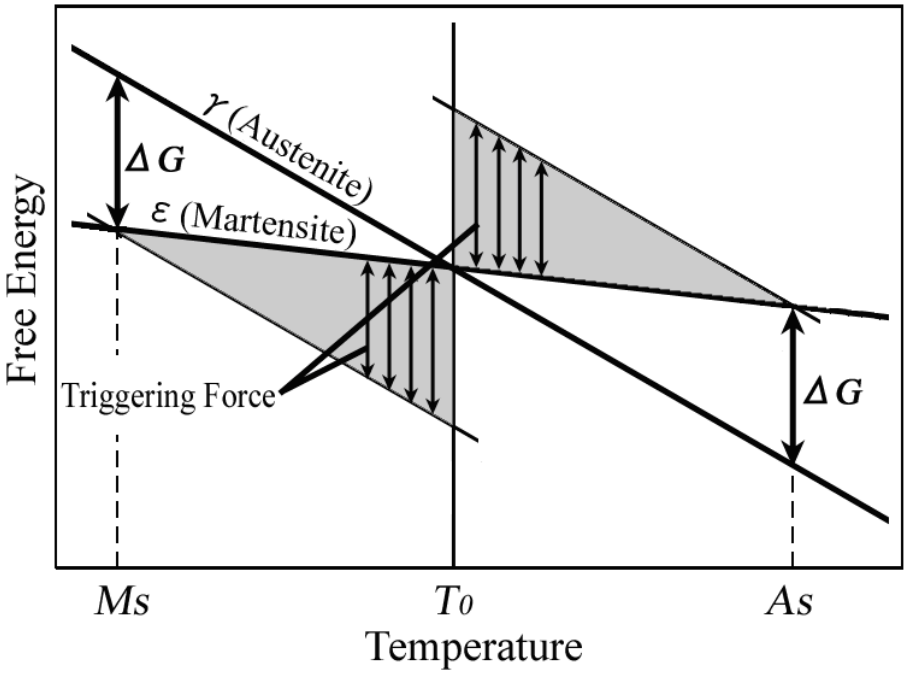


図 1.4　鉄系形状記憶合金の相変態の概念図 [8)]

T_0は ε 相と γ 相の両相の化学的自由エネルギーが等しくなる温度である．$T>T_0$で γ 相が安定となり $T<T_0$で ε 相が安定となる. $M_S<T<T_0$の温度領域では ε 相の安定領域であるが，変態に必要な駆動力と等しい自由エネルギー差⊿Gが不足するため実際には γ 相が準安定で存在する．しかし，$M_S<T<T_0$の温度域では，**図 1.4** の灰色部で示す駆動力⊿Gに足りない自由エネルギー差を外力によって補うことにより ε 相へと変態する．これが応力誘起マルテンサイト変態である．形状回復挙動は $T>A_S$の加熱により， ε 相が母相 γ へと逆変態することで発現する．今回用いた供試材 Fe-28%Mn-6%Si-5%Cr の M_s 点は-23～30℃，オーステナイト変態終了温度 A_f 点は 127～182℃である．

1.2.1. 形状回復挙動および形状回復特性

鉄系形状記憶合金において形状回復効果を発現させるためには，材料の形状を拘束して約 1000℃での熱処理・焼鈍しを施し元の形状を規定する『形状記憶処理』，引張・圧縮などの加工により予め変形を施す『予ひずみ付与工程』，350～400℃で 10 分程度の加熱と保持を施して，逆変態することで形状を回復させる『形状回復処理』の 3 工程が必要となる．

形状記憶処理では，材料の組織はすべて母相である γ 相となる．予ひずみ付与工程による変形では，変形と共に γ 相から応力誘起マルテンサイト相である ε 相への変態が部分的に生じる(図 1.3)．そして，形状回復処理を施すことにより， ε 相から γ 相へと逆変態することにより，付与した変形が回復する．すなわち，鉄系形状記憶合金の形状上回復効果は，この γ ⇔ ε 相変態によるものである．

近年行われた，多結晶の Fe-28Mn-6Si-5Cr(mass%)合金の形状回復特性についての研究は，

主として以下のことが挙げられる.

・単軸引張・圧縮による予ひずみ付与と形状回復特性
・トレーニングの評価
・形状回復処理温度
・ひずみ履歴を有する予ひずみ付与と形状回復特性
・曲げ変形による予ひずみ付与と形状回復特性
・応力下での形状回復処理
・押拡げ加工が形状回復特性に及ぼす影響

ここでは，過去に行われた Fe-Mn-Si 系形状記憶合金の一般的な形状回復特性について説明する.

(1) 単軸引張による予ひずみ付与と形状回復特性

試験片に単軸応力による予ひずみ付与後，形状回復処理を施して予ひずみを回復させた時の，応力－ひずみ曲線及び温度－ひずみ曲線を図 1.5 に示す.

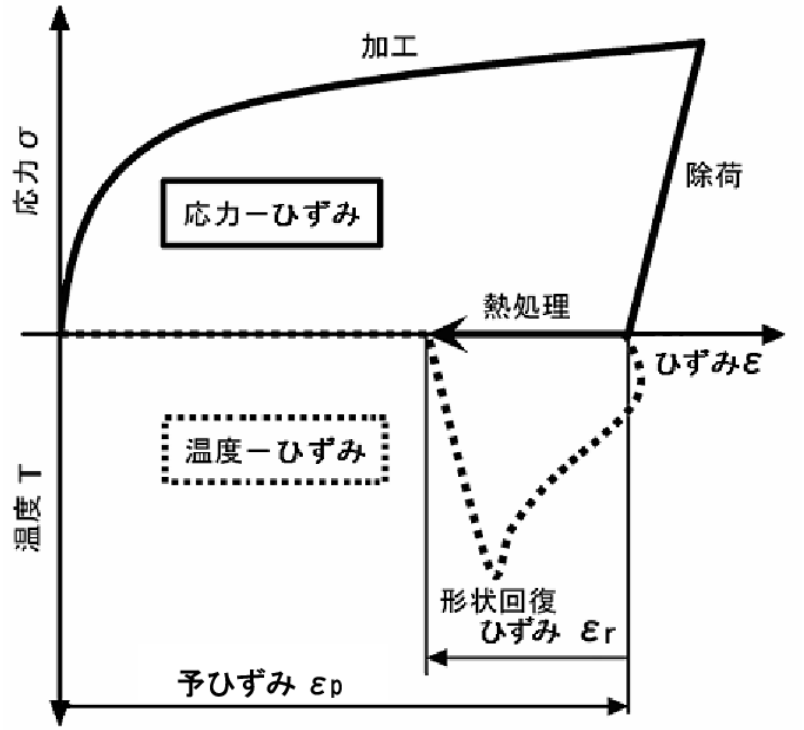


図 1.5　予ひずみ付与工程と形状回復処理を１サイクル施したときの
応力-温度および応力-ひずみ線図

試験片をある程度変形させた後に応力を除荷すると，試験片には残留ひずみ(加工ひずみ)である予ひずみ ε_p が与えられる．その後，形状回復処理として一定の温度まで加熱する際，最初は熱膨張によりひずみは増加するが，温度が高くなるにつれて形状回復挙動が発現しひずみは減少していく．その後の冷却で熱収縮分だけさらにひずみは減少し，最終的に形状回復ひずみ ε_r を得る．

予ひずみ付与前の標点距離を L_1，予ひずみ付与後の標点距離を L_2 とし，予ひずみ ε_p を以下の式で表す．

$$\varepsilon_p = \ln(L_2/L_1) \tag{1}$$

形状回復処理後の平行部標点距離を L_3 とし，形状回復ひずみ ε_r を以下の式で表す．

$$\varepsilon_r = \ln(L_3/L_2) \tag{2}$$

(2) トレーニング効果

予ひずみ付与工程と形状回復処理工程を数サイクル施すことで，形状回復特性が向上することが知られている [10]．これをトレーニング効果と称し，1 サイクル目の予ひずみ付与と形状回復処理工程をトレーニング処理とする．図 1.6 には形状回復処理の加熱温度および保持時間の影響 [11]について，図 1.7 にはトレーニング回数と加熱温度の影響 [11]について示す．形状回復率は以下の式で定義される．

$$\eta = -(\varepsilon_r/\varepsilon_p)\times 100 \quad [\%] \tag{3}$$

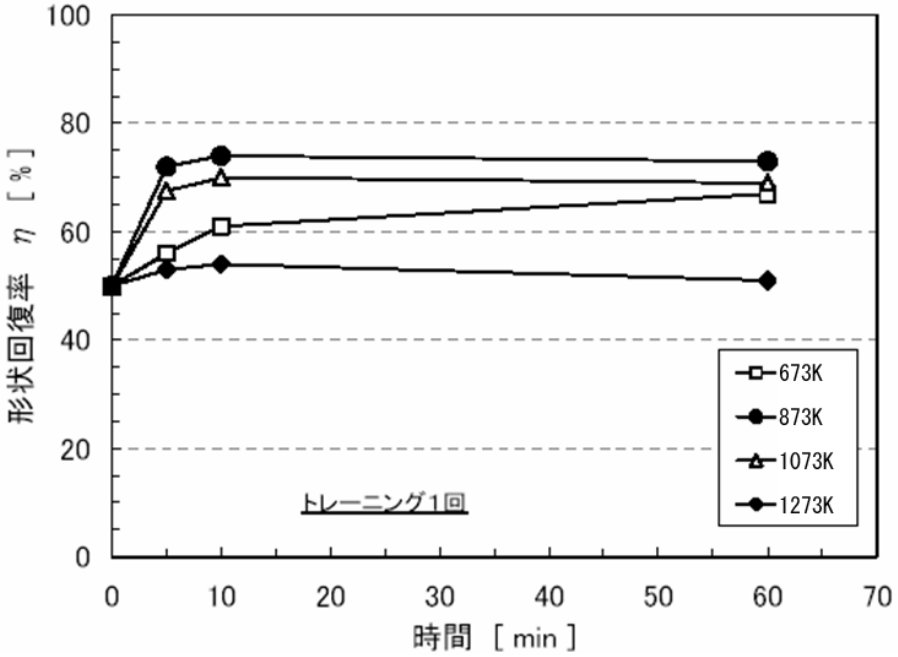


図 1.6　形状記憶処理の加熱温度及び保定時間が形状回復率に及ぼす影響 [11]

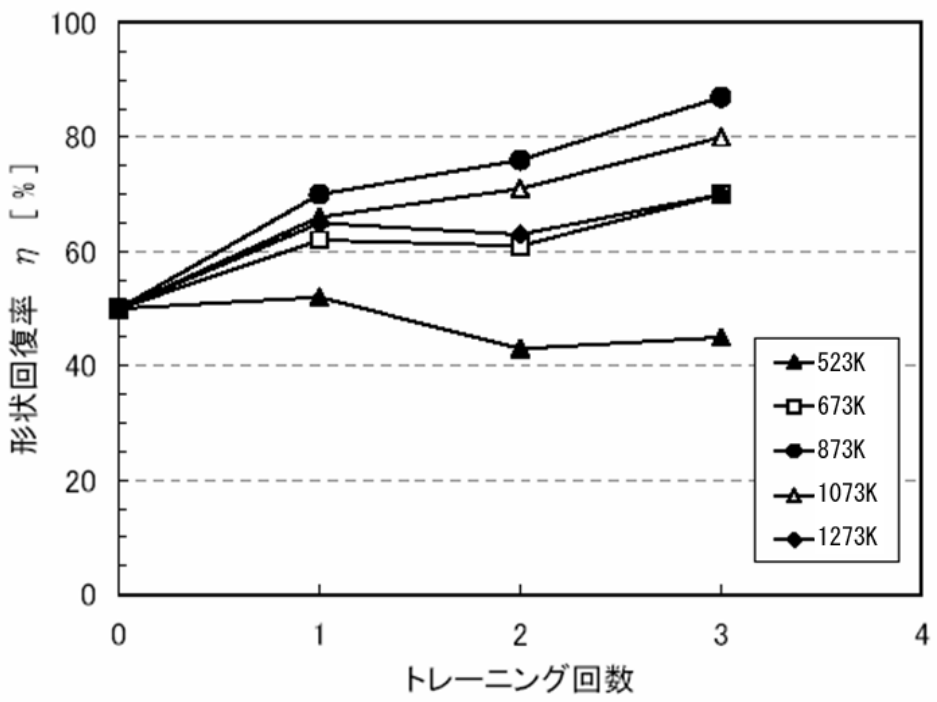


図 1.7　トレーニング回数とトレーニング処理の加熱温度が形状回復率に及ぼす影響 [11)]

また，図 1.8 に単軸応力による引張り・圧縮による予ひずみ付与と形状回復特性の関係を，トレーニング無しと 1 サイクルのトレーニングを施した場合で比較した図を示す [12)].

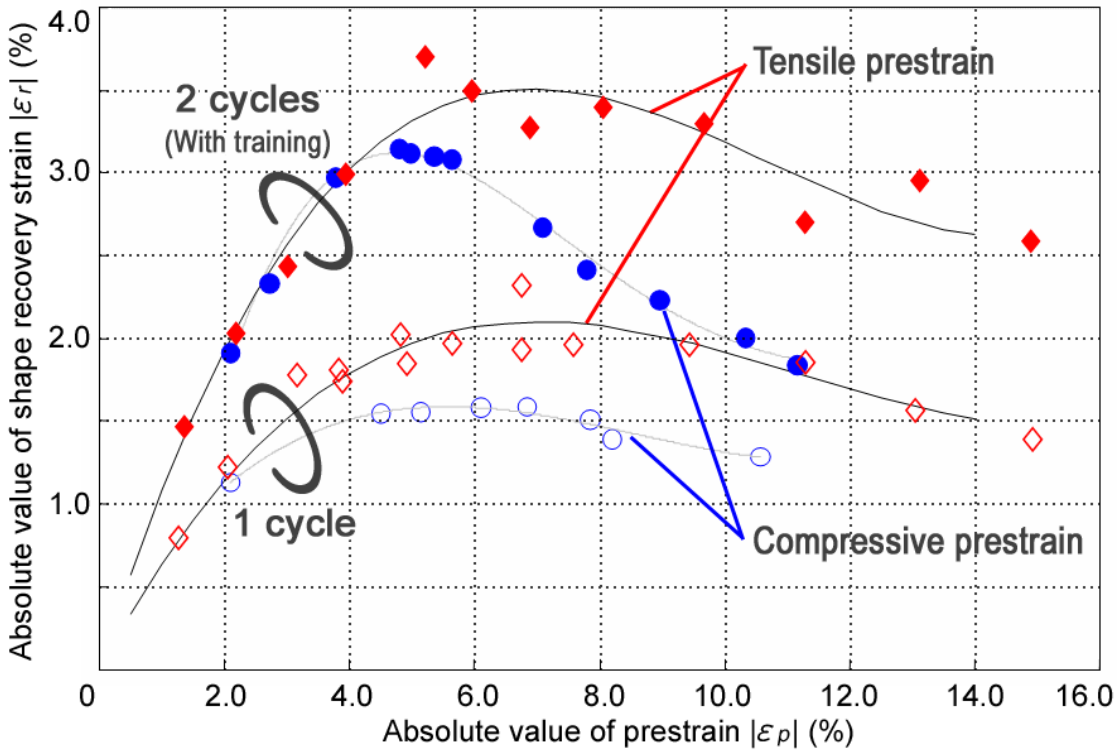


図 1.8　引張りと圧縮の予ひずみに対する形状回復ひずみの比較

1.2.2. 物理的特性および機械的特性

表 1.2 に Fe-28Mn-6Si-5Cr 合金の一般的な物理的特性及び機械的特性[7), 13), 14)]を示す．本合金は機械的特性がオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 に類似する点が特徴である．
同合金の強度は引張強さ TS が 680MPa 以上であり，構造用部材への適用には問題ない．伸びは 16～30%であり，通常の鉄鋼材料と同等の加工性を持つ．溶接性に関しては TIG 溶接が可能である．

表 1.2　Fe-28Mn-6Si-5Cr 合金の物理的特性及び機械的特性[7), 13), 14)]

項目			単位	特性値
物理的特性	密度(25℃)		g/cm^3	7.2～7.5
	融点		℃	1320～1350
	比熱		cal/g・deg	0.13
	熱膨張係数(～500℃)		$℃^{-1}$	$(16～20)\times10^{-6}$
	熱伝導率		Cal/cm・deg・sec	0.02(8.37[W/m・K])
	比抵抗		Ω・cm	$100～130\times10^{-6}$
	縦弾性係数		GPa	169.2
	横弾性係数		GPa	65.0
	ポアソン比	25℃		0.359
		350℃		0.363
	変態温度	M_s	℃	-20～25
		A_f	℃	130～185
	磁気性			常磁性
機械的特性	引張強さ		MPa	680～1000
	降伏強度		MPa	200～300
	伸び		%	16～30
	耐力		MPa	200～300
	ビッカース硬さ			190～220
	加工性			SUS304 並
	溶接性			可能(TIG 溶接)
形状記憶特性	形状回復方向			一方向性
	形状回復ひずみ		%	最大 4%
	形状回復応力		MPa	147～200

1.3. 無電柱化推進計画

日本における電線類の地中化は，1986 年度に策定した「電線類地中化計画」から始まる [15]．1998 年度まで 3 期の計画を策定して，主に大規模な商業地域の整備をすすめ，約 3400km を達成．その後，1999 年度から「新電線類地中化計画」に基づき地中化を進め，2003 年度末には約 5500km を整備した．今後は 2004 年度からスタートした「無電柱化推進計画 [16]」に基づき，これまでの幹線道路に加え，主要な非幹線道路も対象に無電柱化をさらに推進していくと，国土交通省と関係省庁，関係事業者が取りまとめている．しかし日本では欧米に比べ，無電柱化において大幅な遅れをとっている．欧米主要都市と日本の都市の電線類地中化の現状 [16]を図 1.9 に，国内の無電柱化率 [16]を図 1.10 に示す．

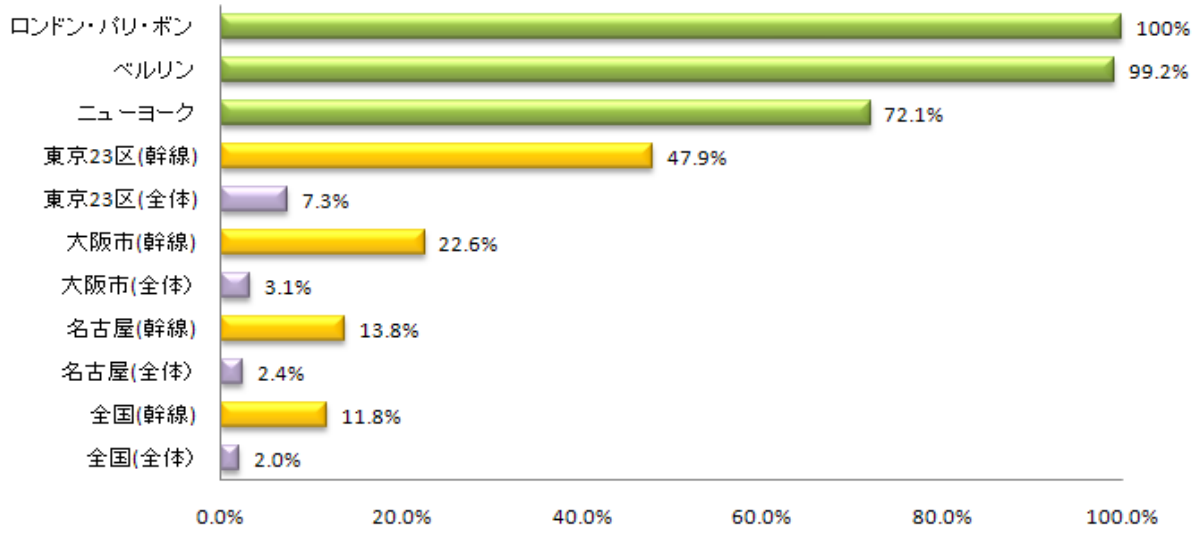


図 1.9　欧米と日本の主要都市における無電柱化の状況 [16]

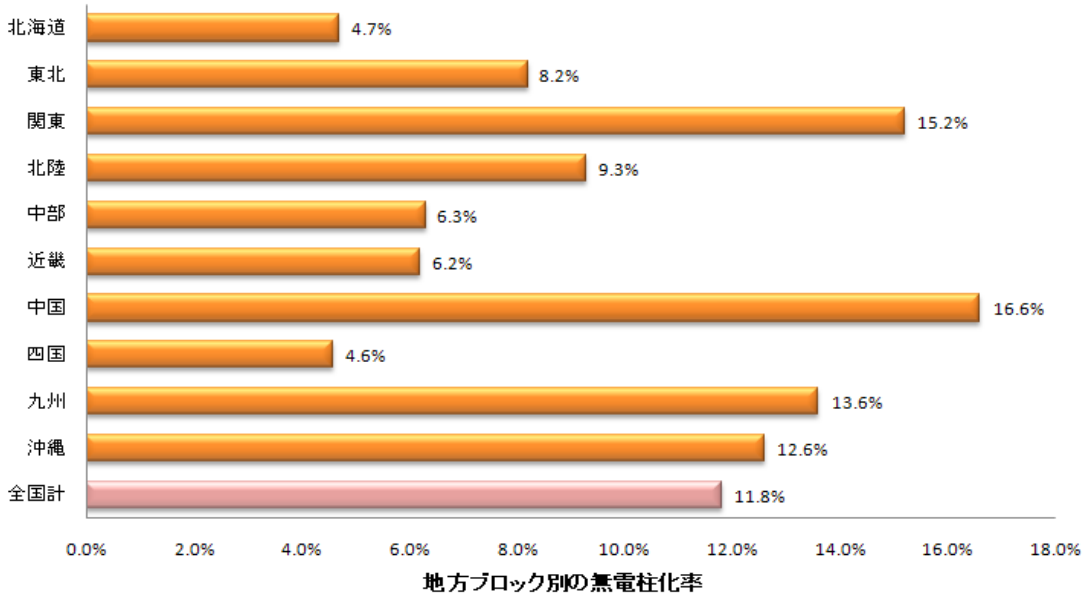


図 1.10　地方ブロック別の無電柱化率 [16]

無電柱化のメリットとして以下のことがあげられる．(図 1.11 参照)

(1) 安全で快適な歩行空間の確保

電柱をなくすと同時に歩道整備も行われることで，車椅子利用者などにとって使いやすいバリアフリーの歩行空間が形成されると共に，道路の見通しが良好になり，安全性が向上する．また，道路に沿って立つ電柱は車両の衝突による重大事故の要因ともなっており，無電柱化はそのような事故の要因を取り除くためにも有効といえる．

(2) 都市景観の向上

京都や奈良など歴史的な街並みを保存しようとする運動は日本各地で行われている．また，オフィス街や住宅地でも景観に配慮した都市計画が進行している． その計画の 1 つとして地上に張りめぐらされた電線類が道路の下に収められることで，美しい街並みが形成される．

(3) 都市災害の防止

災害時における，電柱の倒壊や電線の破断による感電，火災等二次災害を防ぐと共に，消防および救命活動の空間の確保を可能とする．

(4) 情報通信ネットワークの信頼性の向上

災害時における電線の破断被害を軽減することが可能になり，災害時の情報通信ネットワークを確保し，情報の信頼性を向上させることが可能となる．

Before　　After

図 1.11　無電柱化の施工前

無電柱化に伴い，電気や通信等の複数のケーブルを通す管路を歩道下などの地下空間に共同で埋設する．この施設を電線共同溝と呼び，国土交通省による「電線共同溝の整備等に関

する特別措置法」に基づいて施工されている．埋設された管路(地中埋設管)には所々にハンドホールと呼ばれるコンクリート製函型連結部が取り付けられており，その壁面から配線を分岐させるための接合管が取り付けられている．その接合管から，建物内に配管させる際に使用する電力・通信ケーブル用地中埋設管 [17]を本研究では電力埋設管 [18]と呼び，震災や地殻変動による地盤沈下等に対応する機能を有する．電線共同溝を**図 1.12** に，電力埋設管の施工例を**図 1.13** に示す．

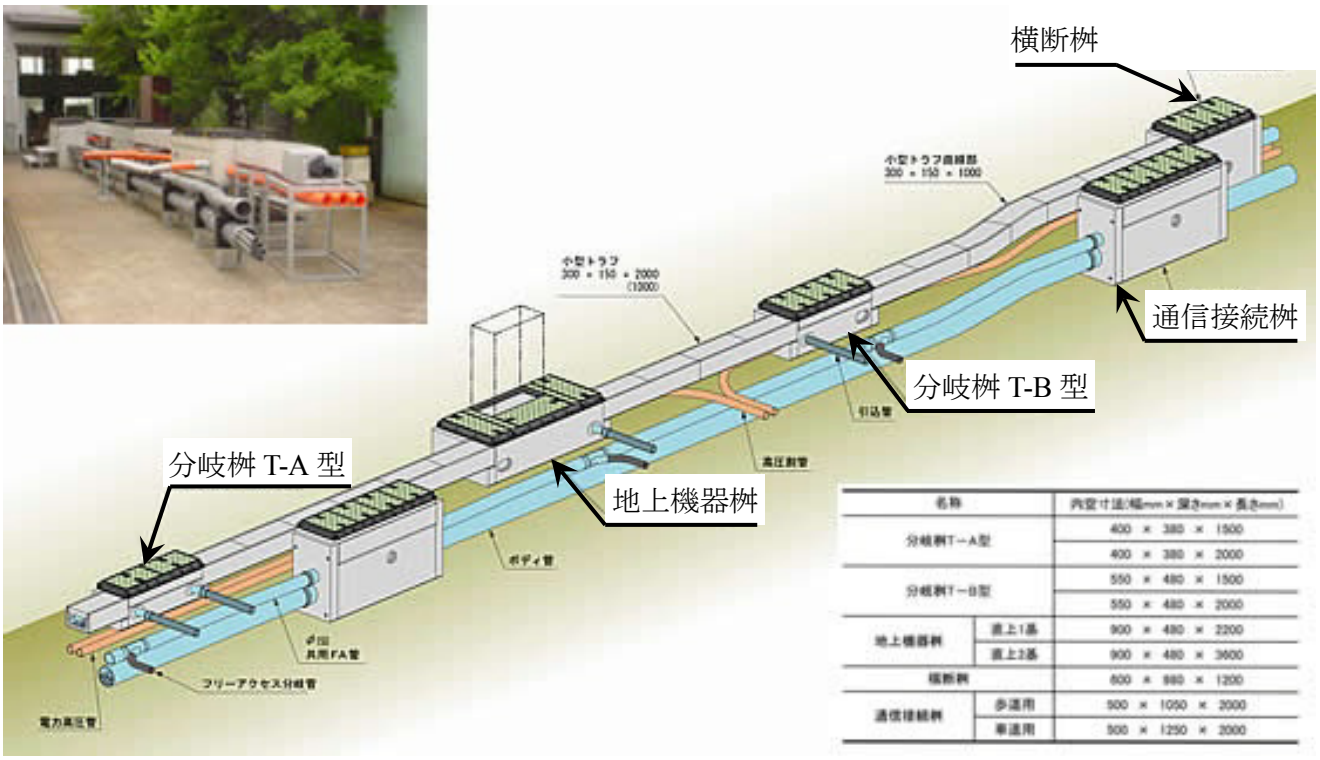


図 1.12　電線共同溝施工模式図 [19]

- 分岐桝 T-A 型；電力低圧分岐接続体および情報通信・放送系ケーブル等のタップオフを収容し需要家へ引込みを行う桝.
- 分岐桝 T-B 型；電力高圧・低圧分岐接続体および情報通信・放送系ケーブル等のタップオフを収容し需要家へ引込みを行う桝.
- 横断桝；支道横断部で小型トラフを管路部に変更する.
- 地上機器桝；地上に設置する機器(電力変圧器等)に使用.
- 通信接続桝；情報通信・放送系ケーブルの接続・分岐のためにクロージャーやタップオフ等を収容.

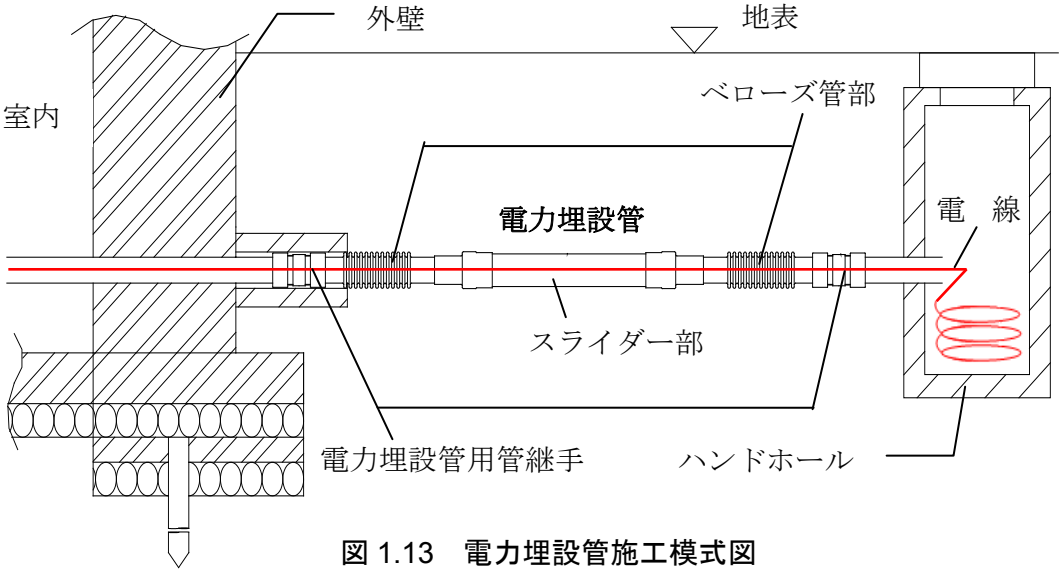


図 1.13　電力埋設管施工模式図

地盤沈下が起きると，埋設管には曲げの力や軸方向の引張りの力が加わり，埋設管が扁平，座屈，破断などを起こしてしまい，管内の電線やケーブルを保護することができなくなってしまう．これを防ぐため，電力埋設管のベローズ管部は地盤沈下時における曲げに対して，スライダー部は伸びに対して，埋設管の地盤沈下時の断面形状を保持する仕組みになっている．この電力埋設管と建物およびハンドホールから伸びる鋼管とを接続しているのが電力埋設管用管継手である．電力埋設管の施工例を図 1.14 に示す．

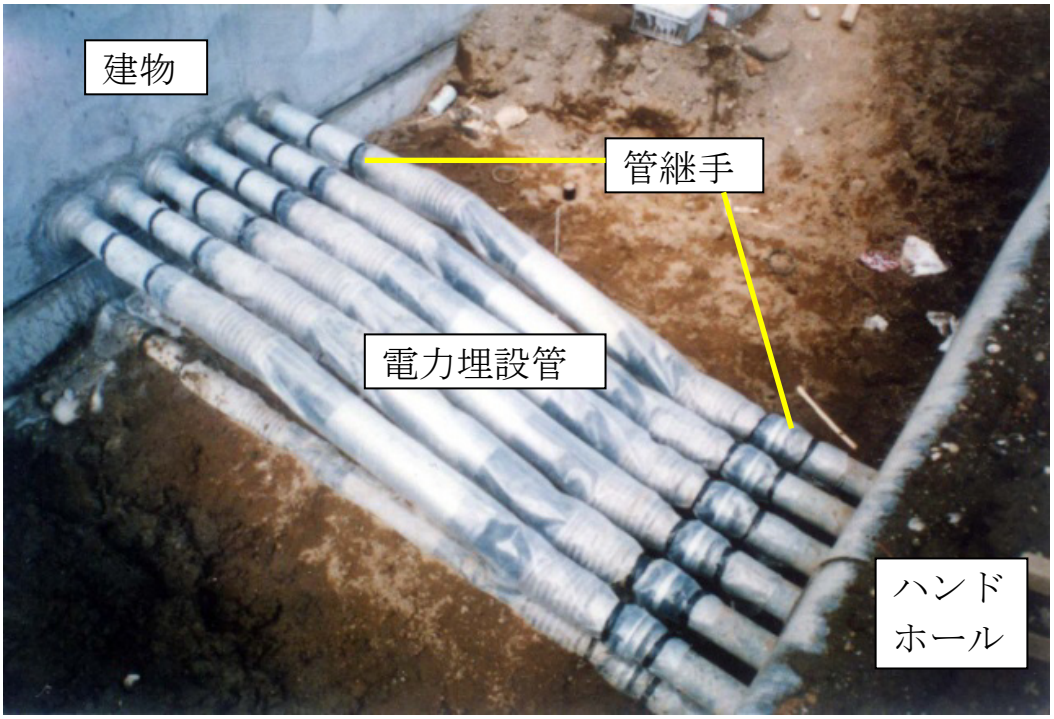


図 1.14　電力埋設管施工例

1.4. 電力埋設管用継手

通常建物から地中へケーブルを伸ばす配管や地中埋設管には炭素鋼鋼管(SGP50A)が用いられるが，ベローズ管を有する電力埋設管にはステンレス鋼管(SUS304)が用いられる．ここで本研究では締結される鋼管を母管と呼ぶ. SGP50A 母管と SUS304 母管の接続では異種金属接触による電気腐食が起こるため，接合部において両母管の電気的接触を防ぐ必要がある．

現在は図に示すユニオン継手と呼ばれる継手が使用されているが，部品形状が複雑で使用部品数も多く，母管へのねじ切り加工や溶接が必要であるため作業性の悪さや高コストといった多くの問題点がある．これらの問題を解決するため，本研究では鉄系形状記憶合金を用いてよりシンプルで安価な新しい継手の開発を目指している．電力埋設管用継手として東京電力(株)殿仕様より以下の条件を満たすことが必要とされている．

(1)継手からの母管引抜き時の強度(以下，管継手強度と呼ぶ)が 14.7kN 以上

(2)絶縁性能として電気抵抗値 1MΩ以上

図 1.15 にユニオン継手組立図を，**図 1.16** に鉄系形状記憶合金管継手組立図の一例を示す．

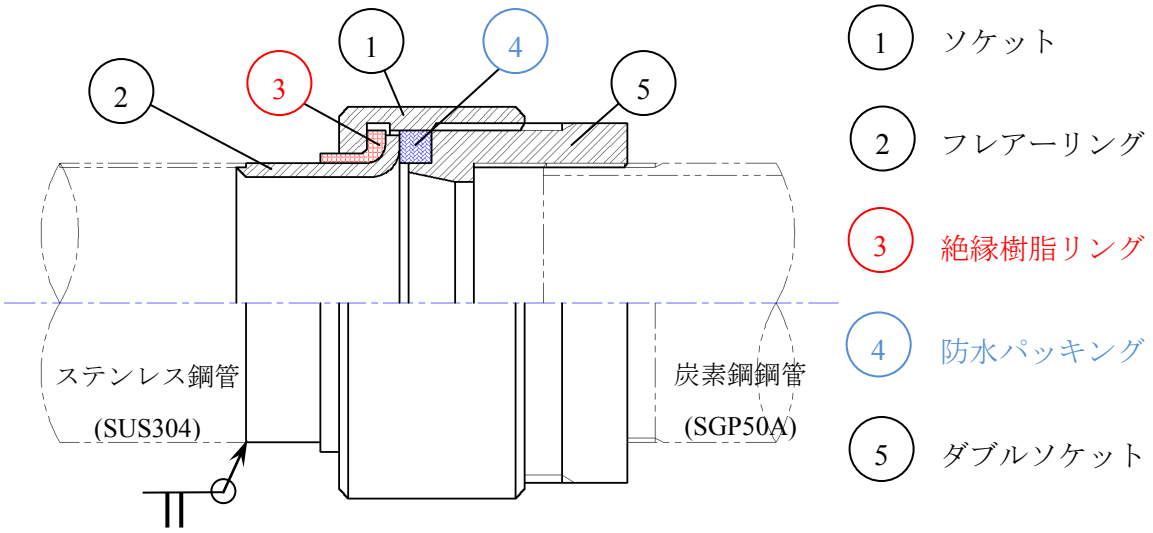


図 1.15　ユニオン継手組立図

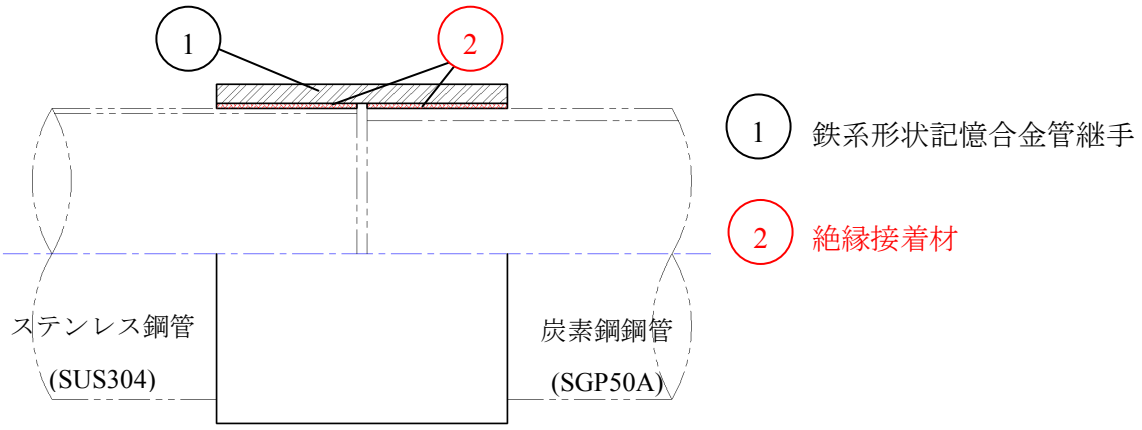


図 1.16　鉄系形状記憶合金管継手組立図

2. 供試材

本研究では鉄系形状記憶合金の最適成分系として Fe-28Mn-6Si-5Cr(mass%)を用いた．供試材を溶解後，鍛造にて丸棒状に加工したのち，切削にて円管状に加工し，試験片端面の片側にだけ刻印を打つ．その後，1050℃で 90 分間の固溶化熱処理を施し，試験片に形状記憶処理を施した．本研究では予ひずみ付与工程として拡径を行い，形状回復処理を施すことで管を締結させる．拡径法は**図 2.1** に示すように角度 5°のテーパー付きマンドレルを押込むことで拡径を行う押拡げ加工を用いた．テーパー付きマンドレルを，インストロン型万能試験機を用いて 6mm/min の押込み速度で試験片の刻印が打ってある端面側から軸方向長さの半分まで押込み，一度マンドレルを抜いたのち，試験片の逆端部から再度マンドレルの押込みを同速度で行い，拡径の完了とした．この際，潤滑剤として二硫化モリブデンを用いた．また，一度拡径を行い，形状回復処理を施したのち再度拡径を行うことで，1 サイクルのトレーニング処理を施すとした．第二拡径を行った後に試験片内外部の表面形状を切削加工にて整え，指定の寸法形状に仕上げる仕上げ加工を行い，，試験片の完成とした．また，これまでの研究データに基づき，拡径ひずみは中心径周方向ひずみ 6%とし，トレーニング時の形状回復処理は 600℃にて 30 分間の熱処理を行い，管継手として母管を締結させる際の形状回復処理は 350℃にて 30 分間の熱処理を行った．

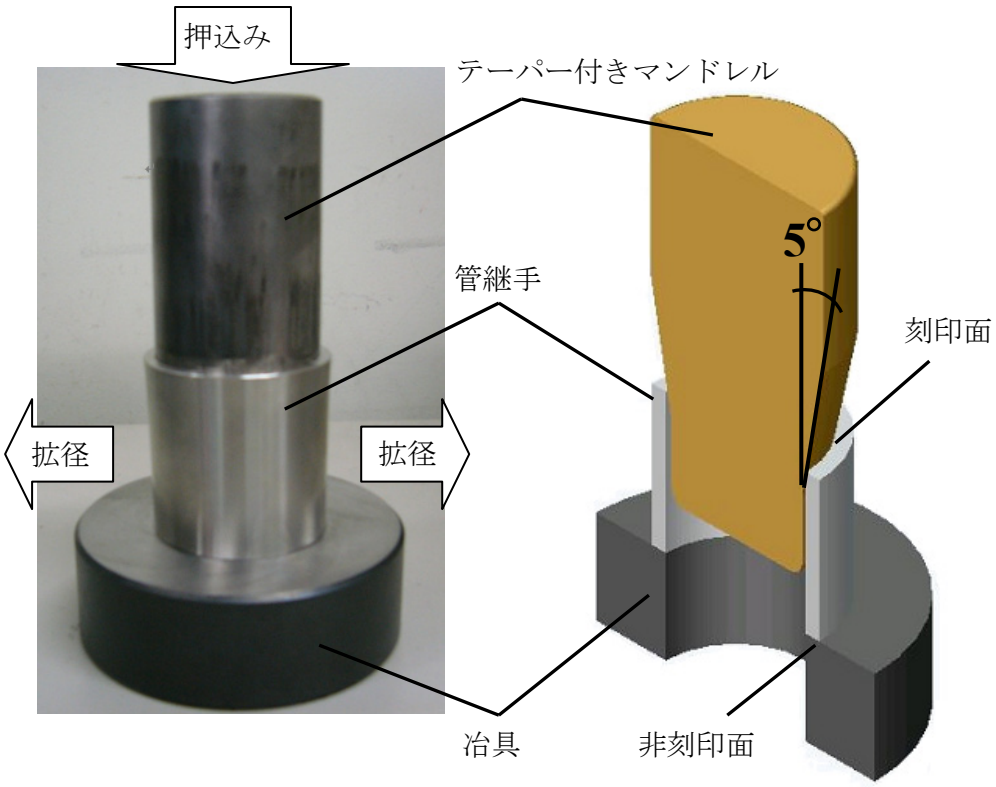


図 2.1　テーパー付きマンドレルによる押拡げ

3. 絶縁接着材

3.1. 選定試験

本試験における絶縁材の使用状況は図に示した通り母管(SGP50A 炭素鋼管及び SUS304 ステンレス鋼管)と鉄系形状記憶合金管継手との間に挟み込み，350℃にて 30 分間の形状回復処理を行う．それにより，絶縁材は鉄系形状記憶合金管継手から締結圧力を受けた状態で電気抵抗値 1MΩ以上を保持しなければならない．すなわち，350℃にて 30 分間という高温に耐えられ，締結圧力によって潰されてはならない素材を選定しなくてはならない．また，絶縁材を挟むことにより継手強度が低下してはならないため，接着剤を用いて継手強度を向上させることも検討した．

3.1.1. 鋼板試験片を用いた絶縁接着試験

以上の条件を踏まえ，次のように，管継手に使用する絶縁接着材の性能確認のための，板材を用いた選定試験[20)]を行う．図 3.1 のように長さ 100mm，幅 25mm，肉厚 1.0mm の SPCC 鋼板に絶縁接着材を挟み込み，クランプにて荷重を与えた状態で，電気炉を用いて 350℃にて 30 分間の熱処理を施し，空冷にて十分に冷ました後，テスターを用いて電気抵抗値を測定した．その後，挟み込む絶縁接着材の種類によって接着剤の剪断力に及ぼす影響を調べるため，インストロン型万能試験機にて引張試験を行い，最大荷重を測定した．

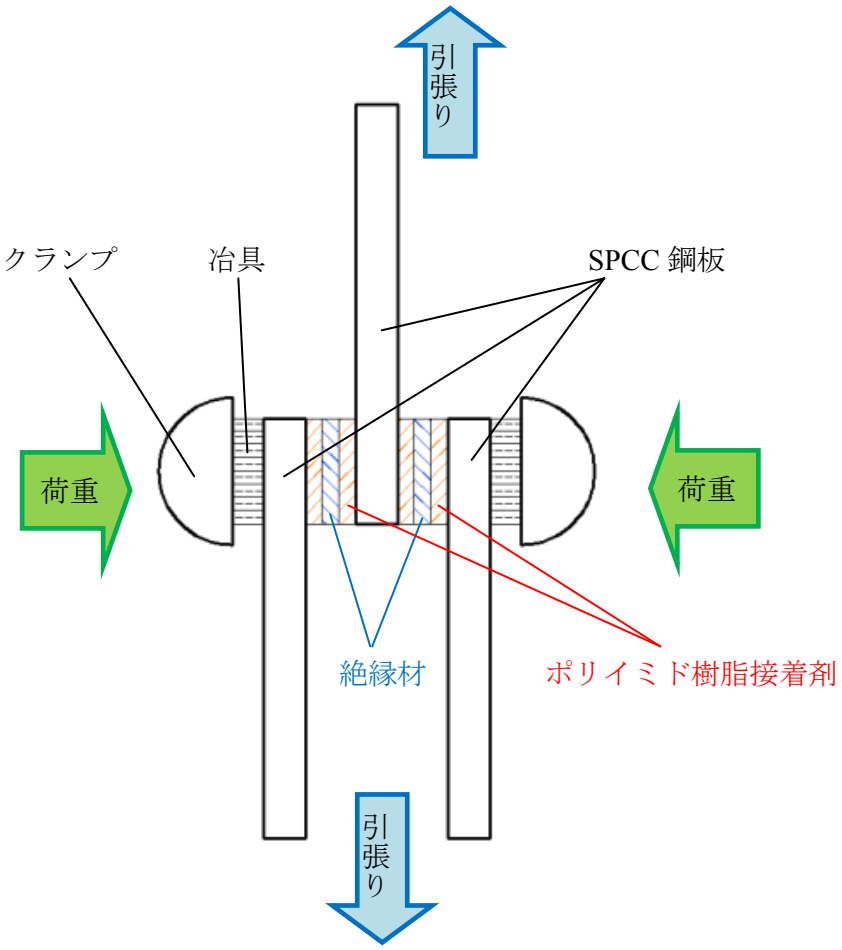


図 3.1　鋼板試験片を用いた絶縁性能及び剪断強度試験

絶縁材は**表 3.1** に示すものを用いた．接着成分としてポリイミド樹脂接着剤を使用しているため，図に示すように全ての絶縁材の両面にポリイミド樹脂接着剤を塗布して試験を行った．

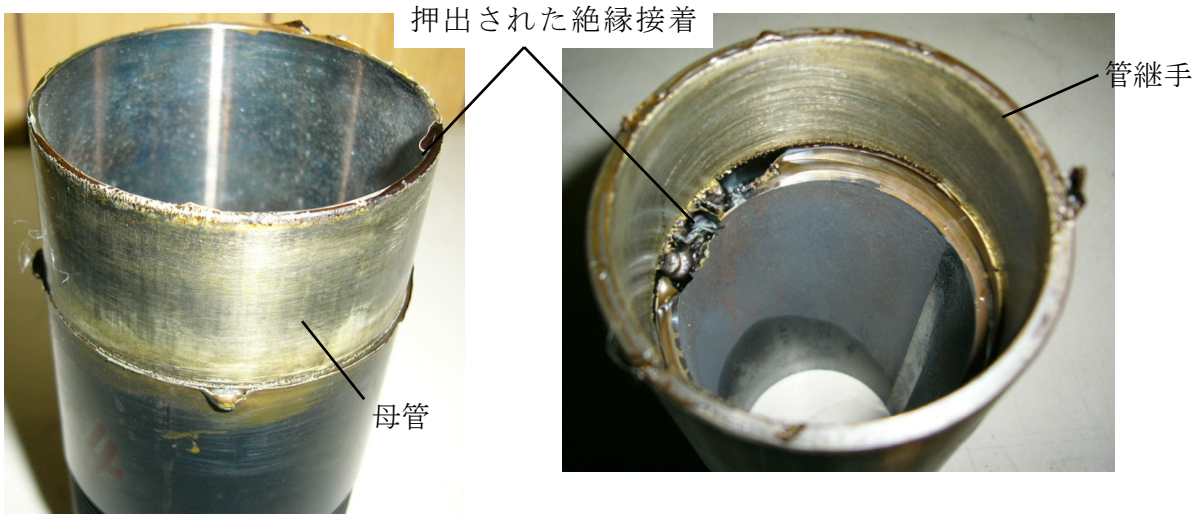
表 3.1　絶縁材

絶縁材		厚さ[mm]
ポリイミド樹脂接着剤のみ	—	0.1
	—	0.2
	—	0.4
アルミナ砥粒	#60	粒径 250 μm
	#80	粒径 180 μm
	#120	粒径 106 μm
炭化珪素砥粒	#60	粒径 250 μm
	#80	粒径 180 μm
	#120	粒径 106 μm
布基材 アルミナサンドペーパー	#80	0.4
	#120	0.4
	#320	0.4
	#400	0.4
	#600	0.4
紙基材 炭化珪素サンドペーパー	#80	0.4
	#120	0.4
	#320	0.4
	#400	0.4
	#600	0.4
布材	綿	0.17
	麻	0.21
	エステル	0.08
	エチレン	0.08
カプトン (ポリイミドフィルム)	500H/V	0.125

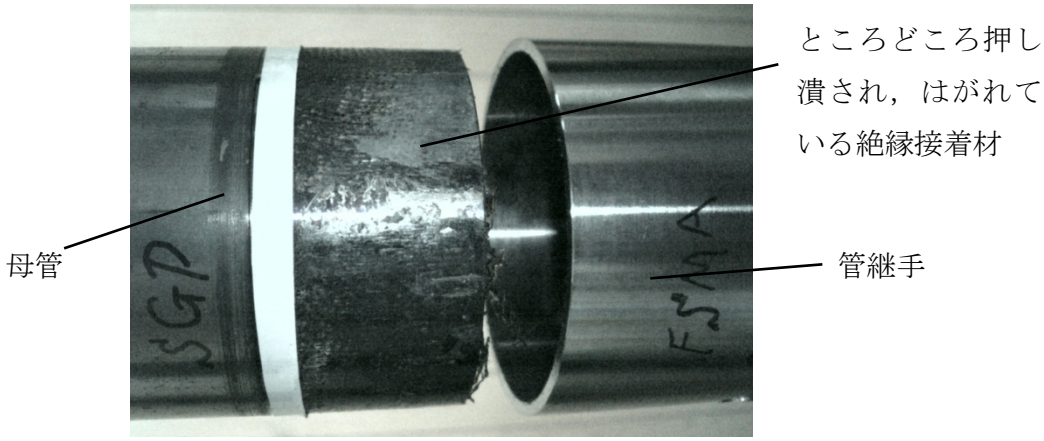
・サンドペーパーに関しては，初期の厚さが厚すぎたため，あらかじめ 0.4mm の厚さになるまで押し潰してから使用した．

3.1.2. 鉄系形状記憶合金管状試験片を用いた絶縁試験

3,1,1 鋼板試験片を使用した絶縁試験において十分な電気抵抗値を示した絶縁材を管継手に用いて締結させると，十分な電気抵抗値を示さない場合が多かった．その様子を**図 3.2** に示す．これは絶縁材の使用条件が平坦な面から曲面になったほか，鋼板試験片使用時は圧力を加えた状態で熱処理を行うが，管継手では加熱されながら，形状回復による圧力が徐々に加わっていく．こういった条件の差異が結果に影響を及ぼしたと考えられる．



(a) ポリイミド樹脂接着剤のみを用いた場合の絶縁接着材設置状況



(b) 布材＋ポリイミド樹脂接着剤を用いた場合の絶縁接着材設置状況

図 3.2　絶縁接着材の設置状況

図 3.2-(a)：ポリイミド樹脂接着剤のみを用いた場合，ポリイミド樹脂接着剤が凝固を開始する前に管継手の形状回復が始まり，接着剤がすべて押し出されてしまっている．

図 3.2-(b)：麻布とポリイミド樹脂接着剤を用いた場合，管継手の形状回復による圧力が加わる前に麻布の炭化が起きてしまい，その後の管継手による圧力で麻布が押し潰されていると考えられる．

以上ことから，鉄系形状記憶合金を管状に加工して試験片を作成し，管継手と同じ条件となるように絶縁試験を行った．試験片形状および試験片番号・寸法を**図 3.3** および**表 3.2** に示し，使用した絶縁接着材を**表 3.3** に示す．

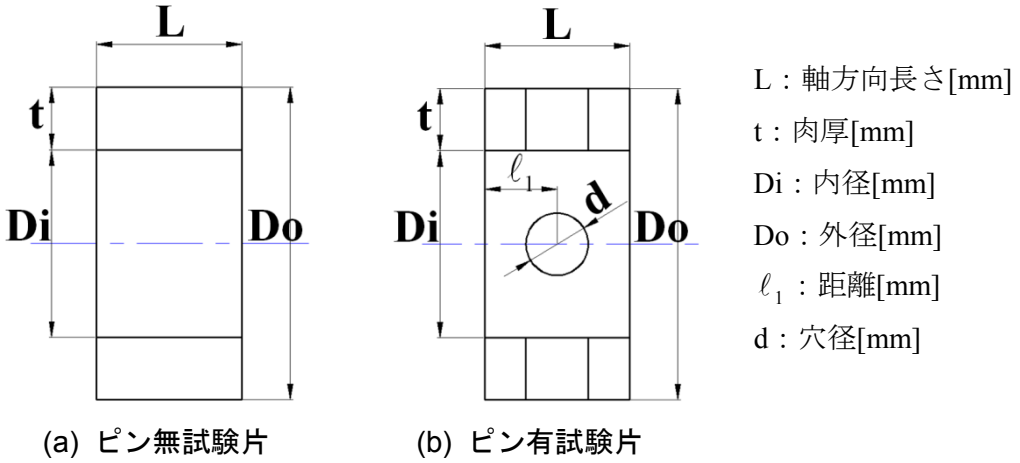


図 3.3　鉄系形状記憶合金管状絶縁試験片

表 3.2　鉄系形状記憶合金管状絶縁試験片寸法

No.	図番号	L	t	Di	Do	ℓ_1	d
1	3.3-(a)	20	4	61.1	69.1	—	—
2	3.3-(a)	20	4	61.1	69.1	—	—
3	3.3-(a)	20	4	61.1	69.1	—	—
4	3.3-(a)	20	4	61.1	69.1	—	—
5	3.3-(b)	24	4	61.1	69.1	12	6.4
6	3.3-(b)	24	4	61.7	69.7	12	6.4
7	3.3-(b)	24	4	61.7	69.7	12	6.4

表 3.3　絶縁接着材

絶縁材		厚さ[mm]	試験片番号
布材＋ポリイミド樹脂接着剤	綿(薄)	0.08	1・5
	綿(厚)	0.17	2・6
	麻	0.21	3・7
カプトン＋ポリイミド樹脂接着剤	500H	0.125	4

カプトンとは東レ・デュポン(株)製のポリイミド製フィルム状製品であり，型番 500H を用いた．用いた絶縁材料の種類が布材とカプトン 500H のみであったのは，この試験を始める以前に，その他の絶縁材は **4．管継手強度**の試験に用いており，その試験結果が判明しているためである．ここで，カプトン 500H の特性[21)]を**表 3.4** に示す

表 3.4　カプトン特性[21)]

項目		単位	500H
機械的特性	フィルム厚さ	μm	125
	引張強度	MPa	255
	伸び	%	75
	引張弾性率	GPa	3.35
	静摩擦係数	—	0.55
	動摩擦係数	—	0.46
	表面粗さ[Ra]	μm	0.03～0.10
	密度	g/cm^3	1.42
熱的特性	熱膨張係数[50～200℃]	ppm/℃	27
	熱収縮率[200℃]	%	0.2
	比熱	J/(g・℃)	1.1
	熱伝導率	W・m/℃	0.16
	耐熱寿命[400℃]	時間	12
電気的特性	絶縁破壊電圧	kV/mm	207
	誘電率	—	3.3
	体積抵抗率	Ω・cm	1×10^{17}

3.2. 試験結果

3.2.1. 鋼板試験片を用いた絶縁接着試験

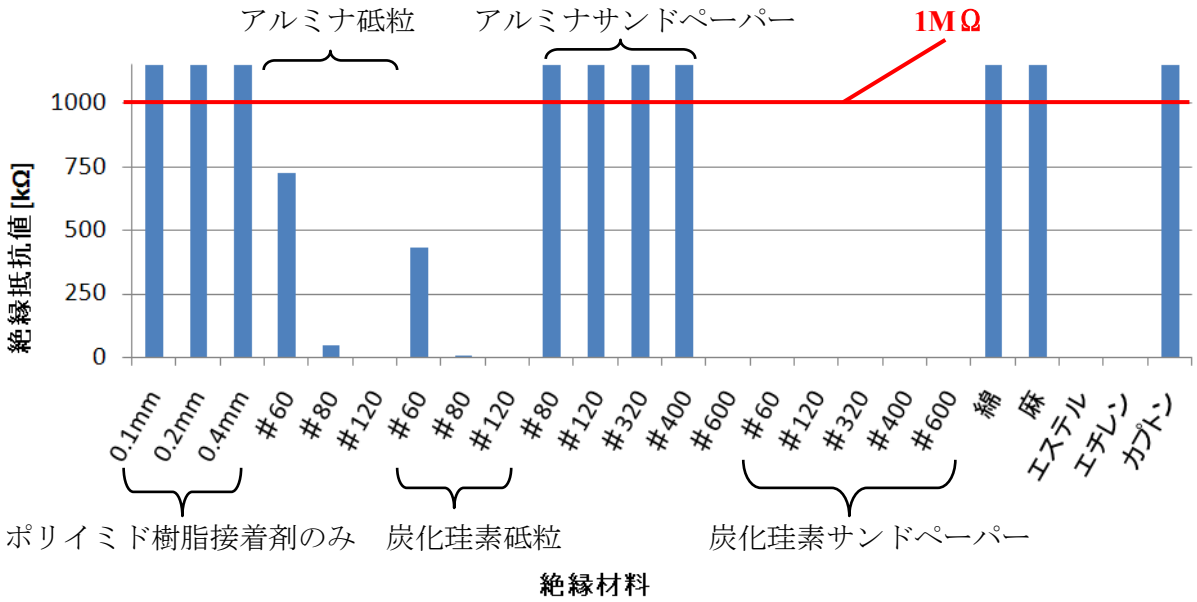


図 3.4　絶縁性能

図 3.4 に示す通り，ポリイミド樹脂接着剤，布基材アルミナサンドペーパー，綿布，麻布，カプトン 500H において，1MΩ以上の電気抵抗値が測定された．ここで 1MΩ以上としたのは，用いたテスターの測定限界値が 1MΩであったためである．

ここで 1MΩ以上の電気抵抗値が確認された試験片の剪断力を図 3.5 に示す．

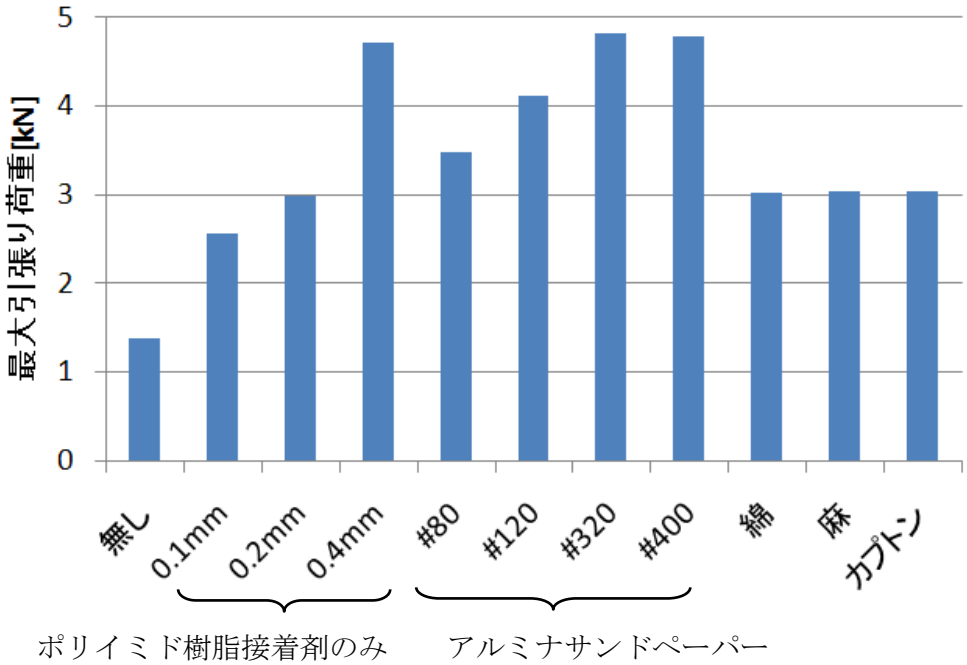
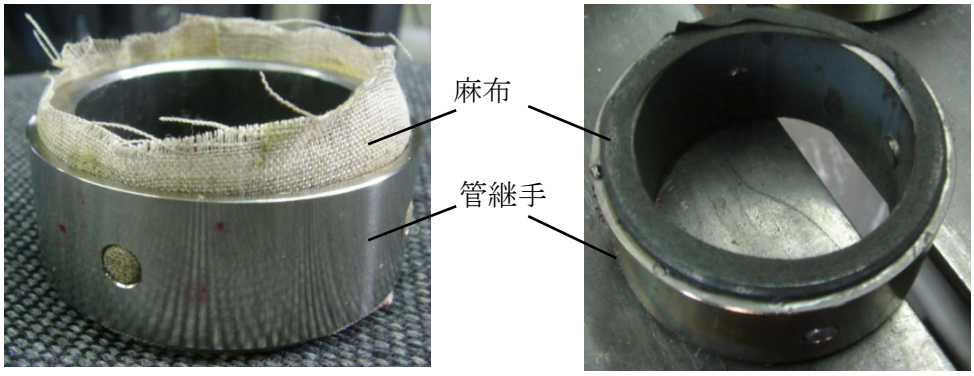


図 3.5　絶縁接着材剪断力

図 3.5 から，何も挟まない場合の値と比べ，全ての絶縁接着材の剪断力が高いことから，接着剤の影響が顕著に表れていることが分かる．また，塗布される接着剤の厚さが増すと剪断力が上昇する傾向がみられる．絶縁材の厚さが厚いとその分塗布される接着剤の厚みも増すため，やはり剪断力が向上する．サンドペーパーにおいては粒度番号が小さいほど，押し潰すと密度が高くなる．その結果接着剤の浸透性が低減し，剪断力が低下したと考えられる．

3.2.2. 鉄系形状記憶合金管状試験片を用いた絶縁試験

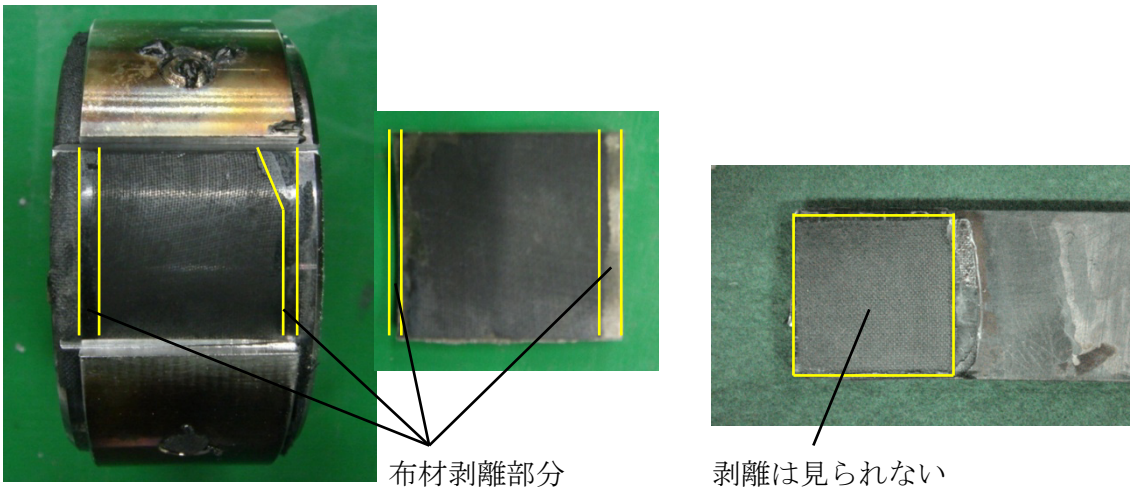


(a) 形状回復処理前　　(b) 形状回復処理後

図 3.6　試験体形状回復処理前後

図 3.6 に試験体の形状回復処理前後の様子の一例を示す．電気抵抗値が 1MΩ以上あることが確認できたのはカプトン 500H を用いた場合のみであった．

次に絶縁性を持たなかった布材を用いた試験片を切断し，絶縁接着材がどのようになっているかを確認した．また，鋼板試験片を用いた場合と比較した様子を**図 3.7** に示す．



(a) 管状試験片の絶縁接着材設置状況　　(b) 鋼板試験片の絶縁接着材設置状況

図 3.7　管状試験片と鋼板試験片の絶縁接着材設置状況

図 3.7 から，鋼板試験片を用いた場合は，布地はほぼ均一に炭化されて残存していたが，鉄系形状記憶合金管状試験片を用いた場合は，試験片端面に近い部分で布地が消滅していたり，ところどころ布材が非常に薄く押し潰されていることが確認できた．これは布地の分解温度が約 235℃，燃焼温度が約 275～456℃とされている [22]が，鋼板試験片を用いた場合はクランプによる荷重を与えた状態で加熱したため，布地端部の焼失が見られなかったが，鉄系形状記憶合金管状試験片を用いた場合は，試験片によって締め付けられる以前に布の分解及び炭化が始まり，その後締め付けられることによって布地が剥がれ落ち，金属が接触してしまったと考えられる．さらに，鋼板試験を行った際のクランプによる締付け荷重よりも形状記憶合金による締結荷重が強かったため，布地が押し潰されて金属が接触してしまったことも考えられる．しかし，カプトン 500H を用いた場合はこのような現象は起きておらず，そのため，十分な絶縁性能を持っていたと考えられる．

以上の結果から，ポリイミド樹脂接着剤＋#400 布基材アルミナサンドペーパーおよびポリイミド樹脂接着剤＋カプトン 500H を用いることが絶縁接着材として十分な条件を満たして入ることが明確となった．

4. 管継手強度

4.1. 試験方法

鉄系形状記憶合金を用いて管継手を作成し，絶縁材を挟み込みながら二本の母管の締結を行う．その後テスターを用いて母管，管継手間の絶縁性能を確認したのち，母管をインストロン型万能試験機を用いて 50N/sec の速度で引き抜く．その際の母管が抜け落ちるまでの最大荷重を管継手強度と呼ぶ.

この試験に用いた試験片形状を図 4.1 に示す．ここで図 4.1 に示す通り，本試験では 3 種類の管継手形状を用いて試験を行った．図 4.1-(a)に示す形状は管継手の締結力にて管継手強度を保持する管継手だが，図 4.1-(b)に示す試験片形状は，母管が薄肉で抜けやすい SUS304 母管側に SUS303 製，直径 8mm，長さ 5mm の平行ピンを打ち，管継手強度を向上させる片側ピン管継手とする．また，図 4.1-(c)に示す試験片形状は SUS304 母管側には SUS303 製，直径 8mm，長さ 5mm の平行ピンを，SGP50A 母管側には S45C 製，直径 8mm，長さ 7mm の平行ピンを打ち，さらに強度を向上させる両側ピン管継手とする．管継手強度が東京電力(株)殿仕様より 14.7kN 以上と規定されており，規定荷重を SUS303 ピンの剪断力で耐えさせるため，安全率 S=4 として計算し，直径 8mm，90°ずつ 4 ヵ所にピンを打ち込むとした.

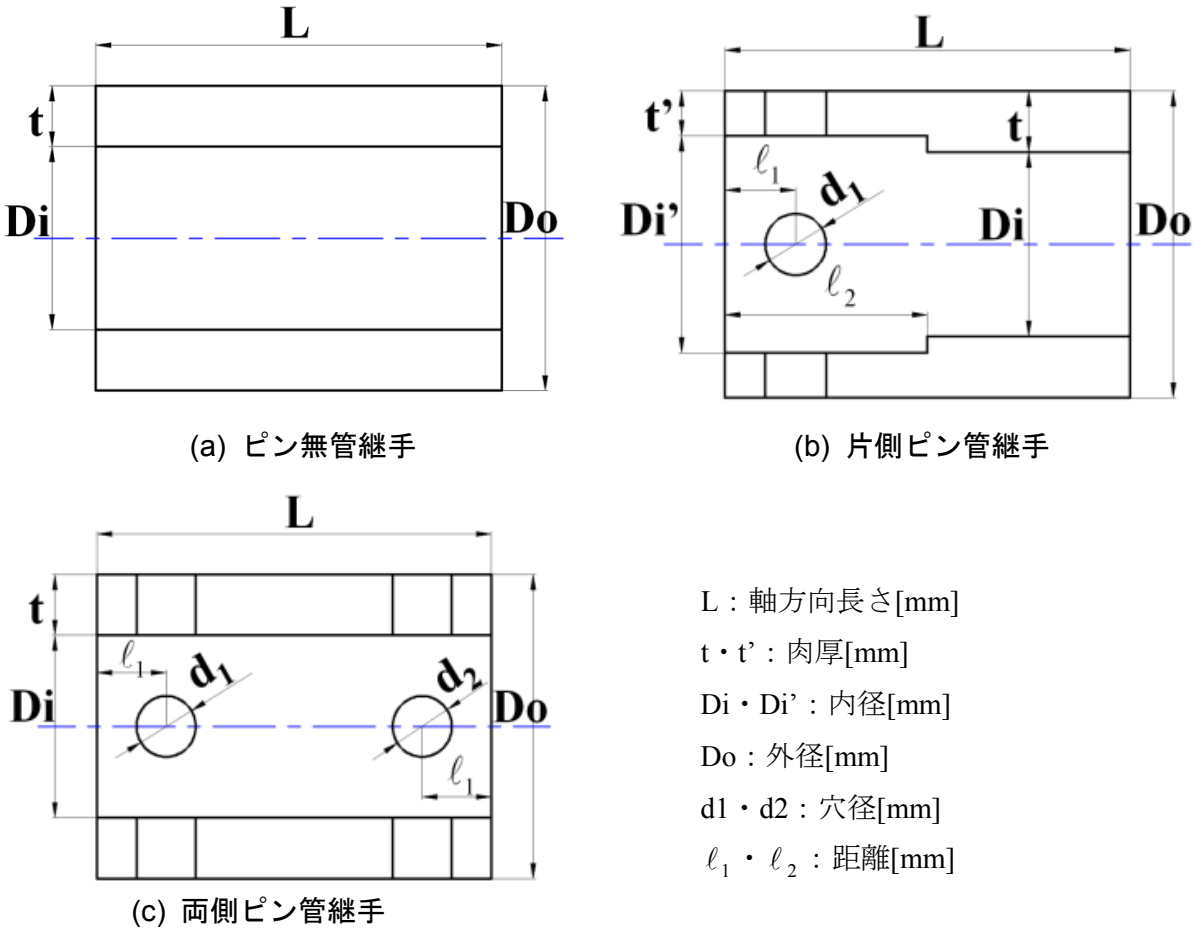


図 4.1　管継手試験片寸法形状

図 4.1-(a)，(b)，(c)に示す形状の試験片の試験片番号および試験片寸法をそれぞれ表 4.1，4.2，4.3 に示す．ここで，母管外径に対する，母管外径と管継手内径 Di との間隙の割合を，以降クリアランスと呼び，C[%]とする．また，表 4.2 においては Di 部におけるクリアランスを C[%]，Di’部におけるクリアランスを C’[%]とする．

表 4.1　ピン無管継手試験片寸法

No.	L	t	Di	Do	C
8	60	2	60.4	64.4	0.67
9	60	3	60.4	66.4	0.67
10	60	4	60.4	68.4	0.67
11	20	4	61.0	69.0	1.67
12	32	4	61.0	69.0	1.67
13	62	4	61.0	69.0	1.67
14	62	3	61.0	67.0	1.67
15	62	2	61.0	65.0	1.67

表 4.2　片側ピン管継手試験片寸法

No.	L	Di	Di’	Do	ℓ_1	ℓ_2	d1	t	t’	C	C’
16	50	60.6	61.2	64.6	12	25	8	2	1.7	1.0	2.0
17	50	60.6	61.2	66.6	12	25	8	3	2.7	1.0	2.0
18	50	60.6	61.2	68.6	12	25	8	4	3.7	1.0	2.0

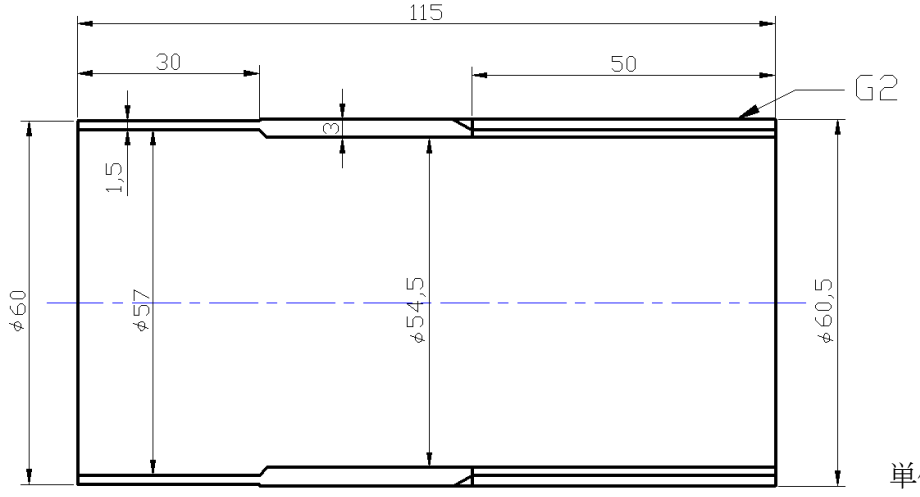
表 4.3　両側ピン管継手試験片寸法

No.	L	Di	Do	ℓ_1	d1	d2	t	C
19	50	61.2	65.2	12	8	8.4	2	2.0
20	50	61.2	67.2	12	8	8.4	3	2.0
21	50	61.2	69.2	12	8	8.4	4	2.0

絶縁接着材として，試験片番号 8～10 にはポリイミド樹脂接着剤のみを，試験片番号 11～15 には#400 布基材アルミナサンドペーパー＋ポリイミド樹脂接着剤を，試験片番号 16～21 には麻布＋ポリイミド樹脂接着剤を使用した．

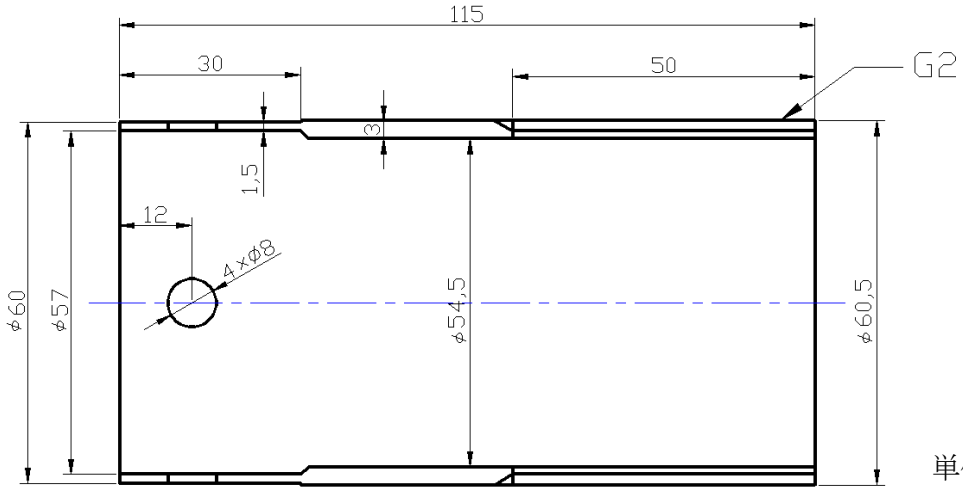
次に，実際に用いられている電力埋設管と同じ SUS304 を用いて締結部の肉厚 1.5mm となる SUS304 母管と，実際に用いられている配管用炭素鋼鋼管 SGP50A を用いて締結部の肉厚が 3.55mm となる SGP50A 母管を作成した．両母管とも締結部の母管外径は 60mm とする．また，両母管も締結部と反対側の端面にはねじ加工が施してあり，チャック部材とねじ締結

をすることで，その後の引張り試験を行うことができる仕組みになっている．母管の形状および寸法を**図 4.2** に示す．また，締結後，チャック部材をねじ締結した締結管の概要を**図 4.3** に示す．



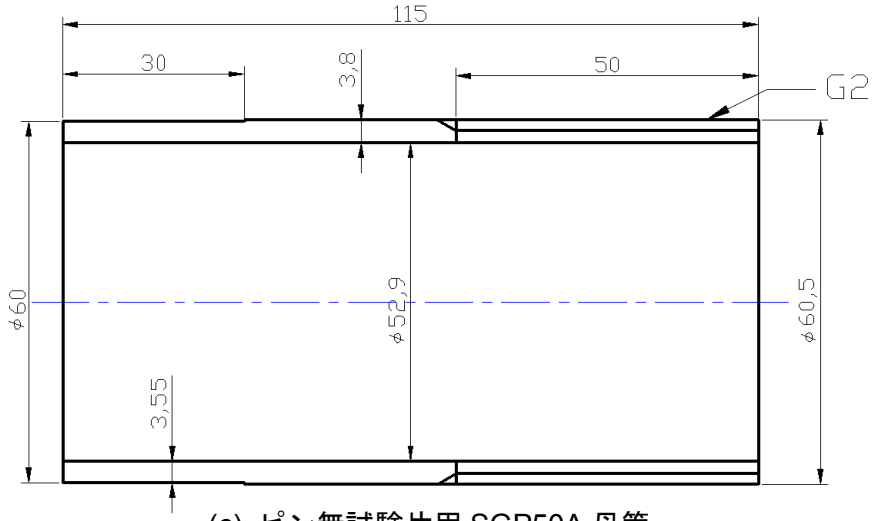
単位[mm]

(a) ピン無試験片用 SUS304 母管



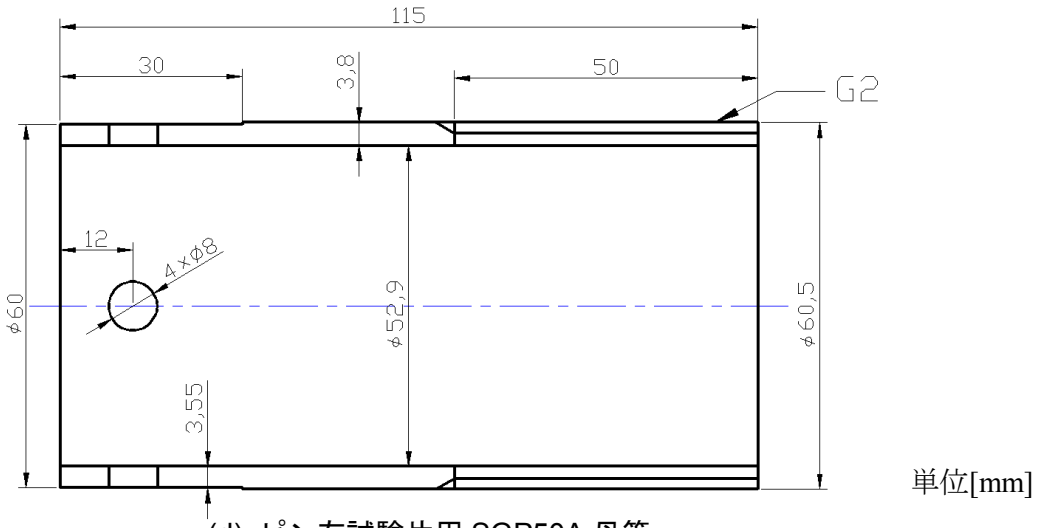
単位[mm]

(b) ピン有試験片用 SUS304 母管



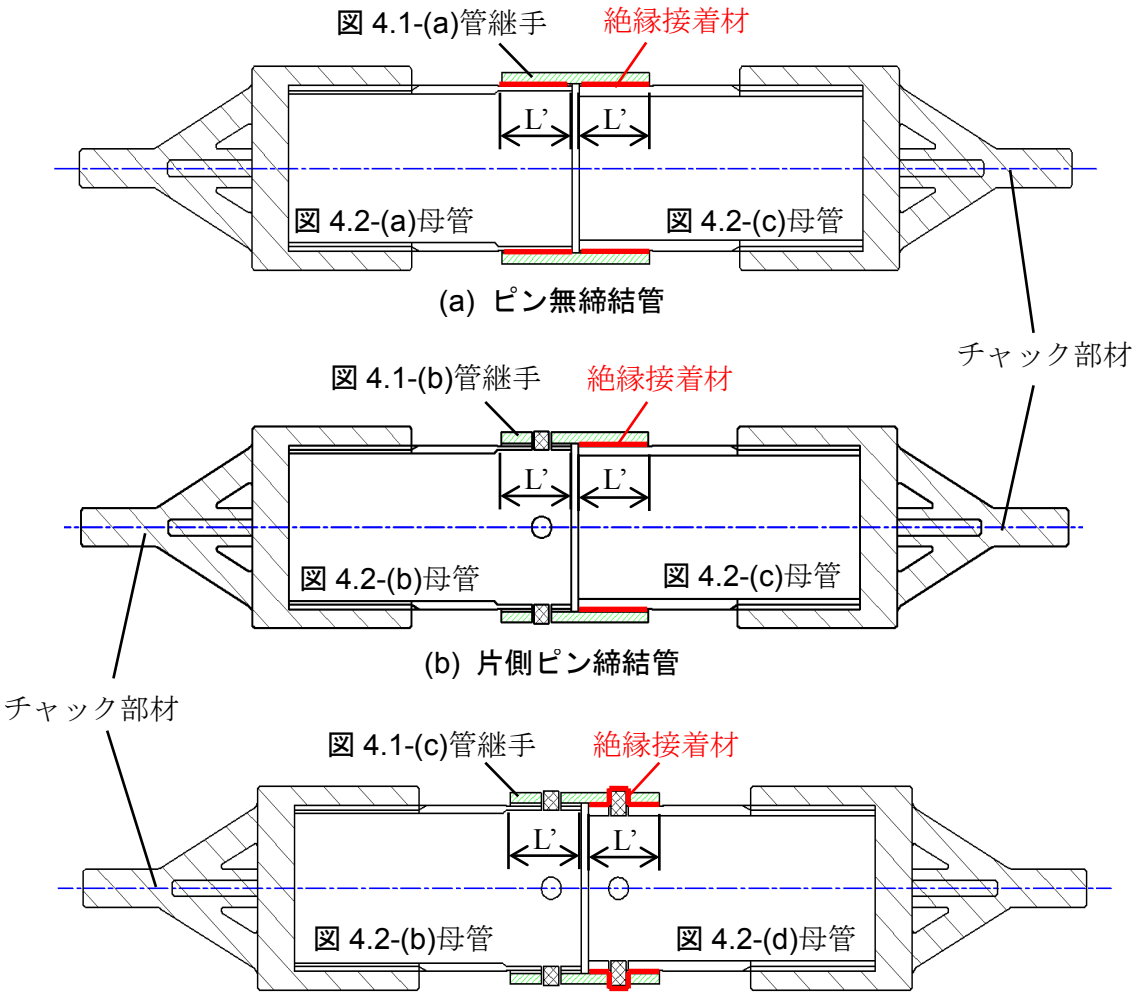
単位[mm]

(c) ピン無試験片用 SGP50A 母管



(d) ピン有試験片用 SGP50A 母管

図 4.2　母管寸法形状



(a) ピン無締結管

(b) 片側ピン締結管

(c) 両側ピン締結管

図 4.3　管継手組立図

ここで，管継手と母管の接触距離 L'は管継手軸方向長さ L によって異なり，L=62mm で L'=30mm，L=60mm で L'=29mm，L=50mm で L'=24mm，L=32mm で L'=15mm，L=20mm で L'=9mm となる．

図 4.3-(a)には試験片番号 8～15 を用い，そのうち試験片番号 8～10 では絶縁接着材としてポリイミド樹脂接着剤のみを用い，試験片番号 11～15 では絶縁接着材としてポリイミド樹脂接着剤＋#400 布基材アルミナサンドペーパーを用いた．また，**図 4.3-(b)**には試験片番号 16～18 を，**図 4.3-(c)**には試験片番号 19～21 を用い，どちらも絶縁接着材としてポリイミド樹脂接着剤＋麻布を用いた．

実際の管継手強度測定試験の様子を**図 4.4** に示す．

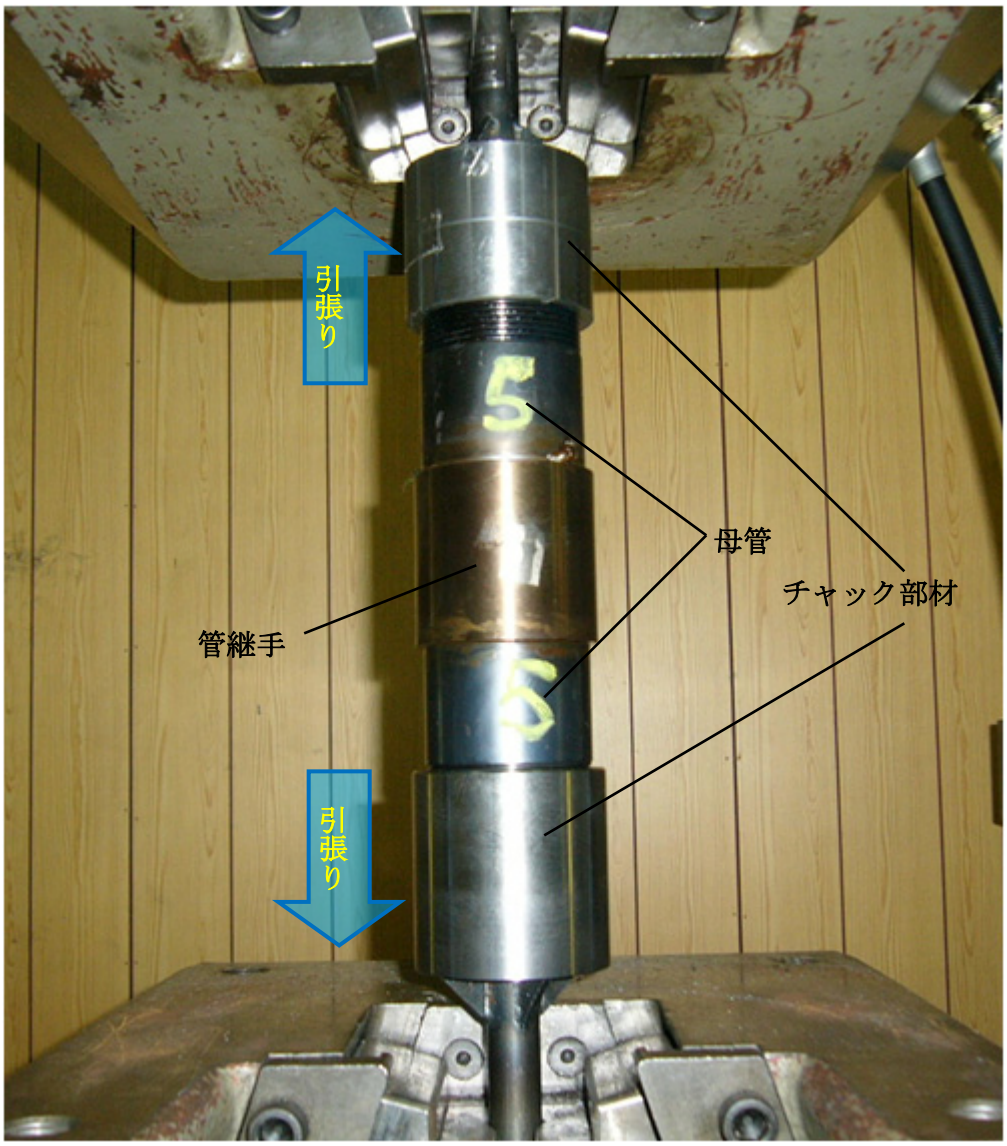
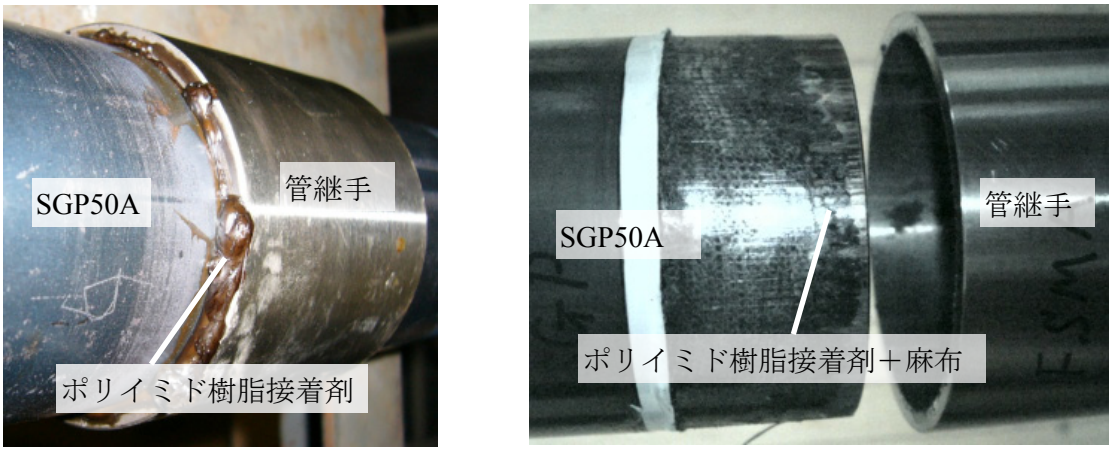


図 4.4　管継手強度測定試験

4.2. 試験結果

(1) 絶縁性能

絶縁性能測定では，1MΩ以上の十分な電気抵抗値を示したのはサンドペーパーを用いた場合のみであった．ポリイミド樹脂接着剤のみを使用した場合及びポリイミド樹脂接着剤＋麻布を使用した場合の絶縁接着材設置状況の写真を，前述の**図 3.2** および**図 4.5** に示す．



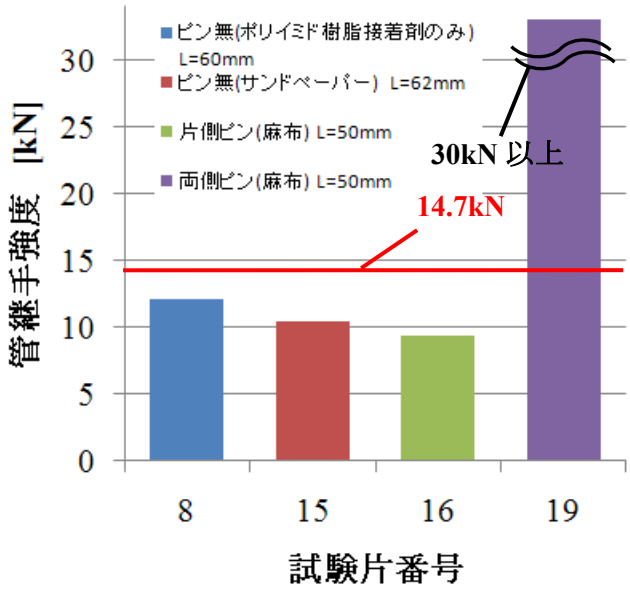
(a) ポリイミド樹脂接着剤のみ　　(b) ポリイミド樹脂接着剤＋麻布

図 4.5　絶縁接着材の設置状況

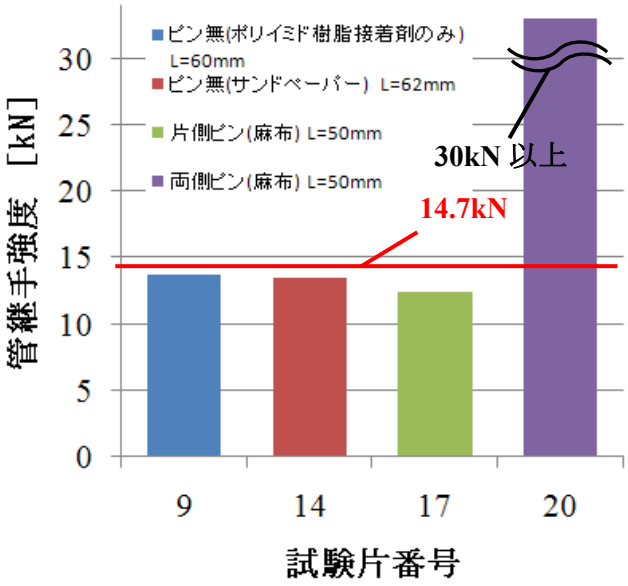
これは，まずポリイミド樹脂接着剤のみを用いた場合は，接着材の熱硬化が開始する以前に管継手の形状回復が発生し，接着剤を押し出して締結してしまったため，絶縁性を確保できなかったと考えられる．麻布を用いた場合は締結される以前に布材の端部が炭化し始め，締結時に押し潰されて崩れてしまい，管継手と母管の接触が起きたか，もしくは鋼板を用いた絶縁接着材選定試験時のクランプ荷重よりも大きな締結力が発生し，麻布自体が押し潰されてしまったために管継手と母管の接触が生じ，絶縁性が確保できなかったと考えられる．

(2) 管継手強度

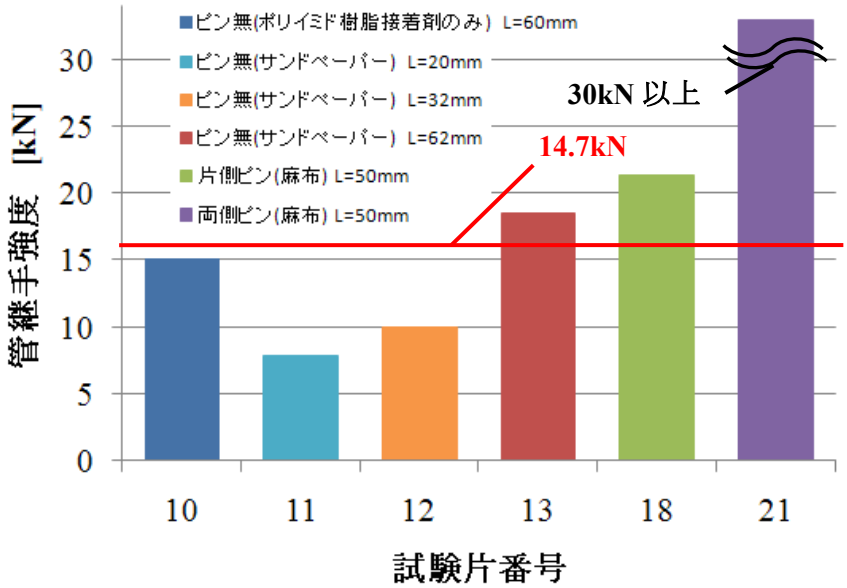
管継手強度測定試験結果を管継手肉厚 2mm～4mm の場合に分けて**図 4.6** に示す．図は，横軸に試験片番号をとり，縦軸に管継手強度をとった．



(a) 管継手肉厚 2mm



(b) 管継手肉厚 3mm



(c) 管継手肉厚 4mm

図 4.6　管継手強度測定試験

図中 30kN 以上と示されているのは，チャック部材の強度限界から 30kN 以上の荷重の測定が困難であったためである．また，電力埋設管用管継手強度は 14.7kN と規定されているため，図中にそれを示す．

図 4.6 から，両側ピン管継手はどの肉厚でも 30kN 以上の管継手強度を示したが，その他の

管継手は，管継手肉厚は厚いほど，管継手と母管の接触距離は長いほど管継手強度は増していることが分かる．これは管継手肉厚が厚くなると締結圧力が増し，管継手強度が向上していると考えられる．また，管継手軸方向長さ L が長くなる，即ち管継手と母管の接触距離 L' が長くなると摩擦抵抗力もしくは絶縁接着剤による剪断力が増すため，同じく管継手強度が向上したと考えられる．

図 4.6-(c)から, 管継手肉厚が 4mm になると管継手と母管の接触距離が短いにも係らず片側ピン管継手の管継手強度が大きくなっている．これはピン無管継手の管継手強度測定を行った際，どの試験も常に SUS304 母管側から抜け落ちていたことに起因する．SUS304 母管は肉厚 1.5mm と非常に薄く, 管継手から受ける締結力に耐えられずに内側に変形が起きてしまい，締結力に対する抵抗力の減少，および接触面積の減少による摩擦抵抗力もしくは絶縁接着材による剪断力の減少から，管継手強度の低下が生じたと考えられる(**図 4.7** 参照).

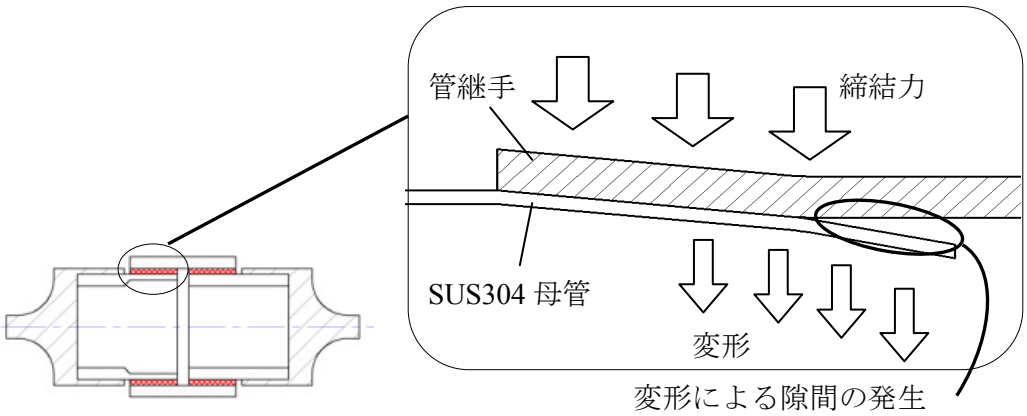


図 4.7　SUS304 母管の変形

これを改善するために SUS304 母管側にピンを打ち込んだ管継手が，片側ピンおよび両側ピン管継手である．即ち片側ピン管継手の管継手強度に影響を与えている母管は肉厚約 3.55mm の SGP50A 母管側であり, 上記の様な管継手強度低下の原因となる母管変形現象が起きにくいため，管継手強度が上昇したと考えられる．

図 4.6-(a)から，管継手肉厚 2mm においては明らかに母管と管継手の接触距離の影響を大きく受けていて，8 番，15 番の試験値が 16 番よりも高い値を示しているが，**図 4.6-(b)**において 9，14，17 番はほぼ同値となり，**図 4.6-(c)**において 10 番，13 番は 18 番よりも管継手強度が低くなっていることから，管継手肉厚が 3mm 以上になると，薄肉の SUS304 母管側に，管継手強度に影響を及ぼすほどの変形が生じてしまうと考えられる．

5. 管継手の形状回復応力

5.1. 試験方法

形状回復応力とは，形状回復処理を施すことで発現する形状回復ひずみを，何らかの外部拘束により変位を抑制した結果，形状記憶合金に生じる応力と定義する．形状回復応力は，形状回復ひずみが生じてから外部拘束を与えるまでの形状回復ひずみ量（拘束開始ひずみ）の影響を受けるが，その変化によってどの程度の応力が発生するのかは明らかにされていない．

本試験では，外部拘束の開始を母管と管継手との接触とし，拘束開始ひずみを母管と管継手とのクリアランスとし，その際管継手の周方向に発生する応力を形状回復応力として，管継手を用いて形状回復応力と拘束開始ひずみの関係を調査した．この試験で用いた母管は鋼種が STKM13A，外径は 60.5mm，肉厚を 3.8mm とし，管継手試験片は**図 4.1-(a)**に示す形状を用い, その試験片番号および寸法を**表 5.1** に示す. 同じ試験片を二本ずつ作製したため, A, B と振り分ける．

表 5.1　形状回復応力測定用管継手試験片

No.	L	t	Di	Do	C	備考	
22	15	3	60.5	66.5	0	A22	B22
23	15	3	60.6	66.6	0.17	A23	B23
24	15	3	60.7	66.7	0.33	A24	B24
25	15	3	60.9	66.9	0.66	A25	B25
26	15	3	61.1	67.1	0.99	A26	B26
27	15	3	61.2	67.2	1.16	A27	B27
28	15	3	61.3	67.3	1.32	A28	B28
29	15	3	61.4	67.4	1.49	A29	B29
30	15	3	61.6	67.6	1.82	A30	B30
31	15	3	61.7	67.7	1.98	A31	B31
32	15	3	61.8	67.8	2.15	A32	B32

形状回復応力の測定法は**図 5.1** に示す．締結させた管継手の外表面の，両管端から 2mm の位置に周方向にひずみゲージを計二枚貼り付け，刻印面側を i ゲージ，非刻印面側を ii ゲージとする．その後ひずみゲージ貼り付け部を切断することによって試験片が収縮し，周方向残留ひずみ ε_θ が測定される．本合金のヤング率を E_j とすると，(4)式から周方向応力 σ_θ が算出される．

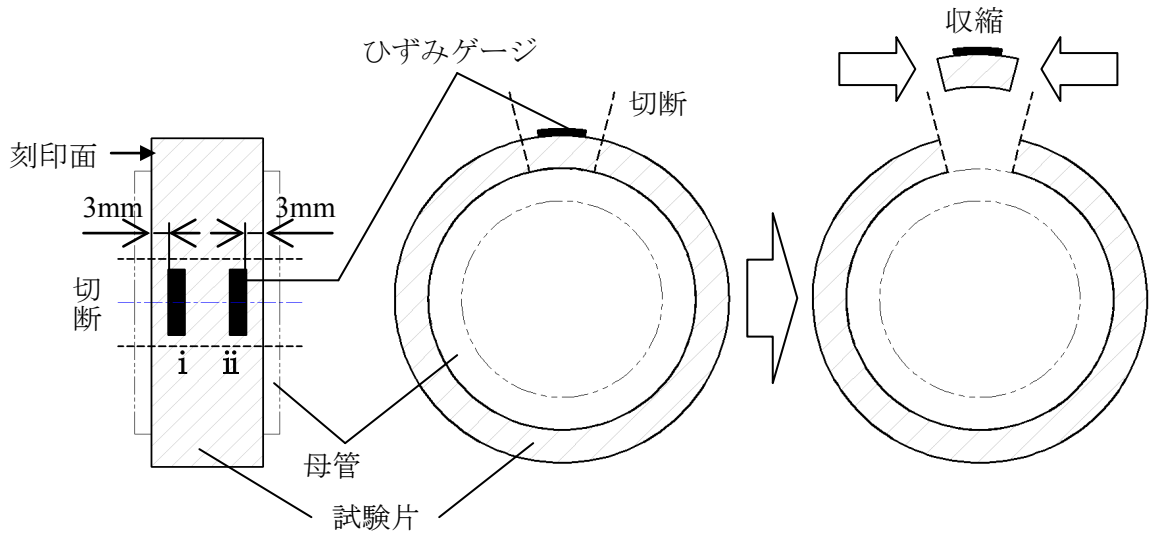


図 5.1　周方向応力測定法

$$\sigma_\theta = E_j \varepsilon_\theta \tag{4}$$

試験結果から，クリアランス，即ち拘束開始ひずみと周方向形状回復応力の関係を明らかにする．

また，母管外径を D，継手肉厚を t とすると，(5)式からその際の継手の締結圧力 p が求められる．

$$p = \frac{2t\sigma_\theta}{D} \tag{5}$$

これにより，管継手に，母管に対するあるクリアランスを持たせた際の形状回復応力が有する締結圧力が求められるため，そこからおおよその管継手強度を推定することが可能となる．まず管継手強度に影響を及ぼす要素は，絶縁接着剤の剪断強度と，管継手の締結力が挙げられるが，**図 4.6** から，使用している絶縁接着材が同様であっても，管継手強度に管継手肉厚による差異が生じている．即ち，管継手の締結力と，それに伴う見かけの摩擦抵抗力が主たる要因として管継手強度に影響を及ぼすと考えられる．管継手強度 F は，管継手と母管の接触距離を L’，管継手肉厚を t，母管外径を D，管継手の周方向形状回復応力を σ_θ，管継手・母管間の見かけの摩擦係数を μ とすると，(6)式であらわされる．

$$F = \pi DL' \cdot \frac{2t\sigma_\theta}{D} \cdot \mu = 2\pi tL'\sigma_\theta \mu \tag{6}$$

しかし，ピン無管継手強度試験においては薄肉 SUS304 母管が変形してしまい，母管と管継手の接触面積が接触距離 L'に比例しないため, 片側ピン管継手強度試験における結果から，管継手と SGP50A 母管との見かけの摩擦係数を算出した．その結果，μ は約 0.3133 であったため，(6)式に代入し，(7)式を得る．

$$F = 0.6266\pi t L' \sigma_\theta \qquad (7)$$

以上の結果から，管継手の形状および寸法が満たすべき条件を検討する．

5.2. 試験結果

(1) 周方向形状回復応力

測定されたひずみを(4)式を用いて周方向応力に換算し，縦軸に周方向形状回復応力，横軸に拘束開始ひずみをとり，ゲージごとの測定結果を図 5.2 に示す.

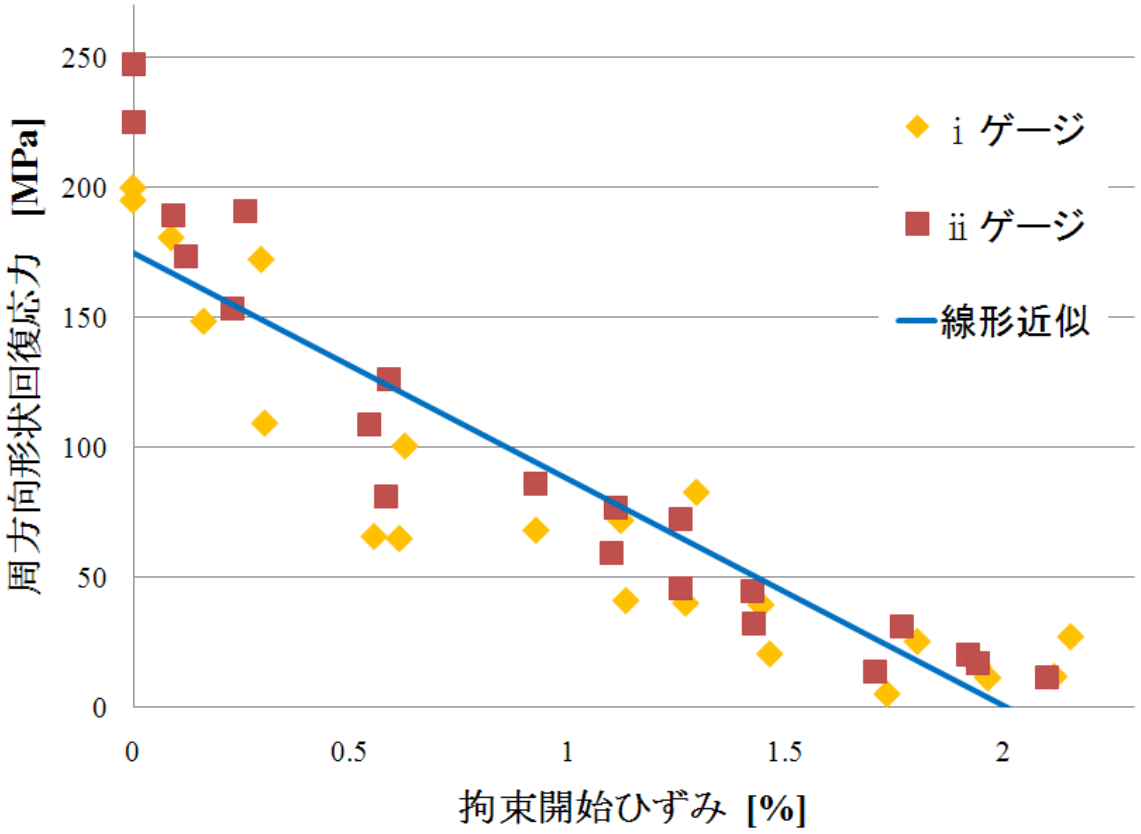


図 5.2　周方向形状回復応力-拘束開始ひずみ線図

図 5.2 に i ゲージの測定結果および ii ゲージの測定結果をプロットにて示し，全データの近似直線を示す．周方向形状回復応力を σ_θ，拘束開始ひずみを C[%]とし，近似直線式を(8)式に示す.

$$\sigma_\theta = -87.109C + 174.9 \tag{8}$$

図 5.2 から拘束開始ひずみ 0～0.5%程度までは周方向形状回復応力は急激に減少し，0.5%以降は緩やかな減少になっていることが確認される．鉄系形状記憶合金の，単軸予ひずみ付与における，1 サイクルのトレーニングを施した場合の形状回復応力は最大約 200MPa，形状回復ひずみは最大約 3.5%とされており [6]，本試験においても最大で 200～250MPa 程度の周方向形状回復応力が測定された．すなわち押拡げ加工における最大周方向形状回復応力は，単軸予ひずみ付与における最大形状回復応力と同程度以上発現していると言える．また，本試験においては周方向形状回復応力が 0 となる拘束開始ひずみ，即ち最大形状回復ひずみは測

定されなかったが，**図 5.2** からおよそ 2.5%の形状回復が起こると推定される．これは単軸予ひずみ付与における形状回復ひずみと比べ約 1%減少してしまっている．これは，本試験で用いた押拡げ加工は軸方向の圧縮も行われているため，二軸応力下の変形となる．二軸応力下における形状回復挙動は，過去の試験データから形状回復ひずみ量が著しく減少することが報告されている [12]．このことから形状回復ひずみ量の減少が生じたと考えられる．

ここでは母管として STKM13A を肉厚 3.8mm，母管外径を 60.5mm に加工して用いたが，母管に締結による変形が生じてしまうことで，クリアランス分のひずみでは完全拘束されず，**図 5.2** に示した拘束開始ひずみと，実質の拘束開始ひずみには差異が生じていると考えられる．締結後の母管外表面に発生している周方向応力を σ_m，管継手外表面に発生している周方向応力を σ_θ とすると，(5)式から $\sigma_\theta \fallingdotseq 1.4\sigma_m$ となり，**図 5.2** から σ_θ が最大値 250MPa を示した場合も母管の最大 σ_m は 180MPa 程度となる．これは弾性変形領域内であるから，母管のヤング率を E_m とすると，$\sigma_\theta/(1.4E_m)$ の弾性変形ひずみが生じていることとなる．以上のひずみを**図 5.2** に示す拘束開始ひずみの校正値として修正を加えた図を，**図 5.3** に示す．同時に過去の試験から，単軸引張り時における形状回復応力-拘束開始ひずみ線図 [11]を同図に掲載する．ただし，単軸引張り試験ではトレーニング処理を施していないため，形状回復応力特性の傾向についてのみ，比較，検討を行う．

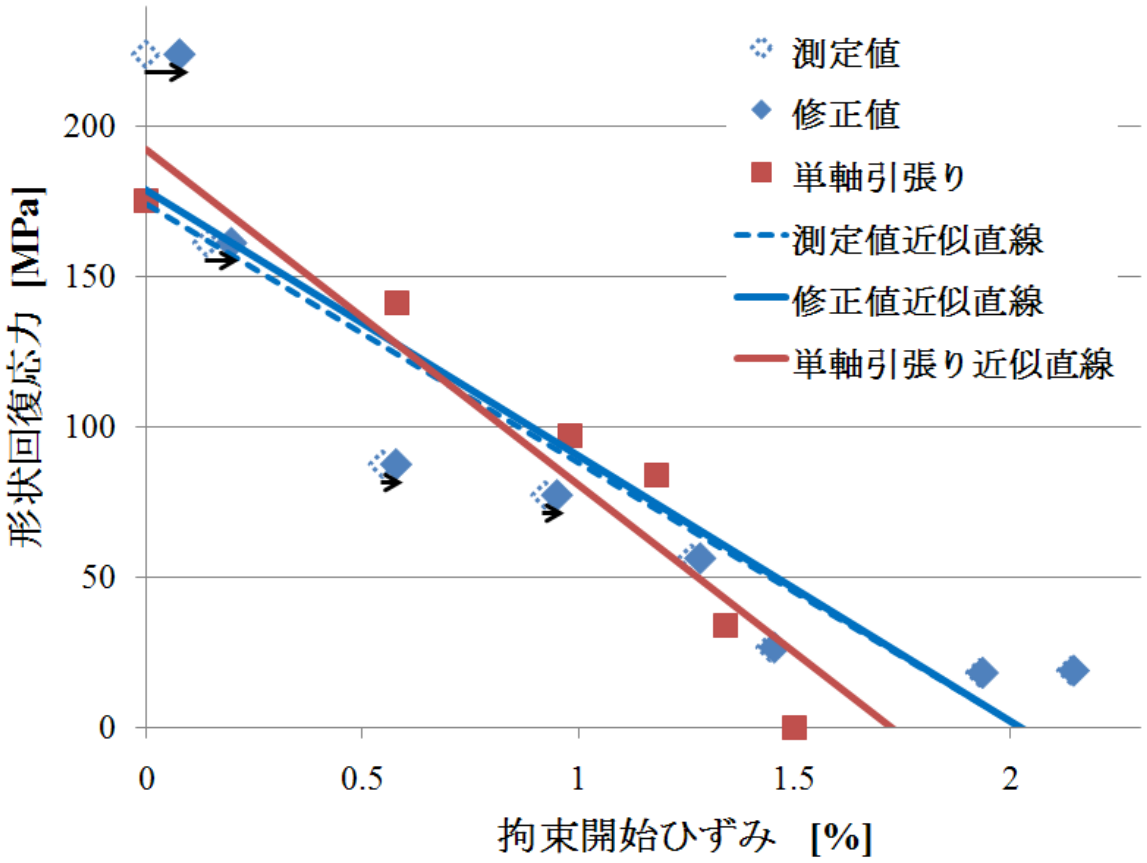


図 5.3　押拡げ加工と単軸引張りの形状回復応力の比較

図 5.3 から，周方向形状回復応力の減少傾向が単軸引張り時のそれと類似していることがわかる．このことから，押拡げ加工による拡径時の形状回復特性は，単軸引張り時と比較して最大形状回復ひずみ量こそ減少するものの，最大形状回復応力及び形状回復応力の減少傾向は，単軸引張りのそれと類似することが確認された．

(2) 管継手強度換算

管継手締結には絶縁接着材を挟み込むため，クリアランスは最低でも 1%程度必要となる．(8)式からその際の周方向形状回復応力 σ_θ は約 87.8[MPa]となり，その際は t×L'の値が 85[mm^2]以上となるような設計を行えば，規定の管継手強度 14.7kN を満たすと推定される．

ただし，母管が塑性変形を起こさず規定の管継手強度 14.7kN を満たすには，使用されている SGP50A 母管の降伏応力を σ_y[MPa]とすると，母管外径は 60.5mm，母管肉厚は 3.8mm であることから，(5)式および(7)式から，(9)式を満たす肉厚 t[mm]に設計しなくてはならない．ここで，母管と管継手の接触距離を L'[mm]，管継手周方向形状回復応力を σ_θ[MPa]とする．

$$\frac{23.460\times10^3}{\pi L'\sigma_\theta} \le t \le \frac{3.8\sigma_y}{\sigma_\theta - 0.126\sigma_y} \tag{9}$$

以上のことから，管継手が持つべき形状は，本論における片側ピン管継手のような，薄肉の SUS304 母管に変形を与えない，もしくは変形を与えても管継手強度に影響を及ぼさない形状に設計し，寸法は(7)式及び(9)式から管継手強度 14.7kN を満たす寸法に設計することで，最適な管継手を作成することが可能である．

6. 電力埋設管への適用試験

6.1. 試験方法

電力埋設管への適用試験として，これまでの試験から有力と考えられる管継手を用いて，両スネーク SP スライダー[17, 18]電力埋設管と SGP50A を締結させ，空中で地盤沈下のシミュレーション試験を行う．使用した試験片の試験片番号，形状および寸法を**表 6.1** に示す．

表 6.1　電力埋設管への適用試験用管継手試験片

No.	図番号	L	Di	Di’	Do	ℓ_1	ℓ_2	d1	d2	t	t’
33	4.1-(b)	50	61.1	61.7	69.1	11	25	6	—	4	3.7
34	4.1-(c)	50	61.1	—	65.1	11	—	6	6.4	2	—

絶縁接着材は 33 番試験片にポリイミド樹脂接着剤＋カプトン，34 番試験片にポリイミド樹脂接着剤＋麻布を用いた．また 33 番試験片では，SUS303 製，直径 6mm，長さ 6mm の平行ピンを，34 番試験片では，電力埋設管側には SUS303 製，直径 6mm，長さ 4mm の平行ピンを，SGP50A 母管側には S45C 製，直径 6mm，長さ 6mm の平行ピンを用いた．締結にはバンドヒーターを用いて 350℃にて 30 分間の形状回復処理を施した．締結終了後にテスターを用いて絶縁性の有無を確認する．また，**図 6.1** に示す A0°～A180°，B0°～B180°の位置に計八枚, 両端のチャック部から約 100mm の位置に軸方向ひずみを測定するようにひずみゲージを貼る．これにより沈下試験時の埋設管全体にかかる軸力を測定する．電力埋設管と SGP50A を締結した概要を**図 6.1** に，写真を**図 6.2** に示す．締結後の固定端チャック部から 33 番管継手端部までの距離は 590mm，管継手間の電力埋設管長さは 1360mm，34 番管継手端部と移動端チャック部の距離は 330mm とする．

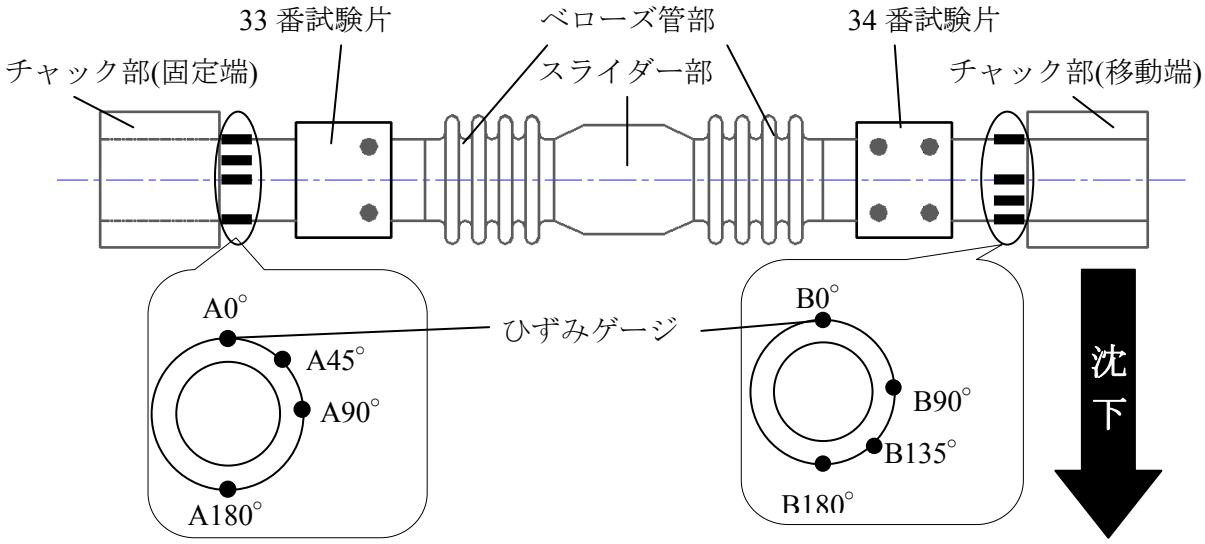


図 6.1　電力埋設管と SGP50A の締結およびひずみゲージ貼り付け位置概要

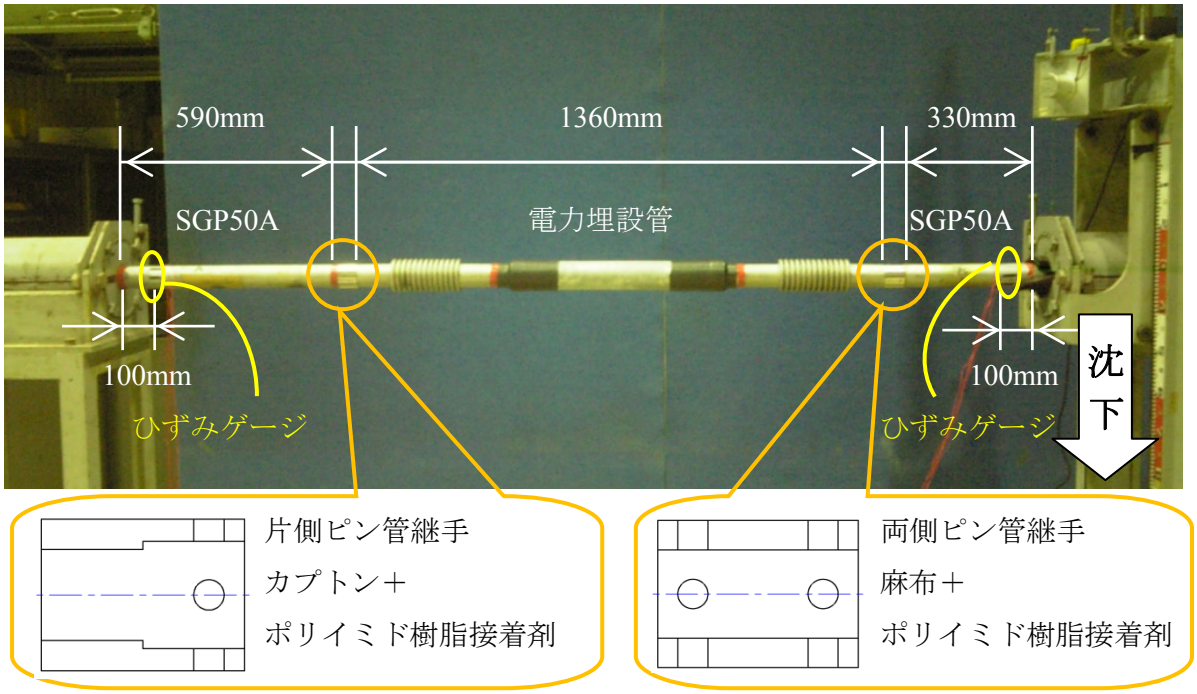


図 6.2　電力埋設管と SGP50A の締結およびひずみゲージ貼り付け位置

地盤沈下シミュレーション試験においては沈下速度を 11.1mm/sec, 沈下量を 1000mm とし, 同時に沈下に要する荷重も測定した.

6.2. 試験結果

絶縁性は麻布を用いた場合は確認できず，カプトンを用いた場合は 1MΩ以上の電気抵抗値を確認した．試験後の状況を図 6.3 に，沈下量と軸方向ひずみの測定結果を図 6.4 に示す．

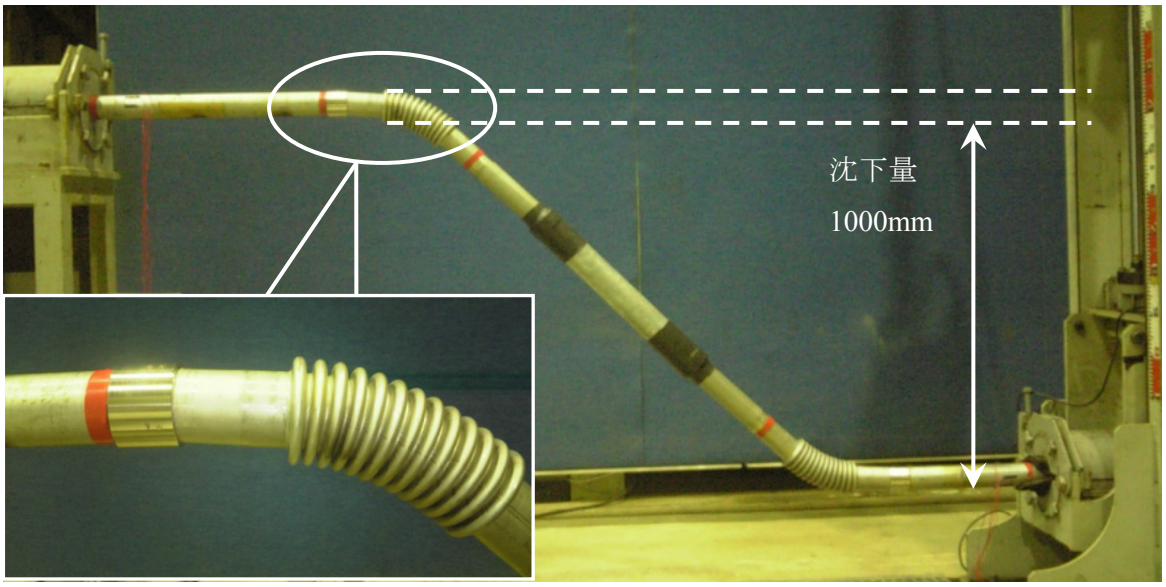


図 6.3　地盤沈下シミュレーション試験後の様子

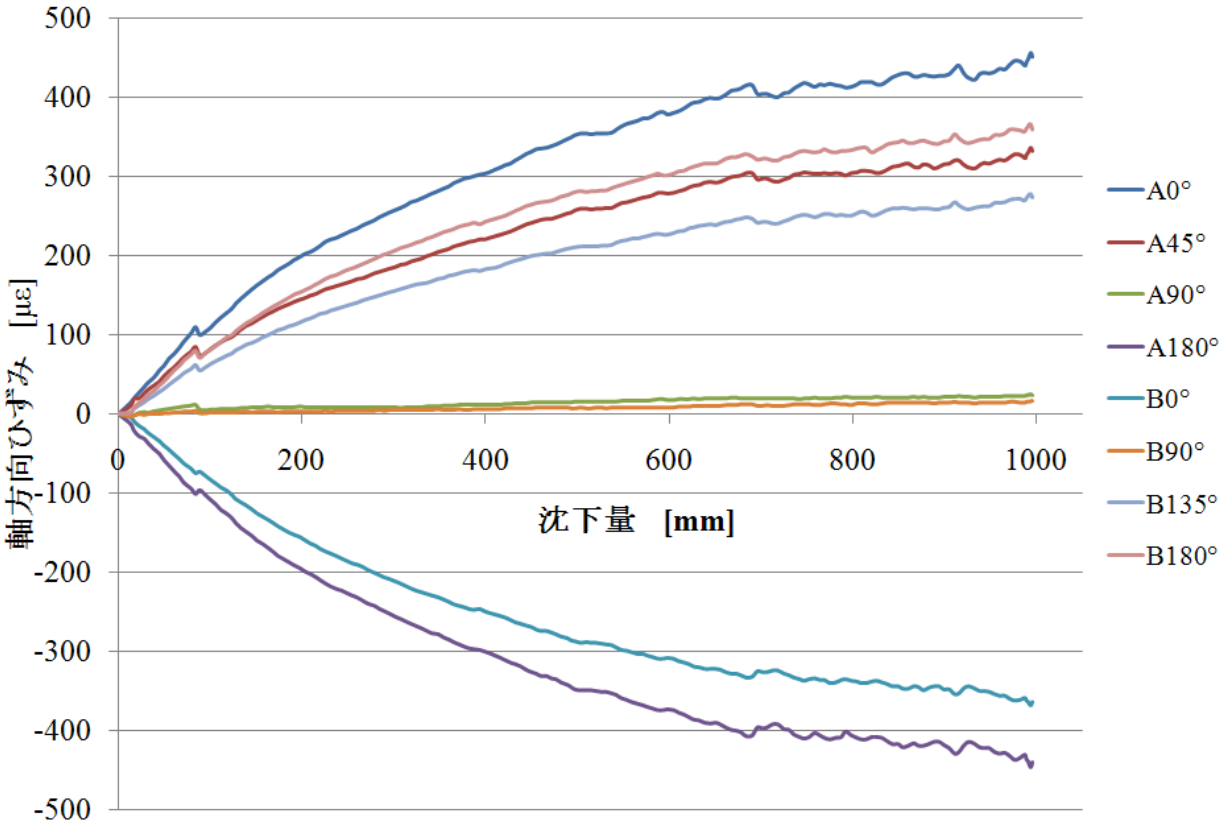


図 6.4　測定ひずみ-沈下量線図

図 6.3 から，管継手が抜けることなく試験が終了していることが確認される．また，**図 6.4** から鋼管にかかる力は曲げ成分が主となり，軸力はほとんどかかっていないことがわかる．鋼管部にかかる最大曲げモーメントは約 795.2Nm となり，最大軸力は約 2.98kN となった．電力埋設管用管継手において，曲げに関しての規定はないが，軸力に関しての規定 14.7kN は大幅に下回る結果となった．これは，電力埋設管のベローズ管部とスライダー部が，電力埋設管の曲げ，および伸びに対する力を相殺しているためである．

空中地盤沈下シミュレーション試験における管継手強度及び絶縁性を十分に満たす管継手として，絶縁接着材にカプトン＋ポリイミド樹脂接着剤を用いた片側ピン管継手が最も有力であることが明らかとなった．

7. 結言

1) 管継手強度は両側ピン管継手が最も高く，次いで肉厚 4mm，軸方向長さ 50mm の片側ピン管継手，肉厚 4mm，軸方向長さ 62mm のピン無管継手と高い管継手強度を示した.
2) 管継手肉厚およびクリアランスを決定することによって，形状回復応力-拘束開始ひずみ線図からおおよその管継手強度を推定することができる.
3) 空中における電力埋設管への適用試験においては，管継手形状は肉厚 4mm の片側ピン管継手を，絶縁接着材にはカプトン＋ポリイミド樹脂接着剤を用いることで，十分な管継手性能を有する.
4) 絶縁接着材としてはカプトン＋ポリイミド樹脂接着剤，もしくは#400 アルミナサンドペーパー＋ポリイミド樹脂接着剤の使用が適している.

参考文献

1) L.Kaufman and M.Cohen:“Progress in Metal Physics”(1958)165.
2) 宮崎修一・大塚和弘：形状記憶合金, 産業図書(1984)
3) 宮崎修一・佐久間俊雄他：形状記憶号合金の特性と応用展開,シーエムシー(2001)
4) A.Sato,E,Chishima,K.Soma and T.Mori:Acta Metal.,30(1982),1177-1183.
5) 山本英知・直井久他：塑性加工連合講演会(2008),325pp.229-230
6) 丸山忠克・栗田孝：金属,74(2004),48-51.
7) 村田雄一・直井久他：塑性加工連合講演会(2005),334pp.211-212.
8) 澤口孝宏・菊池武丕児他：金属, 76(2006),20-23.
9) 田中喜久昭・戸伏壽昭・宮崎修一：形状記憶合金の機械的特性，養賢堂(1993)
10) 大塚広明・村上雅人・松田昭一：日本金属学会講演概要,(1986),219
11) H.Otsuka, M.Murakami and S.Matsuda: Proc. of MRS Int. Mtg. on Advanced Materials, 9(1989), 451-456.
12) 小池拓：鉄系形状記憶合金の形状回復特性，法政大学大学院修士論文(2008)
13) 久保紘・丸山忠克：電子材料,41-4(2004),56-61.
14) 棚橋浩之・丸山忠克・花村年裕：日本金属学会講演概要,(1993),451.
15) 北陸地方無電柱化協議会：無電柱化推進計画
16) 国土交通省道路局：平成 18 年度達成報告書(2007),78-83
17) 土井製作所(株)：地盤沈下対策製品(2004),3-9
18) 宍倉拡：地盤沈下時における電力埋設管の変形挙動，法政大学大学院修士論文(2008)
19) (株)土井製作所：(株)土井製作所ホームページ-無電柱化-次世代型電線共同溝
20) 近藤裕幸・直井久他：塑性加工連合講演会(2006),627pp.363-364
21) 東レ・デュポン(株)：東レ・デュポン(株)ホームページ-製品案内-カプトン
22) 日本化学繊維協会：繊維ハンドブック(1999)

謝辞

論文作成の終わりにあたり，本研究につきまして懇切丁寧なご指導を賜りました法政大学教授 直井久先生に厚く御礼申し上げます．また，共同研究にて種々のご指導を賜りました淡路マテリア株式会社 丸山忠克様，栗田孝様，坂井ひろみ様，株式会社土井製作所 岡田英樹様，大作誠様に厚く御礼申し上げます．

本研究の遂行にあたり，種々の有益なご助言とご指導を賜りました東京工業大学名誉教授佐藤彰一先生に厚く御礼申し上げます．

本研究の推進にあたり，試験片の製作にあたり丁寧な加工をして頂きました元法政大学中央工作室島貫様，富田様，同工作室小山様，藤巻様には心より感謝いたします．

最後に本研究の遂行において多大な協力をいただいた，元法政大学工学部機械工学科直井研究室の和田学氏，村田雄一氏，近藤裕幸氏，小池拓氏，同研究室の皆様に心より感謝の意を表します．