

土木研究所資料

鉄筋の機械式継手および溶接継手 の挙動に関する調査報告書

1998年12月

建設省土木研究所
材料施工部 コンクリート研究室

Copyright © 1998 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

鉄筋の機械式継手および溶接継手 の挙動に関する調査報告書

材料施工部 コンクリート研究室 室 長 河野 広隆
主任研究員 森濱 和正

要 旨

兵庫県南部地震の際に、RC構造物中のガス圧接継手の破断が問題になった。これを受け、地震などを考慮した圧接継手の各種載荷実験および施工の信頼性を向上させるための検討を実施している。

この機会に、ガス圧接以外の鉄筋継手である機械式継手7種類、溶接継手2種類についても、地震を考慮した高速載荷、塑性域での正負繰返しや、低温時の高速載荷実験を行い、それらの挙動把握を行った。また、継手に使用した材料や継手作製後（引張試験前）と引張試験後の継手部について、金属組織の変化や硬さ分布、衝撃特性に関する試験も行った。それらの結果を報告する。

キーワード：機械式継手、溶接継手、載荷速度、温度、弾・塑性域正負繰返し、曲げ試験、組織観察、衝撃特性、硬さ

目 次

1. まえがき	1
2. 鉄筋継手の種類	2
2.1 鉄筋継手の分類	2
2.2 実験対象とした継手の種類	4
2.2.1 継手の選定	4
2.2.2 ねじ節鉄筋・ロックナット継手	7
2.2.3 ねじ節鉄筋・充填継手	8
2.2.4 端部ねじ加工・摩擦圧接継手	9
2.2.5 端部ねじ加工・圧着継手	10
2.2.6 スリーブ・充填継手	11
2.2.7 スリーブ・圧着継手	12
2.2.8 エンクローズ溶接継手	13
2.2.9 フラッシュ溶接継手	14
3. 実験概要	15
3.1 実験項目	15
3.2 鉄筋母材	15
4. 引張試験	17
4.1 引張試験方法	17
4.1.1 試験項目	17
4.1.2 試験片	18
4.1.3 測定項目および方法	18
4.2 鉄筋母材の一方引張試験結果	23
4.2.1 試験結果	23
4.2.2 試験温度、載荷速度の影響	23
4.2.3 破断位置、標点長と破断伸びの関係	23
4.3 継手の一方引張試験結果	28
4.3.1 試験結果	28
4.3.2 破断状況	28
4.3.3 強 度	28
4.3.4 ひ ず み	29
4.3.5 伸出し量	30
4.3.6 伸び変位、一様伸び、破断伸び	30

4.4 繰返し載荷試験	50
4.4.1 試験結果	50
4.4.2 引張強さ	54
4.4.3 剛 性	56
4.4.4 伸出し量	57
4.4.5 伸出しの残留量	58
4.4.6 破断伸び	59
5. 曲げ試験	60
5.1 継手の種類	60
5.2 試験方法	60
5.3 試験結果	60
6. 金属学的調査	62
6.1 試験方法	62
6.1.1 マクロ観察	62
6.1.2 ミクロ観察	62
6.1.3 硬さ試験	62
6.1.4 シャルピー衝撃試験	62
6.2 試験結果	63
6.2.1 鉄筋母材	63
6.2.2 ねじ筋鉄筋・ロックナット継手Aおよび充填継手B	65
6.2.3 端部ねじ加工・摩擦圧接継手C	68
6.2.4 端部ねじ加工・圧着継手D	74
6.2.5 スリーブ・充填継手E	81
6.2.6 スリーブ・圧着継手F	88
6.2.7 エンクローズ溶接継手G	99
6.2.8 フラッシュ溶接継手H	103
7. まとめ	107
資料編	109

1. まえがき

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震において、鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋のガス圧接継手部に破断現象がみられた。

現在、鉄筋コンクリートで造られている橋脚などの耐震設計の考え方は、通常の荷重や中規模までの地震に対しては、残留変形が生じない範囲で耐え（弾性設計）、大地震に対しては、変形によりエネルギーを吸収することで、崩壊を免れるという考え方（塑性設計）を採っている。しかしながら、この地震で見られた破断現象が、変形によるエネルギー吸収が小さいまま生じているものとする、これは想定している外力より小さい力で崩壊が生じる可能性のあることを意味する。

載荷速度、繰返し載荷などの外力の形態によって鉄筋継手の強度が大きく影響を受けるとすると、現在の設計体系を根底から揺るがしかねないことであり、構造物の安全性の確保のため、地震時などに生じる外力に対する鉄筋継手の挙動を明確にすることは、極めて重要で急務となっている。

これまで^{1.1) 1.2)}は、鉄筋継手の90%以上を占めるガス圧接継手について、地震時に作用する特徴的な荷重である載荷速度および弾・塑性域の正負繰返しなど様々な載荷実験を行い、さらに温度の影響による、継手の挙動について検討を行い、圧接を適切に行えば圧接部から破断することはないことが明らかになった。

本報告書では、中径鉄筋を主な対象としているガス圧接継手に対して、最近太径鉄筋を中心に全鉄筋継手数の約10%を占める機械式継手7種類、溶接継手2種類についても常温時の高速載荷、低温時の高速載荷、弾・塑性域での正負繰返し載荷実験を行い、継手の詳細な挙動について調査した。また、鉄筋母材、継手を作製する前のボルト、ナット、スリーブ、カプラーなど継手素材自体、継手作製後（引張試験前）および引張試験後の継手部の顕微鏡によるマクロ、ミクロ観察、硬さ分布、衝撃特性など金属学的試験によるそれらの変化も調査した。これらの結果についてとりまとめたものである。

1.1) 共同研究報告書第188号、鉄筋のガス圧接継手に関する共同研究報告書(1)載荷速度の影響、1997年8月、以下第1報

1.2) 共同研究報告書第196号、鉄筋のガス圧接継手に関する共同研究報告書(2)温度および繰返し載荷の影響、1998年3月、以下第2報

2. 鉄筋継手の種類

2. 1 鉄筋継手の分類

鉄筋継手の種類は、世界中のものを細かく分類すると、50種類程度もあるといわれている^{2.1)}。

継手の形式からは、重ね継手、機械式継手、突合せ溶接継手に大別される。現在実用されている主な継手を表-2.1.1に示す。一般的には、直径16mm以下の細径鉄筋の場合には重ね継手が、径19mm以上の太径鉄筋の場合には、ガス圧接を主体とする突合せ溶接継手および機械式継手が適用される。

また、重ね継手は、一方の鉄筋の応力を周辺のコンクリートの付着を介して他方の鉄筋に伝達する方法であり、簡易なため、で最も一般的な継手であった。しかしながら、継手部とその周辺のコンクリートに鉄筋に沿ったひび割れ・剥離を生じた場合、継手の耐力は著しく減少する。

一方、周辺コンクリートの付着を期待せず、金属を介して鉄筋の応力を伝達する方式が機械式継手または突合せ溶接継手である。

機械式継手には、ねじ、スリーブ方式がある。ねじ方式には、鉄筋の節がねじになっているねじ節鉄筋継手、鉄筋の端部にねじを加工する端部ねじ加工継手、鉄筋の端部にねじを接合する端部ねじ接合継手がある。端部ねじ接合継手は、ねじの接合に後述するスリーブ方式や突合せ溶接方式を用いて接合しそのねじ同士を連結するというように二段階の継手になっている。

スリーブ方式は、鉄製のパイプであるスリーブを介して鉄筋同士を連結する方式であり、鉄筋とスリーブの結合方法によって圧着方式、充填方式などがある。

突合せ溶接継手は、鉄筋同士を直接接合して応力を伝達するものであり、固相接合と溶融接合がある。固相接合とは、接合端面を溶融温度直下まで加熱し、圧縮力を加えて原子を拡散させて接合する方法である。固相接合にはガス圧接継手が最も多用されている。

溶融接合に属する溶接継手としては、今回エンクローズ溶接とフラッシュ溶接を対象とした。エンクローズ溶接は、継手部を銅当て金で囲んで半自動ガスシールドメタルアーク溶接するものである。フラッシュ溶接は、電気抵抗溶接の一種であり、鉄筋端面を短絡電流とアーク熱で加熱溶融後加圧し、接合する。短時間での接合が可能な自動溶接工法である。

^{2.1)} 別所佐登志，角陸純一：鉄筋継手の種類と力学性状，コンクリート工学，vol. 29，No. 12，1991. 12

表-2.1.1 鉄筋継手の分類

周辺コンクリートとの関係	鉄筋の応力伝達機構		継手工法	備考				
付着力を期待する	重ね継手	コンクリートのせん断	フックなし重ね継手	異形鉄筋				
			フック付き重ね継手	丸鋼				
			横筋付き重ね継手	溶接金網				
			添筋継手					
付着力の一部を期待する	機械式+コンクリートのせん断		ねじ節鉄筋重ね継手					
付着力を期待しない	機械式継手	ねじ方式	ねじ節鉄筋継手	締付け	ナット締付け(ロックナット)			
					カプラー圧着			
					ナット圧延			
				充填	樹脂			
					モルタル			
					転造ねじ+カプラー			
			端部ねじ加工継手	切削ねじ+カプラー				
				切削雌ねじ+切削雄ねじ				
				雌ねじ圧着+中ボルト				
			端部ねじ接合継手	雌ねじ摩擦圧接+カプラー				
				鋼管スリーブ方式	圧着方式	断続圧着継手	油圧力でダイスを圧着	
						連続圧着継手	油圧力でダイスを圧着	
		鍛造圧着継手						
		充填方式	爆発圧着継手		火薬爆発で圧着			
			モルタル充填継手		テーパ付き鋳鋼管			
			樹脂充填継手	円筒鋳鋼管				
			溶融金属充填継手	テルミット反応で溶融				
		金属片充填継手	くさび打込み					
		端面接触方式 (圧縮力伝達用)	帯締め接触継手	ボルト帯締め				
				くさび帯締め				
	突合せ継手	固相接合	ガス圧接継手					
			アルガス接合継手					
		溶融接合	突合せ溶接継手					
			アーク溶接	鋼当て金				
			エンクローズ溶接	鋼当て金				
			フラッシュ溶接					
重ね継手	重ね溶接	フレアー溶接継手	PCa工法で慣用					
		添え鋼板溶接継手						

2. 2 実験対象とした継手の種類

2. 2. 1 継手の選定

表-2. 1. 1の中から、継手の構造、用途、実績などから、表-2. 2. 1および図-2. 2. 1の継手を今回の実験対象として選定した。機械式継手7種類、溶接継手2種類である。

「ねじ節鉄筋継手」は、鉄筋の節がねじ状のものをを使ってカプラーと呼ばれる長いナットで鉄筋同士を連結する継手である。鉄筋とカプラーを緊結するために、その両側をナットで締め付けて緊結したものが『ロックナット』継手である。『充填』継手は、カプラーと鉄筋のすき間に有機材料(樹脂)やモルタルを充填した継手である。今回対象とした充填材は、前者の有機材料(エポキシ系)である。

「端部ねじ接合」継手は、メスねじまたはオスねじを鉄筋端部に接合し、ボルトまたはナットで連結するものである。『摩擦圧接』は、鉄筋にオスねじを押し付けて回転させ摩擦熱によって圧接したものの、『圧着』は、スリーブとメスねじが一体になったものを、スリーブを鍛造により鉄筋に圧着した継手である。

「スリーブ」継手は、鋳物のスリーブと鉄筋の間をモルタルによって充填する『モルタル充填』継手と、スリーブを油圧によって変形させて鉄筋に圧着させた『圧着』継手である。モルタル充填継手は、モルタルの強度の違いによりスリーブ長さの異なる2種類の継手を対象とした。

「溶接継手」は、ガス圧接以外にはエンクローズ溶接とフラッシュ溶接の2種類を対象とした。

各継手は、(社)土木学会「鉄筋継手指針」に準拠、または日本建築センター「一般規定A級またはSA級継手」を取得あるいは同等のものである。

次項以降に各継手の概要、施工手順、検査・確認事項、特徴と主な用途について記述した。

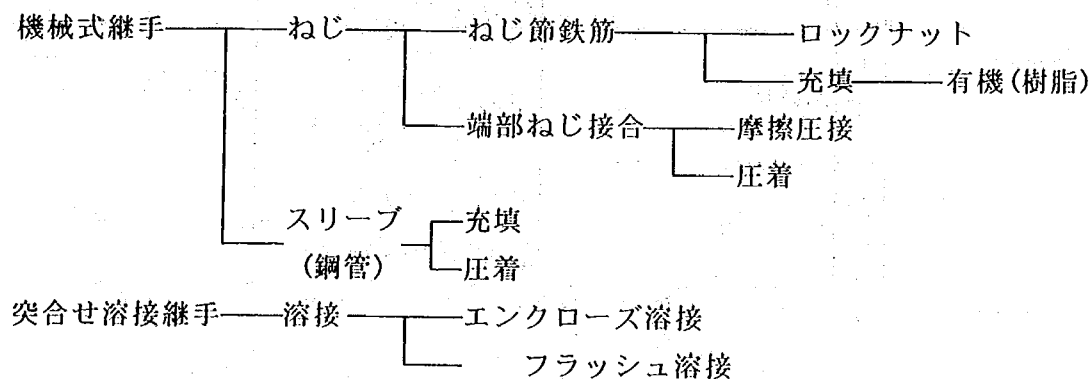


図-2. 2. 1 実験対象とした継手の種類および機械式継手の分類

表-2.2.1 実験対象とした継手の種類

継手の種類	ねじ節鉄筋継手		端部ねじ加工継手		スリーブ継手		溶接継手	
	ロックナット	充填	摩擦圧接	圧着	モルタル充填	圧着	エンクローズ溶接	フラッシュ溶接
記号	A	B	C	D	E	F	G	H
鉄筋の種類	SD295. SD345 SD390. SD490	SD295. SD345 SD390. SD490 USD685	SD295. SD345 SD390. SD490	SD295. SD345 SD390. SD490	SD295. SD345 SD390. SD490	SD295. SD345 SD390	SD295. SD345 SD390. SD490	SD345. SD390 SD490 USD685
鉄筋の呼び名	D19～D51	D19～D51	D13～D51	D13～D51	D13～D51	D19～D51	D25～D51	D35, D38, D41, D51
使用鉄筋	ねじ節鉄筋	ねじ節鉄筋	普通異形鉄筋	普通異形鉄筋	普通異形鉄筋	普通異形鉄筋	普通異形鉄筋	普通異形鉄筋
継手の種類 (異型間継手)	2サイズ異型	2サイズ異型	2サイズ異型	同型のみ	2サイズ異型	D19～D41の 1サイズ異型	1サイズ異型	1サイズ異型
継手の長さ (mm)	D25 200～220 D32 250～280 D38 280～315	D25 120～150 D32 150～190 D38 170～215	D25 110 D32 131 D38 168	D25 Bタイプ 254 D32 313 D38 312	D25 320～370 D32 403～455 D38 483～535	D25 220 D32 240 D38 260	—	—
継手の径 (mm)	D25 44～45 D32 55～58 D38 65～67	D25 38～45 D32 48～55 D38 57～65	D25 42 D32 53 D38 63	D25 Bタイプ 39 D32 49 D38 59	D25 63 D32 71 D38 82	D25 45 D32 54 D38 65	1.1～1.2D	1.1～1.2D
施工者の資格	公的資格不要 技能講習有り	公的資格不要 技能講習有り	公的資格不要 技能講習有り	公的資格不要 技能講習有り	公的資格不要 技能講習有り	公的資格不要 技能講習有り	公的資格必要 技能講習有り	公的資格必要 技能講習有り
天候の影響	無	無	無	無	無	無	防護措置が必要	防護措置が必要

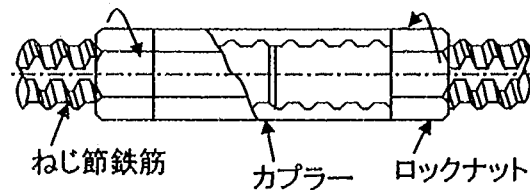
	ねじ節・ロックナット	
	ねじ節・充填 (有機)	
	ねじ接合・摩擦圧接	
	ねじ接合・圧着	
	スリーブ・圧着	
	スリーブ・充填A	
	スリーブ・充填B	
	突合せ・エンクローズ溶接	
	突合せ・フラッシュ溶接	
	母材・ねじ節	
	母材・横節	

表-2.2.2 実験対象とした継手の形状・寸法

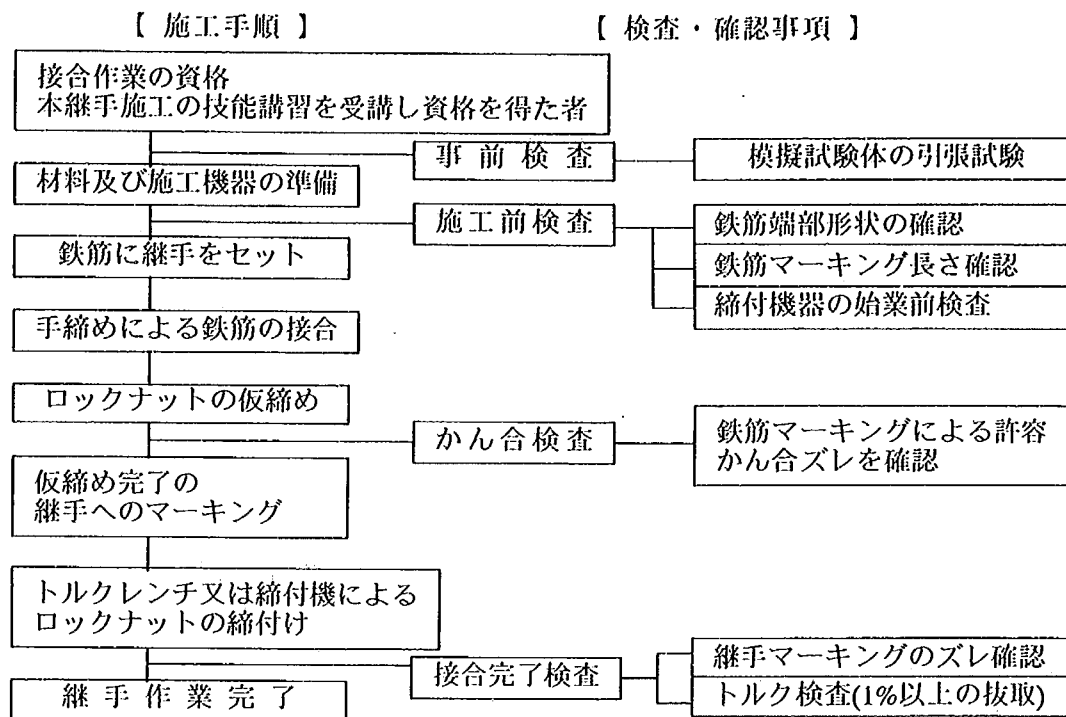
2.2.2 ねじ節鉄筋・ロックナット継手

(1) 継手の概要

ねじ節鉄筋をカプラーとロックナットで接合し両端のロックナットにトルクを導入して締付け固定する方式



(2) 施工手順と検査



(3) 特徴

①鉄筋の長さを任意に切断が可能

鉄筋の端部にボルトを取付けた継手と異なり、ねじ節鉄筋は異形鉄筋の節形状が、全長にわたってねじ状になっているので、どの位置で切断しても接合できる。

②熟練工不要

継手作業は、熟練工や技量資格は不要で、簡便で誰にでも迅速に施工できる。

③鉄筋先組工法に最適

ねじ節とカプラーは、独特の形状設計により、螺合性に優れ、鉄筋組立誤差などを容易に吸収でき、安全かつ高能率に加工組立が行え、他の機械加工ねじに比べ格段の施工性がある。

④継手検査が容易

継手の引張試験は施工前の模擬試験体で確認する。

また、施工後の検査は、かん合長さを目視で確認する。

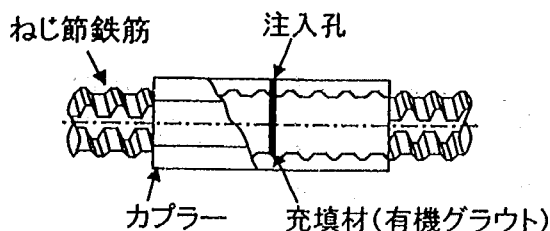
⑤全天候型

全天候で継手作業ができ、継手性能には影響はない。

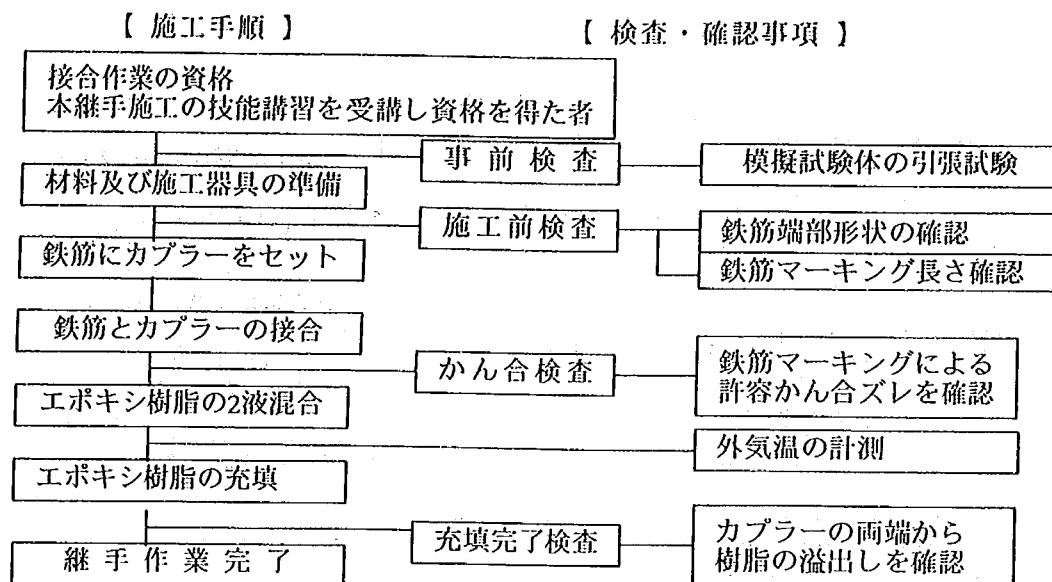
2.2.3 ねじ節鉄筋・充填継手

(1) 継手の概要

ねじ節鉄筋をカプラーで接合して、カプラーと鉄筋の空隙にエポキシ系グラウト材を充填、硬化させ固定する方式。



(2) 施工手順と検査



(3) 特徴

①鉄筋の長さを任意に切断が可能

鉄筋の端部にボルトを取付けた継手と異なり、ねじ節鉄筋は異形鉄筋の節形状が、全長にわたってねじ状になっているので、どの位置で切断しても接合できる。

②高性能グラウト材の採用

接着強度及び即硬性に優れたグラウト材を採用しロックナットを不要とし、その結果、作業性の向上とコスト削減が図られている。

③グラウトの混練が不要の簡単施工

グラウト剤は主剤と硬化剤の2液混合で、継手メーカーにより混練方法が異なり、2液を手練りで混練しカートリッジに移し替え注入する方法と、予め主剤と硬化剤が各々カートリッジに詰められたダブルカートリッジにより、注入時、2液が先端のノズル内で混練されながら注入され、混練作業とカートリッジへの移し替え作業を不要とした方法がある。

④熟練工不要

継手作業は、熟練工や技量資格は不要で、簡便で誰にでも迅速に施工できる。

⑤優れた螺合性と施工性

ねじ節とカプラーは、独特の形状設計により、螺合性と施工性に優れ、安全かつ高能率に加工組立が行え、他の機械加工ねじに比べ格段の施工性がある。

⑥継手検査が容易

継手の引張試験は施工前の模擬試験体で確認する。

また、施工後の検査は、かん合長さ目視で確認する。

⑦全天候型

全天候で継手作業ができ、継手性能には影響はない。

⑧太径・高強度鉄筋に最適

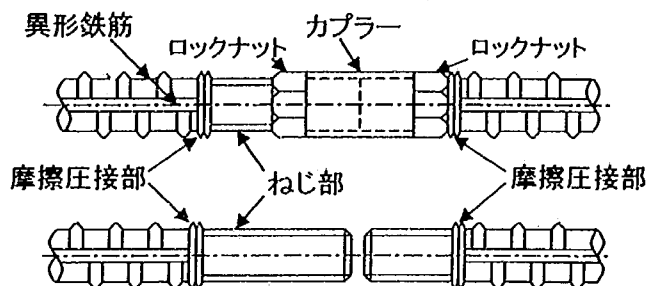
SD685, SD490 から SD295 の D19 から D51 まで対応できる。とくに高強度・太径には優れた継手性能と施工性が得られる。

2.2.4 端部ねじ加工・摩擦圧接継手

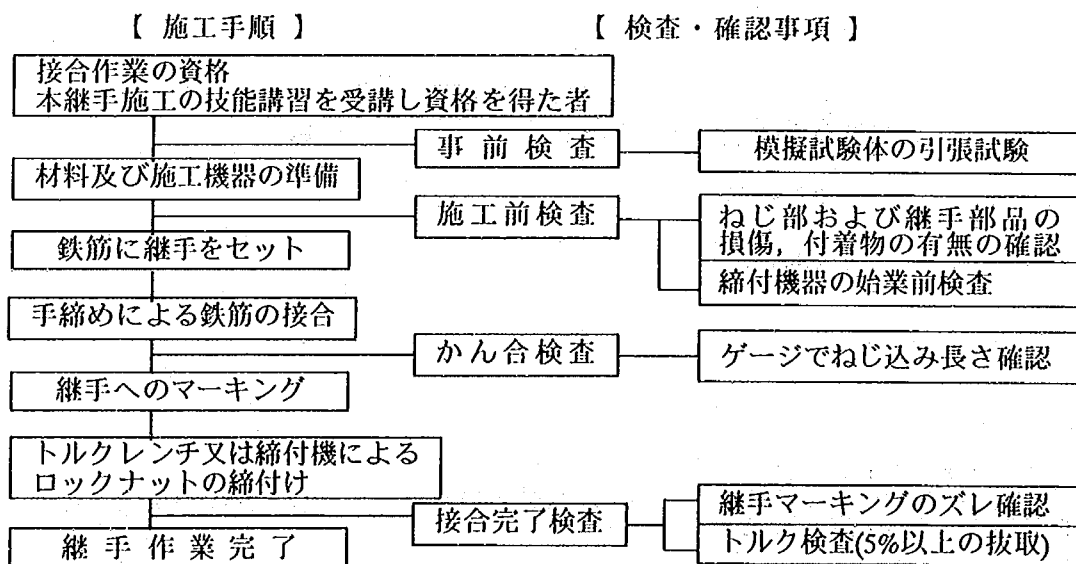
(1) 継手の概要

鉄筋の端部に、ねじ加工したボルトを予め摩擦圧接により接合した鉄筋とカプラーおよびロックナットで接合。両端のロックナットにトルクを導入して締付け固定する方式。

(鉄筋とボルトの摩擦圧接は継手メーカーの工場製作による)



(2) 施工手順と検査



(3) 特徴

①コンパクトで十分な強度

接合部の材質は構造用炭素鋼の S45C を使用しその有効断面積は鉄筋より大きくすることにより継手部の強度を鉄筋より高く、かつ継手長さを非常に短く設計できる。

②グラウトは一切不要

作業手順は非常に簡単でグラウト剤の注入が不要な上、現場ではガス圧接のような加熱・加圧といった作業も一切不要である。

③部品は鉄筋に装着して出荷

工事工程にあわせ、鉄筋部材のねじ部にカプラーとロックナットを装着して、1梱包として出荷する。各部品に分かれて出荷される他の工法と比べて、部品の紛失や面倒な準備作業の必要がなく、速やかに配筋作業に入れる。

④技量資格は不要

熟練工や特殊な有資格者を必要とせず完璧な施工が可能で、人件費が節約できる。

⑤全天候型

雨・風の中での作業でも品質には全く影響がない。

⑥均一な品質と高い信頼性を保証

ねじ部と鉄筋部を摩擦圧接する。これは自動車部品の接合に広く採用されており、管理の行き届いた工場で加工するので均一で安定した品質が保証される。

⑦検査は極めて簡単

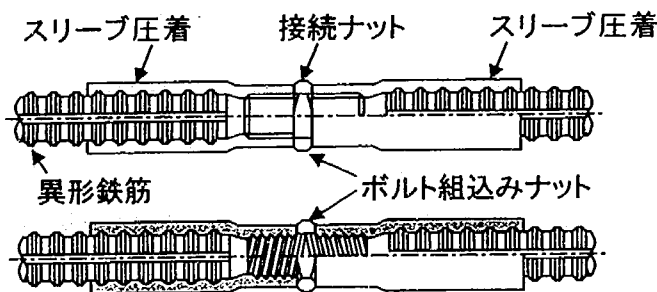
強度検査は施工前の供試材で確認する。施工後の検査は専用ゲージによる、ねじのかん合長さをチェックする。

2.2.5 端部ねじ加工・圧着継手

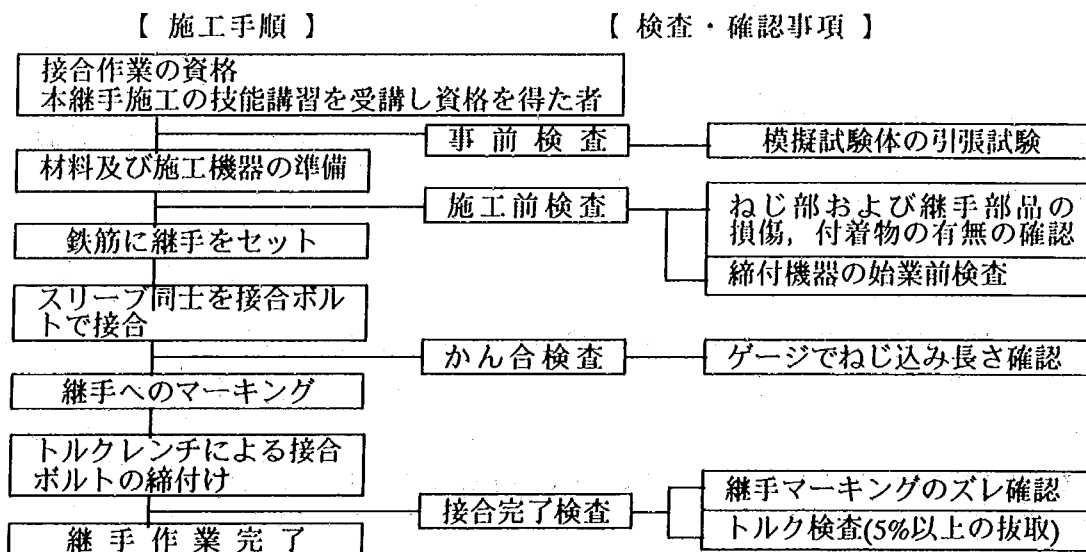
(1) 継手の概要

接合する鉄筋の両端部に、予め雌ねじ加工を施してある鋼管（スリーブ）を圧着機で鍛造圧着して、スリーブ同士を接合ボルトを介して接合。接合ボルトにトルクを導入してターンバックル方式に締付け固定する方式。

(鉄筋とスリーブの圧着は継手メーカーの工場製作による)



(2) 施工手順と検査



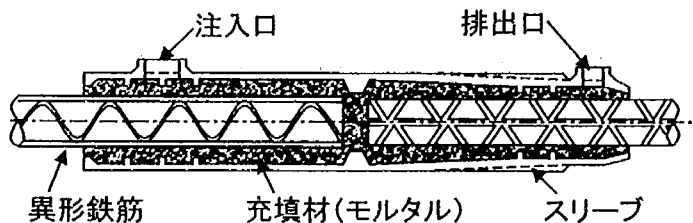
(3) 特徴

- ①鉄筋を加熱することなく機械的に接合しているため、信頼性が高い。
- ②使用条件に合わせた最適の継手を選択できる。
- ③打ち継ぎ部での使用に適している。
- ④鉄筋の形状に関わらず、すべての JIS 適合鉄筋に対応できる。
- ⑤鉄筋鋼種は、SD295～SD490 まで、鉄筋径は D13～D51 までに対応している。
- ⑥接合作業に熟練を必要としない。

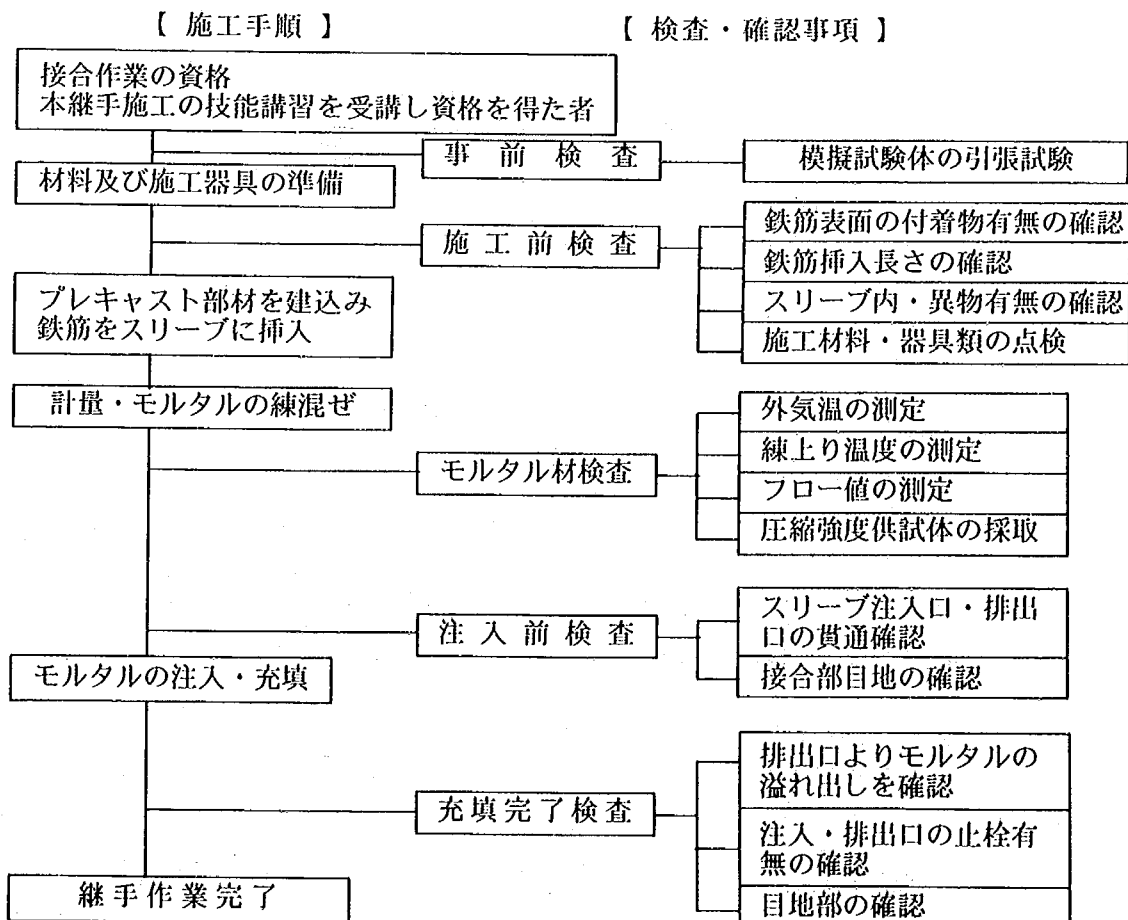
2.2.6 スリーブ・充填継手

(1) 継手の概要

円筒状のスリーブに鉄筋両端部を挿入し、スリーブと鉄筋の空隙に無収縮モルタルを充填、硬化させ固定する方式。(主にプレキャストコンクリート部材の継手に使われ、継手はプレキャスト製作メーカーでセットされる)



(2) 施工手順と検査



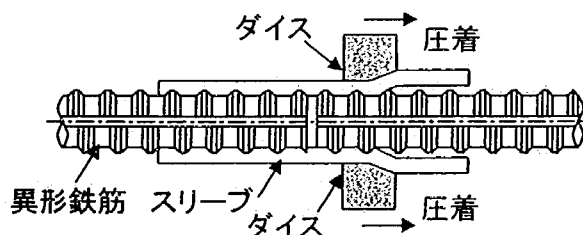
(3) 特徴

- ①プレキャストコンクリート部材同士の接合に最適な継手である。
- ②モルタル充填方式による継手であり、鉄筋に熱も外力も加えないので二次応力の発生はない。
- ③鉄筋はD13からD51まで、鉄筋の種類、節形状に関係なく確実な継手が得られる。
- ④プレキャストコンクリート部材には鉄筋継手作業のための断面欠損部がないので、部材接合部の全断面を有効に計算できる。
- ⑤部材の建て方は複数本の接合鉄筋を有する上下の部材をワンタッチで接合できる。
- ⑥部材の建て方作業と鉄筋継手作業とは工程が分離されるのでクレーンの稼働率が良くなり躯体建て方工程が短縮できる。
- ⑦スリーブの広口内径と鉄筋のクリアランスが10～20mm有るので、部材製作誤差、建て入れ誤差などを容易に吸収できる。
- ⑧継手作業に特殊技能者を必要としない。
- ⑨現場施工はモルタルを充填することであり、かつ確実な継手が得られる。
- ⑩充填作業は天候に左右されることはない。
- ⑪充填後の検査はスリーブの排出口よりモルタルの溢れ出しを確認と目地部の目視確認である。

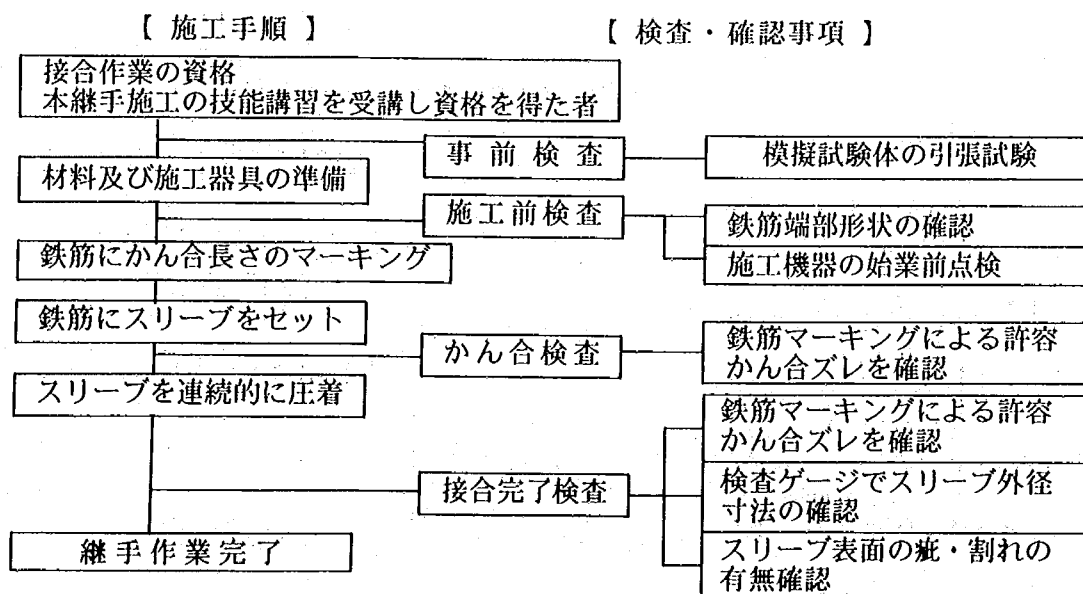
2.2.7 スリーブ・圧着継手

(1) 継手の概要

鉄筋両端部に円筒状の鋼製スリーブで被せ、専用の油圧式圧着機でスリーブを連続的に絞り込み鉄筋の筋に食い込ませて固定する方式。



(2) 施工手順と検査



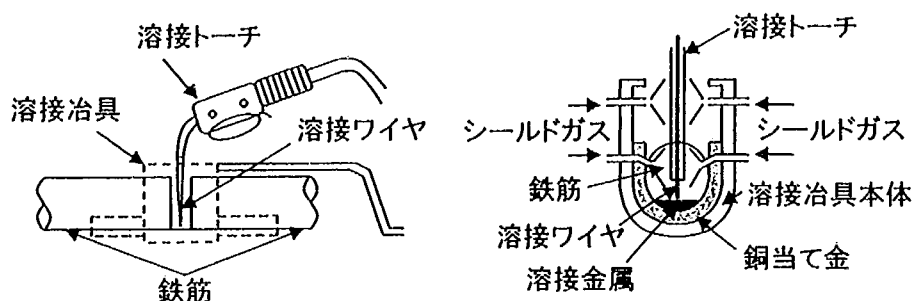
(3) 特徴

- ①機械的接合のため、継手作業者の技量に左右されず、信頼性の高い継手を得られる。
- ②圧着加工時に鉄筋および鉄筋間の伸縮がほとんどない。
異種径の継手が可能である。
- ③圧着加工後の検査は目視で行える。
- ④圧着作業は天候に左右されない。

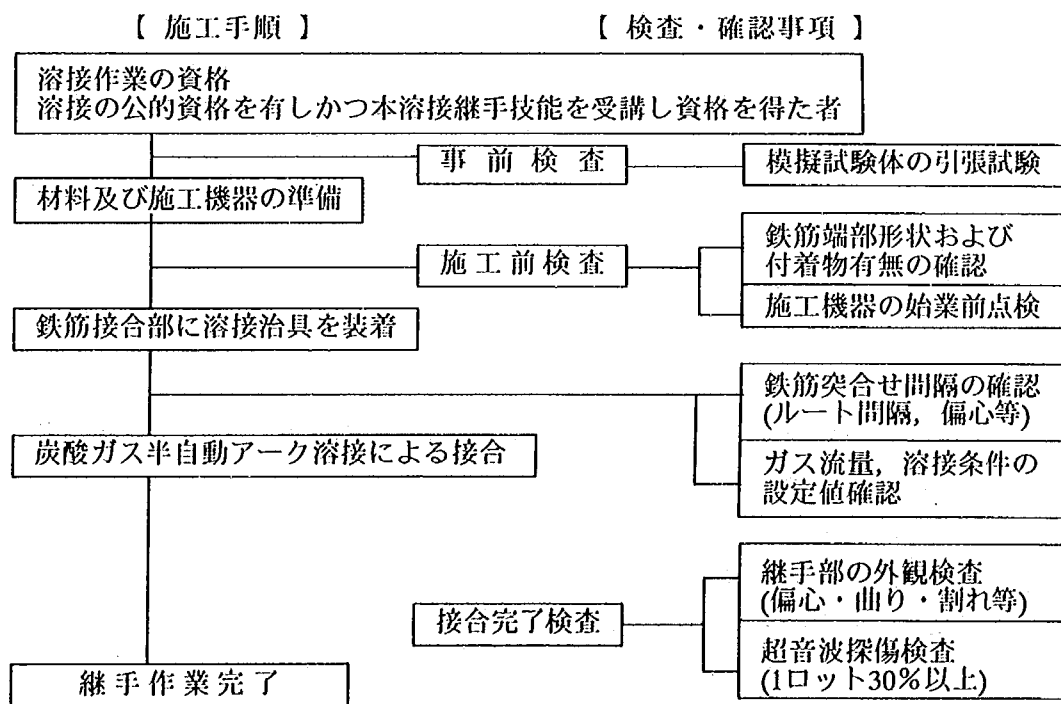
2.2.8 エンクローズ溶接継手

(1) 継手の概要

突合せたの端面間に所定の間隔を設け。銅当て金で囲み、炭酸ガスアーク溶接法により溶融接合するもので、金属的に一体となる継手方式。



(2) 施工手順と検査



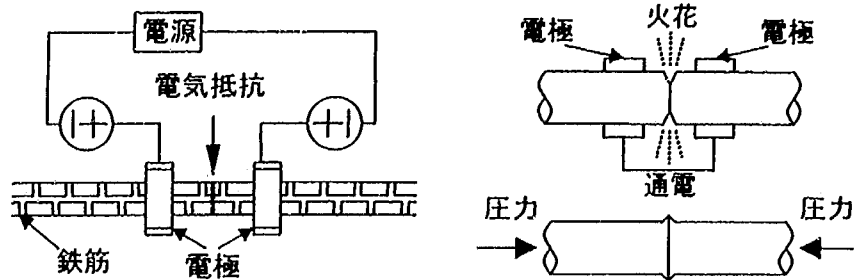
(3) 特徴

- ①一体接合継手であるため降伏点および引張強さなどは鉄筋母材と同等の性能を有している。
- ②鉄筋を引き寄せる必要がなく固定された鉄筋同士でも接合できる。
- ③継手部の長さが短く外径も鉄筋径とほぼ同一のためコンクリートの打設性が良い。
- ④溶接治具が小型軽量のため高所や狭隘な場所でも作業が容易である。

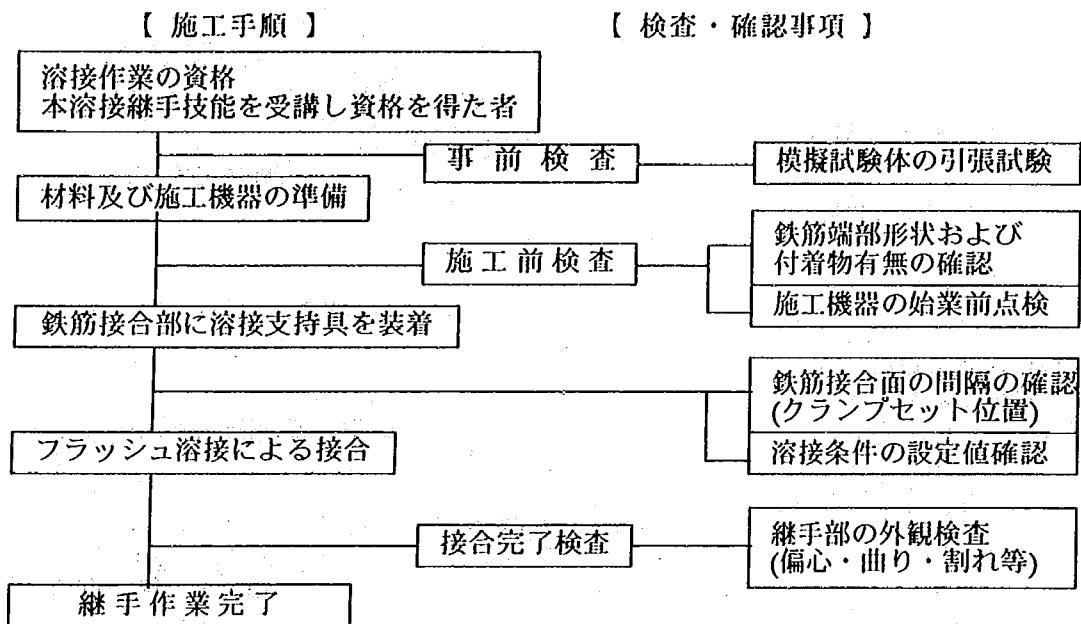
2.2.9 フラッシュ溶接継手

(1) 継手の概要

突き合わせた鉄筋端面を接触させて通電し、フラッシング（溶接・アーク）を発生させることで、鉄筋端面を加熱した後、急速に加圧・変形を与えて接合するもので、金属的に一体となる継手方式。



(2) 施工手順と検査



(3) 特徴

① 一体接合継手であるため降伏点および引張強さなどは鉄筋母材と同等の性能を有している。
また繰返し応力付加時にもすべり（抜け出し）などは発生しない。

異種径の継手が可能である。

② 継手部の長さが短く外径も比較的小さいためコンクリートの打設性が良い。

③ 自動溶接であるため作業者の熟練や技量は不要で、均一良好な継手品質が得られる。

3. 実験概要

3. 1 実験項目

各継手は、表-3.1.1のように一方向引張試験、繰返し載荷試験、曲げ試験および金属試験を行った。

引張試験の実験要因は、温度と載荷速度である。試験温度は常温(25℃程度)、低温(-40℃)、一部に高温(40℃)とした。載荷速度は、常温時の標準速度は JIS Z 2241「金属材料の引張試験方法」に準じたものである。それに対し、各温度時の高速載荷は、地震時の最高のひずみ速度程度とした。

繰返し載荷試験は、地震時の繰返しを考慮し、弾性域・塑性域において正負の交番繰返し載荷を行った。

曲げ試験は、一体接合の3種類の継手C、G、Hについて、接合状態の良否を見るために行ったものである。

金属試験とは、ここでは、顕微鏡による金属組織のマクロ、ミクロ観察、ビッカースまたはロックウェルによる硬さ試験、シャルピー衝撃試験を総称している。素材とは、継手に使っているボルト、ナット、スリーブなどである。

金属試験は、継手を作製する前の素材自体、継手を作製後、引張試験を行う前と引張試験後に素材、継手内の鉄筋、継手外の鉄筋(母材部)について実施した。

3. 2 鉄筋母材

今回使用した鉄筋は、SD345の呼び名D25で、節の形状により「ねじ節」と「横節」の2種類である。

ねじ節鉄筋は、ねじ節鉄筋継手のロックナットおよび充填継手に使用した。

そのほかの継手には横節鉄筋を使用した。節の間隔は、市場に出回っているもののほぼ中間のものとした。その理由は、スリーブ圧着には節間隔の小さいものがよいが、スリーブのモルタル充填では、定着強度が低下するためである。

鉄筋の形状を表-2.2.2に、試験結果を表-3.2.1および表-3.2.2に示す。

表-3.2.1 鉄筋の機械的性質

節形状	引張試験				曲げ試験	
	降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	降伏比* %	伸び %	内側半径 2.0D	曲げ角度 180° 常温
ねじ節	416	608	67.9	24.8	OK	OK
横節	373	537	69.5	29.4	OK	OK

*降伏比=降伏点/引張強さ

表-3.2.2 鉄筋の化学成分分析結果

節形状	化学成分分析結果(%)												
	C	Si	Mn	P	S	$\frac{C+Mn}{6}$	Cu	Cr	Ni	Sn	V	Nb	Mo
ねじ節	0.26	0.13	1.02	0.033	0.036	0.43	0.37	0.29	0.08	0.015	0.007	0.001	0.018
横節	0.22	0.21	0.83	0.026	0.022	0.36	0.27	0.17	0.07	0.02			

表-3.1.1 継手の種類と実験項目

記号	継手の種類		一方向引張試験						繰返引張	曲げ試験	金属試験									
			温度	常温		低温		高温			常温	素材			引張試験前			引張試験後		
			速度	標準	高速	標準	高速	高速			高速	断面	硬さ	シャルピ°	断面	硬さ	シャルピ°	断面	硬さ	シャルピ°
A	ねじ節	ロックナット	○	○		○			○		○	○	○	○			○	○	○	
B		充填（有機）	○	○		○	○		○		○	○	○	○			○	○	○	
C	ねじ接合	摩擦圧接	○	○		○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
D		圧着	○	○		○			○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	
E-1	スリーブ	充填A	○	○		○			○		○	○	○	○			○	○	○	
E-2		充填B	○	○		○			○		○	○	○	○			○	○	○	
F		圧着	○	○		○			○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	
G	突合せ	エポキシ溶接	○	○		○			○	○				○	○	○	○	○	○	
H		フラッシュ溶接	○	○		○			○	○				○	○	○	○	○	○	
N-1	母材	ねじ節	○	○	○	○	○		○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	
N-2		横節	○	○	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

金属試験の「断面」は、顕微鏡による金属のミクロ・マクロ組織観察・写真、充填継手の充填状況ねじ継手の締め付け状況、などの観察・写真撮影である。

4. 引張試験

4. 1 引張試験方法

4. 1. 1 試験項目

引張試験の要因は表-4. 1. 1 のように試験温度と載荷速度の組合せを変えた一方向引張試験、および繰返し載荷である。

試験温度は常温(25℃程度)に対し低温(-40℃)と一部高温(40℃)である。高温は、継手B(ねじ節・充填)の充填材に有機材料を使用しているため、その温度の影響をみるために実施した。

載荷速度は、常温時には JIS Z 2241(金属材料に引張試験方法)に準じた標準速度と、地震時の速度を想定した高速である。標準速度は、降伏まではひずみ速度で 0. 01%/sec, 降伏後は 0. 1%/sec とした。高速は 10%/sec を目標としたが、後述するように継手長の違いや継手部からの鉄筋の伸出などにより、実際には 3~11%/sec であった。

繰返し載荷パターンは、図-4. 1. 1 のように1段階は引張が降伏応力の 95%(0. 95fy)と圧縮が 50%(-0. 5fy)を4回繰返しした。次に、 $\sigma_n=1$ と-0. 5fyを4回繰返しした。その後も圧縮は常に一定で、引張側を $\sigma_n=3$, $\sigma_n=5$, $\sigma_n=7$, $\sigma_n=9$ と漸次増加させながら4回ずつ繰返すという、引張漸増の弾性域・塑性域正負交番繰返し載荷を行った。そのあとは、破断まで載荷した。ここで、引張応力 σ_n は式(4. 1. 1)で示されるように、引張強さ f_b と降伏応力 f_y の差を10分割し、降伏応力から1番目を $\sigma_n=1$, 3番目を $\sigma_n=3$, というように n を漸増させたものである。

$$\sigma_n = f_y + \frac{f_b - f_y}{10} \times n \quad \dots \dots \dots 4. 1. 1$$

載荷速度は 0. 5Hz 一定としたので、 n が大きくなるほどひずみ速度も大きくなる。最後の破断までの載荷速度は、高速と同じ 10%/s とした。

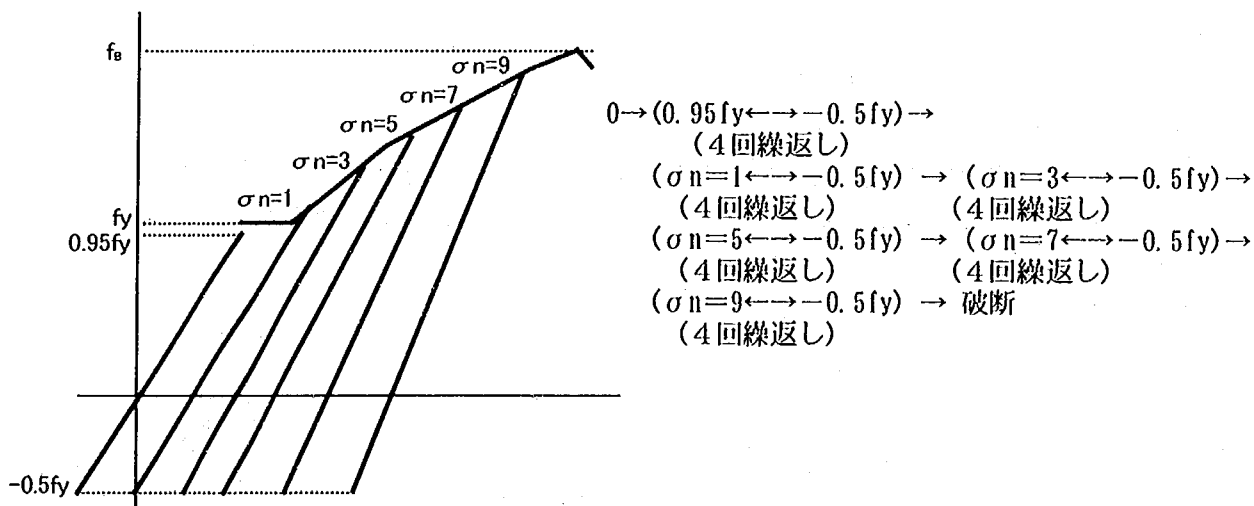


図-4.1.1 弾性域・塑性域正負繰返し載荷パターン

4.1.2 試験片

引張試験に用いた試験片は、図-4.1.2のように引張試験時の標点間に継手の両側の鉄筋母材部が鉄筋径の4倍の長さ(4D)を確保できるようにした。(a)および(b)は常温用、(c)が低温および高温用である。(c)は、両側に直径70mmの鋼棒を溶接してある。これは、とくに低温試験では、強度増加に伴うチャック切れを防止するためである。

4.1.3 測定項目および方法

測定項目を表-4.1.2に、測定フローを図-4.1.3に示す。各測定方法は以下の通りである。

(1) 荷重、ストローク

荷重、ストロークを試験機の出力から求めた。

(2) 変位

標点間(4D+継手長+4D)の長さ変化をレーザー(光学式)変位計により測定した。

低温および高温試験は、恒温槽の外に取り付け、鋼棒のひずみも測定し、鋼棒の伸びを差し引いて変位を求めた。

(3) 伸出し量

継手部からの鉄筋の伸出しやナット間の開きなどを図-4.1.5のようにクリップゲージによって測定した。

(4) ひずみ

図-4.1.5のように鉄筋母材部、継手部のナット、ボルト、スリーブなどにひずみゲージを貼付した。低温試験には、低温用ゲージを用いた。

(5) 鉄筋温度

試験時の鉄筋の温度を測定するため熱電対を中央部に取り付けた。

(6) 破断伸び、絞り

破断後の伸び(ここでは、後述する「一様伸び」と区別するため、以下、「破断伸び」と呼ぶ)測定位置を図-4.1.6に示す。破断部では絞りも測定した。

(7) 破断後の観察

破断後の状況を写真撮影した。

(8) 金属学的調査

以上の測定が終了した後、引張試験を行われなかった試験片(引張試験前)と合わせて、圧接部の顕微鏡によるマクロ、ミクロ組織観察や、硬さ、衝撃試験などを行った(6章)。

表-4.1.1 継手の種類と試験条件

継手の種類		上段：温度 ¹⁾		中段：載荷速度 ²⁾		下段：記号 ³⁾	
		常温		低温		高温	常温
		標準	高速	標準	高速	高速	繰返し
機械式	A	○	○		○		○
	B	○	○		○	○	○
	C	○	○		○		○
	D	○	○		○		○
	E-1	○	○		○		○
	E-2	○	○		○		○
	F	○	○		○		○
溶接	G	○	○		○		○
母ねじ節	H	○	○		○		○
材横節		○	○	○	○		○

1) 試験温度

常温=25℃程度, 低温=-40℃, 高温=40℃

2) 載荷速度

標準：JIS Z 2241 に準じ、降伏まではひずみ速度で 0.01%/sec, 降伏後は 0.1%/sec

高速：目標 10%/sec (継手長, 伸出し量などにより実際には 3~11%/sec)

3) 試験条件の記号

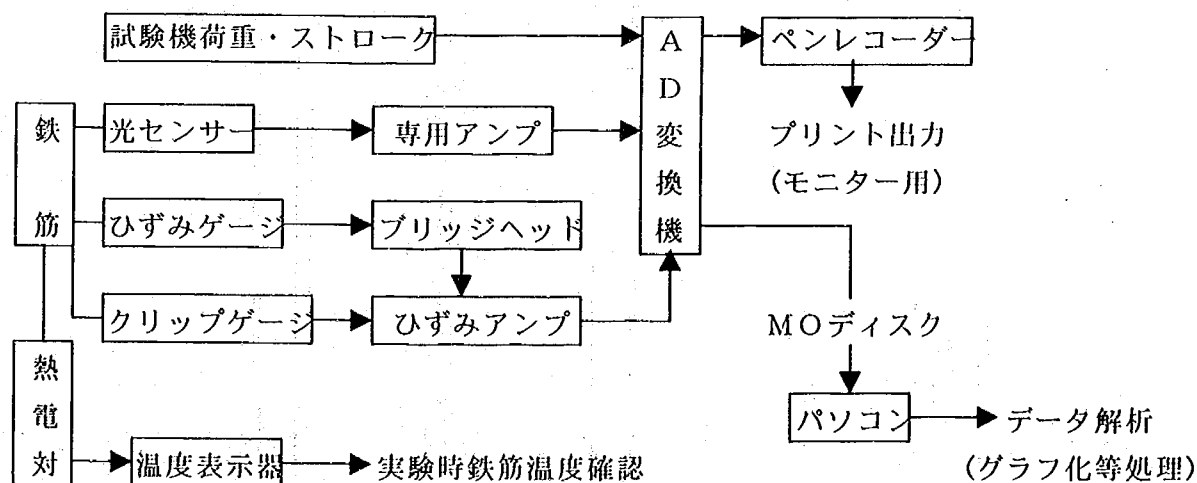
常温・標準速度：S 常温・高速：H

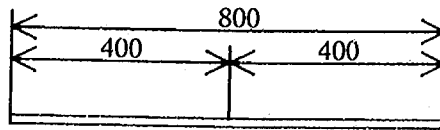
低温・標準速度：LS 低温・高速：LH

高温・高速：HH 繰返し：C

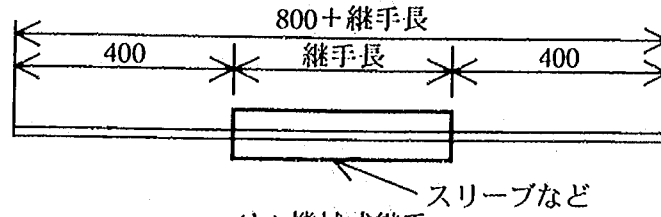
表-4.1.2 計測項目

項 目	セ ン サ ー	内 容
荷重・ストローク	試験機出力	降伏, 最大, 破断荷重と試験機移動量
変位	レーザ変位計	鉄筋の伸び量, 一様伸び, 載荷速度
伸び出し量	クリップゲージ	継手部の伸出し量
鉄筋継手部のひずみ	ひずみゲージ	ヤング係数
鉄筋温度	熱電対	鉄筋の実験時温度
鉄筋の破断伸び	デジタルノギス	JIS 準拠の他, 数点測定
鉄筋の絞り	デジタルノギス	1 個所: (破断位置) JIS 準拠
破断後の観察	カメラ	写真撮影

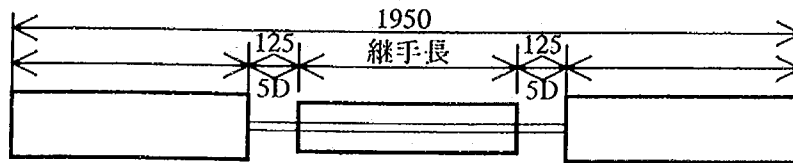




(a) 母材、インクロ-ズ溶接、フラッシュ溶接

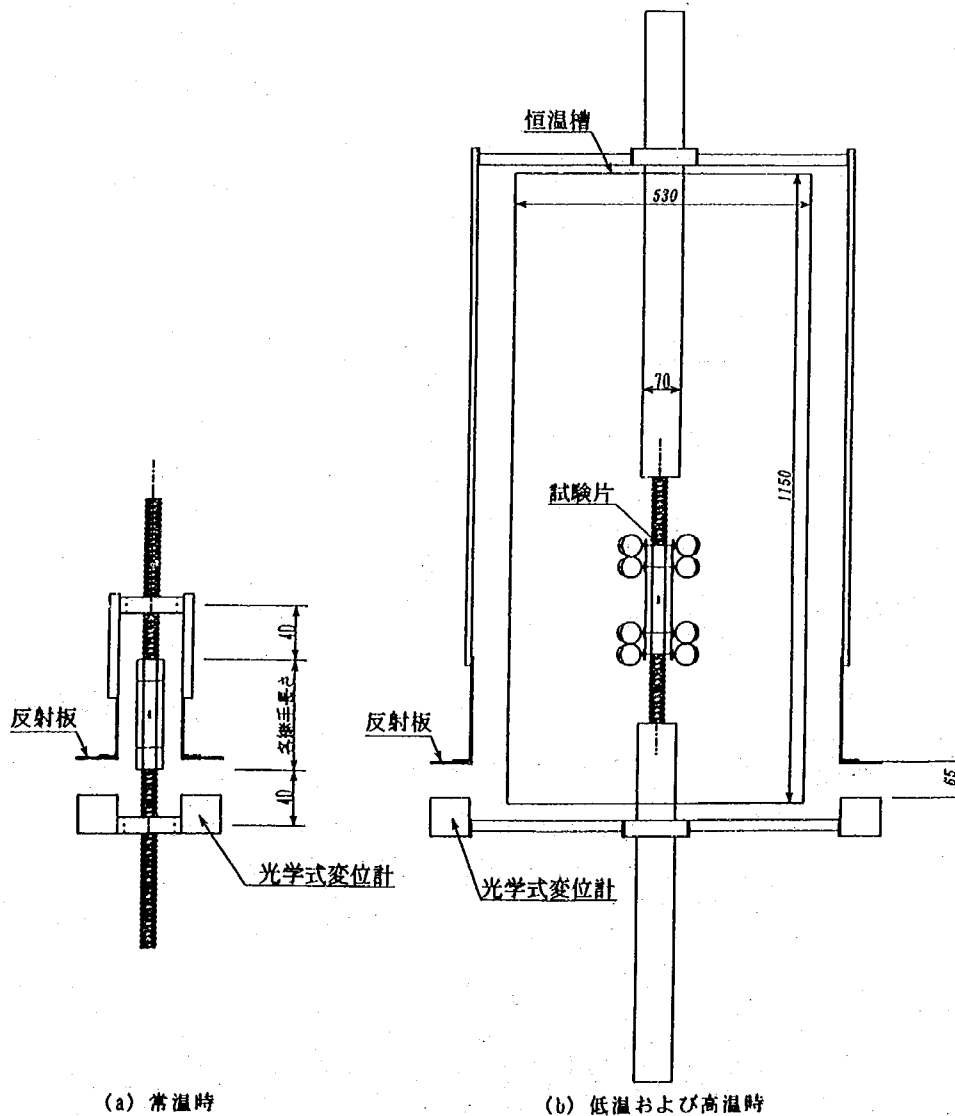


(b) 機械式継手



(c) 低温および高温用

図-4.1.2 試験片



(a) 常温時

(b) 低温および高温時

図-4.1.4 変位の測定状況

凡例  クリップ型変位計  ひずみゲージ

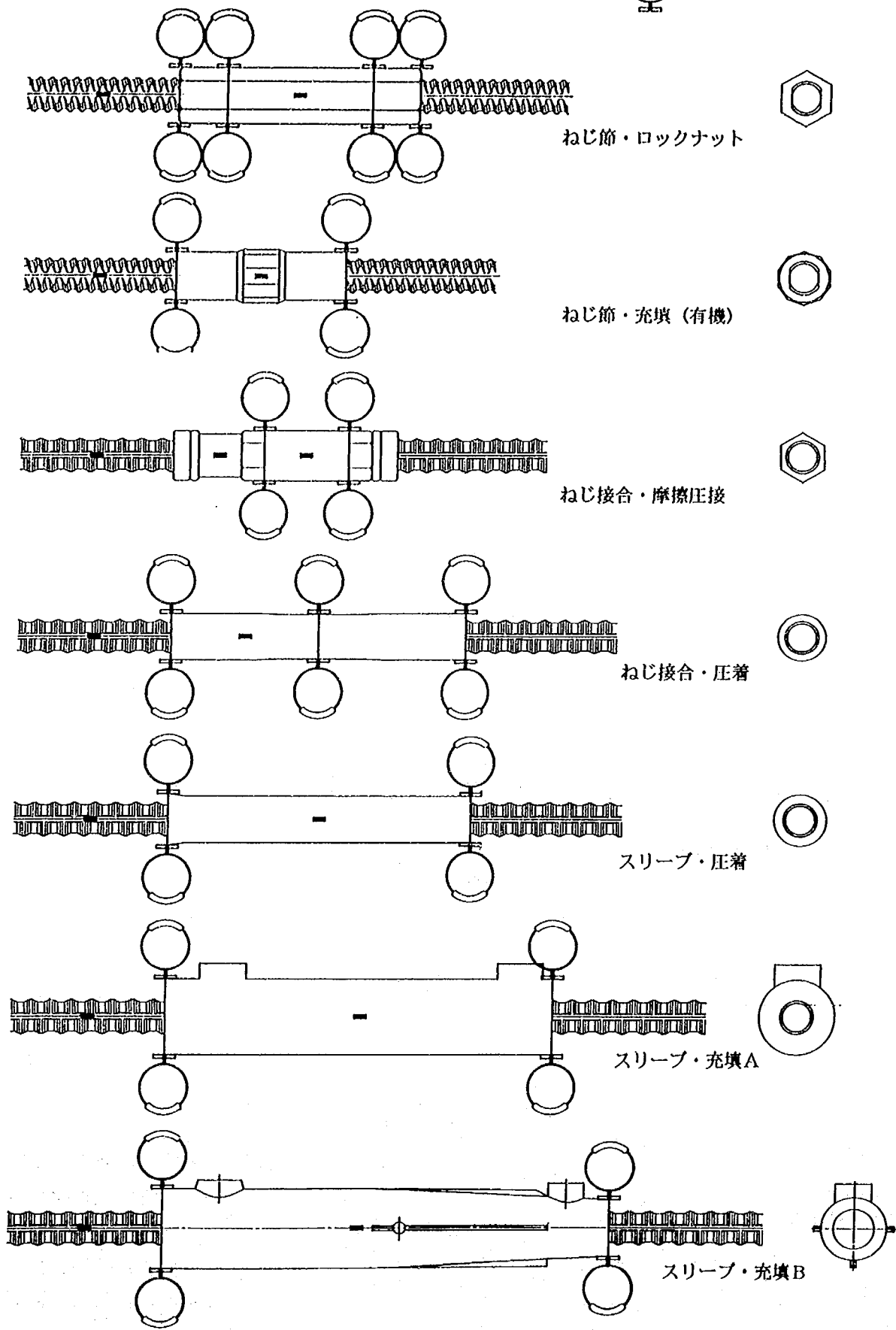
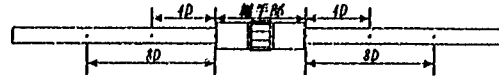


図-4.1.5 クリップゲージ, ひずみゲージの取付位置

ねじ節・ロックナット



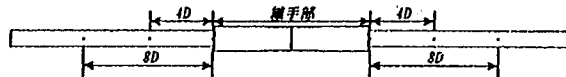
ねじ節・充填



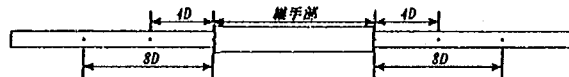
ねじ接合・摩擦圧接



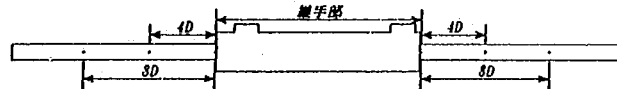
ねじ接合・圧着



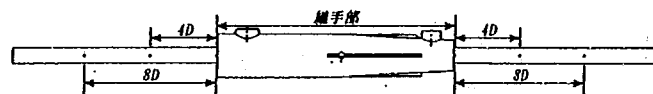
スリーブ・圧着



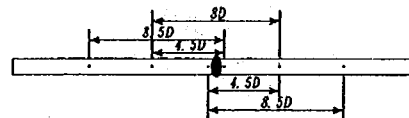
スリーブ・充填A



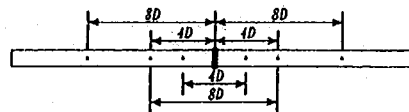
スリーブ・充填B



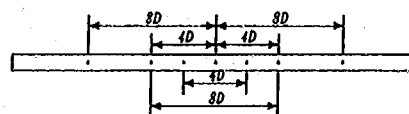
突合せ・エンクローズ溶接



突合せ・フラッシュ溶接



母材・ネジ節



母材・横節



注) 低温および高温引張試験では、機械式継手の8D、溶接継手および母材の中心から8Dの測定はない(図-4.1.2(c)参照)。

図-4.1.6 破断伸び測定位置

4. 2 鉄筋母材の一方向引張試験結果

4. 2. 1 試験結果

試験条件ごとの鉄筋母材の一方向引張試験結果は表－4. 2. 1 のとおりであった。破断伸びは、標準の標点長 8 D に加え 4 D, 16D の場合についても示した。図－4. 1. 6 の位置で測定した各伸びは、各標点長で最も大きい伸びである。

表－4. 2. 1 鉄筋母材の一方向引張試験結果

節形状	測定項目	試 験 条 件				
		LS	S	LH	H	HH
ねじ節	降伏応力 (N/mm ²)	458.5	413.4	524.4	478.1	448.0
	引張強さ (N/mm ²)	646.7	604.2	672.1	632.3	614.9
	ヤング係数 (kN/mm ²)	194.4	184.0	190.2	188.6	177.1
	一様伸び (%)	13.6	13.5	13.7	14.4	13.6
	破断伸び (%)	18.0	25.9	22.2	23.4	22.2
	16D		18.6		18.5	
	8D	(17.1)	21.4	(18.7)	21.1	(18.1)
	4D	(18.0)	25.9	22.2	23.4	22.2
竹節	絞り (%)	37.7	41.3	40.7	47.7	38.8
	降伏応力 (N/mm ²)	427.0	380.6	480.8	462.0	
	引張強さ (N/mm ²)	579.1	541.8	597.1	572.7	
	ヤング係数 (kN/mm ²)	195.8	186.6	189.6	194.8	
	一様伸び (%)	15.3	15.9		17.2	
	破断伸び (%)	27.1	29.3	27.7	27.1	
	16D		21.8		22.9	
	8D	23.5	25.0	22.5	23.9	
	4D	27.1	29.4	27.7	27.1	
	絞り (%)	46.1	52.3	49.2	51.9	

4. 2. 2 試験温度、載荷速度の影響

試験温度、載荷速度と降伏応力、引張強さ、ヤング係数、「一様伸び」、破断伸び(8 D)、絞りの関係を図－4. 2. 1 に示す。

ここで、「一様伸び」とは、変位計で鉄筋の伸びを測定すると図－4. 3. 8 のようになる。そのときの最大の伸び変位を標点長で割った値が「一様伸び」である。一様伸びは鉄筋がくびれはじめる直前の伸びである。

強度は、温度が高くなるほど低下、標準速度に比べ高速の方が大きくなるという一般的な傾向を示している。

そのほかについては温度、速度にかかわらずほぼ一定である。一様伸びは、ねじ節は約 14%、横節は約 16%、破断伸びは、ねじ節で標点長が 16D のとき 18% (以下、16D－18%と表す)、8D－21%、4D－24%、横節は 16D－22%、8D－24%、4D－28% である。絞りは、ねじ節が 40% 程度、横節は 50% 程度になっている。

4. 2. 3 破断位置、標点長と破断伸びの関係

標点長の違いによる破断伸びと測定位置の関係を表－4. 2. 2 および図－4. 2. 2 に示す。標点長と各標点長の最大の破断伸びの関係は図－4. 2. 3 のとおりである。

通常であれば標点長 8 D の伸びを測定するだけである。ところが、今回、機械式継手は図－4. 1. 4(a) のように鉄筋母材部の長さを継手の両側 4 D ずつ、8 D 一定としている。破断位置、標点長と破断伸びの関係を求めたものである。

破断伸びは図-4.2.2より、破断位置に近く、標点長が短いほど大きくなっている。ねじ節の試験Sの場合、標点長16Dのとき18.6%、破断位置から離れていれば標点長4D、8Dとも破断伸びは16%程度であるが、破断位置付近では8Dのとき21.4%に対し、4Dでは25.9%である。同様に横節の場合、D16のとき21.8%、4D、8Dで破断位置から離れていれば20%程度に対し、破断位置付近では8Dのとき25.0%、4Dでは29.4%である。

表-4.2.2 標点長，測定位置ごとの破断伸び（%）

	標点長	測定位置	LS	S	LH	H	HH	C
ねじ節	16D			18.6		18.5		21.4
	8D	上		21.4		18.1		20.8
		中	17.2	16.3	18.7	21.1	18.1	24.1
		下		15.8		18.8		21.9
	4D	上		25.9		15.3		16.9
		中上	18.0	17.0	22.2	20.9	15.4	24.6
		中中	15.7	15.6	15.3	23.4	22.2	28.9
		中下	17.1	15.6	14.9	21.6	15.2	20.5
		下		16.0		16.0		23.4
横節	16D			21.8		22.9		20.5
	8D	上		22.7		23.9		21.3
		中	23.5	25.0	22.5	21.5		23.1
		下		20.9		22.0		19.6
	4D	上		20.3		27.1		18.1
		中上	27.1	25.0	27.7	20.8		24.5
		中中	24.7	29.3	17.8	22.9		25.5
		中下	21.8	24.0	18.5	22.0		17.7
		下		17.7		22.0		21.5

母材 (ねじ節)

母材 (横節)

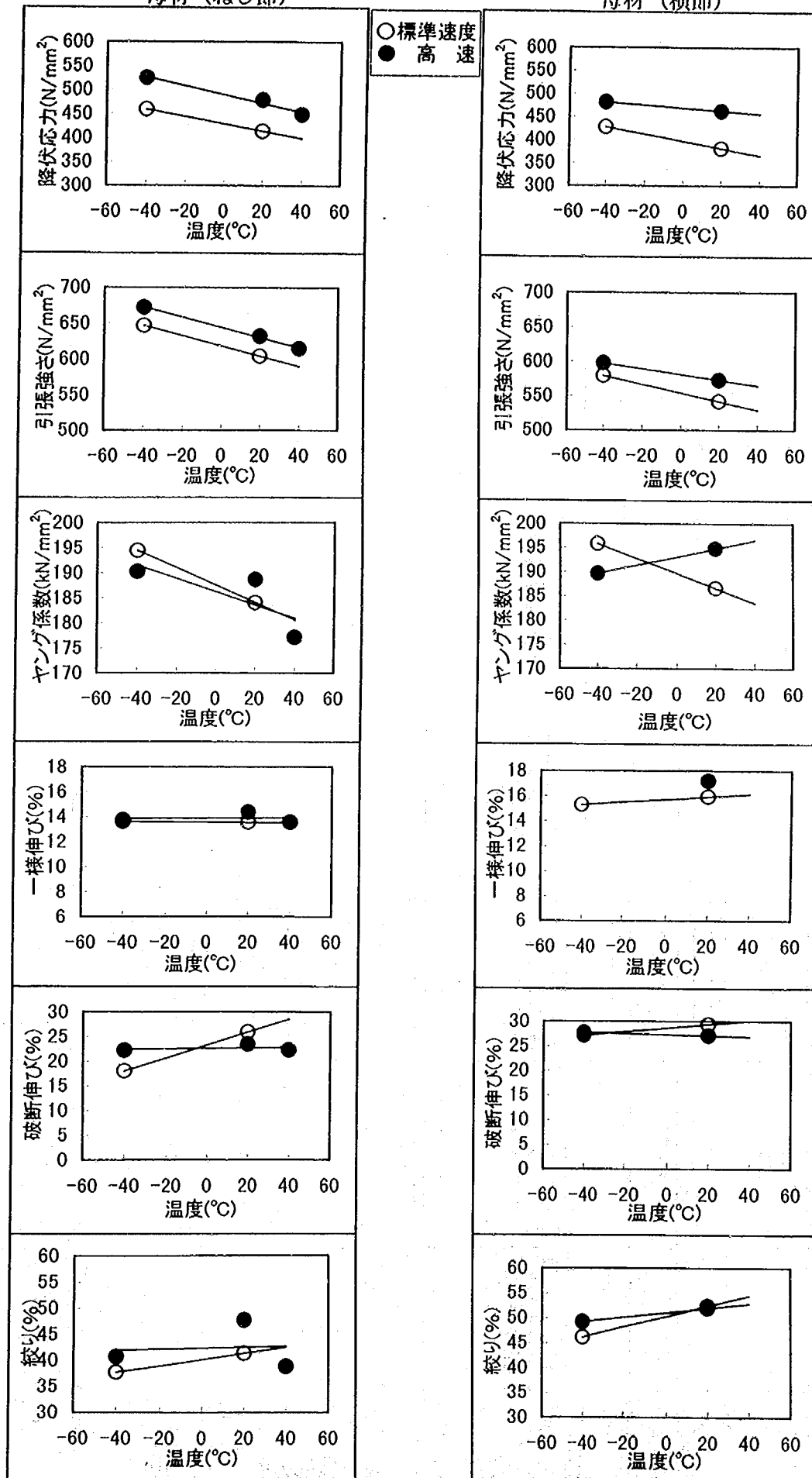
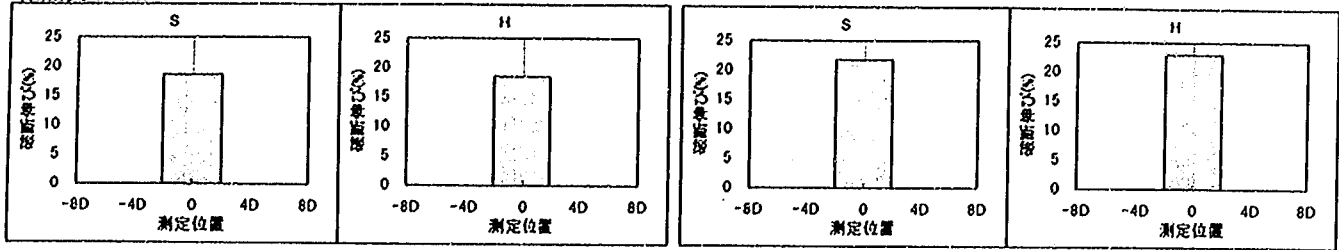


図-4.2.1 鉄筋母材の引張試験結果 (試験温度との関係)

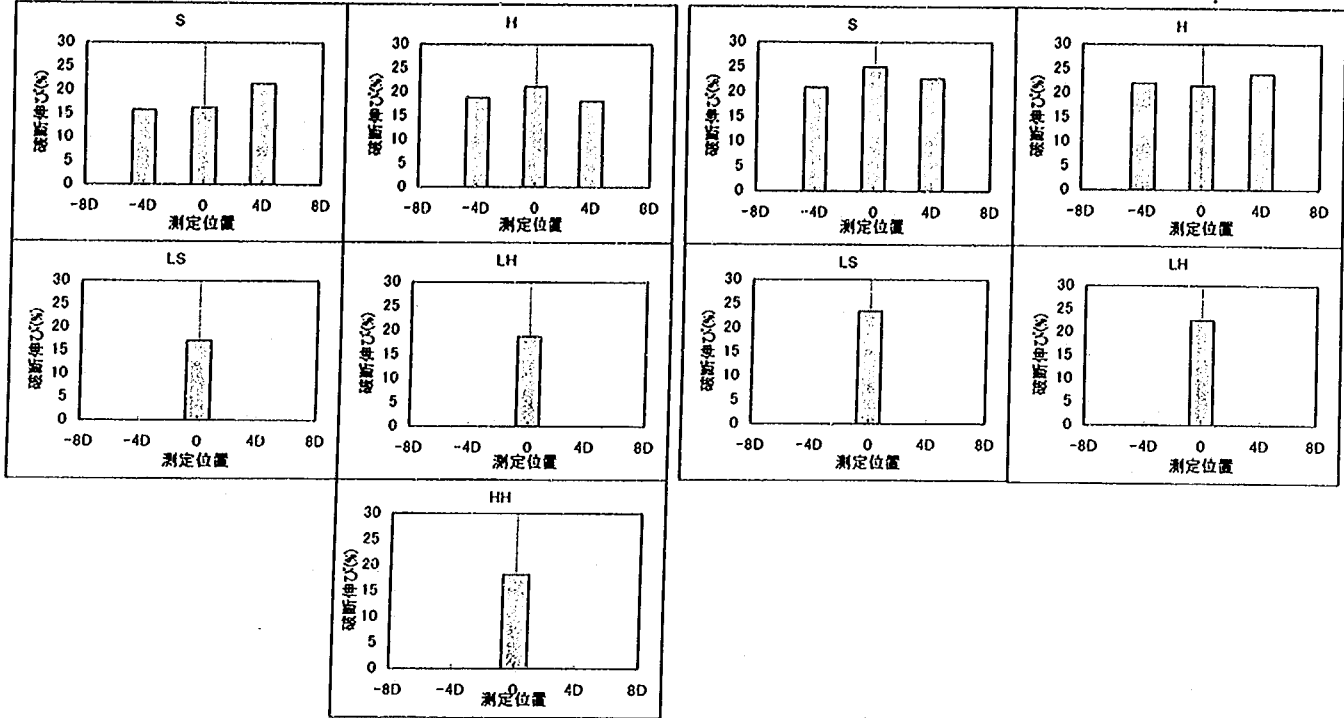
ねじ節

横節

標点長 16 D



標点長 8 D



標点長 4 D

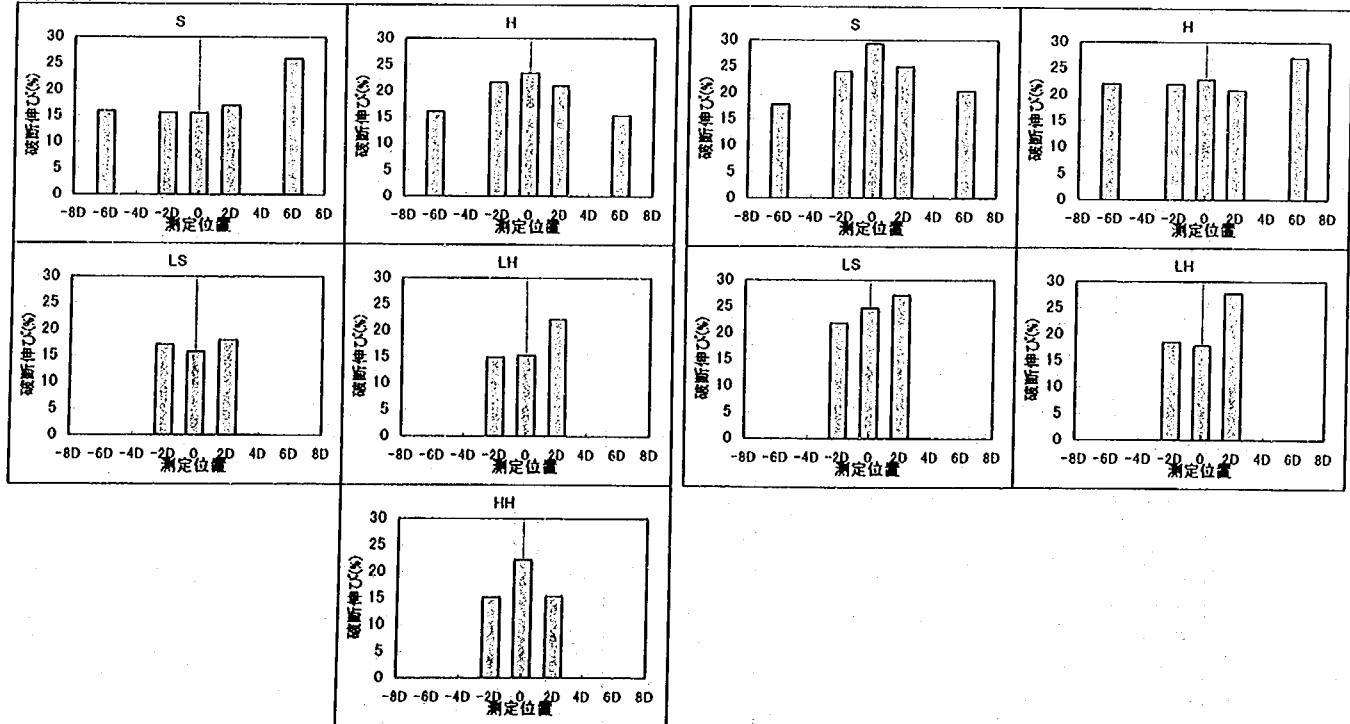


図-4.2.2 標点長の違いによる破断伸びと測定位置の関係

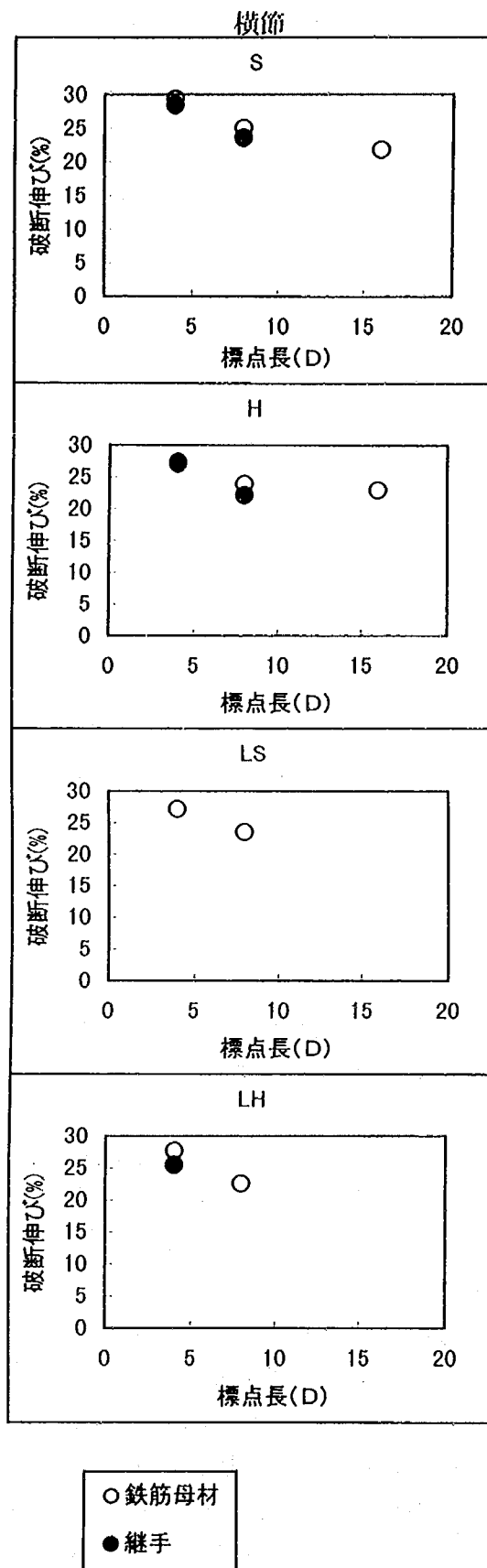
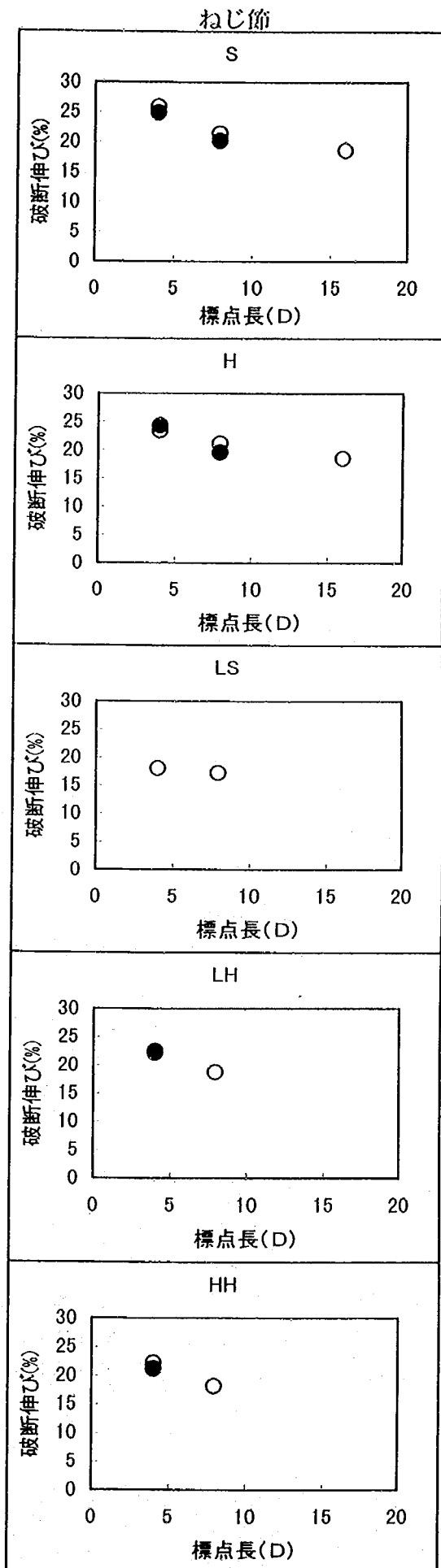


図-4.2.3 鉄筋母材と継手母材部の
標点長と最大破断伸びの関係

4. 3 継手の一方向引張試験結果

4. 3. 1 試験結果

全継手鉄筋とも、4. 3. 2 項に示すようにすべて継手部ではなく鉄筋母材で破断を生じた。以下に示す試験結果は鉄筋母材に関する特性である。

載荷時の実ひずみ速度、降伏応力、引張強さ、ヤング係数、一様伸び、破断伸び、絞り、 $0.5f_y$ 、 $0.7f_y$ 、 $0.95f_y$ 、ピーク時の伸出し量を表-4. 3. 1 に示す。伸出し量は、図-4. 3. 1 のように、各位置のクリップゲージで測定した結果(a)～(d)を合計した値(e)を求め、各応力時の伸出し量を算出したものである。試験条件Sの母材と各継手の関係を図-4. 3. 2 に示す。図中のs、blは鉄筋母材であり、sはねじ節鉄筋、blは横節鉄筋である。試験条件ごとに各継手の強度など測定値に対する母材の比を図-4. 3. 3 に示す。

4. 3. 2 破断状況

各機械式継手の引張試験前・後の全体の断面および端部の拡大写真を写真-4. 3. 1～4. 3. 7 に示す。

ねじ節・ロックナット継手は、引張前はねじ山同士がよくかみ合っている。引張後は伸びによってゆるんでいる。

ねじ節・充填継手は、引張前は樹脂がすき間によく充填されている。引張後は、端部から節3個分はゆるんでいるものの、それより中央部にかけては変化がない。

ねじ接合・摩擦圧接継手は、引張前・後でも摩擦圧接部、ねじ部とも緊結されている。

ねじ接合・圧着継手は、引張前は圧着部、ねじ節とも緊結されている。引張後は、圧着部の端部が節1個分ゆるんでいるものの、それより中央側ではしっかり圧着されている。

スリーブ・充填継手のE-1、E-2はともに、引張前は鉄筋とスリーブの間をモルタルが確実に充填されている。引張後は、端部から節1個分はコーン状にモルタルが欠落し、3個分くらいまではすき間が空いているものの、それより中央部では十分定着されている。

スリーブ・圧着継手は、ねじ節圧着継手の圧着部と同様、引張後は端部から節1個分はゆるんでいるものの、それより中央側では十分圧着されている。

溶接継手のエンクローズ溶接継手、フラッシュ溶接継手については、写真-6. 2. 12～6. 2. 15 のようによく接合されている。

4. 3. 3 強 度

鉄筋母材の常温・標準速度(S)による引張強さ f_{b0} に対する各種継手の載荷方法ごとの降伏応力 f_y 、引張強さ f_b の比を示すと、図-4. 3. 4 のようになる。降伏応力は常温・高速載荷(H)の場合は約10%強度が増加した。低温・高速載荷(LH)の場合は降伏応力ほどではないが、常温・高速、低温・高速になるほど増加した。これらは鋼材の一般的な強度特性ともいえる。

今回の温度、速度の影響は、常温に対する低温、標準速度に対する高速の2水準ずつしか行っていないので、これまで実施した第1報^{4.1)}、第2報^{4.2)}の結果から考察すると以下のとおりである。

4.1) 第1報, pp. 23～27

4.2) 第2報, pp. 26～40

速度の影響は、ひずみ速度を対数でとったとき速度が 10 倍ごとに降伏応力は 18N/mm^2 、引張強さは 14N/mm^2 ずつ上昇する^{4.1)}。今回の実験では、降伏応力は、標準ひずみ速度 $0.015\%/s$ に対し高速は $1\sim 7\%/s$ であったことから強度は $36\sim 50\text{N/mm}^2$ 上昇することが考えられる。これは引張強さの $6\sim 8\%$ に相当する。引張強さは、標準ひずみ速度 $0.1\%/s$ に対し $3\sim 10\%/s$ であったことから強度は $20\sim 28\text{N/mm}^2$ 上昇する。これは引張強さの $3\sim 6\%$ に相当する。

温度の影響は、温度が 1°C 下がると降伏応力 $0.3\sim 0.4\text{N/mm}^2$ 、引張強さは $0.5\sim 0.7\text{N/mm}^2$ 上昇する^{4.2)}。今回の実験では、常温(約 25°C)に対し低温は -40°C なので、降伏応力は $20\sim 26\text{N/mm}^2$ 上昇する。これは引張強さに対して $3\sim 4\%$ に相当する。引張強さは $32\sim 45\text{N/mm}^2$ 上昇する。これは引張強さに対して $5\sim 7\%$ に相当する。

試験条件HHは、降伏応力 7% 、引張強さ 2% 上昇した。温度は 40°C なので降伏応力は引張強さに対して 1% 低下、引張強さも 2% 低下しているはずである。一方、速度では降伏応力は 6% 、引張強さは 5% 程度上昇するはずであり、両者を合わせると。降伏応力 5% 、引張強さ 3% 上昇となり、この試験条件についても実測値とほぼ一致している。

このように、今回の強度結果は母材で破断したことから、鉄筋母材の強度特性と一致した。

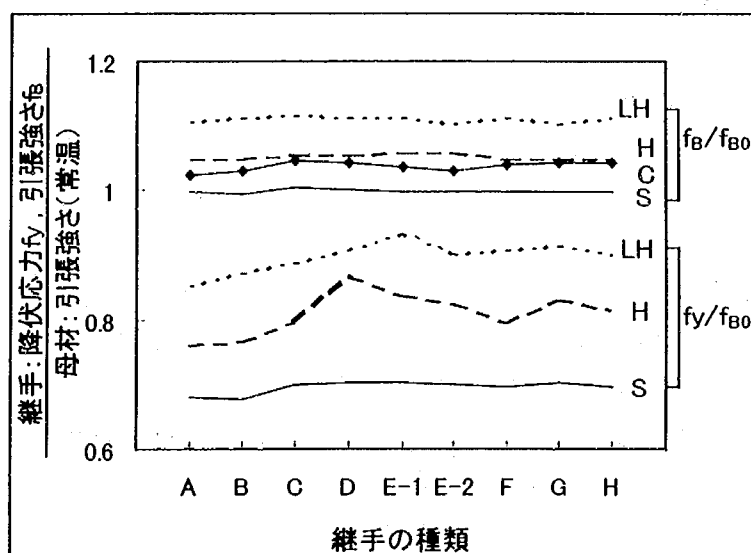


図-4.3.4 継手部強度

4.3.4 ひずみ

各継手の鉄筋母材部、継手部のカプラー、スリーブ、ボルト部、溶接部のひずみを図-4.3.5に示す。カプラー、スリーブのひずみ測定位置は、鉄筋同士、または、鉄筋とボルトの突き合わせ位置なので、カプラー、スリーブのみで応力が伝達されている。

鉄筋母材部はいずれも降伏している。継手Cのボルト部、G、Hの溶接部も鉄筋径とほぼ同じであるため、母材部降伏直後に降伏している。そのほかの継手のカプラー、スリーブのひずみは鉄筋母材部の引張強さに達してもほとんど直線的に増加しており、カプラー、スリーブは鉄筋強度に対して十分な強度を有するように設計されている。

4.1) 第1報, pp. 23~27

4.2) 第2報, pp. 26~40

4.3.5 伸出し量

機械式継手の伸出し量の合計は、図-4.3.6 のとおりであった。これらの結果から降伏応力の95%時($0.95f_y$)および引張強さ時の伸出し量を求めたのが図-4.3.7である。なお、スリーブ充填継手であるE-1, E-2の伸出し量は、クリップゲージの測定限界以上であった(図-4.3.6の(e-1)(e-2))ので、 f_b 時の伸出し量は次節のように(図-4.3.8の(e-1)(e-2))継手鉄筋と母材鉄筋の伸び変位の差とした。

$0.95f_y$ 時の伸出し量は図-4.3.7のように、いずれの載荷方法のときも最小0.05mm~最大0.52mmとわずかであった。 f_b 時の伸出し量は継手の種類によって異なり、継手Cは伸出しのほとんどない継手であることがわかる。継手Aはナットの締付力によって緊結されたものであり、 f_b 時に達すると締付力の効果もなくなり伸出し量は大きくなっている。スリーブ充填や圧着は、スリーブ内の鉄筋が伸び出すことにより伸出し量も大きくなっている。

4.3.6 伸び変位、一様伸び、破断伸び

図-4.3.8に各継手と母材の伸び変位を示す。伸び変位を測定した標点長は、機械式継手は $(4D + \text{継手長} + 4D)$ とし、母材、溶接継手は接合部を含めて $8D$ としている。

溶接継手G, Hは接合部を含んでいることから変位は母材よりも小さい。継手Cは伸出し量がほとんどなかったことから母材とほとんど同じであった。そのほかの機械式継手は、伸出し量に応じて母材よりも大きくなった。

一様伸びの母材に対する各継手の比を図-4.3.9に示す。継手A, B, G, Hは80~90%程度に対し、C~Fは50~60%である。

図-4.3.10には破断伸びを、母材の破断伸びに対する各継手の破断伸びの比で示した。破断伸びを測定した標点長は、伸び変位の場合と同じとした。溶接継手の伸びは、接合部の伸びがほとんどないことから、母材の60~70%程度になっている。継手A, Bは継手長が短く、伸出し量も大きいことから他の機械式継手より大きく母材の60%程度になっている。継手C~Fは継手長が長いので母材の40%前後になっている。

これらの違いは、継手長と伸出し量が影響している。継手部は図-4.3.5のひずみの結果のようにほとんど弾性範囲内か、母材より小さくなっているため、破断時には伸びはないものと考え、標点長を継手部両側の $4D$ ずつを加えた $8D$ として求めた破断伸びと鉄筋母材の破断伸びの比を求めると、図-4.3.11のようになる。こうすることによって、伸出しの影響を知ることができる。継手G, Hは、溶接継手であり、標点長が $8D$ なので図-4.3.10と同じである。そのほかの継手も1.0に近づいている。

表-4.3.1 引張試験結果

継手の種類		鉄筋	載荷条件	降伏応力		引張強さ		ヤング係数	一様伸び	破断伸び %										絞り	伸出し量			
				ひずみ	N/mm ²	ひずみ	N/mm ²			鉄筋母材部		継手 部		継手部 + 16D	継手部 + 8D	継手部を除いた母材部		0.5fy	0.7fy		0.95fy	ピーク		
										8D	4D	4D	8D			16D	8D							
																							%	mm
ねじ節	ロックナット	S	S	0.011	410.6	0.109	602.7	181.6	12.1	19.2	23.5	6.9			13.3	12.3	16.9	18.2	43.4	0.132	0.232	0.413	24.163	
			H	5.975	459.3	7.523	634.8	191.9	11.1	20.6	25.2	9.0			14.6	14.0	17.8	19.6	45.4	0.113	0.210	0.407	19.677	
			LH	3.813	516.2	3.813	669.1	194.8			23.1	6.4			6.4	11.9		18.1	41.2	0.187	0.302	0.525		
	充填	S	S	0.011	408.8	0.122	601.7	184.4	11.0	21.2	26.3	3.6			14.3	13.6	18.2	20.9	43.8	0.092	0.142	0.239	10.521	
			H	6.081	463.5	7.715	634.8	195.8	10.0	18.4	23.4	4.6			13.0	12.8	16.1	18.7	47.3	0.080	0.132	0.222	7.056	
			LH	1.014	526.5	4.603	671.9	187.7			21.7	3.0			3.0	9.6		14.3	40.2	0.109	0.158	0.230		
			HH	1.008	444.0	4.649	613.5	179.7			21.1	5.0			5.0	12.5		17.9	47.8	0.100	0.151	0.235		
ねじ接合	摩擦圧接	b1	S	0.011	379.6	0.106	543.7	184.9	9.2	22.9	28.2	0.7			13.1	11.8	18.8	21.6	52.6	0.027	0.038	0.052	0.096	
			H	6.039	431.6	6.572	572.2	196.1	7.9	22.6	28.3	1.0			13.3	12.1	18.7	21.8	54.5	0.038	0.052	0.079	0.121	
			LH	0.946	481.0	4.511	605.0	193.1			25.6	0.6			0.6	8.9		16.7	48.8	0.040	0.056	0.080	0.659	
	スリーブ圧着	b1	S	0.011	380.3	0.084	541.7	186.3	8.4	23.9	28.3	0.6			12.4	9.3	20.1	20.4	53.4	0.058	0.102	0.190	6.667	
			H	5.838	469.1	5.188	571.3	193.3	7.7	22.7	28.0	0.5			12.6	9.7	20.3	21.4	52.4	0.070	0.125	0.234	8.250	
			LH	0.960	491.4	3.602	603.3	187.5			25.6	0.3			0.3	9.0		20.1	40.0	0.104	0.171	0.280	5.988	
スリーブ	充填A	b1	S	0.012	380.3	0.089	541.5	182.6	10.7	24.2	29.2	5.5			13.5	12.1	19.9	22.8	50.6	0.191	0.266	0.385	24.009	
			H	5.905	453.7	6.299	574.3	191.1	10.9	21.1	25.1	7.1			13.7	12.5	19.0	21.2	45.2	0.206	0.304	0.443	22.460	
			LH	0.916	505.3	3.200	603.0	195.4			25.5	5.5			5.5	11.2		20.6	38.8	0.223	0.313	0.422		
	充填B	b1	S	0.012	379.0	0.089	540.6	178.5	10.4	23.5	28.2	4.9			12.7	11.0	19.9	22.3	45.4	0.176	0.259	0.420	27.225	
			H	5.459	447.5	5.519	572.9	192.8	9.0	21.8	26.5	4.5			11.8	10.3	18.7	21.2	46.6	0.180	0.274	0.425	17.031	
			LH	0.921	488.1	2.940	598.0	194.6			24.7	3.6			3.6	9.1		19.2	37.7	0.210	0.305	0.424		
	圧着	b1	S	0.012	378.1	0.091	540.1	174.1	8.7	23.2	28.2	2.3			12.9	10.5	19.8	21.3	52.9	0.083	0.131	0.261	10.904	
			H	5.677	431.7	6.198	568.5	192.6	9.2	22.3	28.5	2.5			13.3	11.6	20.3	23.4	51.4	0.084	0.140	0.311	7.601	
			LH	0.956	491.7	3.623	603.4	193.3			25.5	1.6			1.6	9.9		20.8	48.2	0.106	0.165	0.257		
溶接	エング溶接	b1	S	0.012	380.7	0.182	541.1	171.0	13.6	21.9	26.4	18.4		18.4					48.2					
			H	7.008	450.0	10.666	568.7	175.8	13.8	22.8	25.3	21.2		21.2					50.7					
			LH	1.112	494.7	4.877	597.3	181.8	14.3		20.4	19.9		19.9					45.6					
	フラッシュ溶接	b1	S	0.011	376.4	0.187	539.9	187.9	14.5	20.1	24.5		14.8	19.3					50.2					
			H	6.474	441.3	9.801	568.8	191.9	13.9	21.9	26.3		14.7	20.2					45.0					
			LH	1.048	488.2	8.105	602.8	179.8	14.5		23.4		15.6	19.7					39.3					

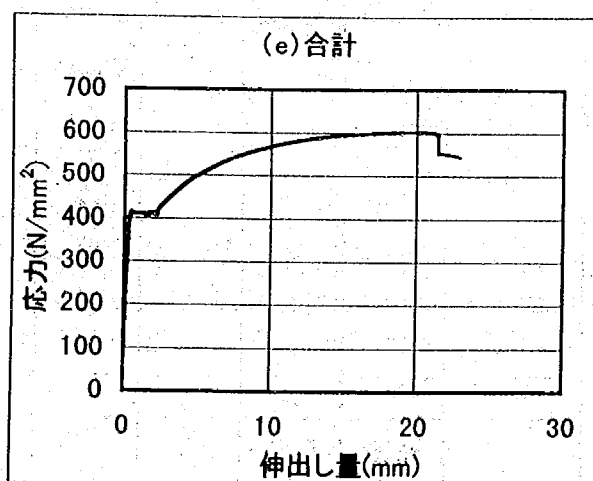
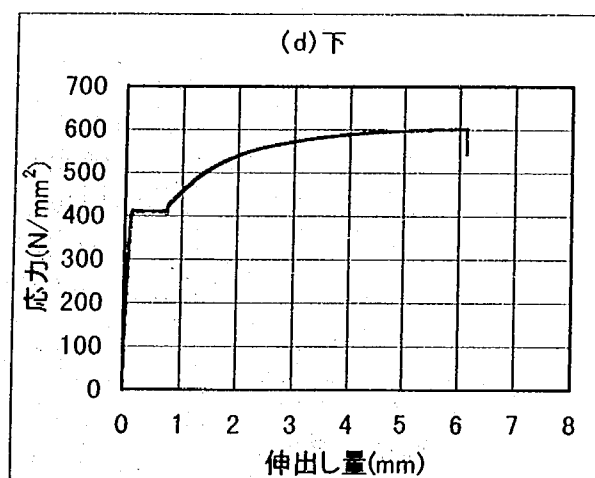
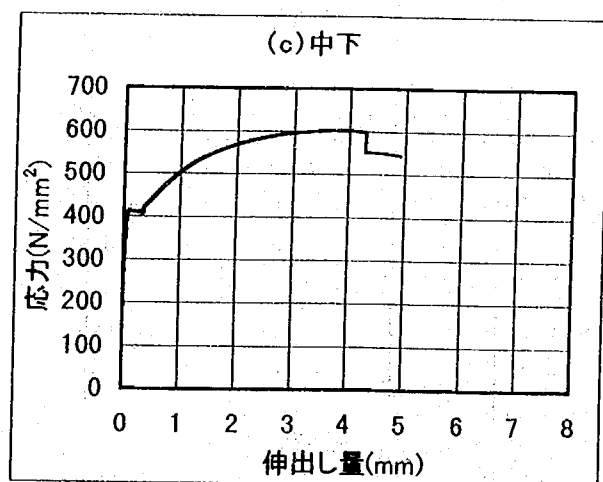
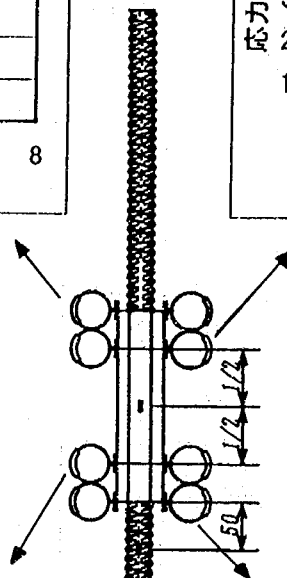
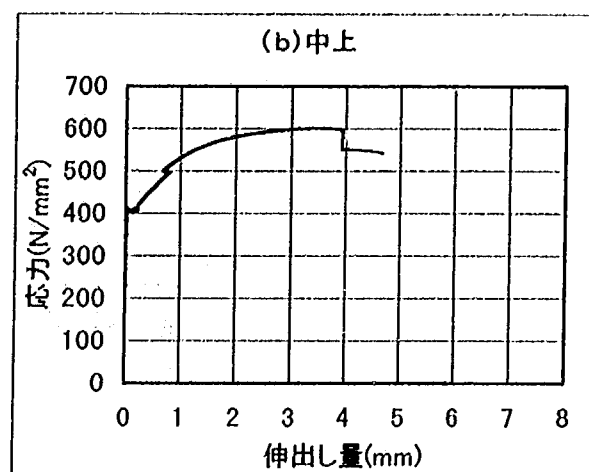


図-4.3.1 伸出し量の求め方

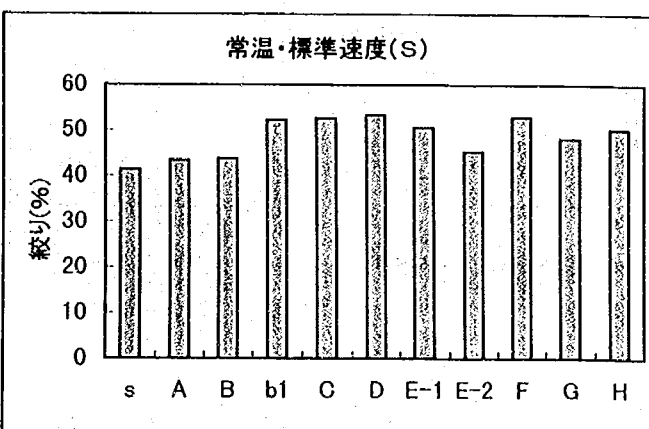
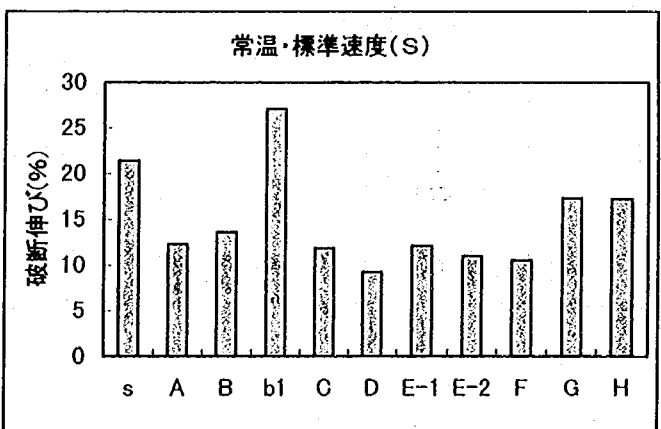
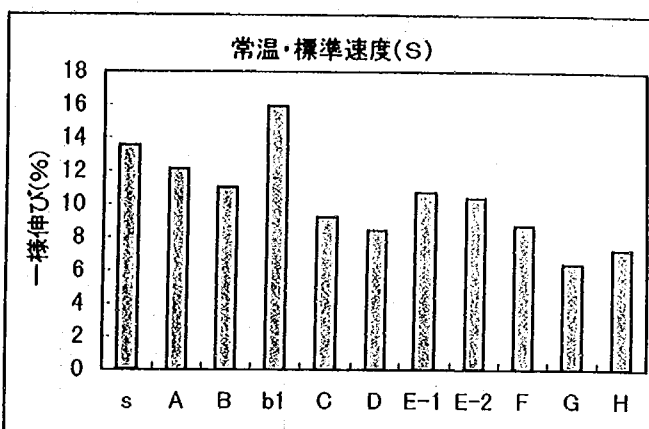
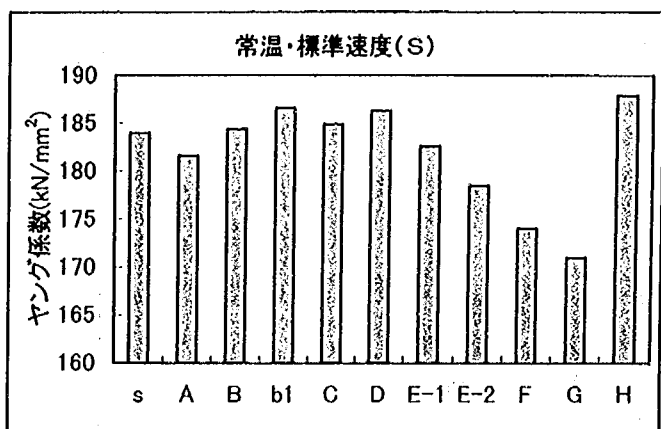
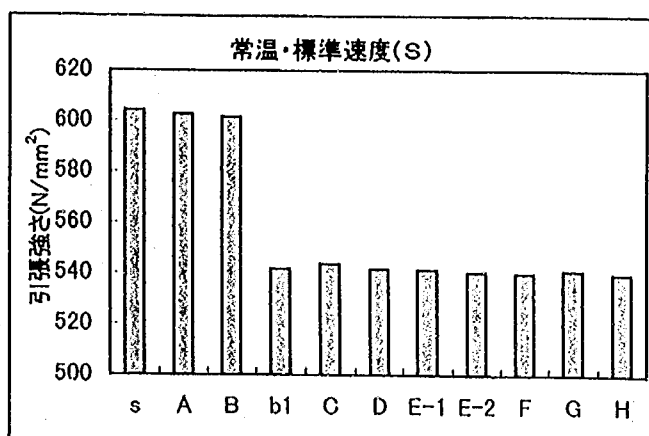
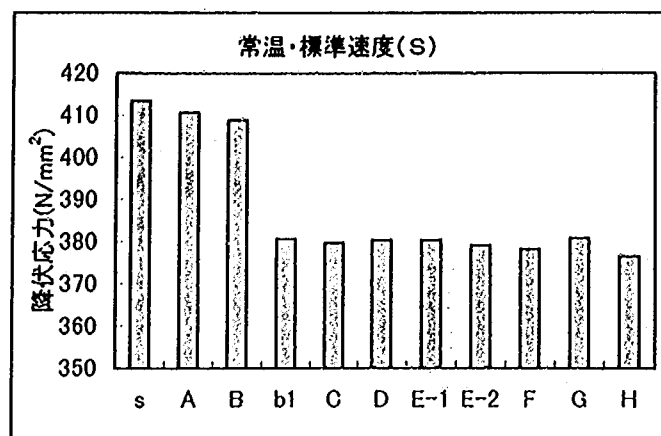


図-4.3.2 常温・標準速度における継手ごとの引張特性

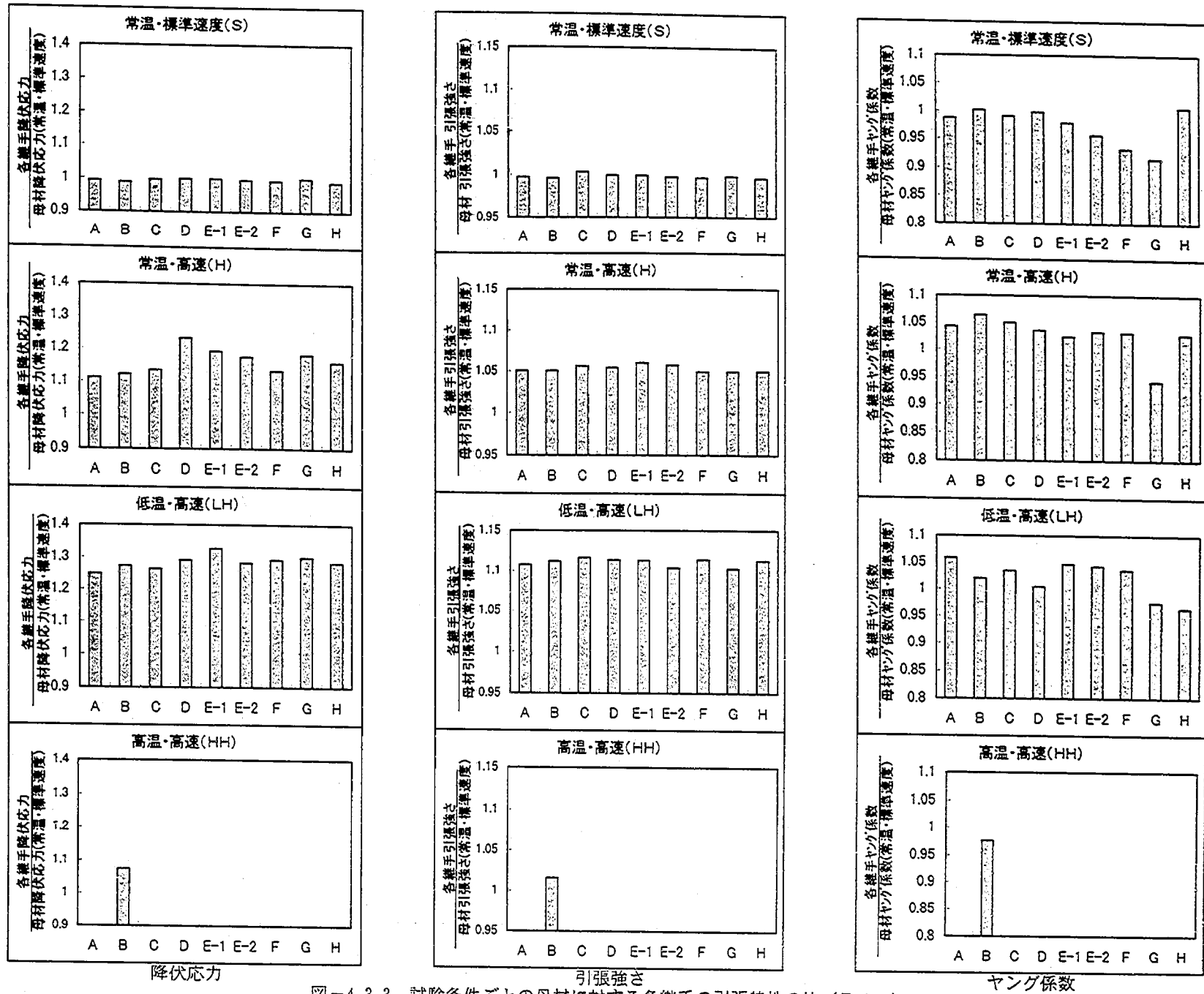
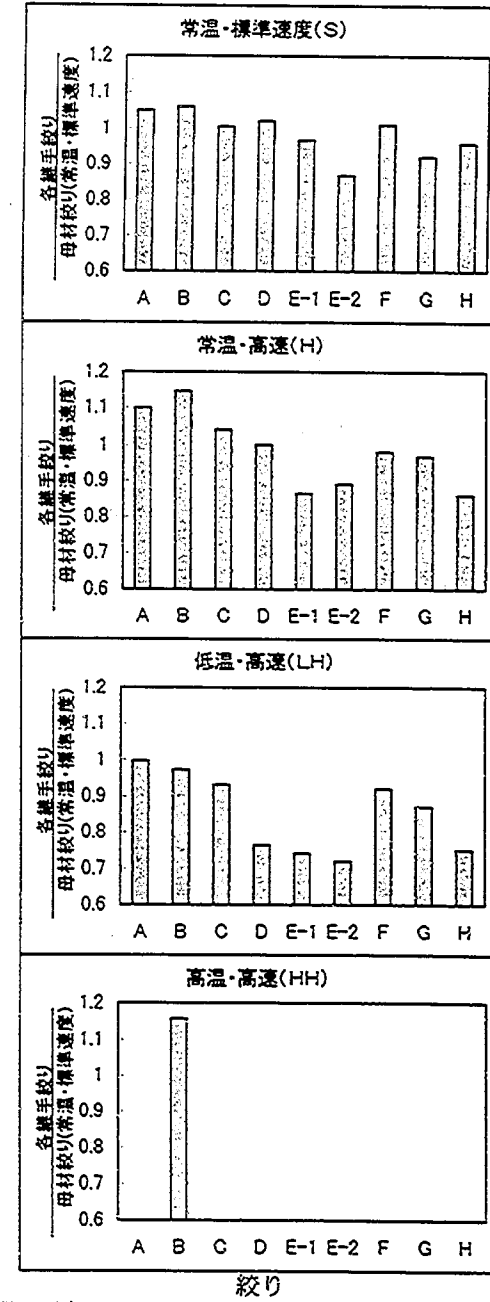
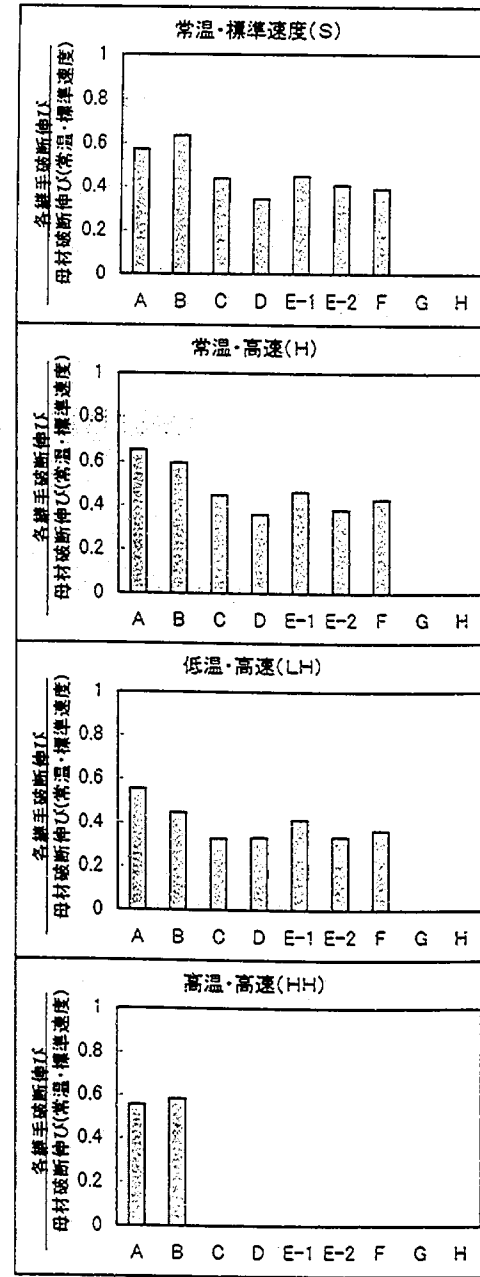
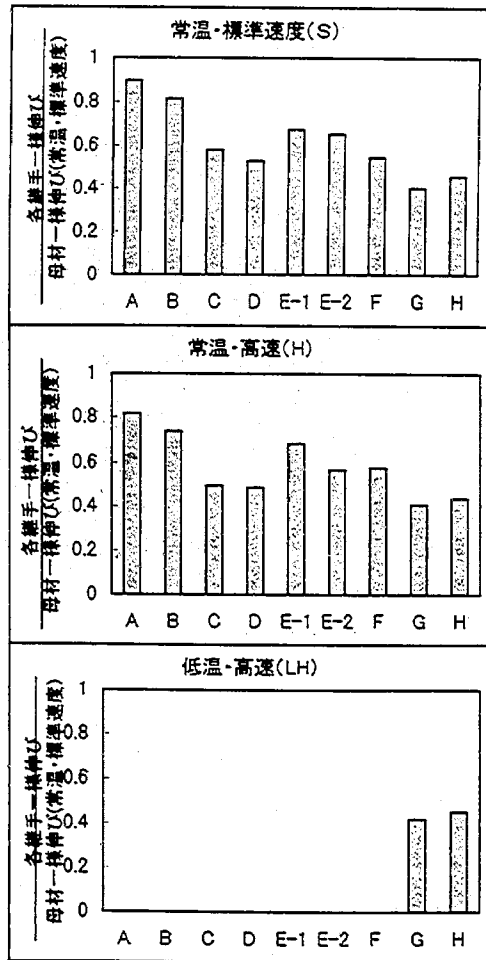


図-4.3.3 試験条件ごとの母材に対する各継手の引張特性の比 (その1)

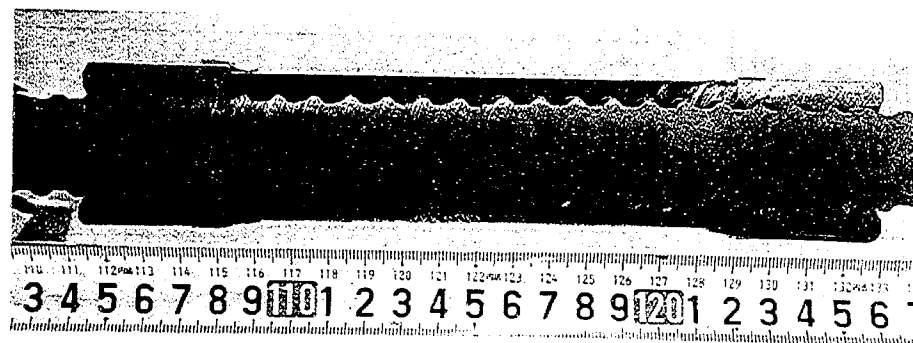


一様伸び

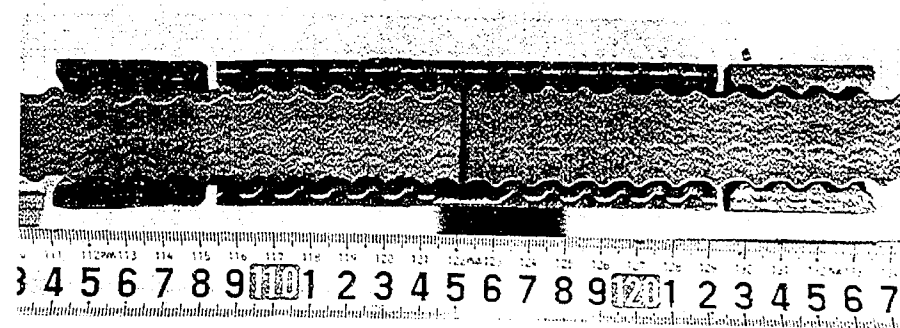
破断伸び

絞り

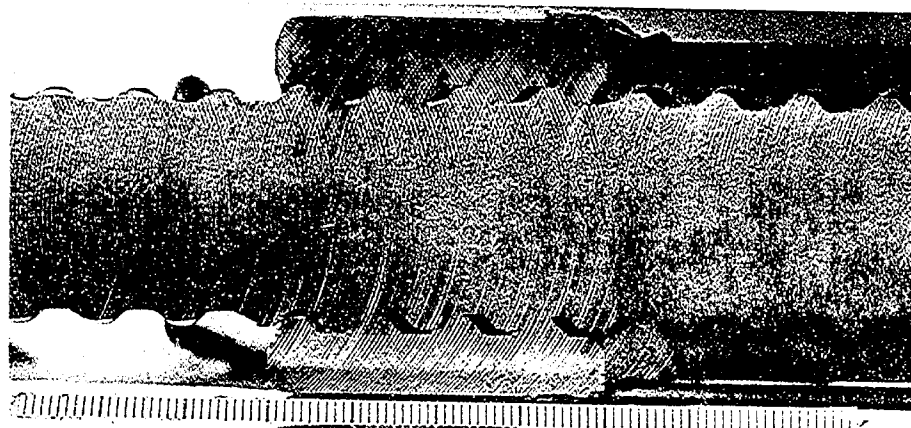
図-4.3.3 試験条件ごとの母材に対する各継手の引張特性の比(その2)



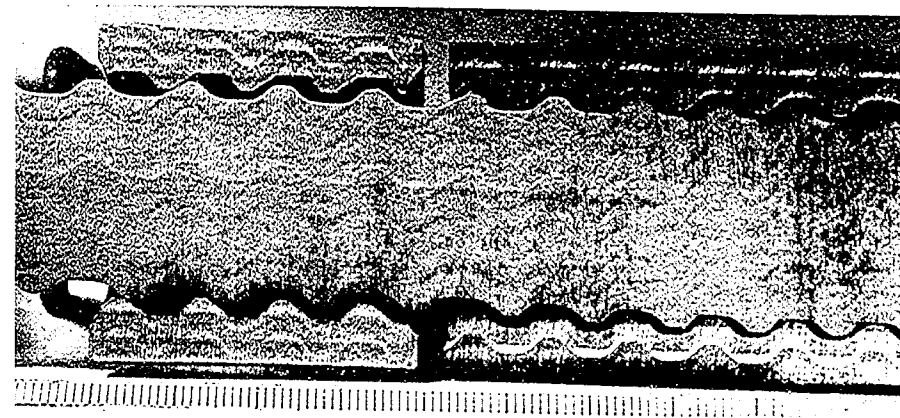
ねじ節・ロックナット 試験前 全体



ねじ節・ロックナット 試験後 全体

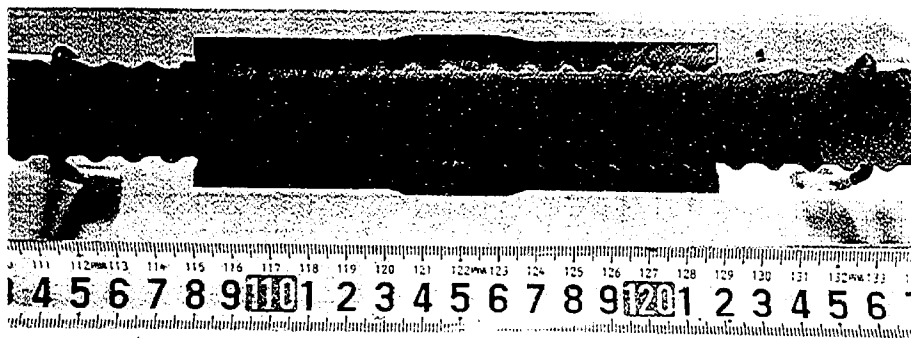


ねじ節・ロックナット 試験前 A側

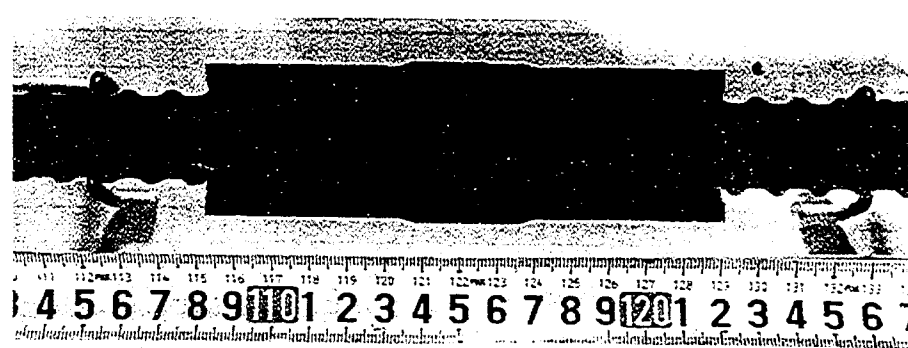


ねじ節・ロックナット 試験後 A側

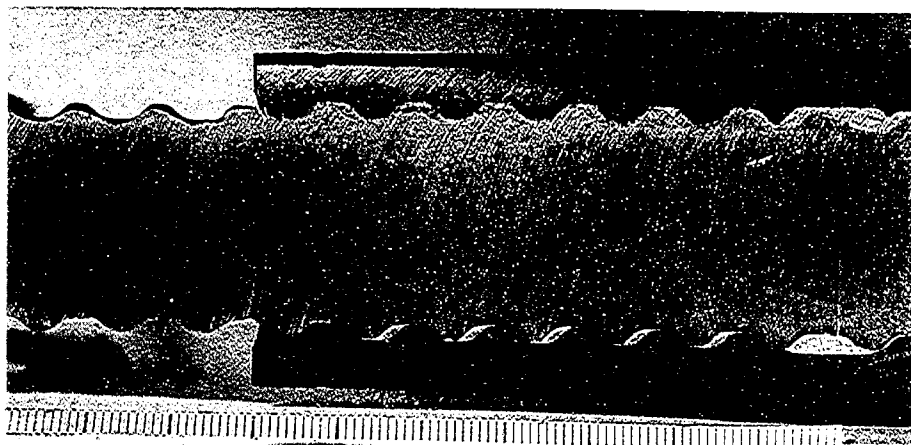
写真-4.3.1 継手Aの引張前・後の状況



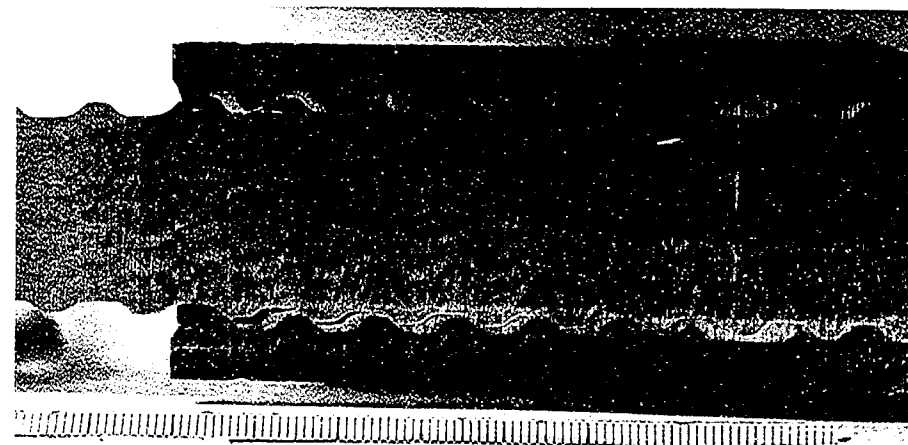
ねじ節・充填（有機） 試験前 全体



ねじ節・充填（有機） 試験後 全体

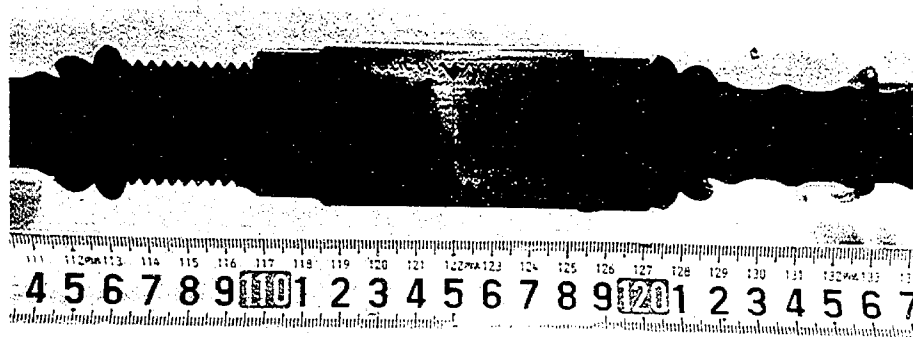


ねじ節・充填（有機） 試験前 A側

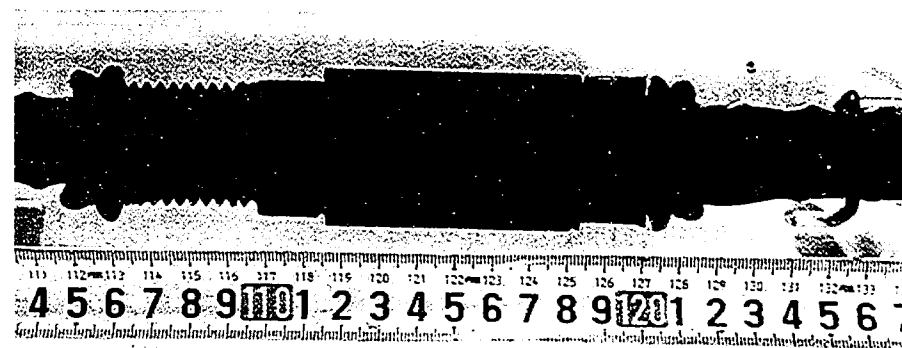


ねじ節・充填（有機） 試験後 A側

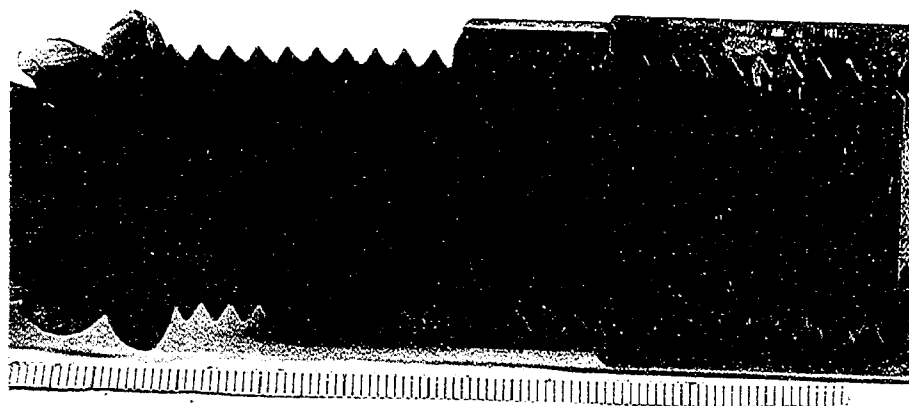
写真－4.3.2 継手Bの引張前・後の状況



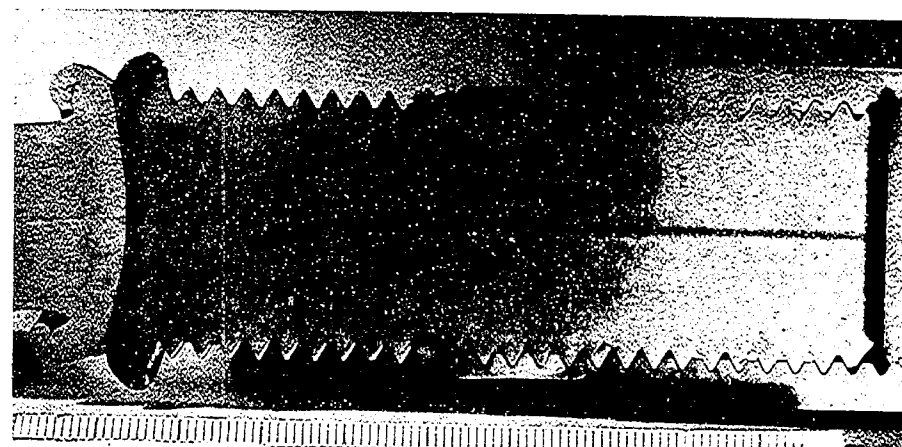
ねじ接合・摩擦圧接 試験前 全体



ねじ接合・摩擦圧接 試験後 全体

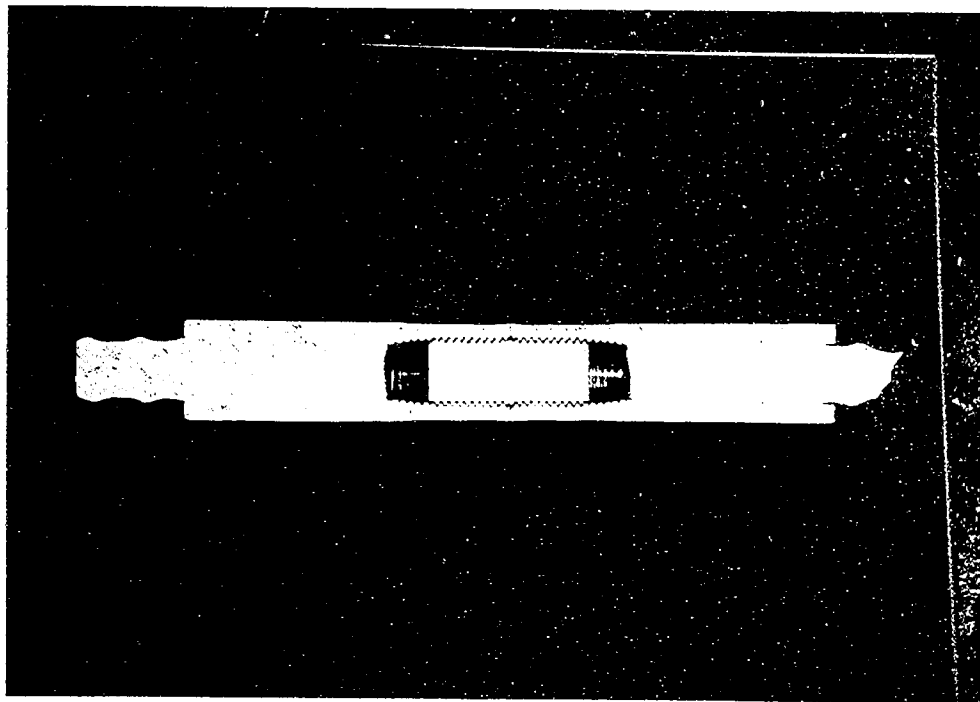


ねじ接合・摩擦圧接 試験前 A側

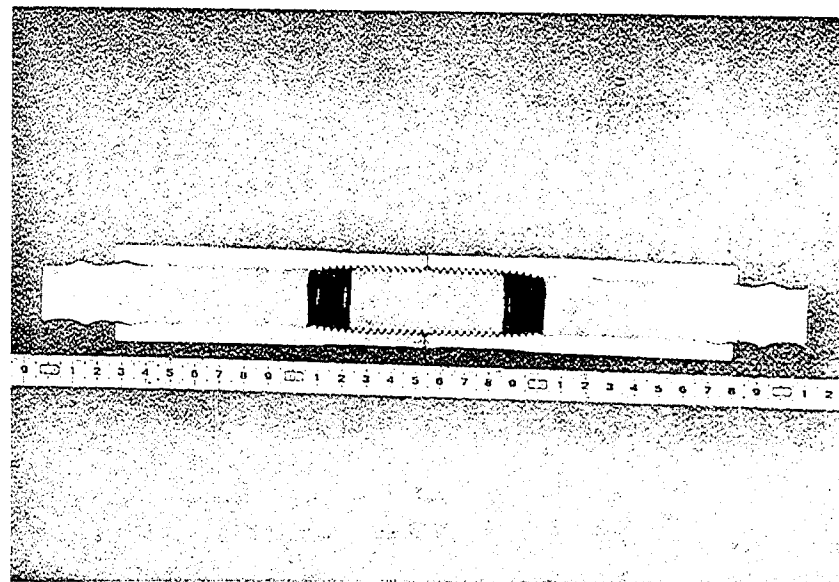


ねじ接合・摩擦圧接 試験後 A側

写真-4.3.3 継手Cの引張前・後の状況

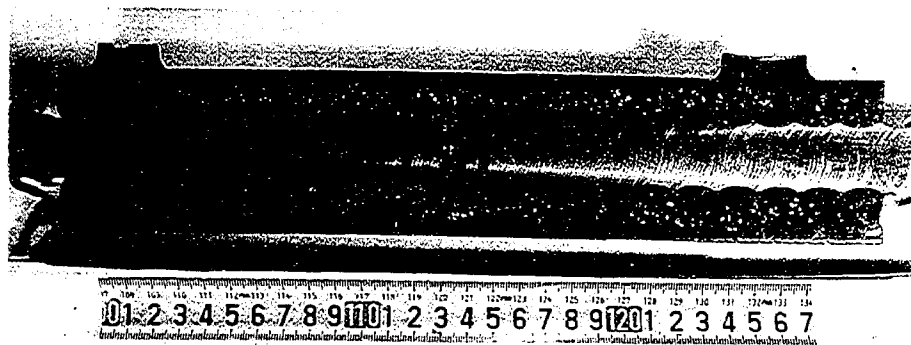


引張前

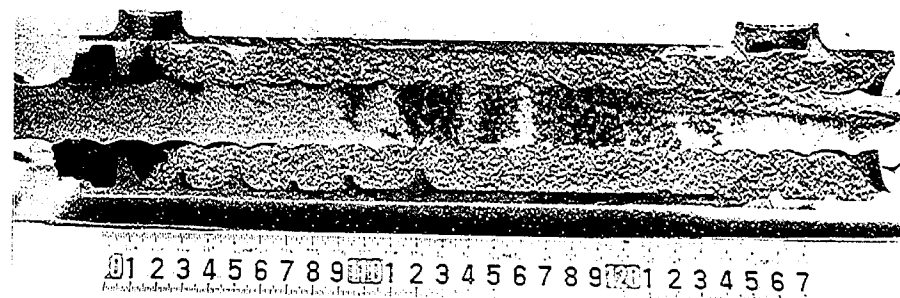


引張後

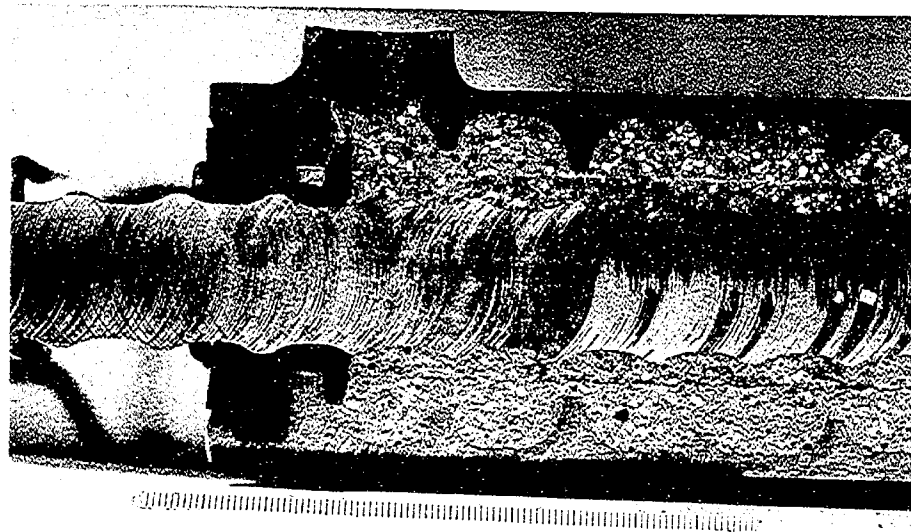
写真— 4.3.4 継手Dの引張前・後の状況



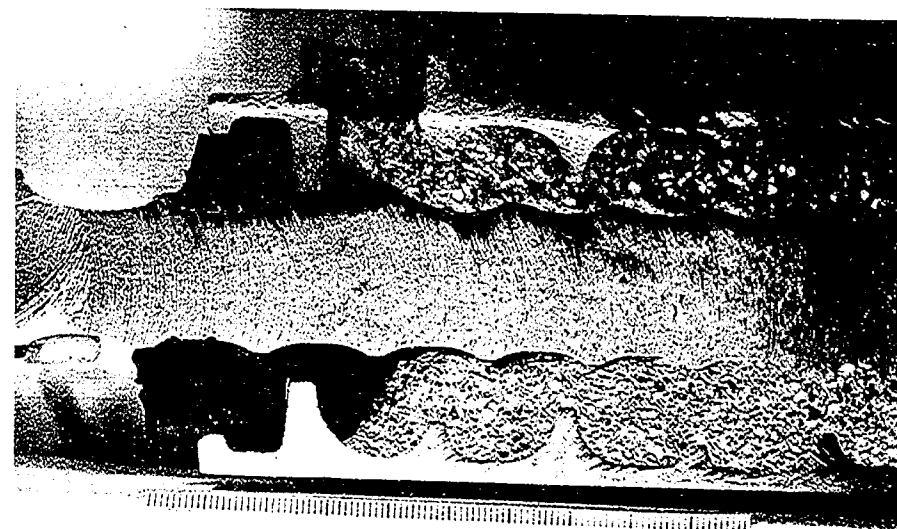
スリーブ・充填A 試験前 全体



スリーブ・充填A 試験後 全体

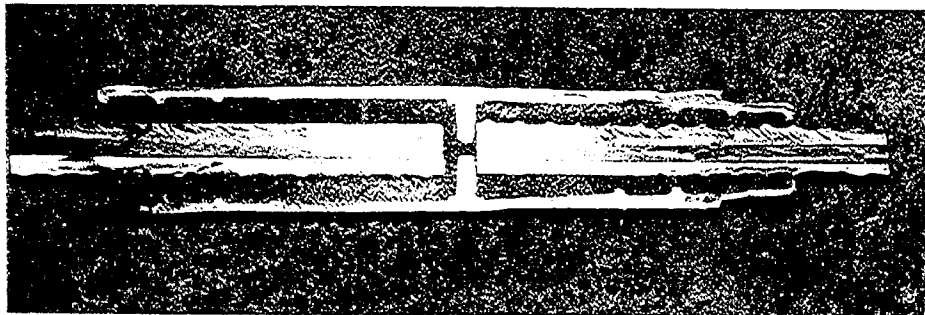


スリーブ・充填A 試験前 A側

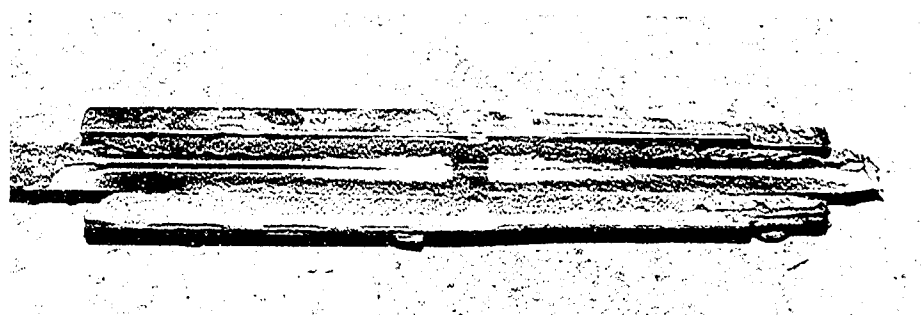


スリーブ・充填A 試験後 A側

写真-4.3.5 継手E-1の引張前・後の状況



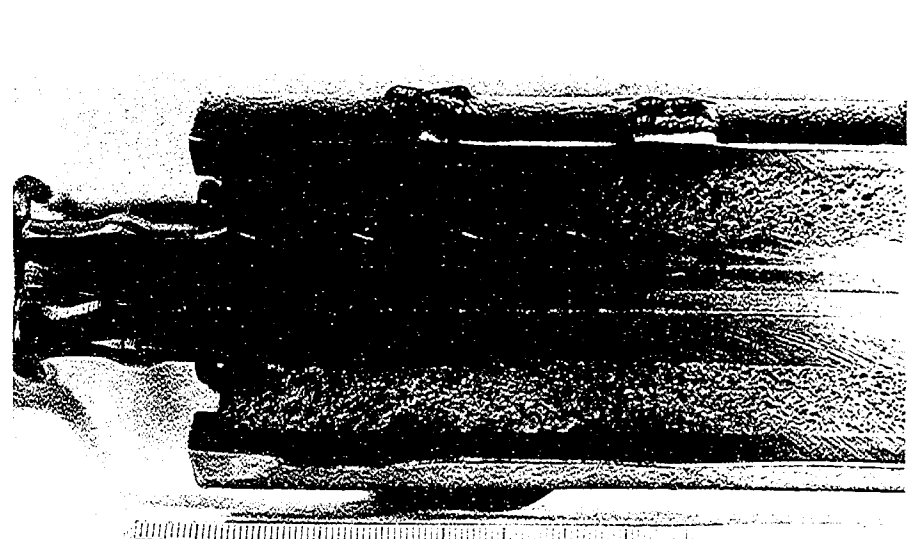
スリーブ・充填B 試験前 全体



スリーブ・充填B 試験後 全体



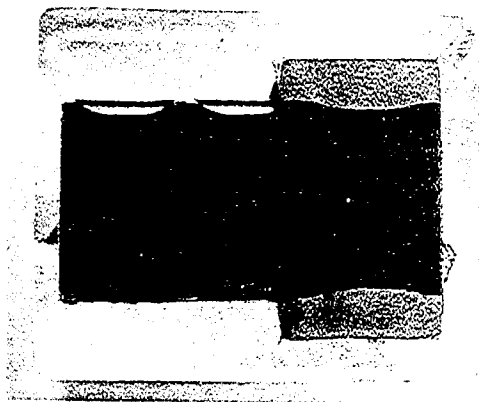
スリーブ・充填B 試験前 A側



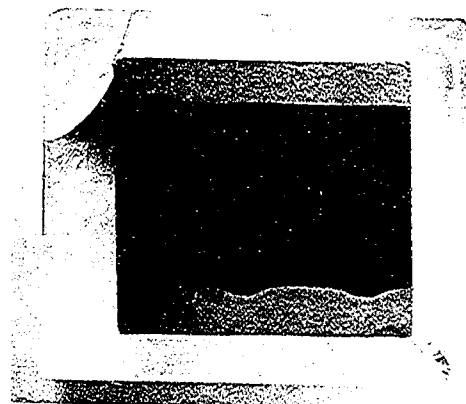
スリーブ・充填B 試験後 A側

写真—4.3.6 継手E-2の引張前・後の状況

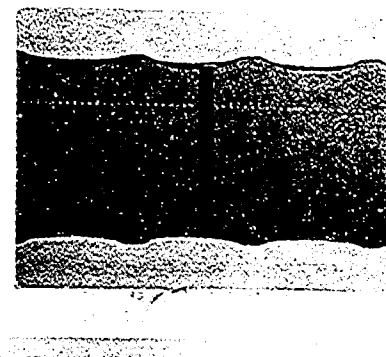
引張前



端部



中間



突合せ部

引張後

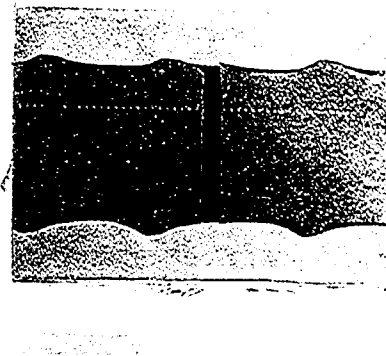
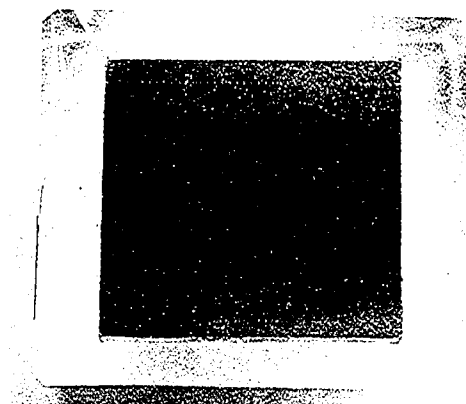
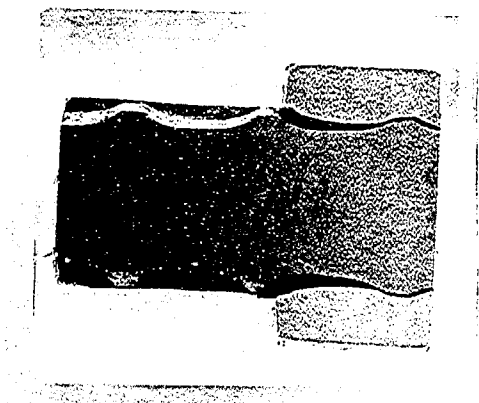


写真-4.3.7 継手Fの引張前・後の状況

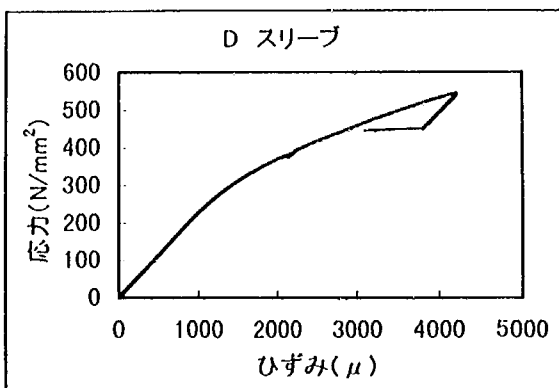
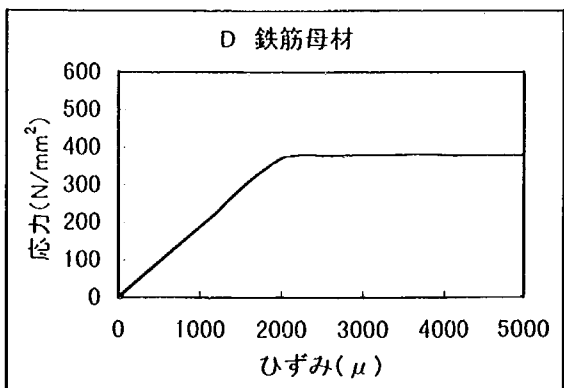
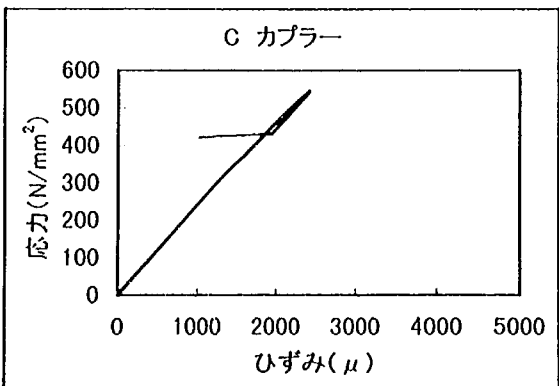
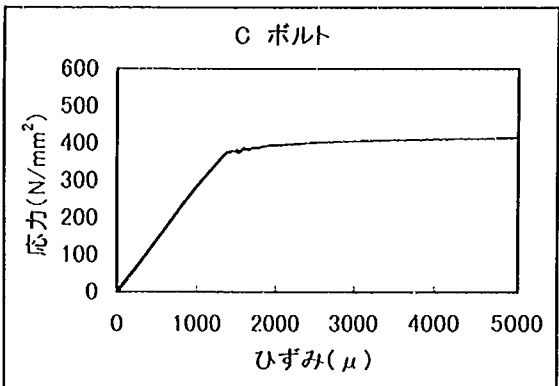
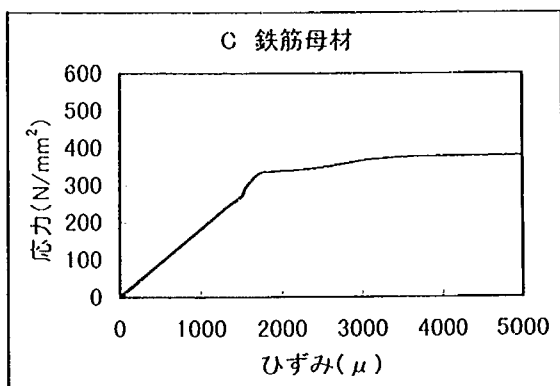
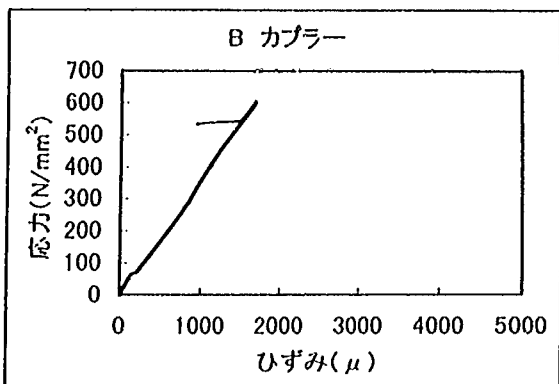
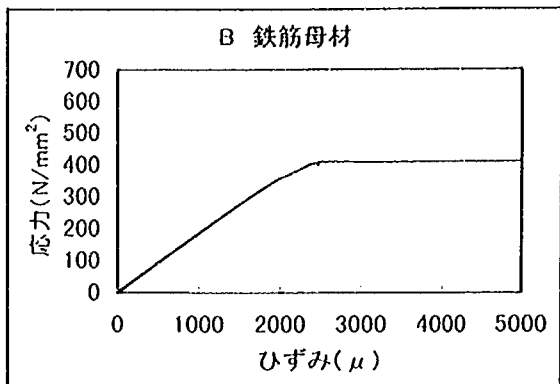
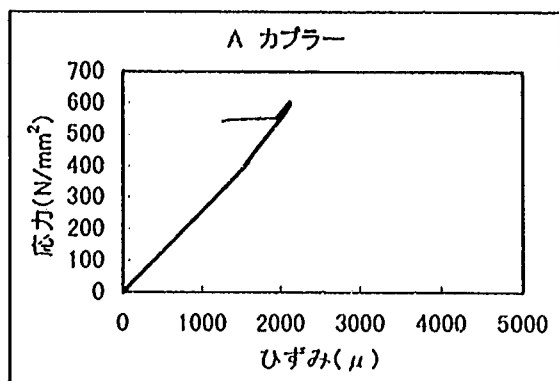
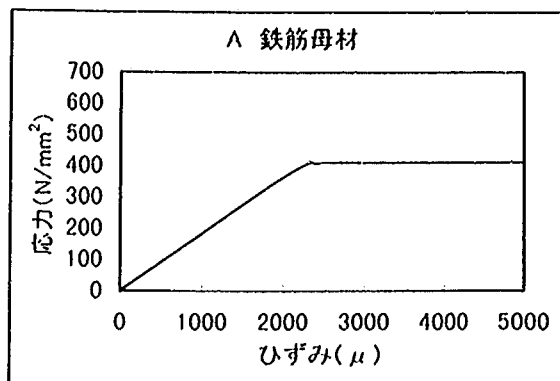


図-4.3.5 応力-ひずみ関係 (その1)

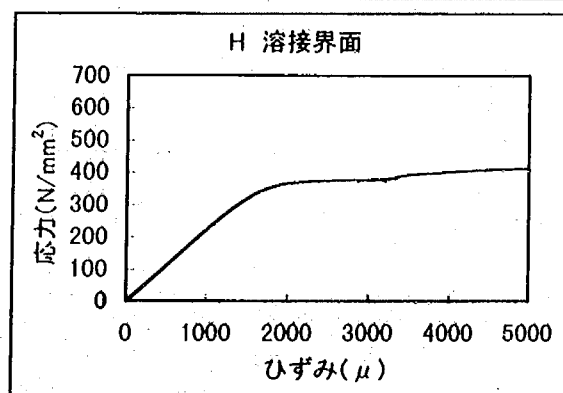
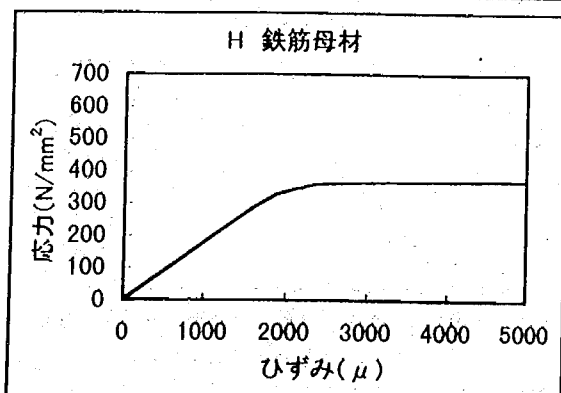
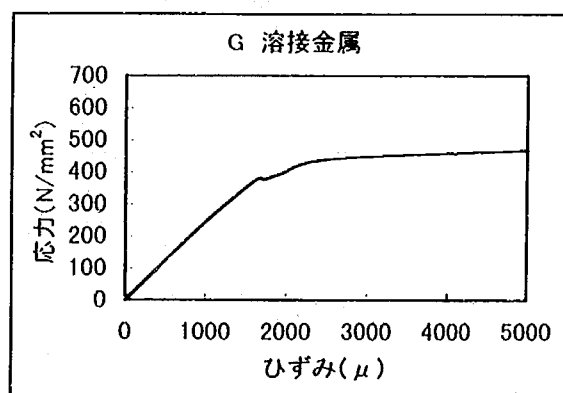
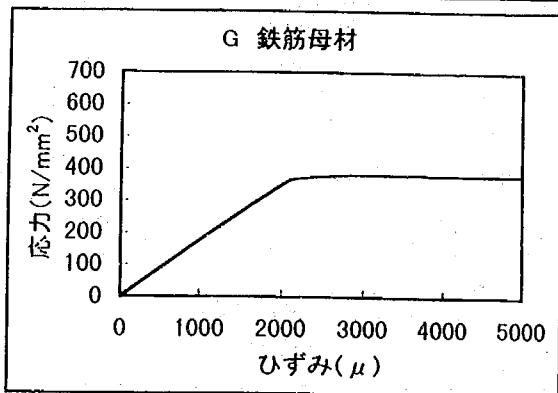
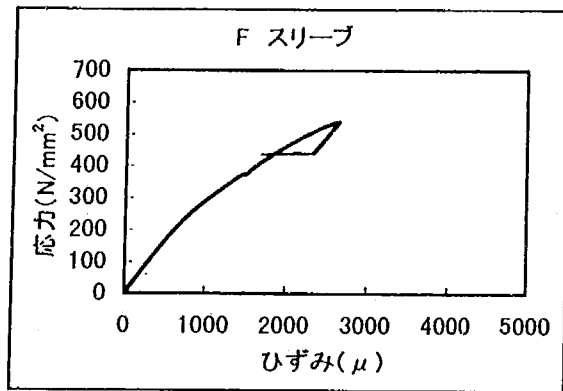
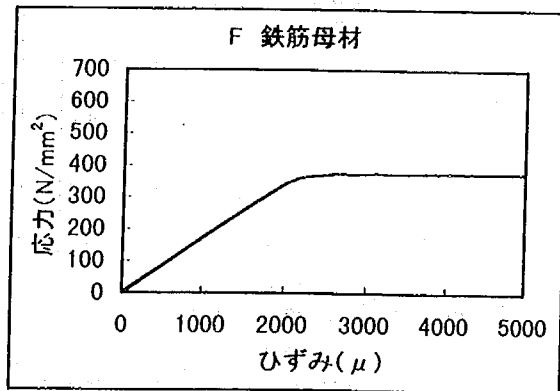
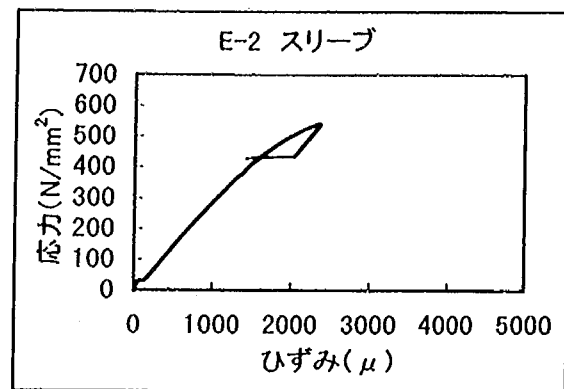
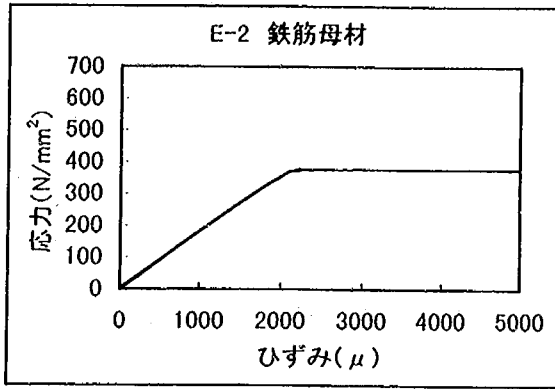
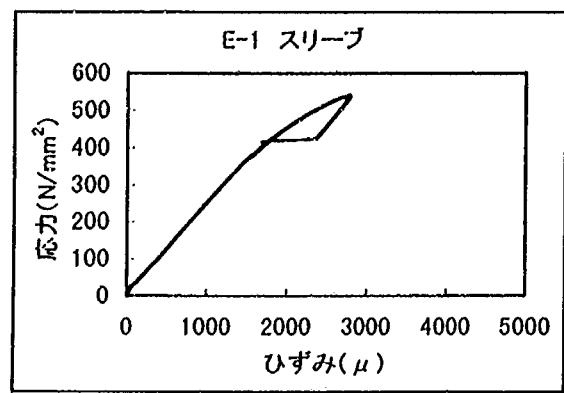
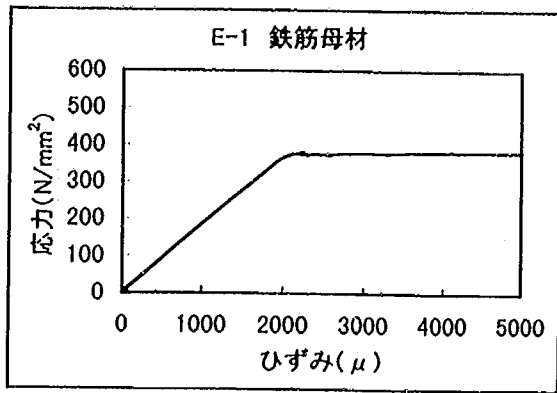


図-4.3.5 応力-ひずみ関係 (その2)

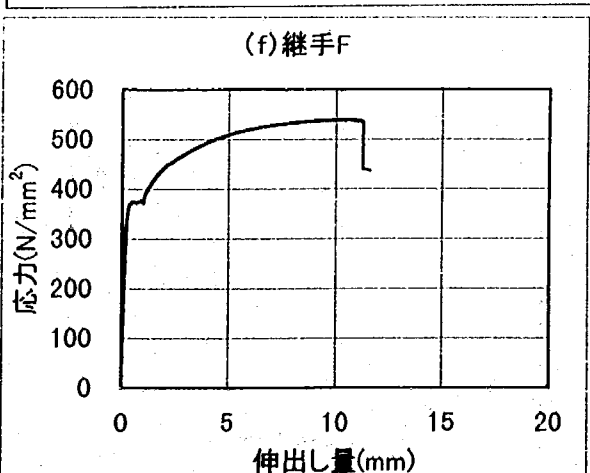
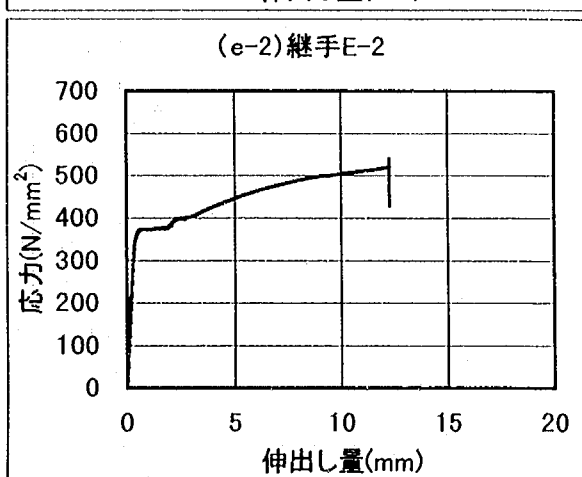
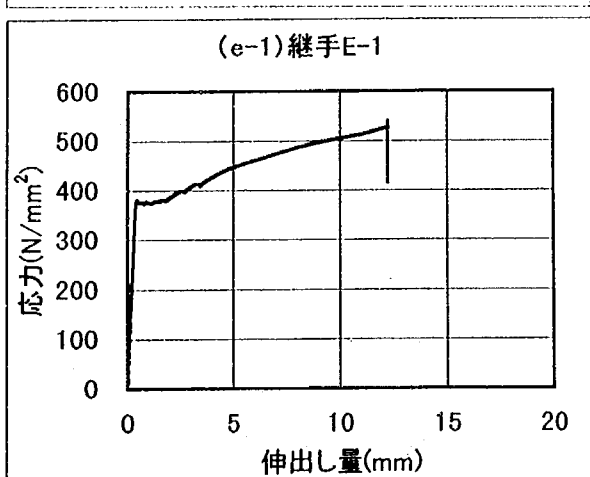
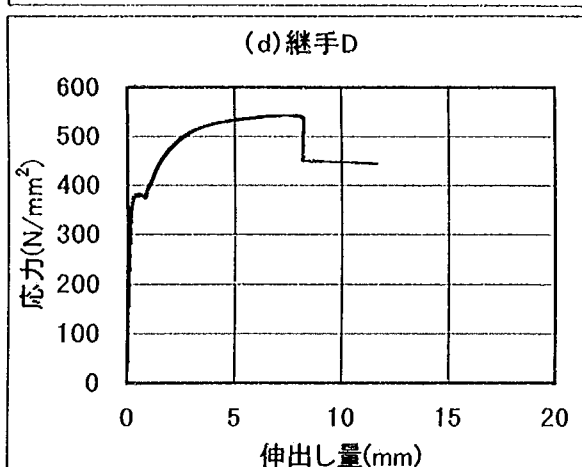
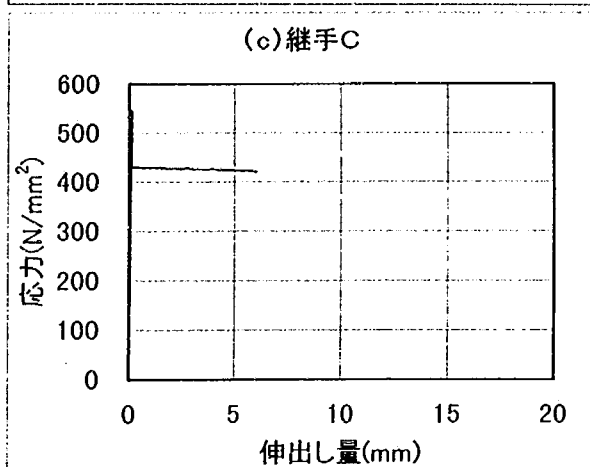
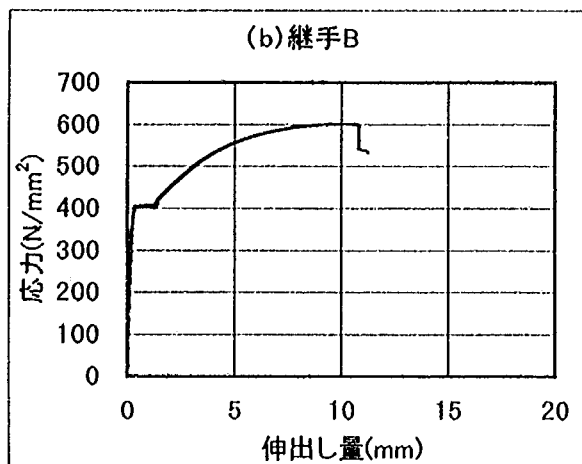
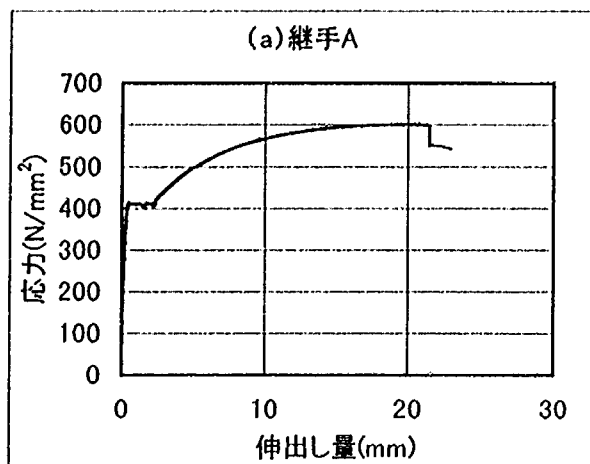
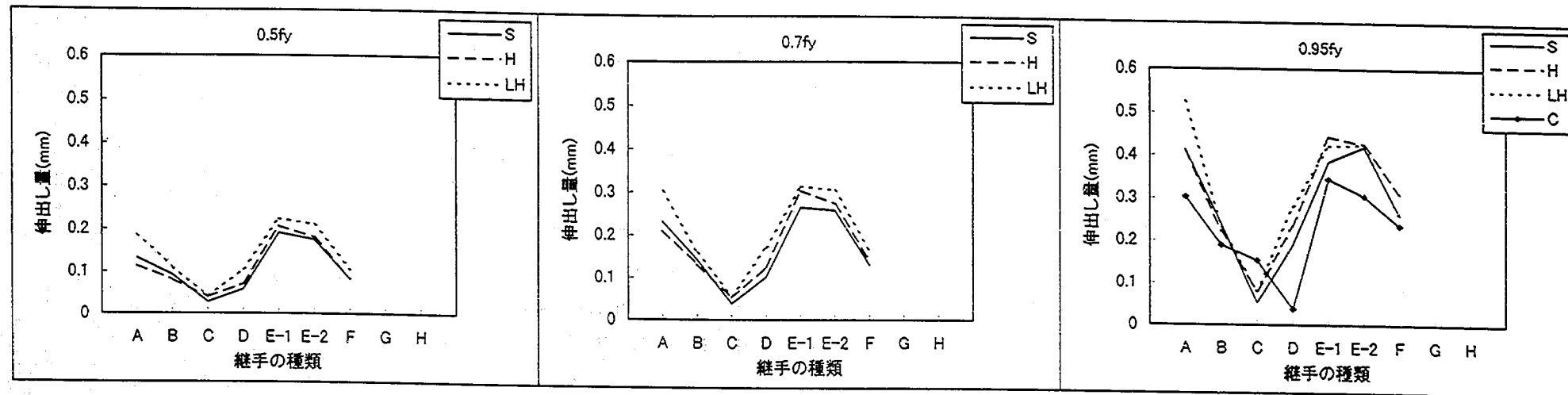


図-4.3.6 伸出し量

(a) 弾性時



(b) 引張強さ時

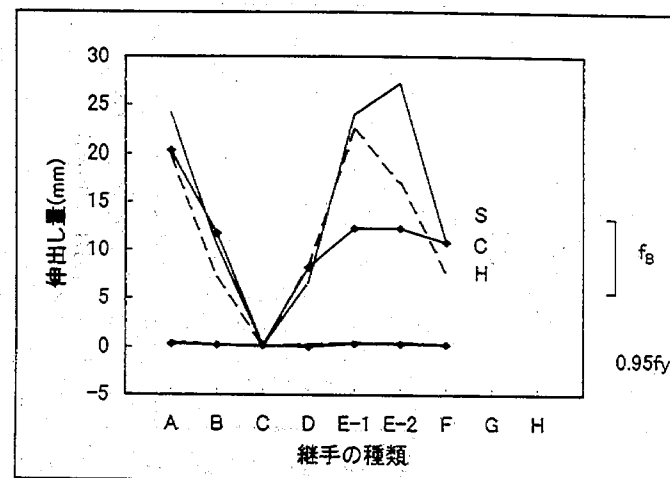


図-4.3.7 機械式継手の伸出し量

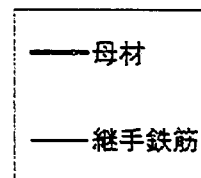
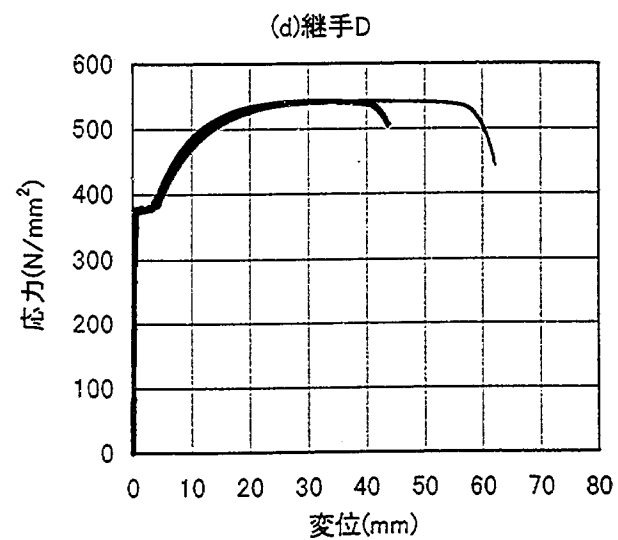
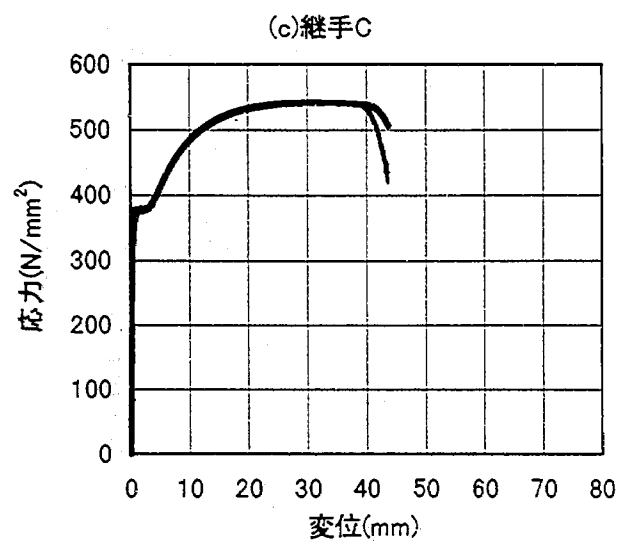
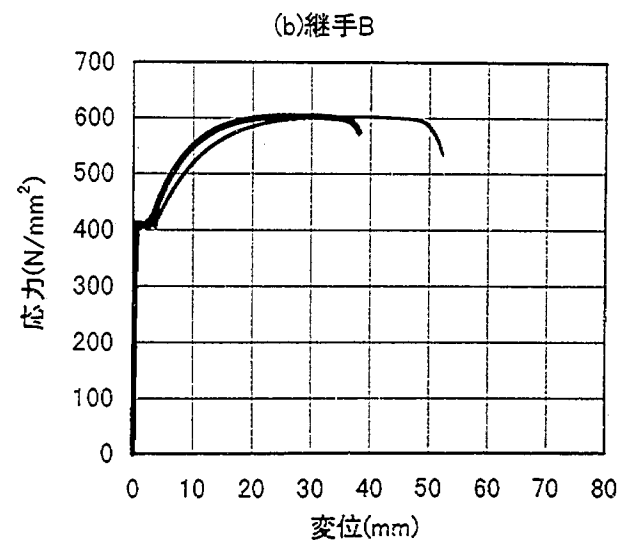
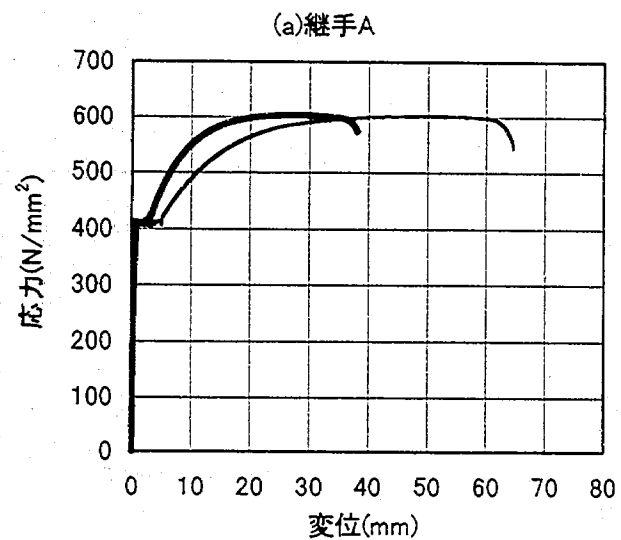


図-4.3.8 伸び変位 (その1)

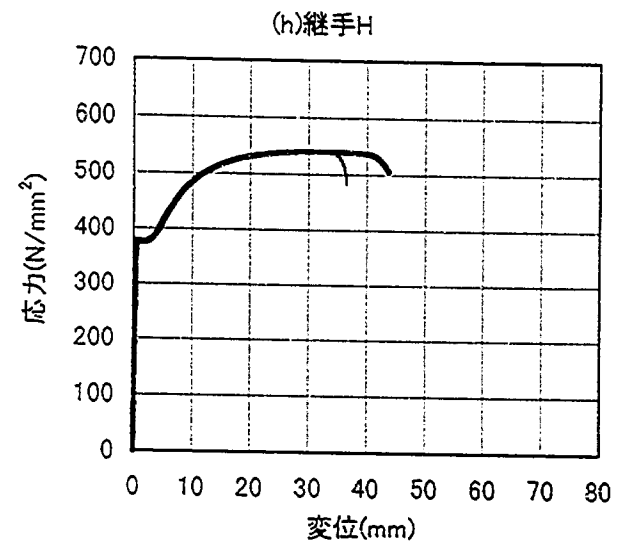
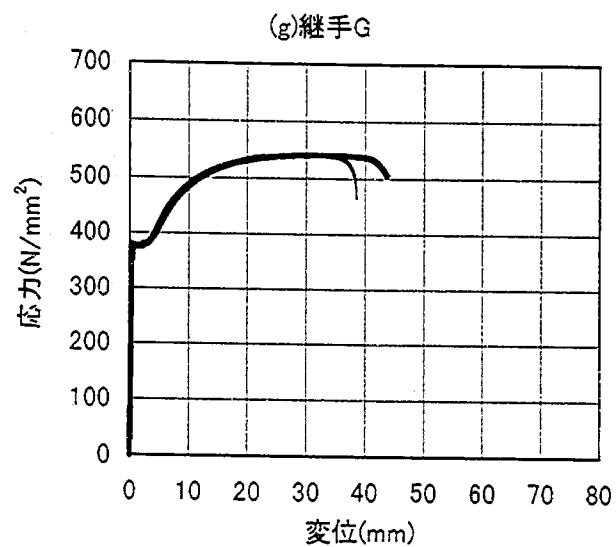
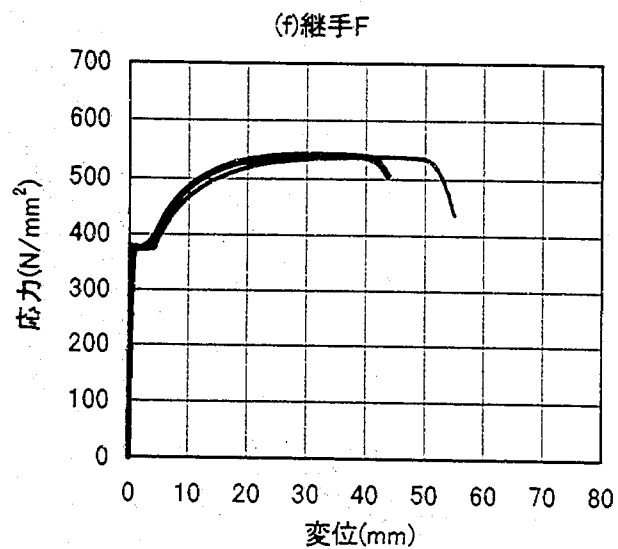
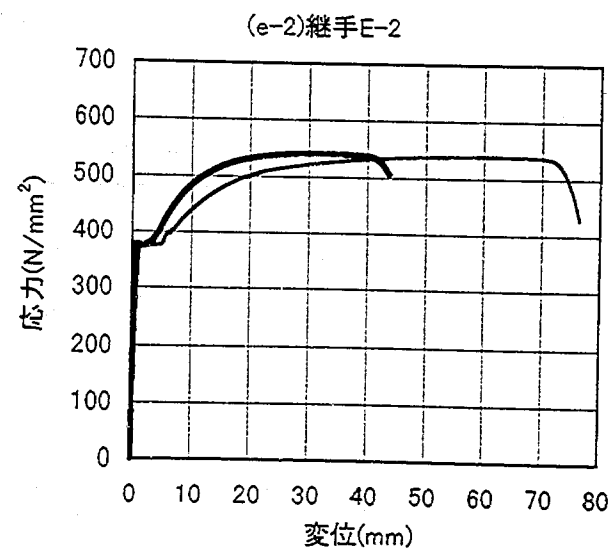
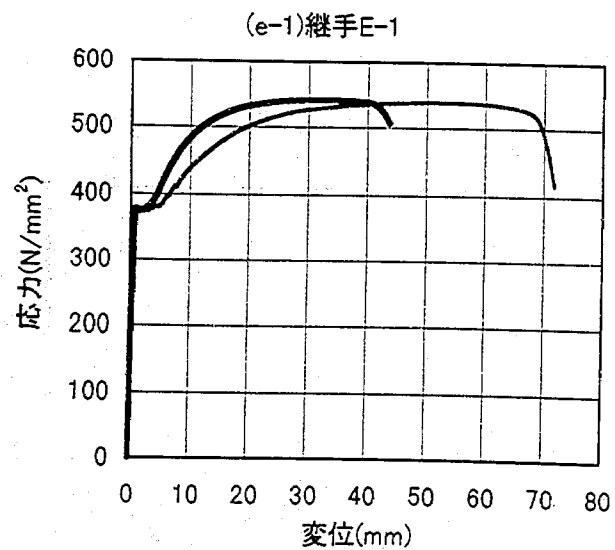


図-4.3.8 伸び変位 (その2)

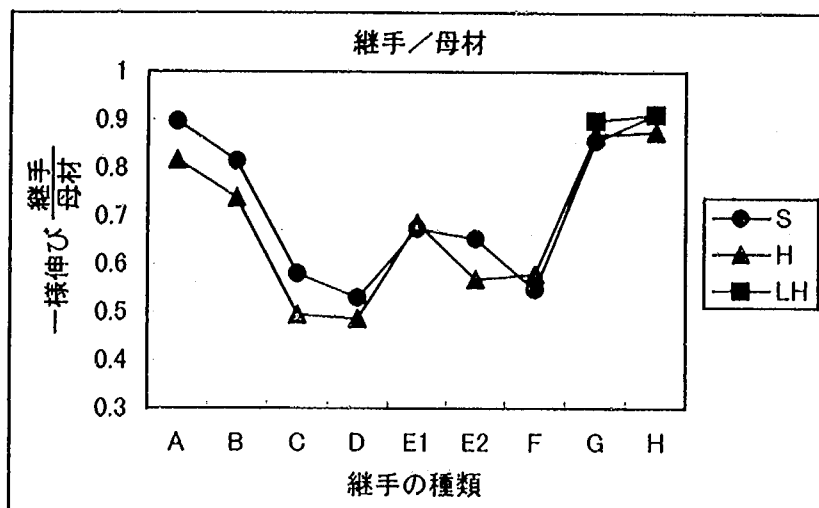


図-4. 3. 9 一様伸び

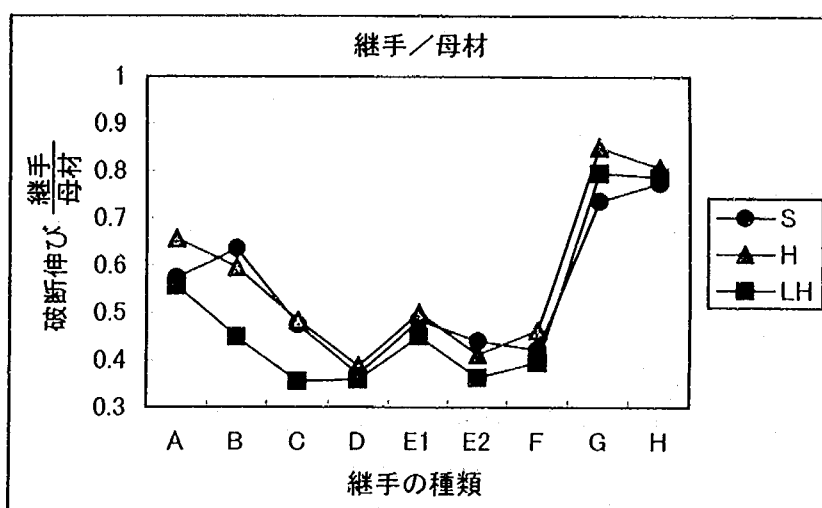


図-4. 3. 10 標点長を(4 D継手部+4 D)としたときの破断伸び

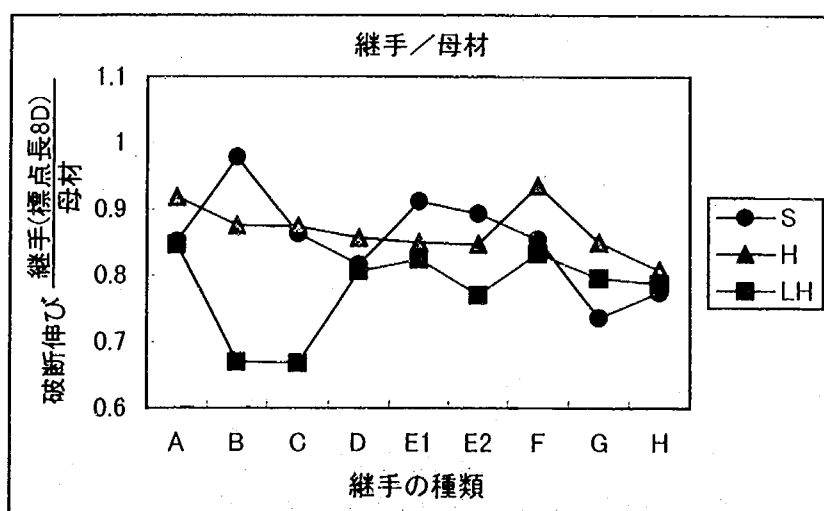


図-4. 3. 11 標点長を母材部の8 Dとしたときの破断伸び

4. 4 繰返し載荷試験

4. 4. 1 試験結果

繰返し載荷試験の結果をまとめて表-4. 4. 1 に示す。伸出し量と鉄筋応力，伸び変位と鉄筋応力の関係を図-4. 4. 1 および 4. 4. 2 に示す。

表-4. 4. 1 の二重線の左側は引張試験とほぼ同様に， $0.95f_{y0}$ 時のヤング係数，引張強さ，破断伸び，絞りの結果である。破断伸びは何種類か示しているのので，これらについて説明を加える。鉄筋母材部の 8D，4D および継手部は図-4. 1. 6 の各部の伸びであり，8D，4D は最大の伸びを表す。継手部+16D および継手部+8D は，継手部の両側 8D（8D+継手部+8D）と両側 4D（4D+継手部+4D）を標点としたときの伸びである。継手部を除いた母材部の 16D および 8D とは，継手部のひずみは弾性範囲内であったので破断後はもとの長さになるものと仮定し，鉄筋の伸び+スリーブなどからの伸出しの残留を考慮したときの破断伸びを求めたものである。

二重線の右側は繰返し載荷に伴うものであり，伸出し量は $0.95f_{y0}$ 時および f_b 時のみを示した。軸方向剛性は $0.95f_{y0}$ 時の繰返しの 1 回目および 4 回目について求めた。

ここで，軸方向剛性は見かけのヤング係数であり，引張応力を変位量／標点長で割ったものである。

伸出しの残留量は，繰返し載荷において荷重をゼロまたはその付近まで下げたときの伸出し量である。

母材の 1 回目の剛性は本来ヤング係数と一致するはずである。しかしながら，今回ヤング係数はひずみゲージから求めたものであるが，剛性は継手部も含んでいることからレーザー変位計によって測定した結果である。伸出しの残留量は，繰返しの各段階において 1 回目と 4 回目の結果を求めた。

表-4.4.1 繰返し試験結果

継手の種類		記号	鉄筋	ヤング係数 kN/mm ²	引張強さ f _B N/mm ²	破断伸び %						絞り %	伸出し量		0.95f _{y0} 軸方向剛性		伸出し残留量													
						鉄筋母材部		継手部	継手部 + 16D	継手部 + 8D	継手部を除いた 母材部		0.95f _{y0} mm	ピーク mm	0.95f _y		f _n =1		f _n =3		f _n =5		f _n =7		f _n =9					
															8D	4D	1回目	4回目	1回目	4回目	1回目	4回目	1回目	4回目	1回目	4回目	1回目	4回目		
						mm	mm								kN/mm ²	kN/mm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
ねじ節	ロックナット	A	S	185.6	618.5	19.7	23.8	8.0	13.8	12.3	21.5	25.8	45.6	0.303	20.295	203.6	194.9	0.083	0.095	0.204	0.718	1.309	2.236	2.915	3.974	5.246	7.108	8.519	11.067	
	充填	B	S	187.8	622.4	23.1	29.5	4.3	14.6	13.8	19.8	23.7	47.4	0.189	11.745	209.0	200.0	0.037	0.043	0.061	0.077	0.574	1.508	1.893	2.519	3.104	3.937	4.632	5.911	
端部 ねじ 接合	摩擦圧接	C	b1	187.1	565.9	21.1	25.1	0.7	13.6	12.3	19.7	23.1	47.1	0.154	0.162	217.2	216.6	0.002	-0.004	-0.004	0.001	0.003	0.061	0.078	0.080	0.091	0.093	0.106	0.112	
	リ-ブ 圧着	D	b1	188.7	564.4	25.2	28.5	0.7	13.2	9.5	21.8	21.7	50.1	0.037	8.150	262.8	248.2	0.023	0.027	0.073	0.186	0.567	0.742	0.840	0.979	1.233	1.797	2.202	2.965	
スリーブ	充填A	E-1	b1	176.1	560.8	23.1	29.8	6.0	13.6	12.7	24.7	33.3	51.6	0.345	12.281	243.0	237.8	0.055	0.054	0.144	0.361	0.682	2.206	2.925	3.758	5.137	7.058	8.197	10.250	
	充填B	E-2	b1	188.4	558.1	22.6	27.6	4.3	11.8	10.3	22.8	29.7	53.2	0.306	12.277	268.0	253.9	0.068	0.079	0.375	0.669	1.431	2.016	2.580	3.328	4.447	6.250	7.223	9.259	
	圧着	F	b1	177.7	563.5	23.9	29.0	2.2	13.0	11.1	21.4	25.6	52.9	0.236	10.799	269.1	258.5	0.102	0.120	0.229	0.397	0.663	0.876	1.056	1.535	2.070	3.092	3.754	4.925	
溶接	エポキシ 溶接	G	b1	183.2	564.3	22.7	27.5	19.3					46.8			263.2	257.2													
	フラッシュ 溶接	H	b1	184.5	565.4	22.7	26.9	20.6					45.6			329.5	314.2													
母材	ねじ節	I-1	S	187.2	623.8	24.1							43.8			199.3														
	横筋	I-2	b1	189.1	566.2	25.5							45.0			201.3														

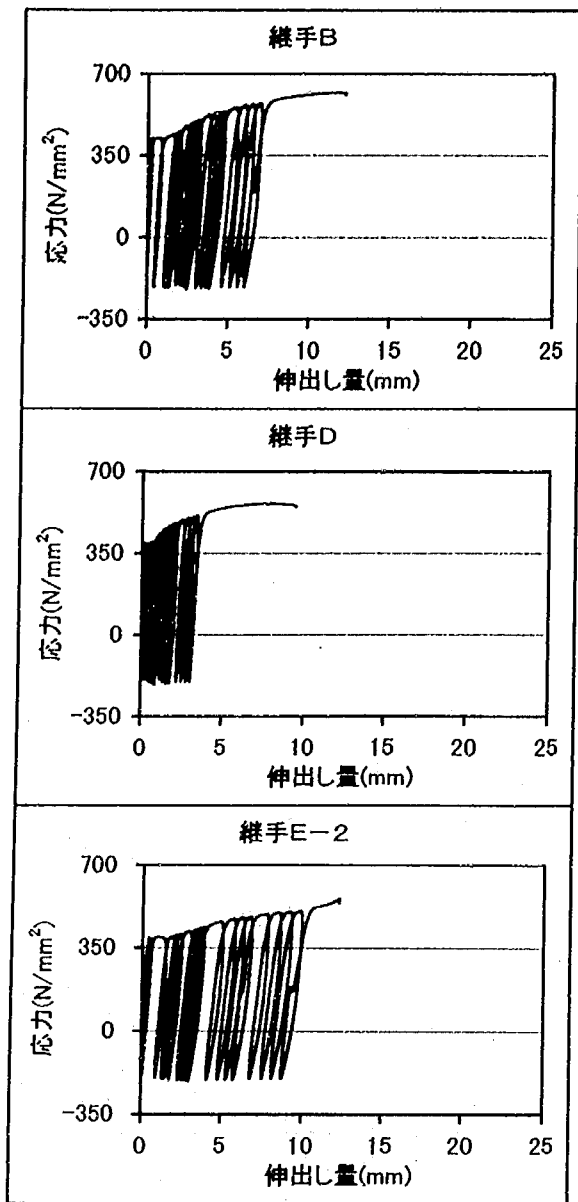
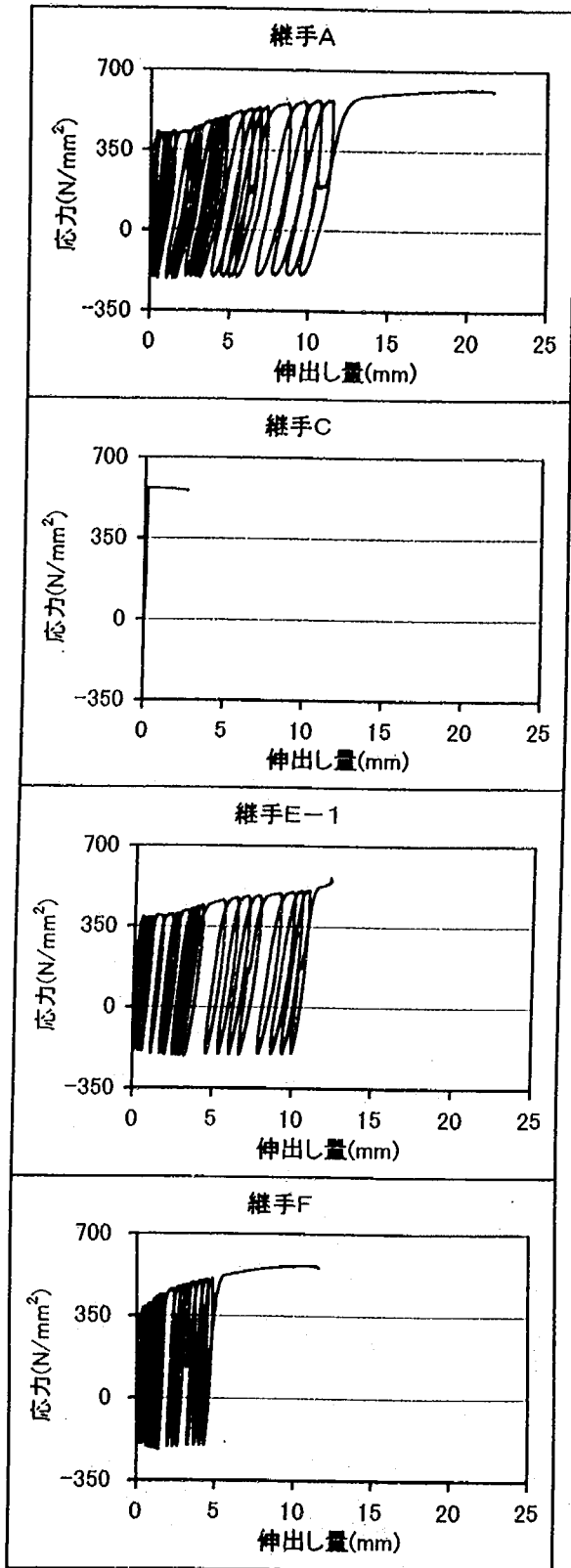


図-4.4.1 伸出し量と鉄筋応力の関係

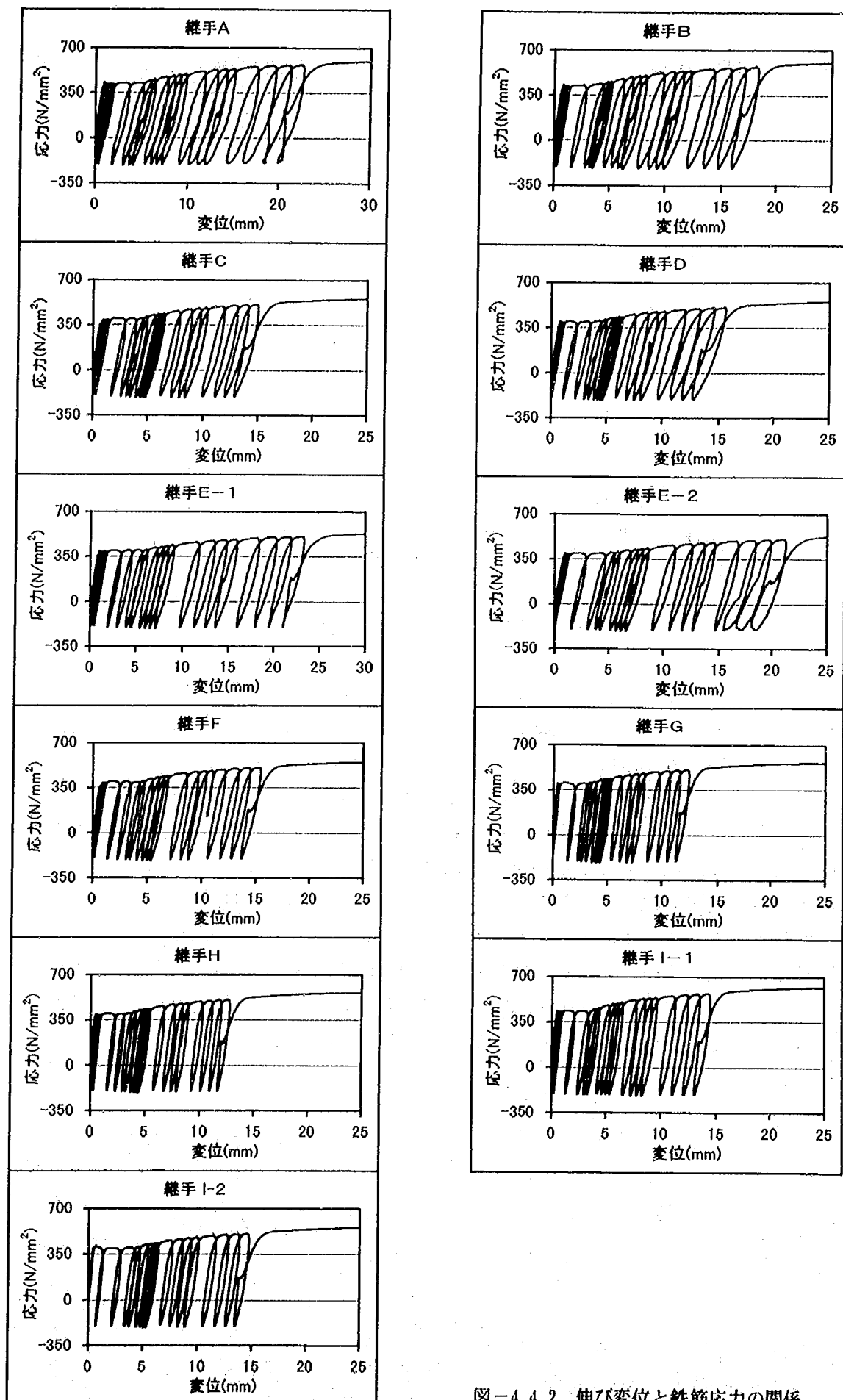


図-4.4.2 伸び変位と鉄筋応力の関係

4.4.2 引張強さ

繰返し後の引張強さは、図-4.4.3の繰返し载荷Cのように各種引張試験と同じく母材の基準速度時の引張強さの比で示した。繰返し载荷後、破断までの载荷速度は常温時の高速载荷(H)と同じにしたので、それよりわずかに小さくなっているものの母材の基準速度の場合より数%強度は増加した。

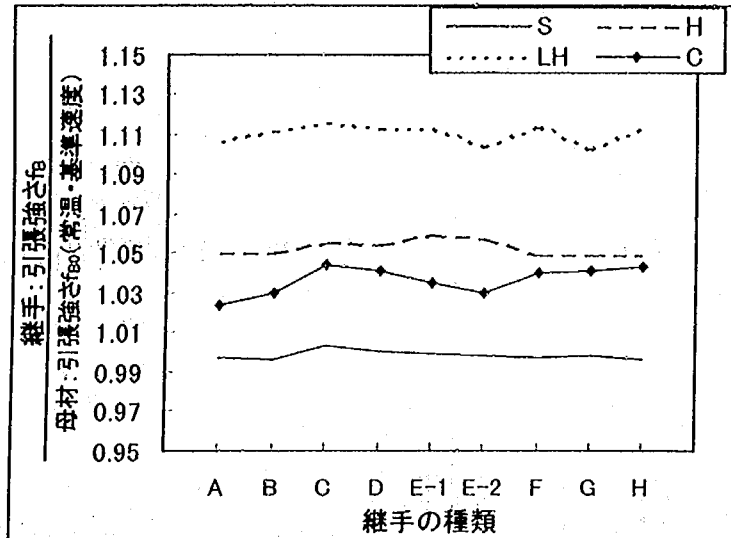


図-4.4.3 引張強さ

参考に、ガス圧接の繰返し载荷の結果を第1報、第2報を基にまとめると図-4.4.4のようになり、母材の基準速度より高速载荷(タイプI-1の◆に相当)は7%増加し、今回のようにタイプII-4の場合は4%増加している。

繰返しパターンは図-4.4.5のように整理できる。基準速度時の引張強さに対する各载荷パターンの繰返し载荷後の引張強さは、図-4.4.4のとおりであった。タイプI-1の载荷速度は基準速度で行ったためそのほかの結果と比べて強度が小さくなっている(番号1の◇)ので、高速载荷時のデータを黒印で示した(I-1:◆, III-1:●)。III-1の場合、両者(○と●)はほぼ同じであり、I-1の場合も高速载荷時の引張強さとほぼ同じと考えてさしつかえないものと考えられる。I→II→IIIへと繰返し応力の振幅が大きくなるほど、また、1→2→3→4と繰返しパターンの番号が大きくなるほど引張強さは小さくなる傾向がある。それでも繰返し载荷は基準速度の引張強さを上回っており、高ひずみの正負交番繰返しを受けても十分な強度を有している。

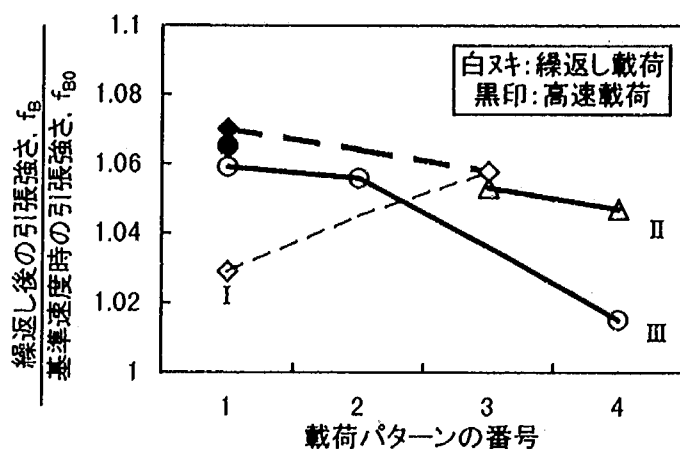


図-4.4.4 繰返し載荷パターンと引張強さの関係（標準圧接）

表-4.4.5 繰返し載荷パターン

繰返し回数 番号 載荷方法	繰返し回数 番号	1回繰返し	漸増1回繰返し	弾性・塑性 20回繰返し	漸増4回繰返し	塑性疲労
		1	2	3	4	5
一方 向繰 返し	I					
正 負繰 返し	II					
正 負交 番繰 返し	III					

表中のグラフの縦軸：応力，横軸：時間である。

4.4.3 剛 性

0.95 f_{yo} 時の母材の剛性に対する各継手の剛性の比を図-4.4.6に示す。

ねじ節継手であるA, Bは, 剛性の高い継手部の長さが短く, 4.3.5項あるいは次項のように伸出も大きいので剛性はほぼ母材と同じになっている。

継手Cは, 伸出は極めてわずかであるが, ねじ部の径が鉄筋に近いこと, 長ナットの長さが短いので剛性の増加もわずかである。

継手D~Fは, スリーブ圧着およびスリーブ充填継手であり, 伸出量は比較的大きいものの, 継手長が長いので, 剛性は母材の1.2~1.3倍になっている。

溶接継手であるG, Hは, 母材と同じ標点長の中央に継手部を含んでいるので, 継手部がほとんど伸びないことから剛性は高くなっている。

繰返し4回目の剛性は, 1回目よりも低下しているが, わずかであり問題になるものではない。

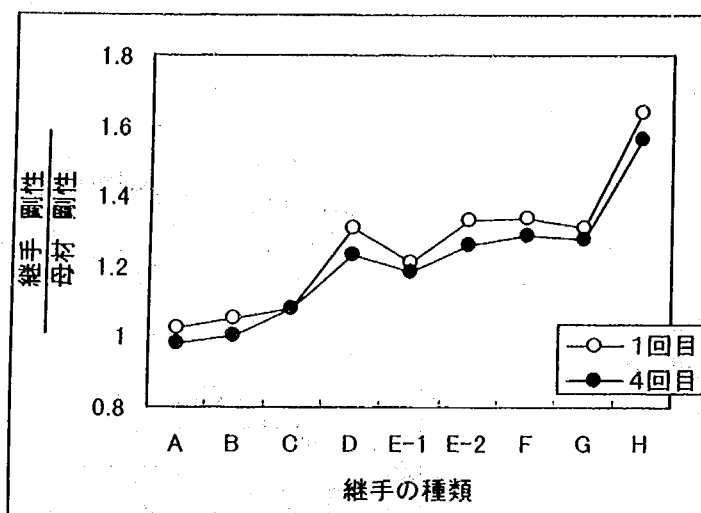


図-4.4.6 剛性

4.4.4 伸出量

0.95 f_{y0} 時および f_B 時の伸出量を図-4.4.7に示す。

0.95 f_{y0} 時の伸出量は、端部ねじ接合である継手C、Dは小さく、そのほかは約0.2~0.3mmとなっている。端部ねじ接合は、普通のねじと同じように細かくねじが切られているのでガタを生じにくいために伸出は小さくなったものと考えられる。一方、ねじ節はねじが粗いのでガタを生じやすいこと、スリーブ充填継手はモルタルを充填しているので伸出が大きいことなどによるものと考えられる。

f_B 時は、継手Aはロックナットの効果なくなり他の継手の2倍程度になっている。継手AおよびCを除く他の継手は10mm前後になっている。その中でスリーブ圧着の継手DとFを比べると、Dの方がわずかに小さい。Dはねじ接合部もあるので、その部分の伸出も加わるが、それは継手Cを見てわかるとおりわずかであると考えられる。そうすると、伸出の違いは圧着方法の違いによるスリーブ端部からの伸出の違いによるものと考えられる。

継手Cは、0.95 f_{y0} 時とほぼ同じであり、伸出の極めて小さい継手である。

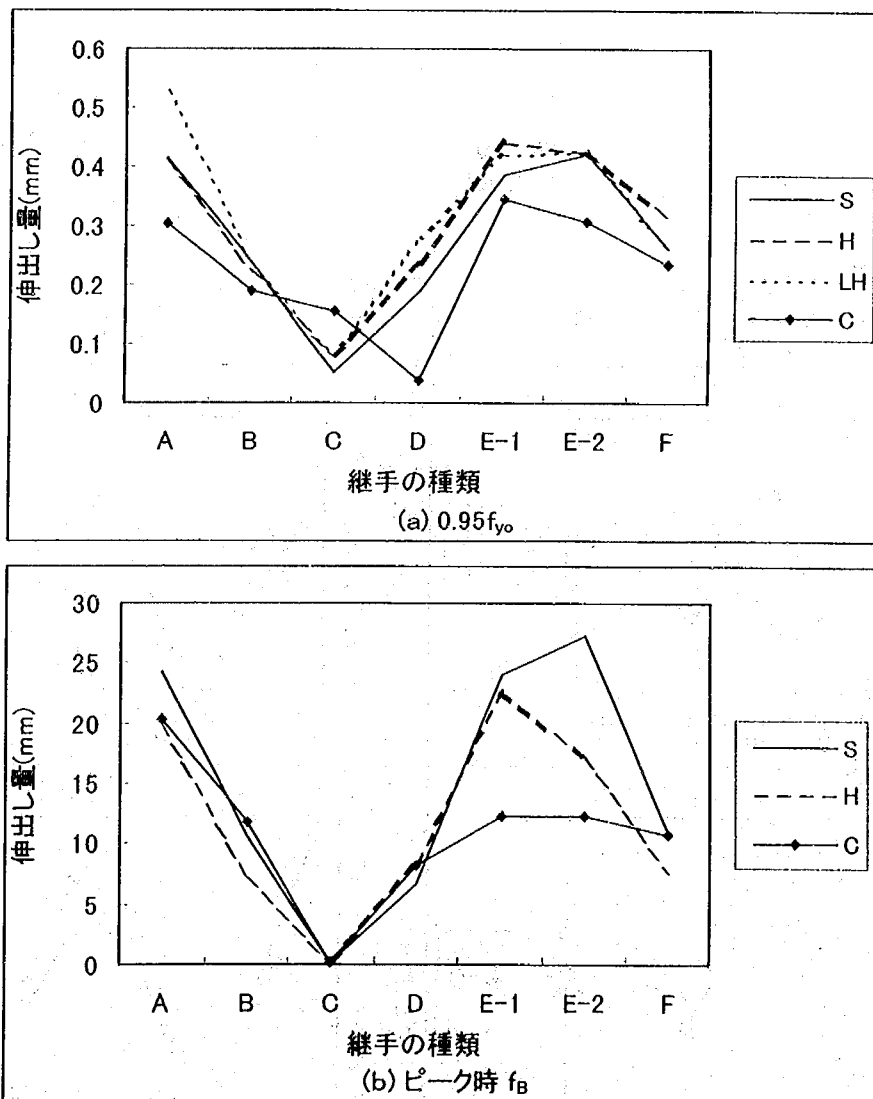


図-4.4.7 伸出量

4.4.5 伸出しの残留量

各繰返し段階ごとに伸出しの残留量を図-4.4.8に示す。

0.95 f_y 時はほとんど0.1mm以下である。応力が高くなるほど残留量も伸出し量(図-4.4.7)とほぼ同じように大きくなる。継手Cは $\sigma_{n=9}$ のときでも残留量はわずかである。

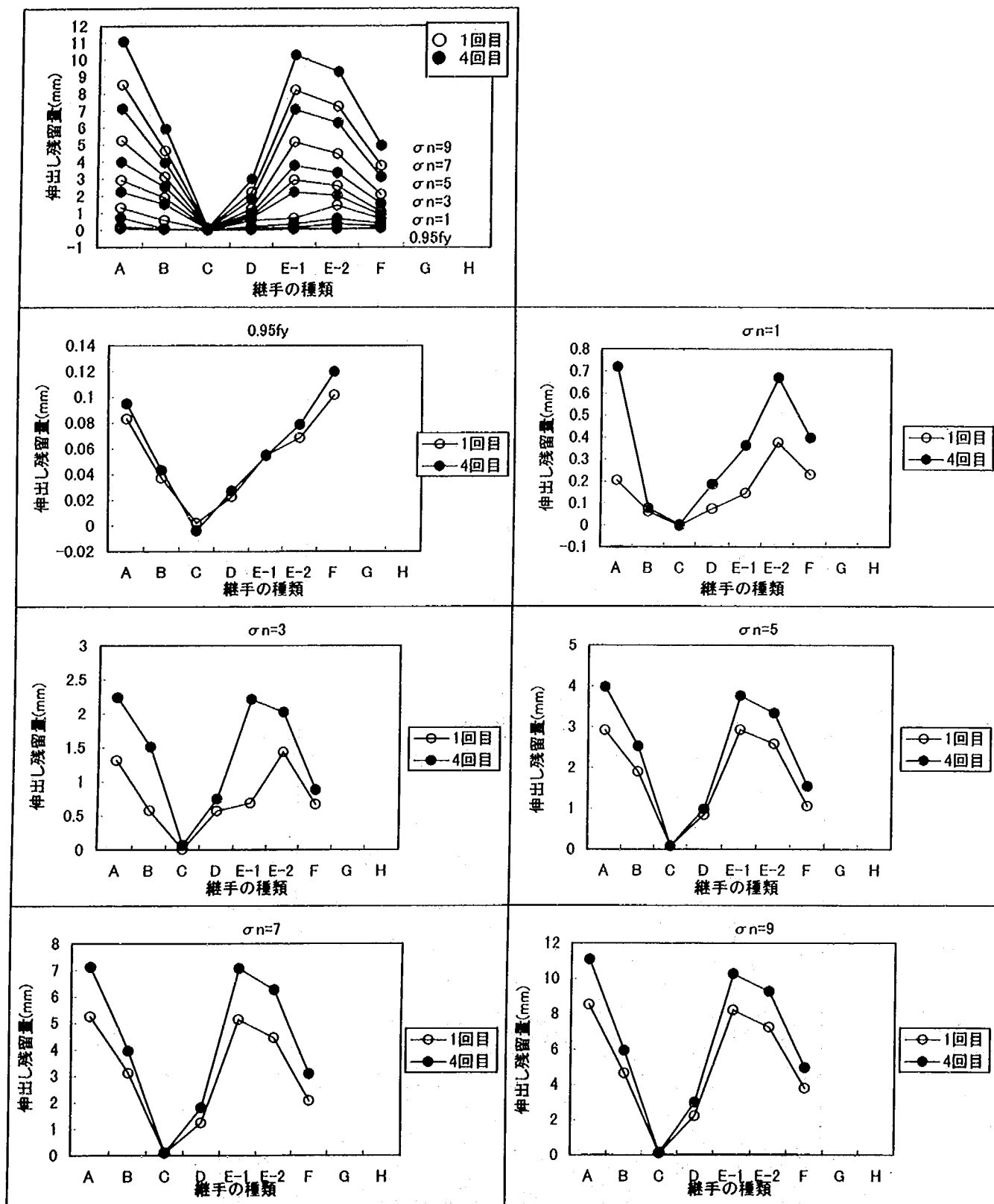


図-4.4.8 伸出しの残留量

4.4.6 破断伸び

図-4.4.9 には母材の破断伸びに対する各継手の破断伸びの比を示す。破断伸びを測定した標点長は、母材 8 D に対し機械式継手は (4 D + 継手長 + 4 D)、溶接継手は溶接部を含めて 8 D とした。溶接継手の破断伸びは、接合部の破断伸びがほとんどないことから、母材の 60 ~ 70 % 程度になっている。一方、機械式継手の破断伸びは、継手の剛性が高いため、溶接継手 G, H に比べて小さく、母材の 40 ~ 60 % になっている。ただし、継手 A, B は継手長が短く、伸出量が大いので、継手 C ~ F より大きく、60 % 程度になっている。

鉄筋母材部と継手部に分けて破断伸びを求めた結果が図-4.4.10, 4.4.11 である。

図-4.4.10 の 4 D は継手部の両側の 4 D のうち、破断した側の伸びを示している。8 D も同様である。8 D の場合は母材と同等か、その 70 % 程度である。4 D の場合も、繰返しを除くと母材の 70 ~ 90 % 程度になっている。繰返しの場合は、伸出量の大きい A, B, E-1, E-2 が母材よりも大きくなっている。

図-4.4.11 の継手部の破断伸びは、伸出量とほぼ同じものを示している。そのため、伸出量の小さかった C, D, F は小さく、伸出量の大きい A, B, E は大きくなっている。

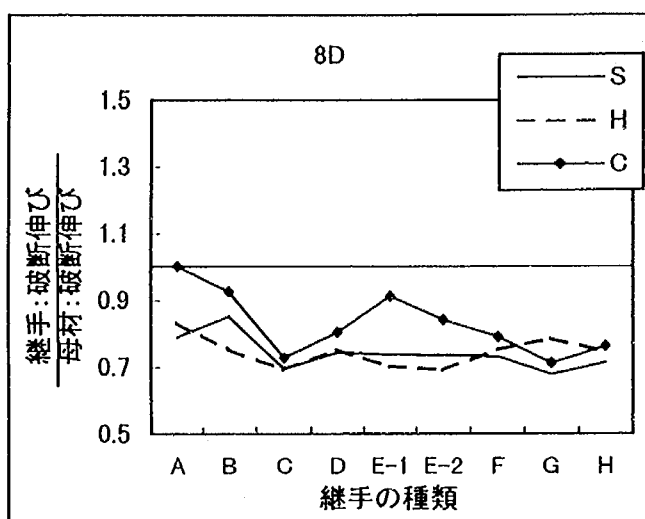
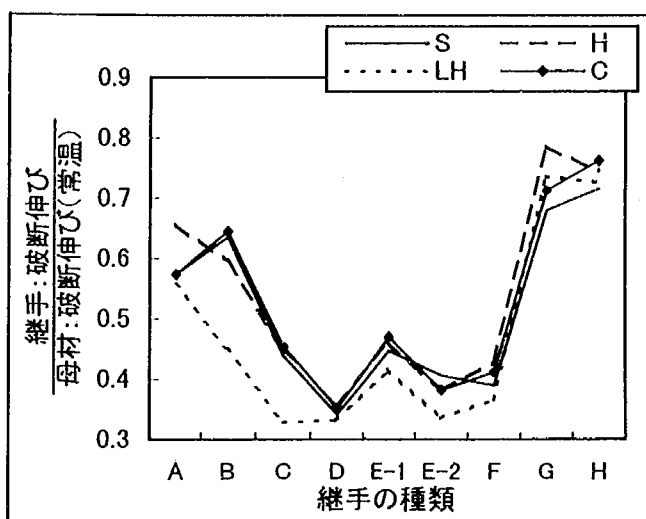


図-4.4.9 標点長を(継手部+8D)としたときの破断伸び

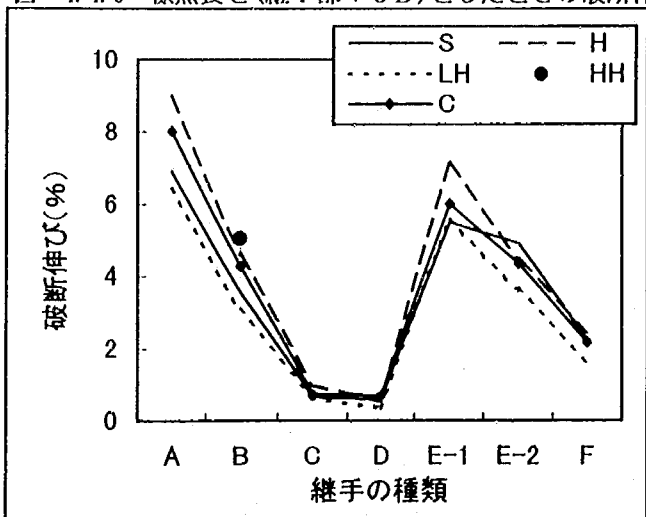


図-4.4.11 継手部の破断伸び

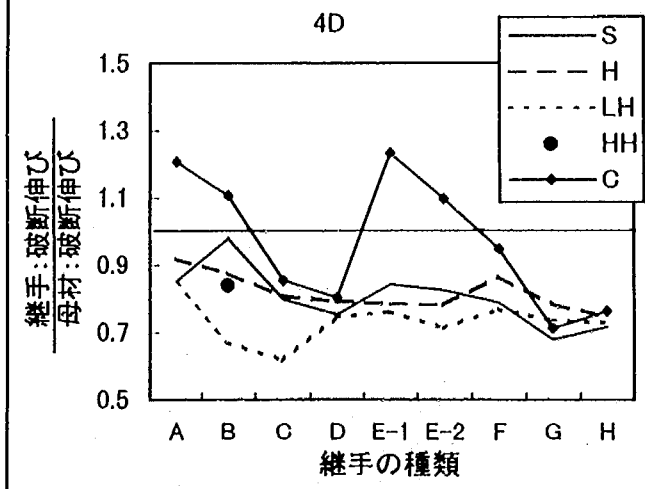


図-4.4.10 標点長を母材部の 8 D としたときの破断伸び

5. 曲げ試験

5. 1 継手の種類

ガス圧接継手の検査法を参考に、突合せ継手(接合)を有する場合、曲げ試験を行った。

曲げ試験の対象とした継手は、エンクローズ溶接継手G、フラッシュ溶接継手Hおよびねじ方式の接合が摩擦圧接である継手Cの3種類である。

5. 2 試験方法

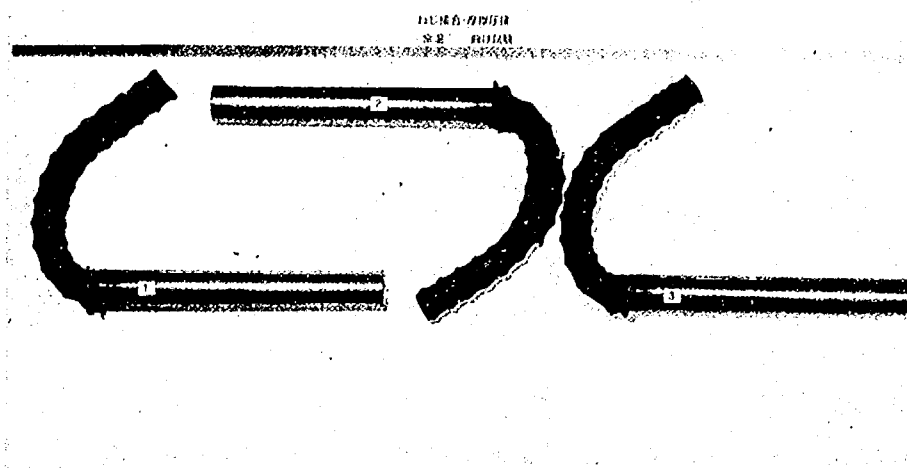
曲げ試験方法は、JIS Z 2248(金属材料曲げ試験方法)の押曲げ法に準じたものであり、曲げ角度は180度近くまで押し曲げた。その後、湾曲部の表面状態を観察した。

継手CおよびHの試験片は、接合部にバリが突いているので、押金具の接触位置はサンダーをかけて、鉄筋面まで平滑にした。

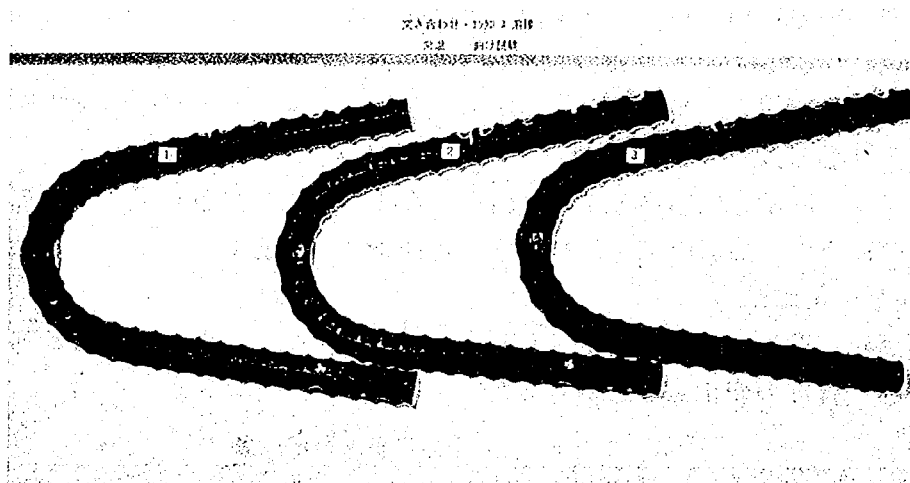
試験本数は1種類につき3本ずつとした。

5. 3 試験結果

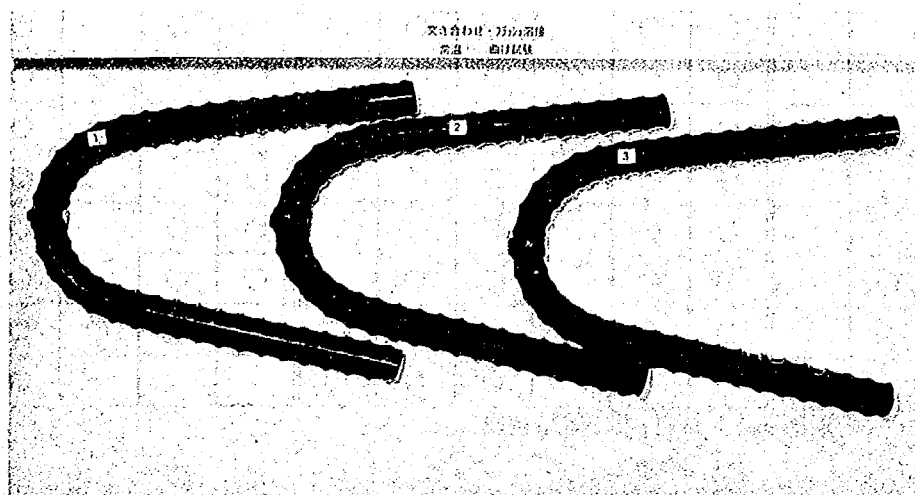
曲げ試験終了後の試験片の状態は写真-5.1~5.3のとおりである。曲げの曲率は継手G、Hは接合部が、継手Cはねじ部の剛性が高かったので圧接部近傍の鉄筋の方が大きくなった。曲げ試験後の試験片は、いずれも接合部にはキズなどを生じることはなく、接合部は良好であった。



写真一 5.1 継手C



写真一 5.2 継手G



写真一 5.3 継手H

6. 金属学的調査

6. 1 試験方法

継手のマクロ、ミクロな顕微鏡観察、ビッカース硬さまたはブリネル硬さ試験、シャルピー衝撃試験を表-6.1.1 のとおり行った。それぞれ引張試験前・後で行い、比較した。以下に各試験方法および測定位置を示す。測定位置については概要であり、詳細については次節で各継手ごとに示す。

6.1.1 マクロ観察

試験片の軸方向断面について、マクロ組織観察を行った。観察位置は継手部全体とその近傍である。倍率は1倍とした。

6.1.2 ミクロ観察

マクロ観察した試験片を倍率100倍でミクロ組織観察を行った。ミクロ観察位置は、スリーブ、カプラーは軸方向断面の1/2面を、ボルトおよび鉄筋は軸方向断面の1/2面および1/4面の接合面、熱影響部、母材部など各変化位置である。

6.1.3 硬さ試験

ビッカース硬さ試験は、JIS Z 2244に基づきマクロ組織試験と同様の試験片を使用し、荷重は10kgfとして行った。ブリネル硬さ試験はJIS Z 2243に基づいて行った。測定位置は、スリーブ、カプラーは軸方向断面の1/2面を、ボルトおよび鉄筋は軸方向断面の1/2面および1/4面の接合面、熱影響部、母材部など各変化位置である。

6.1.4 シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験は、JIS Z 2242に基づいて、スリーブ、カプラーの端部など各断面の変化点・接合部、材質の変化点などで行った。

表-6.1.1 試験片の状態と金属試験

継手の種類	継手材料			継手作製後(引張試験前)						引張試験後					
				継手材料			鉄筋			継手材料			鉄筋		
	マクロ ミクロ	硬さ	衝撃	マクロ ミクロ	硬さ	衝撃	マクロ ミクロ	硬さ	衝撃	マクロ ミクロ	硬さ	衝撃	マクロ ミクロ	硬さ	衝撃
A				○	○		○	○	○	○	○		○	○	○
B				○	○		○	○	○	○	○		○	○	○
C				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
D				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
E-1				○	○		○	○	○	○			○	○	○
E-2				○	○		○	○		○	○		○	○	
F	○	○		○	○		○	○		○	○		○	○	
G *				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
H							○	○	○				○	○	○

* エンクローズ溶接の継手材料とは、溶接金属

6. 2 試験結果

6. 2. 1 鉄筋母材

(1) マクロ・ミクロ組織観察結果

ねじ鉄筋、横筋鉄筋のマクロ、ミクロ組織を写真-6. 2. 1 および 6. 2. 2 に示す。ミクロ写真の軸中心部(c)は表面から 5mm(b)より組織がわずかに大きくなっているが、これは熱間圧延後の表面層と中心部との冷却速度の違いによる変態温度にやや差が出たことによる偏析のためであり、マクロ、ミクロ組織とも正常な状態である。

(2) 硬さ試験結果

表面から 5mm のビッカース硬さは、表-6. 2. 1 および図-6. 2. 1 のようにねじ鉄筋は HV=179, 横筋鉄筋は HV=162 であり、これまで使用した鉄筋と同程度である。ねじ鉄筋は、強度も高く(表-4. 2. 1), 横筋鉄筋より硬くなっている。

(3) シャルピー衝撃試験結果

シャルピー衝撃試験による吸収エネルギー、脆性破面率は、ねじ鉄筋が 98J, 43%, 横筋鉄筋が 106J, 42%であり、これもこれまでの鉄筋と同程度であった(表-6. 2. 2)。

表-6. 2. 1 鉄筋母材の硬さ試験結果

試験位置	引張試験前 HV			
	ねじ筋		横筋	
	5mm	軸中央	5mm	軸中央
1(外側)	178	175	160	154
2	179	174	164	161
3	180	175	162	165
4	178	174	163	168
5	180	174	161	166
6(中側)	178	175	159	165
平均	179	175	162	163

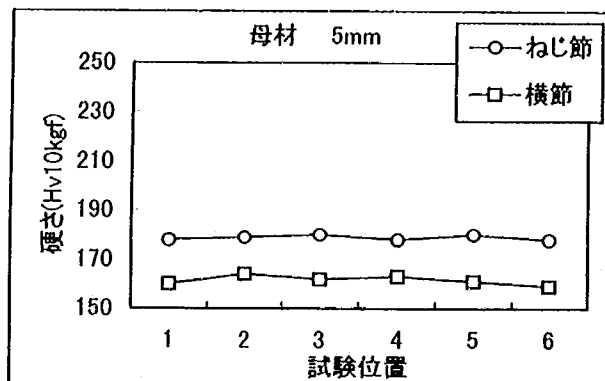
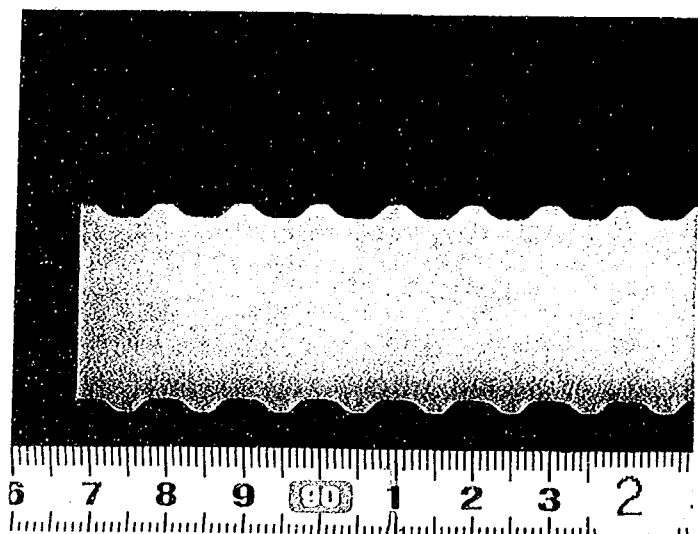


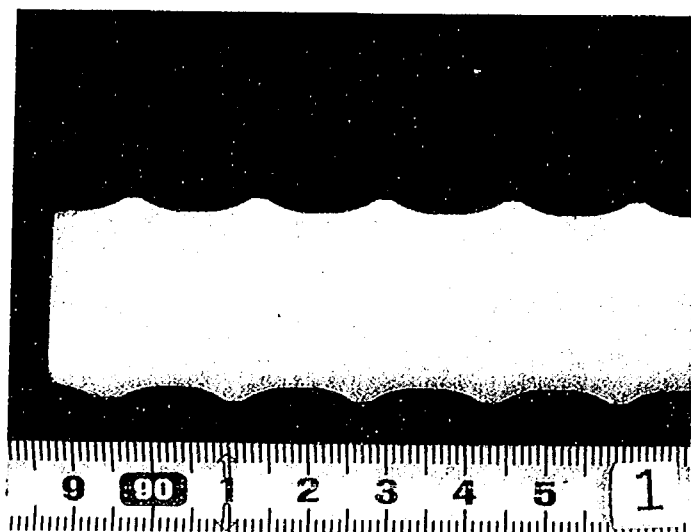
図-6. 2. 1 鉄筋母材の硬さ分布

表-6. 2. 2 鉄筋母材のシャルピー衝撃試験結果

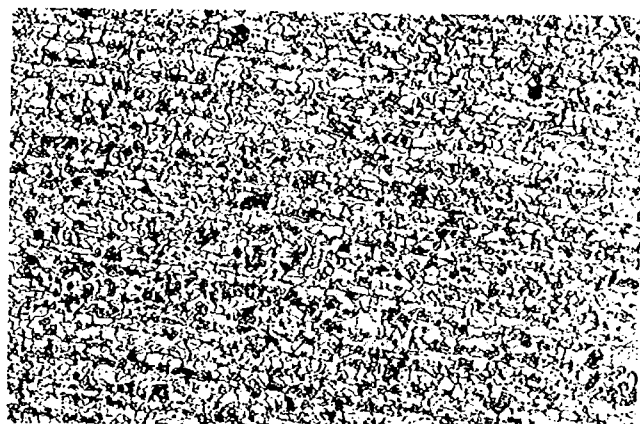
試験片符号	番号	吸収エネルギー kgf-m	吸収エネルギー J	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)
1 ねじ筋鉄筋	21	8.9	87	50	0
	22	9	88	50	0
	23	12.2	120	30	0
平均		10.0	98.3	43.3	0
2 横筋鉄筋	11	9.6	94	45	0
	12	11.9	117	40	0
	13	10.9	107	40	0
平均		10.8	106	41.7	0



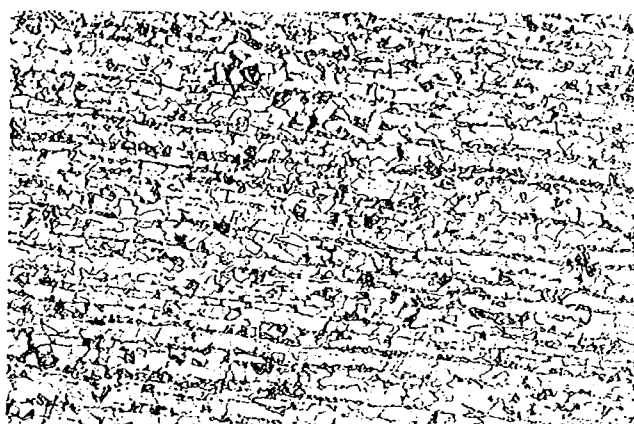
(a) ねじ鉄筋マクロ組織写真 (×1)



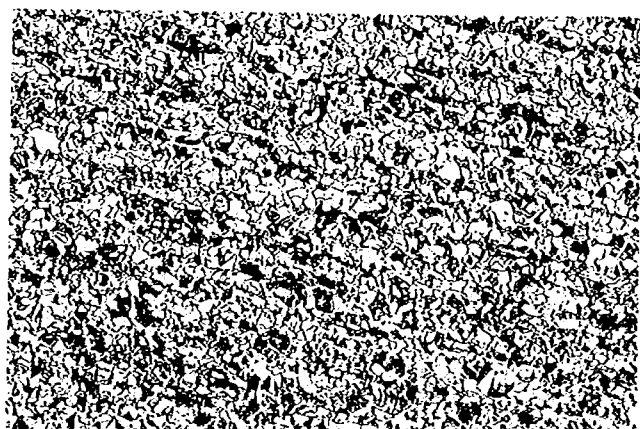
(a) 横節鉄筋マクロ組織写真 (×1)



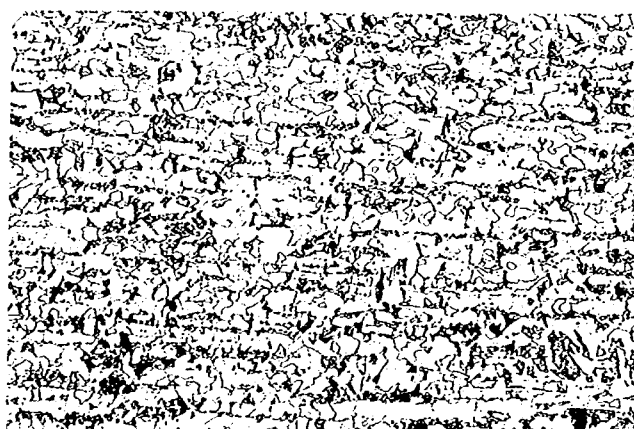
(b) ミクロ写真 表面より 5 mm (×100)



(b) ミクロ写真 表面より 5 mm (×100)



(c) ミクロ写真 軸中心部 (×100)



(c) ミクロ写真 軸中心部 (×100)

写真一 6.2.1 ねじ鉄筋のマクロ、ミクロ写真

写真一 6.2.2 横節鉄筋のマクロ、ミクロ写真

6. 2. 2 ねじ筋鉄筋・ロックナット継手 A および充填継手 B

(1) ミクロ組織

継手 A および B のカプラーの引張前・後のミクロ組織を写真－6. 2. 3 および 6. 2. 4 に示す。両方ともオーステンパ球状黒鉛鋳鉄と呼ばれているものであり、その代表的な金属組織を示している。引張後も変化は認められない。

オーステンパ球状黒鉛鋳鉄は、球状黒鉛鋳鉄 (6. 2. 5 継手 E 参照) にオーステンパ処理を施したもので、オーステンパ処理とは 900℃ 程度に加熱することにより基地組織 (フェライト + パーライトの部分 (6. 2. 5 参照)) をオースナイト化させた後、230～430℃ の塩浴 ($\text{NaNO}_3 - \text{KNO}$) 中に焼き入れし、その温度で保持することにより高温変態してベイナイト (針状) の組織とするものである。このオーステンパ処理により、さらに格段の高強度化がなされ、かつ高塑性の性質が得られる。

(2) 硬さ試験

カプラーのブリネル硬さ結果を表－6. 2. 3、図－6. 2. 2 に示す。

継手 A のカプラーの平均硬さ $\text{HB} = 304$ 、継手 B $\text{HB} = 320$ に対し、引張試験後はそれぞれ $\text{HB} = 308$ 、 $\text{HB} = 324$ であり、ほとんど変化していない。

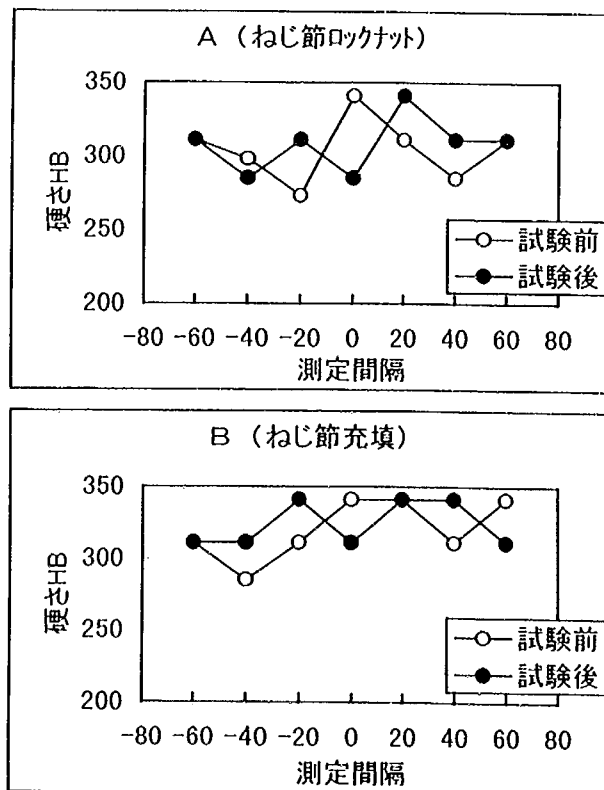
(3) シャルピー衝撃試験結果

シャルピー衝撃試験結果を表－6. 2. 4、図－6. 2. 3 に示す。測定位置は図－6. 2. 3 に示すように、継手 A は鉄筋母材部①とナット端部②、カプラーとナット緊結部③、継手 B は鉄筋母材部①、カプラー端部②である。

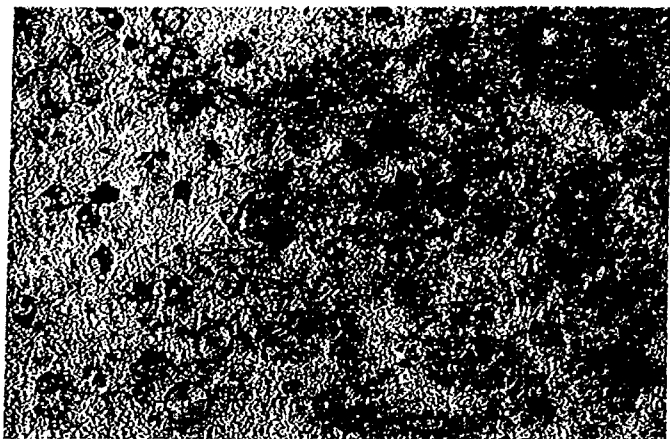
引張前の鉄筋母材の吸収エネルギーは、ねじ筋鉄筋 106J、横筋鉄筋 98J に対し、いずれも 49～52J であり、その位置も降伏して衝撃特性は低下している。

表－6. 2. 3 カプラーのブリネル硬さ試験結果

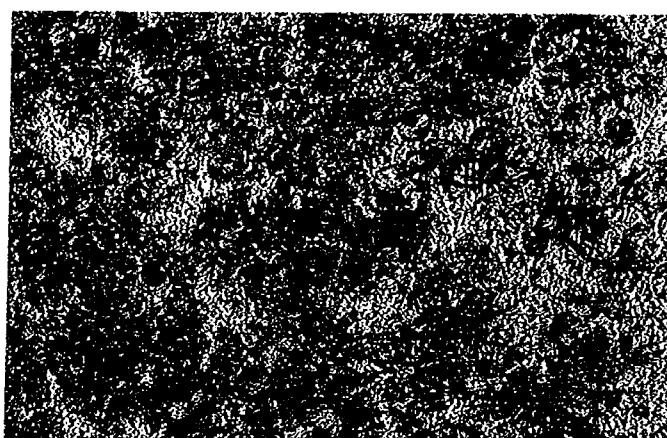
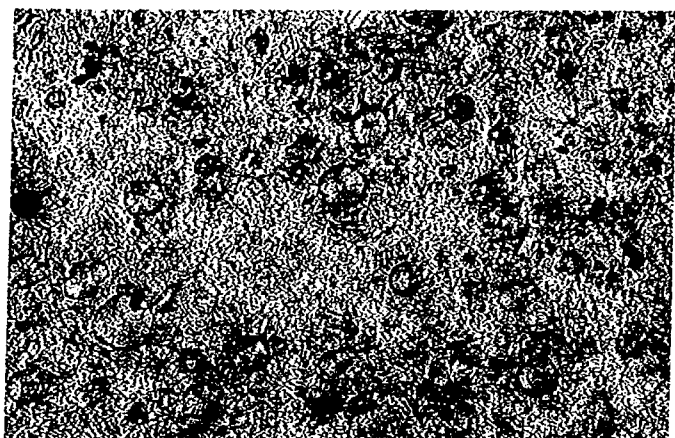
	A		B	
	試験前	試験後	試験前	試験後
全長	L=140mm 計測箇所 = 継手全長を20mm間隔で計測			
7				
6				
5				
4				
3	311	311	341	311
2	285	311	311	341
1	311	341	341	341
0	341	285	341	311
1	273	311	311	341
2	298	285	285	311
3	311	311	311	311
4				
5				
6				
7				
平均	304	308	320	324



図－6. 2. 2 継手 A, B の硬さ分布



表一 6.2.3 継手Aのミクロ組織

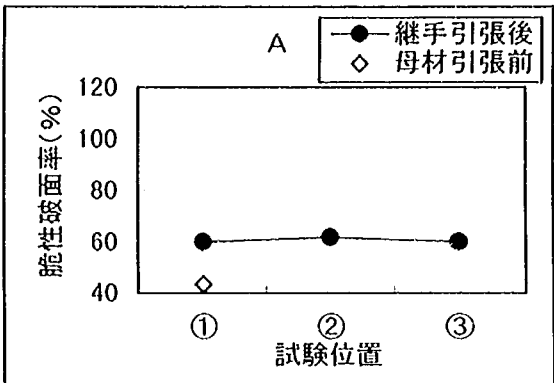
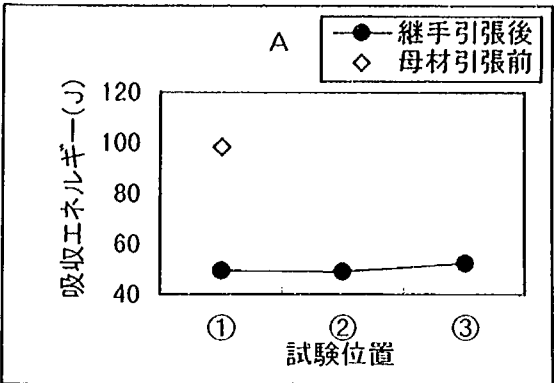
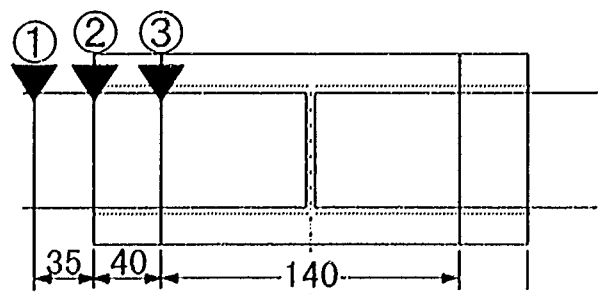


表一 6.2.4 継手Bのミクロ組織

表一 6.2.4 シャルピー衝撃試験結果

試料番号	試験温度 (°C)	吸収エネルギー kgf-m	吸収エネルギー J	脆性破面率 (%)
トルク固定式 A 1	0	5.7	56	60
		5.3	52	60
		5.0	49	60
	平均	5.3	52.3	60.0
トルク固定式 A 2	0	3.9	38	65
		5.7	56	60
		5.4	53	60
	平均	5.0	49.0	61.7
トルク固定式 A 3	0	5.0	49	60
		5.1	50	60
		5.0	49	60
	平均	5.0	49.3	60.0
有機グラウト B 1	0	4.7	46	65
		5.5	54	60
		4.9	48	65
	平均	5.0	49.3	63.3
有機グラウト B 2	0	5.0	49	65
		4.6	45	65
		5.4	53	60
	平均	5.0	49.0	63.3

(a)継手A



(b)継手B

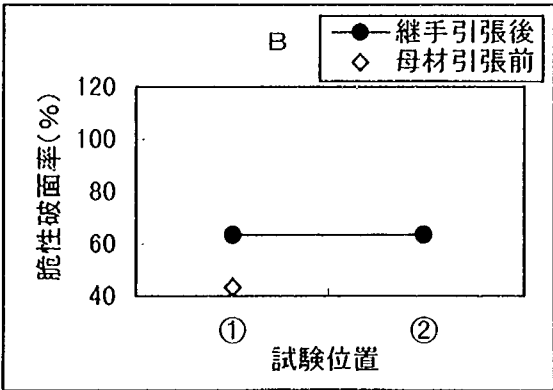
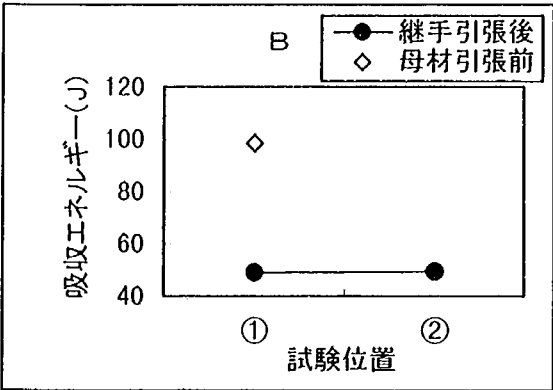
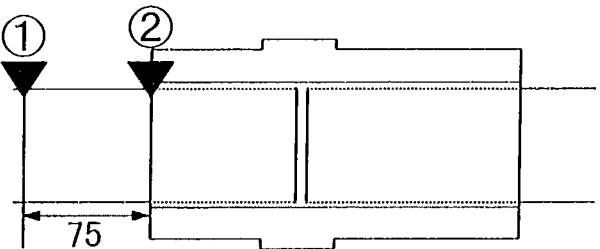


図-6.2.3 シャルピー衝撃試験結果

6.2.3 端部ねじ加工・摩擦圧接継手C

(1) ミクロ組織

継手Cのカプラーのミクロ組織を写真-6.2.5に、鉄筋母材部、鉄筋の熱影響部、圧接界面、ボルトの熱影響部、ボルト母材部の引張前・後のミクロ組織は写真-6.2.6のとおりである。図-6.2.4に観察位置を示す。

カプラー、鉄筋およびボルトの母材部は、正常な金属組織である。

熱影響部は、鉄筋およびボルトの結晶粒は微細化しており、焼きならし組織になっていることがわかる。

(2) 硬さ試験結果

引張前・後のボルト、カプラーの硬さを表-6.2.5、図-6.2.5に、鉄筋とボルトの圧接部の硬さを表-6.2.6および図-6.2.6に示す。

ボルトはHV=223であり、鉄筋より硬い。カプラーはHV=194であり、ボルトより小さくなっている。引張後のカプラーは、中央部がHV=241と大きくなっており部分的に降伏したものと考えられる。

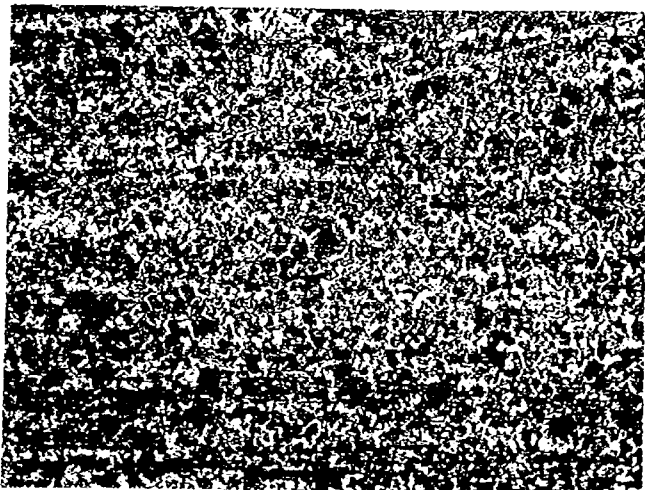
圧接部は、界面が最大のHV=276になっており、それから遠ざかるにしたがい小さくなり、界面から3mm程度で母材の硬さになっている。摩擦圧接は短時間で完了するので、熱影響部はガス圧接の1/2Dに比べ極めて小さいものである。引張後も熱の影響によって硬くなっているためか、測定範囲内では引張前とほぼ同じである。

(3) シャルピー衝撃試験結果

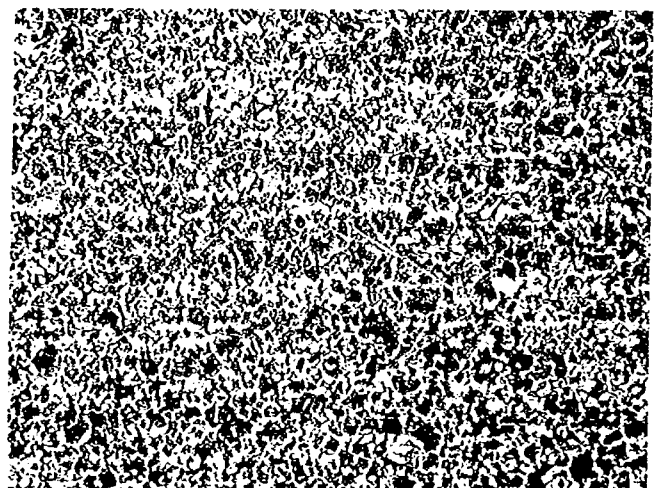
試験結果を表-6.2.7および図-6.2.7に示す。

鉄筋母材部は106Jであり正常である。ボルト母材部は27.7Jであり、鉄筋より硬いので小さくなっている。圧接部は熱の影響によりさらに小さく23.7Jになっている。

引張後は、圧接界面、ボルト部はほとんど変化していないが、鉄筋母材部は45.3Jと引張前の半分以下になっている。この傾向は、ガス圧接の場合とほぼ同じであり、ボルト部は硬く径も鉄筋よりわずかに太いので塑性変形が小さいのに対し、鉄筋は塑性変形することにより衝撃特性が低下し、鉄筋から破断するものと考えられる。

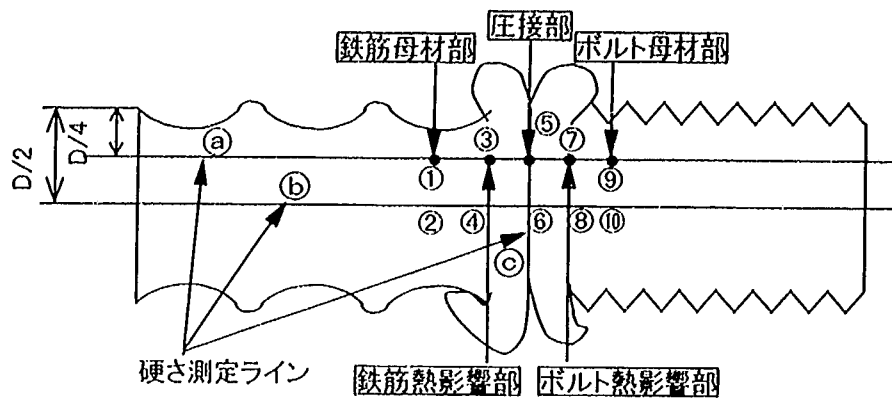


(a) 引張前



(b) 引張後

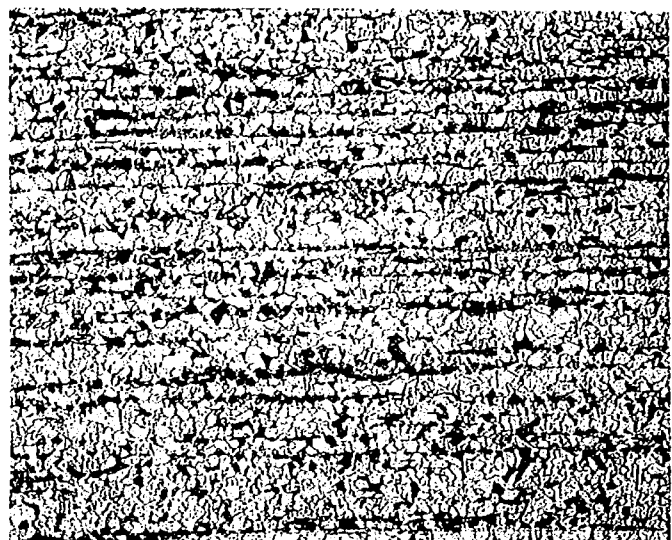
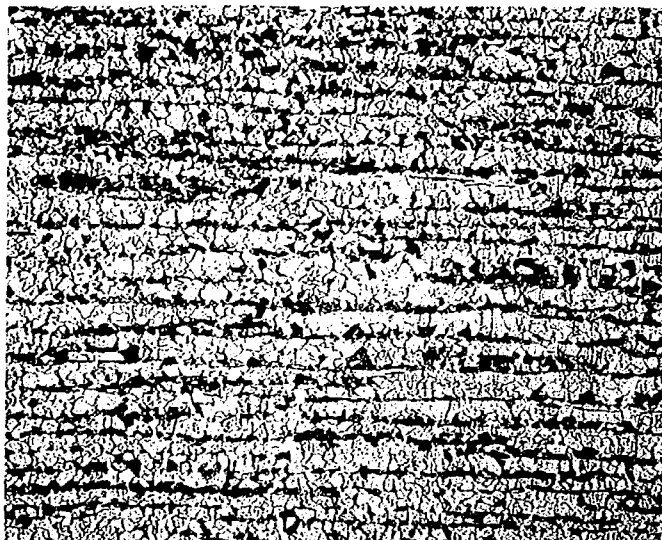
写真-6.2.5 カプラー



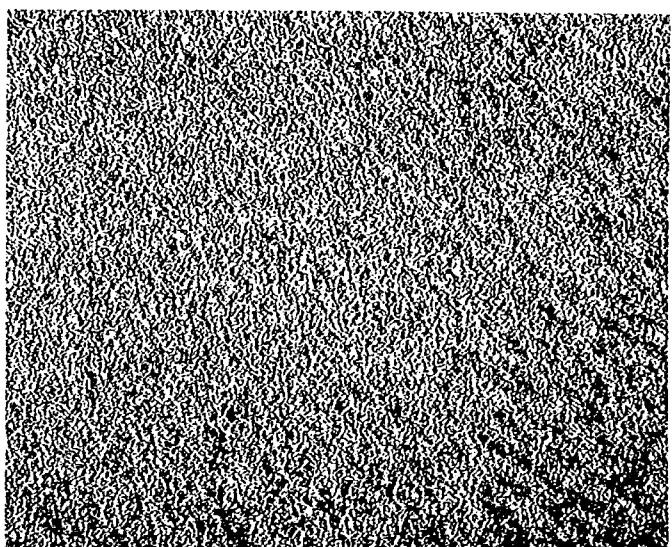
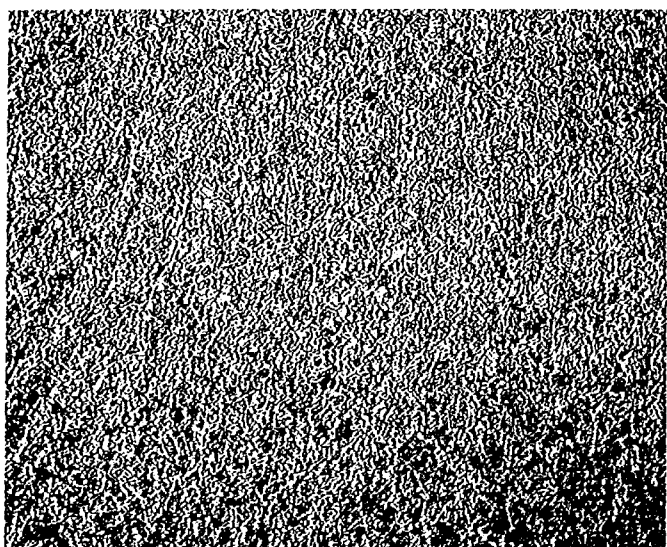
図一6.2.4 硬さ測定ライン，ミクロ組織観察およびシャルピー衝撃試験片採取位置図

引張前

引張後



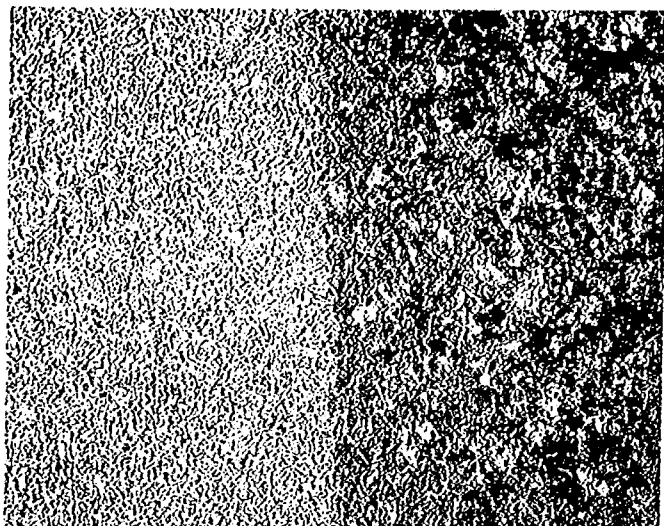
(a) 鉄筋母材部



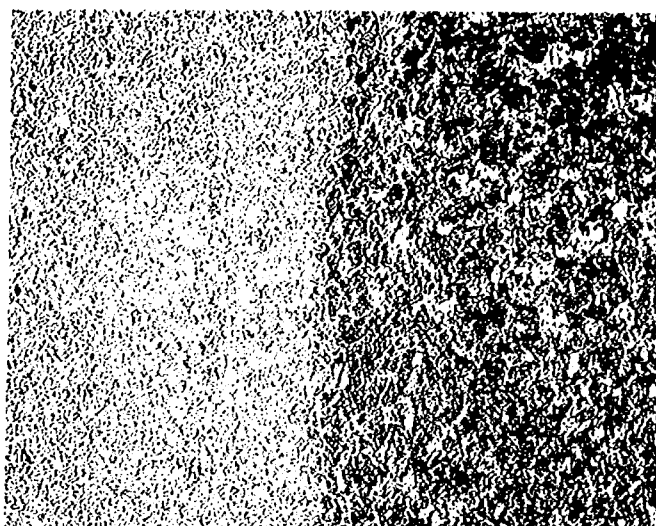
(b) 鉄筋熱影響部

写真一6.2.6 摩擦圧接部のマクロ写真（その1）

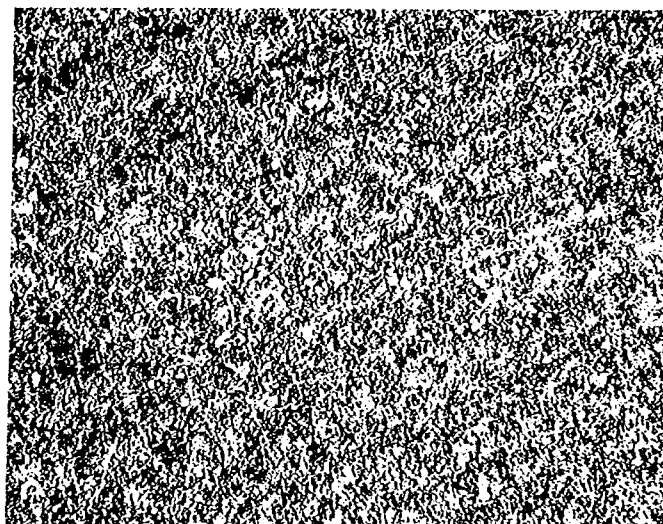
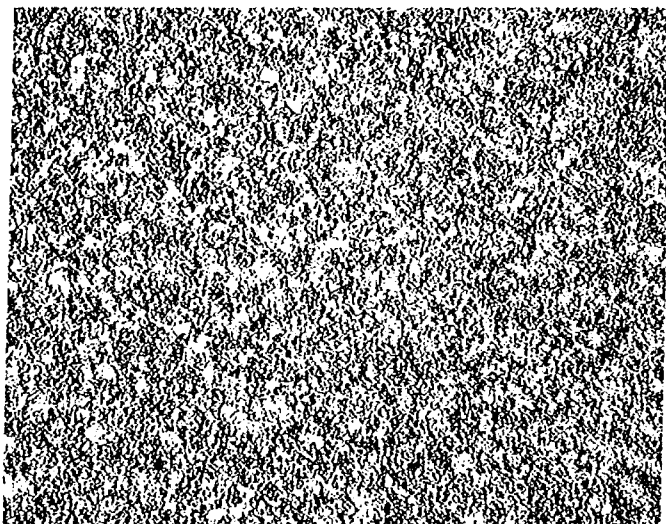
引張前



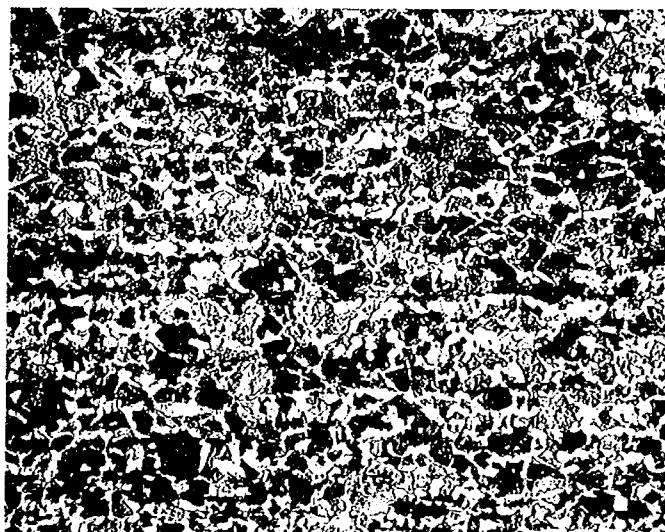
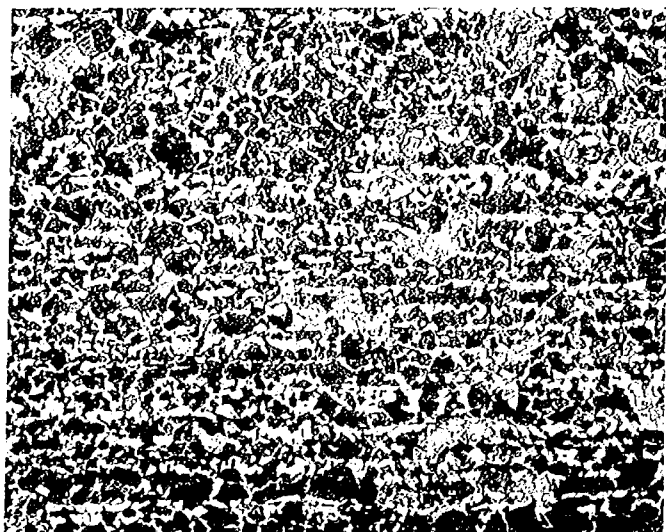
引張後



(c) 圧接部



(d) ボルト熱影響部



(e) ボルト部

写真-6.2.6 摩擦圧接部のマクロ写真 (その2)

表-6.2.5 ボルト, カプラー
(素材)の硬さ試験
引張前

ボルト 硬さ試験(HV10kgf)		
測定位置	D/4	D/2
1	224	225
2	221	227
3	223	221
4	226	225
5	222	227
6	223	225
平均	223	225

カプラー 硬さ試験(HV10kgf)		
測定位置	引張前	引張後
1	195	192
2	195	190
3	194	215
4	195	241
5	195	210
6	192	197
平均	194	208

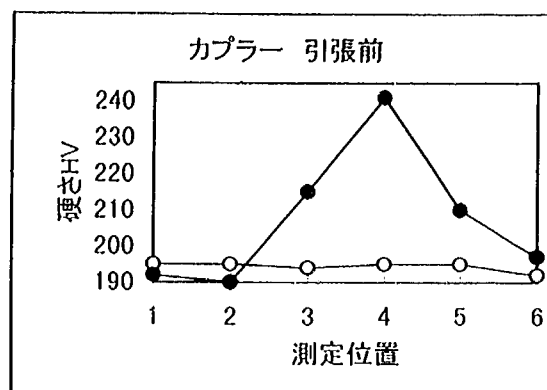
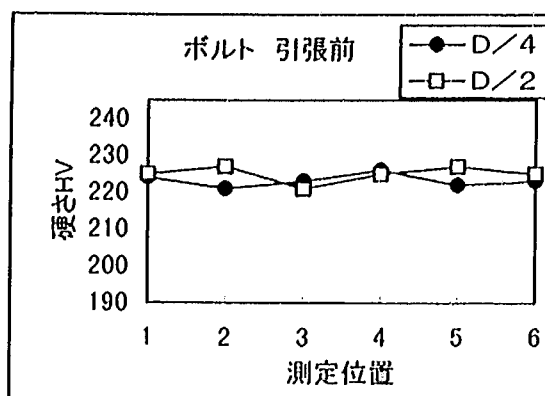


図-6.2.5 ボルト, カプラーの硬さ分布

表-6.2.6 硬さ試験結果 (圧接部)

①	鉄筋+ボルト圧接 表面から5mm		②	鉄筋+ボルト圧接 D/2部		備考
	引張前	引張後		引張前	引張後	
mm			mm			
-7	186	189	-7	166	187	鉄筋母材部
-6	185	187	-6	176	183	
-5	183	183	-5	174	187	
-4	188	184	-4	172	181	
	186	186		172	185	平均
-3	201	192	-3	181	194	鉄筋熱影響部
-2	204	201	-2	193	203	
-1	208	206	-1	196	212	平均
	204	200		190	203	
0	276	233	0	232	250	圧接界面
1	273	272	1	262	248	ボルト熱影響部
2	254	236	2	249	238	
3	226	209	3	222	206	平均
	251	239		244	231	
4	238	222	4	221	217	ボルト母材部
5	246	226	5	227	227	
6	253	236	6	239	231	
7	246	239	7	236	234	
	246	231		231	227	平均

③	鉄筋+ボルト圧接 圧接面(軸と直角)	
	引張前	引張後
mm		
-9	218	234
-8	219	247
-7	239	234
-6	212	237
-5	221	238
-4	226	237
-3	224	230
-2	217	232
-1	223	234
0	232	250
1	211	247
2	222	240
3	218	235
4	214	231
5	222	242
6	222	241
7	217	233
8	216	243
9	248	233
平均	222	238

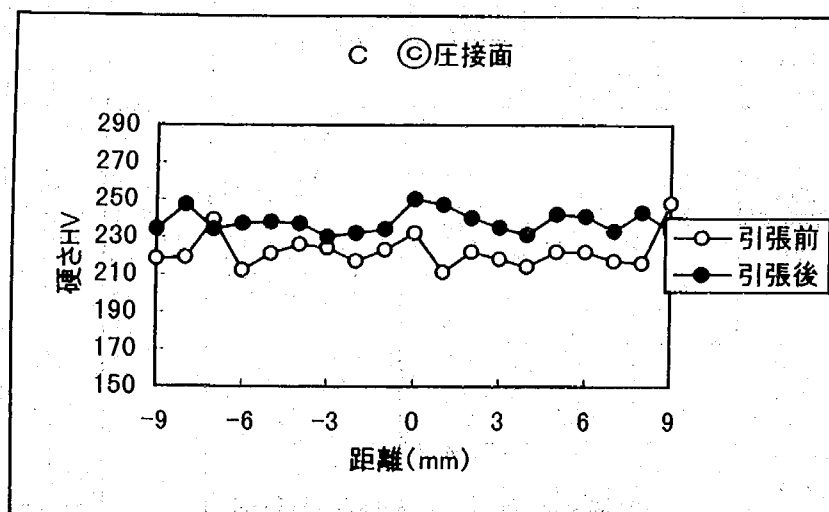
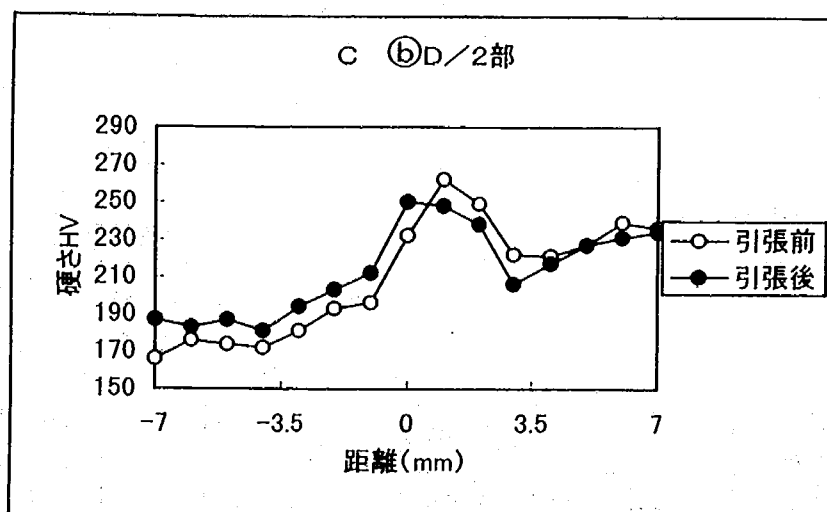
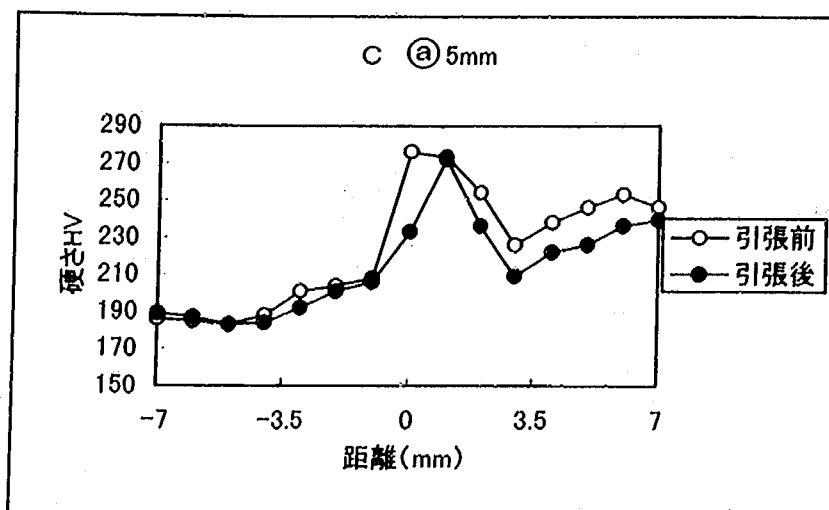


図-6.2.6 硬さ試験結果 (圧接部)

表-6.2.7 シャルピー衝撃試験結果

試験片 ノッチ底位置	引張前			引張後			試験 温度 (°C)
	試験片 No	吸収エネルギー (J)	脆性破面率 (%)	試験片 No	吸収エネルギー (J)	脆性破面率 (%)	
鉄筋母材部 ①	1	96	40	1	53	60	0
	2	108	35	2	41	70	0
	3	114	35	3	42	70	0
	平均	106.0	36.7	平均	45.3	66.7	0
鉄筋熱影響部 ②	1	131	25	1	138	15	0
	2	38	50	2	130	20	0
	3	126	25	3	145	10	0
	平均	98.3	33.3	平均	137.7	15.0	0
圧接界面 ③	1	25	55	1	22	60	0
	2	20	65	2	17	75	0
	3	26	50	3	19	70	0
	平均	23.7	56.7	平均	19.3	68.3	0
ボルト熱影響部 ④	1	25	90	1	25	90	0
	2	29	85	2	21	95	0
	3	18	90	3	23	90	0
	平均	24.0	88.3	平均	23.0	91.7	0
ボルト母材部 ⑤	1	26	85	1	32	80	0
	2	27	85	2	31	80	0
	3	30	85	3	30	85	0
	平均	27.7	85.0	平均	31.0	81.7	0

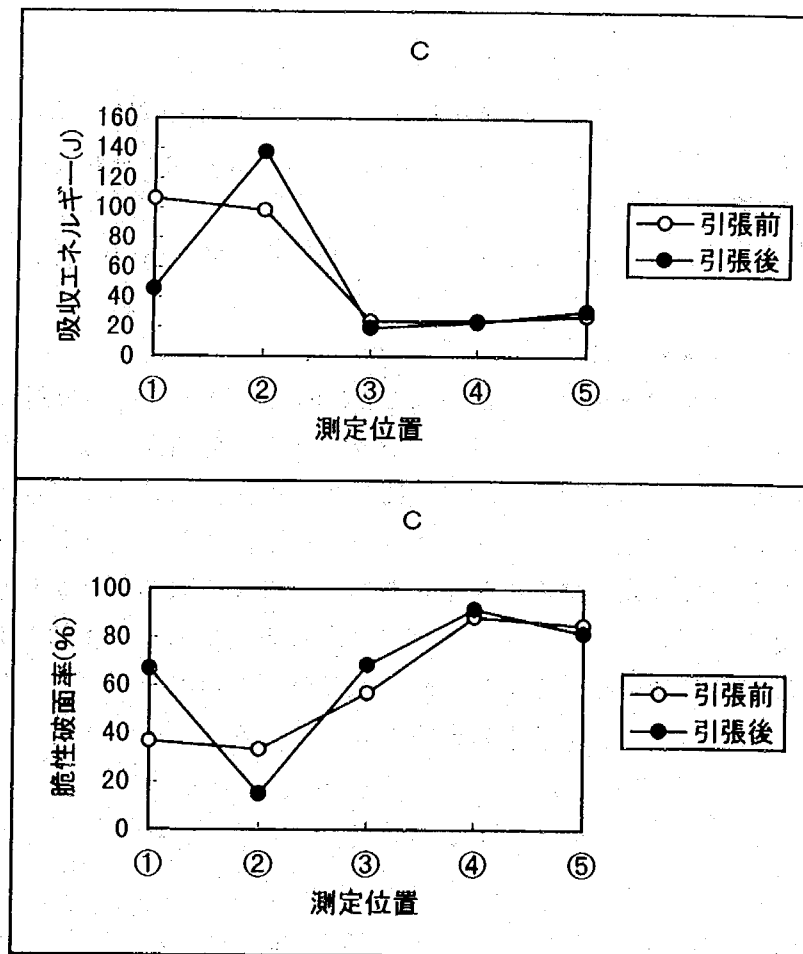


図-6.2.7 シャルピー衝撃試験結果

6.2.4 端部ねじ加工・圧着継手D

(1) ミクロ組織

継手Dのミクロ観察結果は写真-6.2.7のとおりである。観察位置を図-6.2.8に示す。継手作製後(引張前)のスリーブ内の鉄筋の組織は、母材と比べても変化はない。スリーブの組織は、鉄筋よりわずかに大きいものの通常どおりである。ボルトは非常に細かい組織になっている。

引張後もいずれも変化はない。

(2) 硬さ試験結果

硬さ試験は、図-6.2.9のようにスリーブ鉄筋、ボルト、スリーブの中心軸と表面から5mmのラインの①～⑤ほかに、鉄筋の節⑥と、節の間を通る軸方向に直角なライン⑦も測定した。

硬さ試験結果は軸方向の硬さ分布を表-6.2.8、図-6.2.10、軸直角方向の硬さ分布を表-6.2.9、図-6.2.11に示す。

スリーブは、測定位置にかかわらず、また、引張前・後にかかわらずほぼ一定であり、引張前 HV=210、引張後 HV=208 であった。

鉄筋は、スリーブの外側(母材部)は引張前 HV=約 160 に対し、引張後は HV=230 程度と大きくなり、通常の傾向を示している。スリーブ内の鉄筋は、波打っていることがわかる。これは、スリーブの鍛造圧着により、出っ張っている節の位置は大きな塑性変形を受け、節の間はその影響が少ないためと考えられる。これを、軸直角方向の分布で見ると、図-6.2.11のように、節の位置のスリーブは表面が小さく、HV=200 程度であるが、鉄筋接触位置では最大となり HV=240 程度になっている。鉄筋もその位置ではほぼ同じになっており、内部はわずかに小さくなる傾向がある。これに比べ、節の間では HV=200~220 程度である。

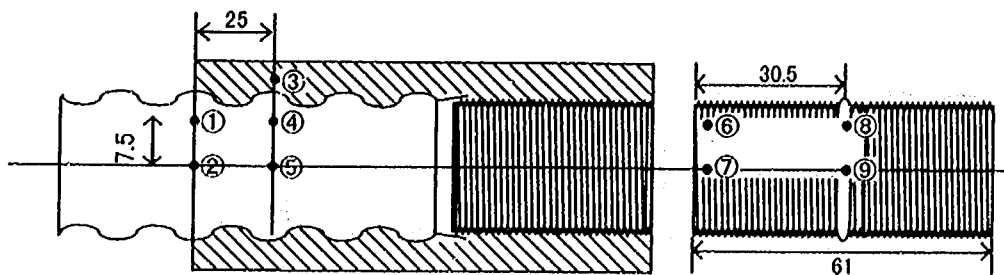
スリーブが鉄筋と一体となって挙動するのは、図-6.2.10の③④より、スリーブ端部から1個目の節より内側と考えられる。

ボルトも測定位置による違いはほとんどなく、引張前・後でも引張前 HV=304、引張後 HV=324 であった。

(3) シャルピー衝撃試験結果

シャルピー衝撃試験用の試験片は、図-6.2.12のように、鉄筋の母材部①、スリーブの境界部②、スリーブ内③と、ボルトのスリーブ境界部④の4箇所から採取した。

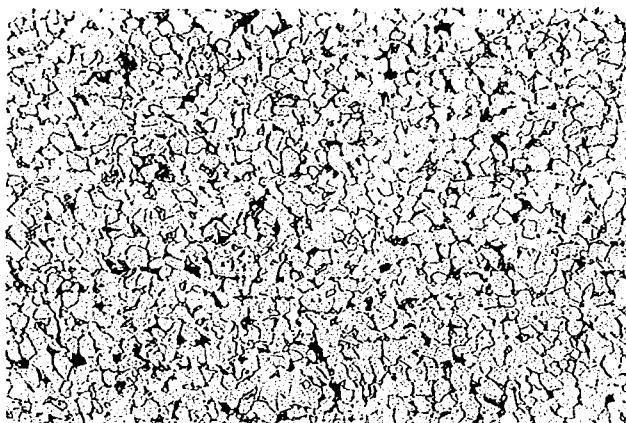
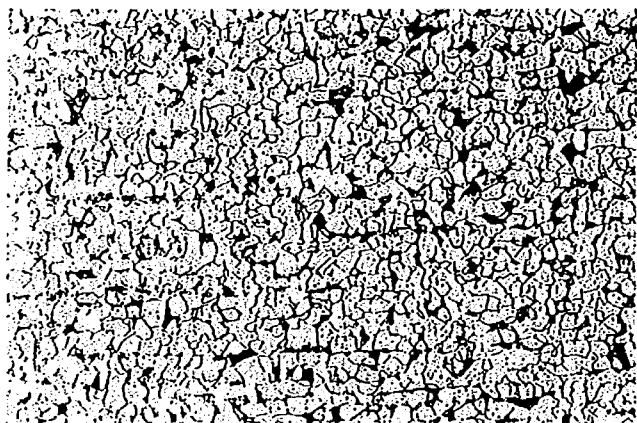
試験結果を表-6.2.10 および図-6.2.13に示す。引張前の鉄筋の吸収エネルギーは、母材部は 117J に対しスリーブ内は 56J と小さくなっている。これは硬さ分布からも明らかのようにスリーブ圧着に伴う塑性変形により低下したものと考えられる。しかしながら、引張後は、母材部 53J と大きく低下したのに対し、スリーブ内は 66J であり引張前とあまり変わらない。母材部は引張によって塑性変形を受けているが、スリーブ内はスリーブと一体となって挙動しているため剛性が高くなっているためと考えられる。



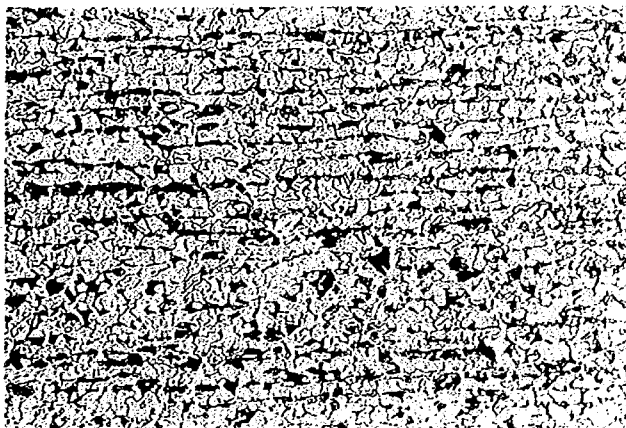
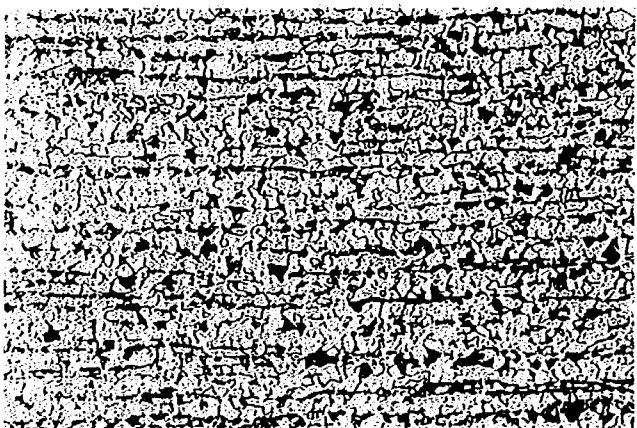
図一 6.2.8 ミクロ組織観察位置

引張前

引張後



(a) スリーブ

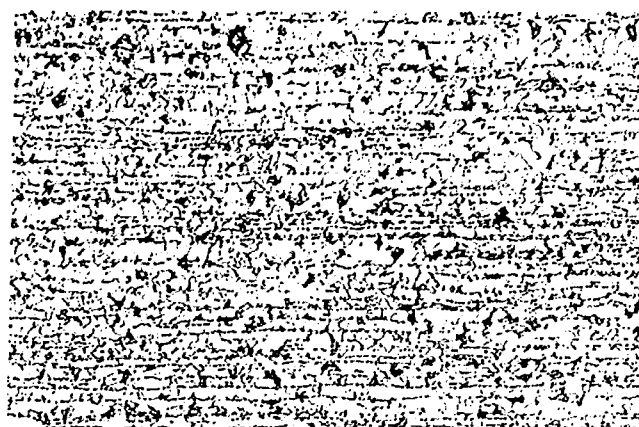
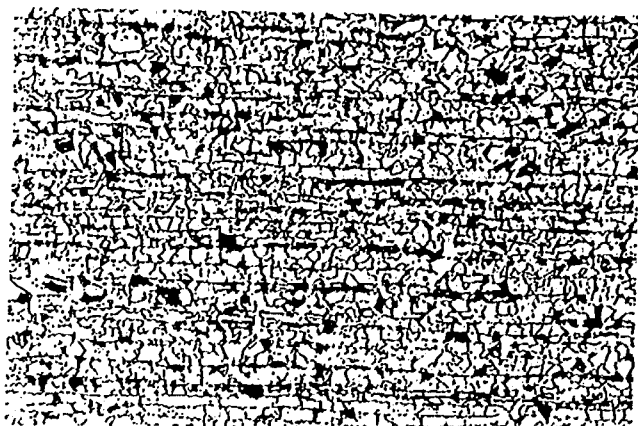


(b) スリーブ端部の鉄筋

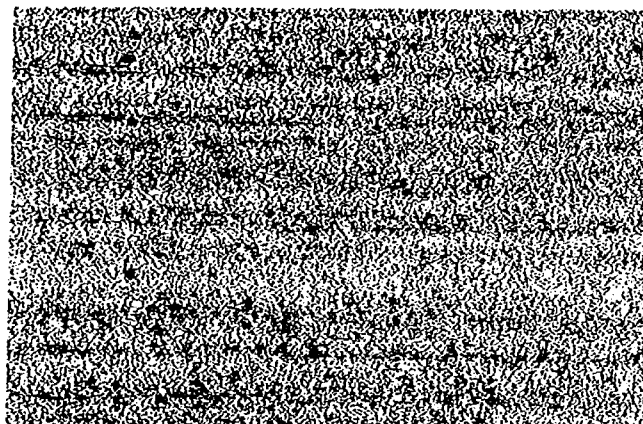
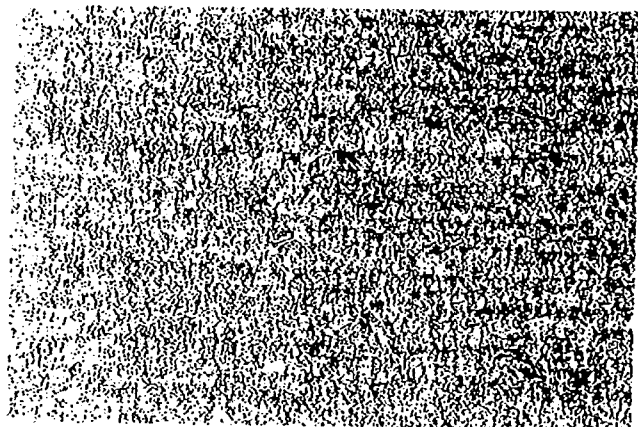
写真一 6.2.7 継手Dのミクロ組織 (その1)

引張前

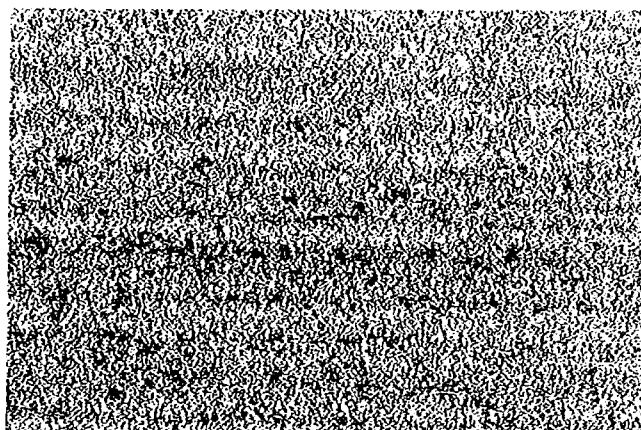
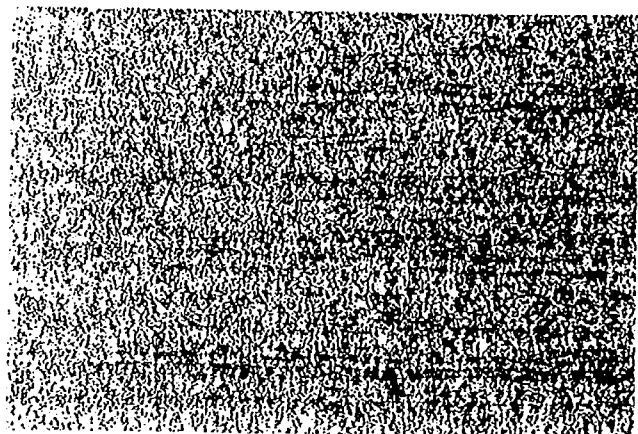
引張後



(c) スリーブ内の鉄筋



(d) ボルト



(e) ボルトのスリーブ境界部

写真一 6.2.7 継手Dのミクロ組織 (その2)

表-6.2.8 硬さ試験結果(軸方向)

① スリーブ(中心軸)			② 鉄筋(表面から5mm)			③ 鉄筋(軸中心)			④ ボルト軸(表面から5mm)			⑤ ボルト(軸中心)		
測定位置	試験前	試験後	測定位置	試験前	試験後	測定位置	試験前	試験後	測定位置	試験前	試験後	測定位置	試験前	試験後
1	207	215	-25	160	228	-25	156	230	1	305	323	1	293	272
2	209	214	-24	160	233	-24	155	236	2	299	320	2	297	275
3	210	216	-23	160	229	-23	158	233	3	298	312	3	294	279
4	204	215	-22	162	227	-22	157	236	4	298	311	4	285	277
5	208	216	-21	160	228	-21	156	230	5	297	318	5	283	280
6	208	210	-20	162	227	-20	153	240	6	305	322	6	282	281
7	206	208	-19	159	224	-19	154	234	7	303	320	7	294	282
8	208	213	-18	162	223	-18	157	225	8	309	320	8	291	281
9	208	201	-17	159	212	-17	155	223	9	308	322	9	286	281
10	214	203	-16	162	219	-16	152	222	10	304	324	10	280	283
11	218	205	-15	161	224	-15	152	220	11	308	324	11	276	280
12	217	207	-14	160	220	-14	154	222	12	300	323	12	277	280
13	224	209	-13	161	228	-13	156	221	13	305	326	13	276	276
14	213	207	-12	161	228	-12	154	221	14	302	326	14	275	278
15	212	212	-11	161	227	-11	155	222	15	304	323	15	284	280
16	210	212	-10	160	227	-10	158	218	16	301	325	16	289	277
17	209	216	-9	162	224	-9	156	223	17	305	328	17	295	279
18	200	210	-8	162	221	-8	154	228	18	301	324	18	289	277
19	200	209	-7	162	221	-7	156	224	19	302	328	19	292	280
20	206	210	-6	161	220	-6	155	226	20	302	329	20	292	277
21	207	211	-5	160	216	-5	156	225	21	306	330	21	291	279
22	209	211	-4	159	220	-4	156	226	22	305	332	22	291	280
23	203	211	-3	162	214	-3	157	221	23	306	333	23	289	277
24	204	207	-2	162	220	-2	157	219	24	302	332	24	289	278
25	206	210	-1	162	207	-1	157	213	25	304	332	25	296	277
26	202	208	1	159	210	1	161	210	26	304	325	26	290	278
27	202	207	2	171	212	2	159	207	27	306	326	27	291	279
28	205	203	3	174	210	3	159	201	28	301	321	28	291	281
29	208	207	4	178	207	4	164	197	29	303	319	29	289	285
30	214	206	5	179	204	5	170	194	30	310	321	30	282	283
31	215	213	6	175	205	6	181	193	31	309	323	31	278	287
32	216	202	7	179	203	7	184	196						
33	213	211	8	183	204	8	187	197	平均	304	324	平均	287	279
34	211	214	9	193	202	9	191	196						
35	206	208	10	202	201	10	193	204						
36	206	207	11	211	206	11	197	204						
37	211	206	12	217	209	12	203	208						
38	209	198	13	225	215	13	201	212						
39	212	200	14	228	223	14	208	213						
40	210	207	15	227	226	15	213	217						
41	219	207	16	225	225	16	213	219						
42	215	200	17	220	228	17	217	221						
43	209	207	18	218	220	18	216	218						
44	213	203	19	212	222	19	215	217						
45	216	204	20	204	216	20	214	217						
46	214	203	21	198	214	21	213	213						
47	215	204	22	201	204	22	211	208						
48	216	203	23	195	200	23	206	204						
49	216	201	24	195	198	24	202	203						
50	215	215	25	198	200	25	199	197						
			26	202	200	26	197	199						
平均	210	208	27	204	200	27	196	197						
			28	214	200	28	197	202						
			29	220	209	29	201	199						
			30	221	213	30	203	203						
			31	231	217	31	209	207						
			32	233	222	32	213	210						
			33	235	231	33	216	217						
			34	230	229	34	219	215						
			35	223	230	35	218	220						
			36	219	229	36	216	221						
			37	213	227	37	221	215						
			38	206	219	38	219	221						
			39	201	216	39	216	218						
			40	203	207	40	215	209						
			41	202	208	41	211	206						
			42	203	203	42	204	208						
			43	202	200	43	201	207						
			44	203	200	44	202	203						
			45	206	202	45	204	201						
			46	212	207	46	203	202						
			47	223	211	47	207	203						
			48	226	210	48	209	209						
			49	230	217	49	214	205						
			50	235	219	50	213	211						

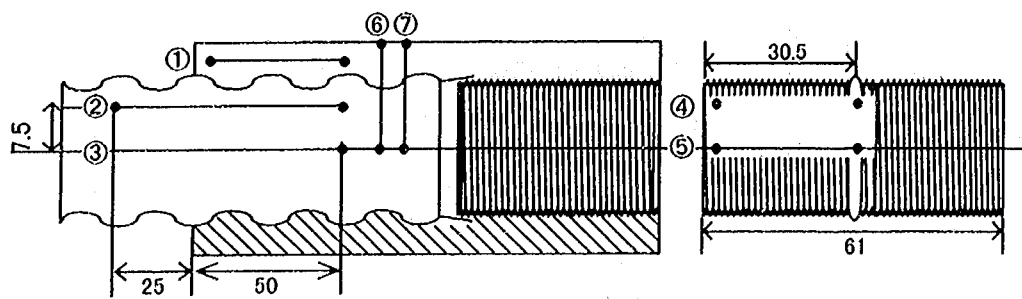


図-6.2.9 硬さ測定位置

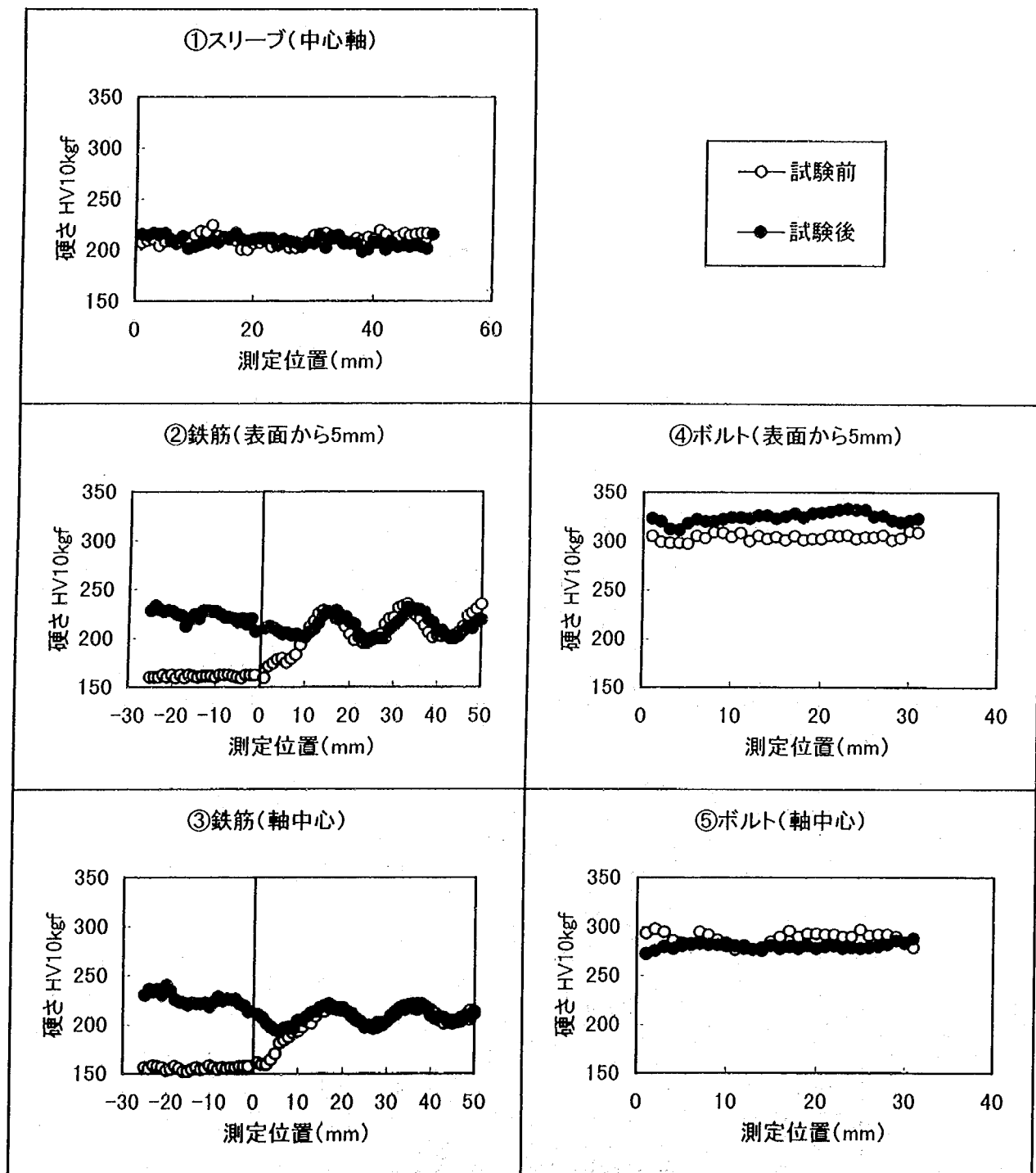


図-6.2.10 硬さ分布 (軸方向)

表-6.2.9 硬さ試験結果 (スリーブ+鉄筋軸直角方向)

⑥ (節)			⑦ (節間)		
測定位置	引張前	引張後	測定位置	引張前	引張後
1	204	213	1	204	201
2	202	208	2	203	203
3	207	203	3	196	205
4	208	209	4	200	208
5	209	205	5	206	212
6	220	219	6	215	214
7	228	213	7	217	218
8	216	223	8	236	229
9	217	219	9	235	232
10	214	221	10	239	236
11	210	213	11	241	232
12	212	214	12	238	226
13	213	215	13	234	226
14	215	216	14	236	226
15	220	218	15	235	227
16	218	217	16	235	231
17	223	220	17	232	209
18	224	214	18	210	224
19	216	212	19	214	214
20	214	193	20	233	214
21	218	209	21	229	221
22	215	208	22	239	229
23	205	216	23	236	218

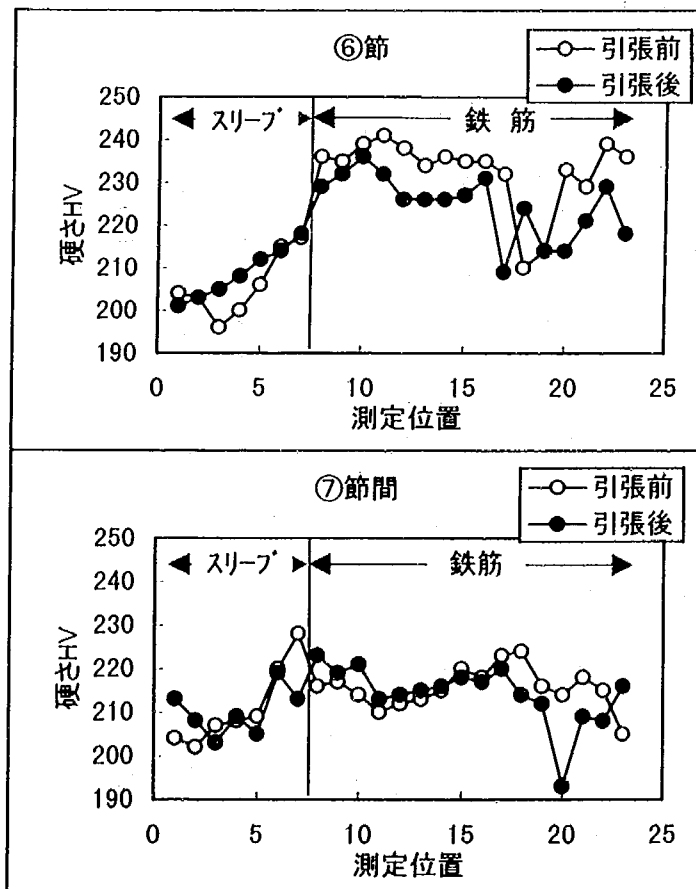


図-6.2.11 硬さ分布 (スリーブ+鉄筋軸直角方向)

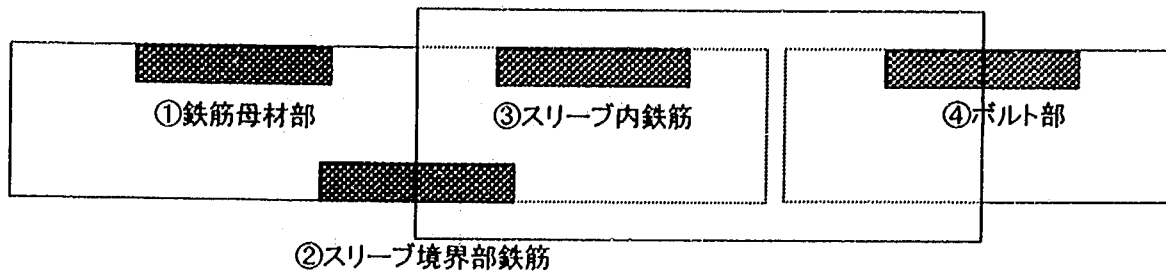


図-6.2.12 衝撃試験片採取位置図

表-6.2.10 シャルピー衝撃試験結果

	試料明細	番号	吸収エネルギー J	脆性破面率 (%)	試験温度 (℃)	
引張試験前	鉄筋母材部	①	116	30	0	
			108	30	0	
			127	25	0	
	平均			117.0	28.3	0.0
	スリーブ内鉄筋	③	53	60	0	
			53	60	0	
			63	55	0	
	平均			56.3	58.3	0.0
	ボルト部	④	117	0	0	
			170	0	0	
111			0	0		
平均			132.7	0.0	0.0	
引張試験後	鉄筋母材部	①	58	60	0	
			53	60	0	
			47	65	0	
	平均			52.7	61.7	0.0
	スリーブ境界部鉄筋	②	57	55	0	
			55	60	0	
			46	65	0	
	平均			52.7	60.0	0.0
	スリーブ内鉄筋	③	77	45	0	
			58	60	0	
64			55	0		
平均			66.3	53.3	0.0	

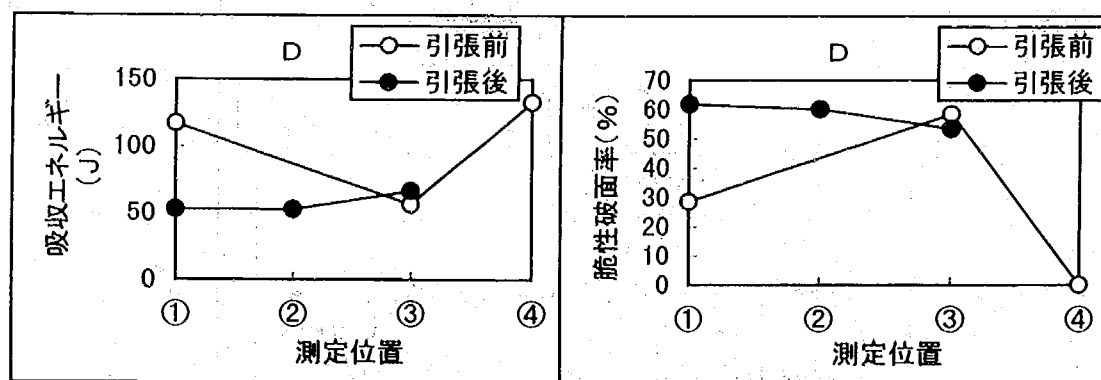


図-6.2.13 シャルピー衝撃試験結果

6.2.5 スリーブ・充填継手E

(1) ミクロ組織

継手E-1, E-2についての顕微鏡観察(倍率100倍)は、ひずみが最大になる継手中央部付近(中央)とその両側(中央±19mm)を、引張試験前および引張試験後で行った。その結果を写真-6.2.8~6.2.9に示す。

スリーブは球状黒鉛鋳鉄製である。鋳鉄は、基本的に最大固溶限炭素量以上のCを含むFe-Cの合金と考えられ、凝固した組織中に黒鉛(炭素)結晶が見られるのが特徴である。この黒鉛の形状は鋳鉄の諸性質に大きな影響を及ぼし、球状黒鉛鋳鉄は片状黒鉛鋳鉄(ねずみ鋳鉄など)に比較して機械的性質(強度、伸び)が著しく向上する性質がある。球状黒鉛鋳鉄の製造方法は、銑鉄、スクラップ等を溶解した溶湯にMgを添加する球状化処理を行い、黒鉛の発生を促進させる接種を行った後、鋳型に流し込み凝固させて製造するものである。この球状黒鉛鋳鉄の鋳放し(AS CAST)の組織は、黒い球状化した黒鉛の周囲に白色のフェライトが見られ、さらにその周囲に黒色のパーライトが観察されるブルアイ(雄牛の目)組織を呈するのが特徴である。

両継手のスリーブとも、引張試験前と引張試験後の組織は全体がブルアイ組織で球状化も良好(95%程度)であった。また、パーライト率も50%以上であり、良好な組織であると言える。

引張試験前・後の組織を比較しても、顕微鏡観察写真に差は認められない。

(2) 硬さ試験結果

1) スリーブ

スリーブのブリネル硬さは、図-6.2.14のように中央から両側に継手E-1は20mmピッチ、E-2は30mmピッチで測定した。

硬さの結果は、表-6.2.11 および図-6.2.15のとおりである。両継手とも、全長にわたって、引張前・後ともほぼ一定であり、E-1の平均値は引張前HV=216が引張後HV=217に、E-2は引張前HV=235が引張後HV=226であった。

2) 鉄筋

鉄筋の硬さ試験の結果を表-6.2.12 および図-6.2.16, 6.2.17に示す。

継手E-1はスリーブの外の鉄筋母材部なので引張前HV=163に対し、引張後HV=219と大きくなっている。

スリーブ内は、図-6.2.17のようにスリーブの端部から70~80mm程度内部まではほぼ直線的に低下し、それより内部ではほぼ一定となっている。

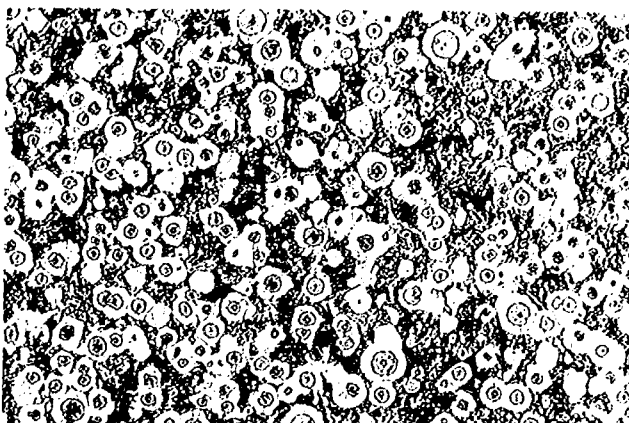
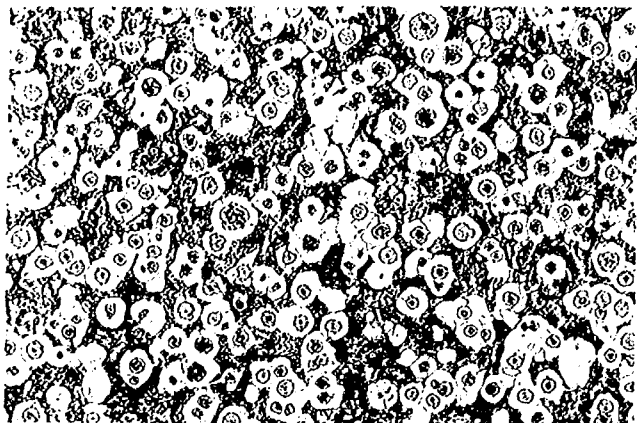
(3) シャルピー衝撃試験結果

継手E-1の引張後の鉄筋母材部、スリーブ端部の鉄筋のシャルピー衝撃試験結果を表-6.2.13, 図-6.2.18に示す。

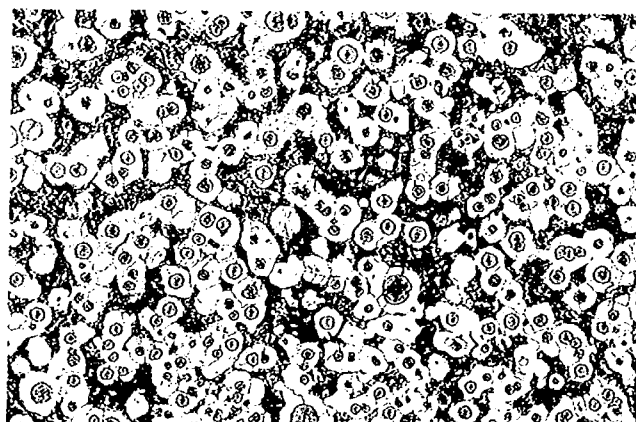
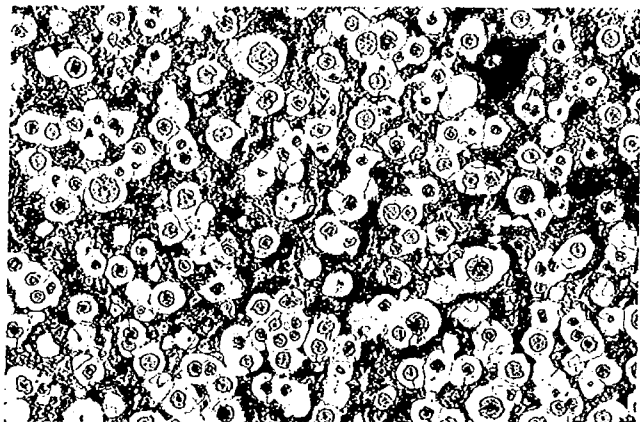
鉄筋母材の引張前の吸収エネルギーは106Jに対して引張後は62J、スリーブ端部は57Jに小さくなっている。これは他の継手の傾向と同じである。

引張前

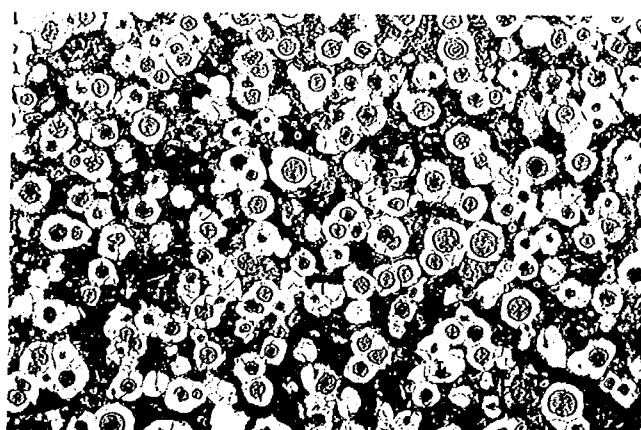
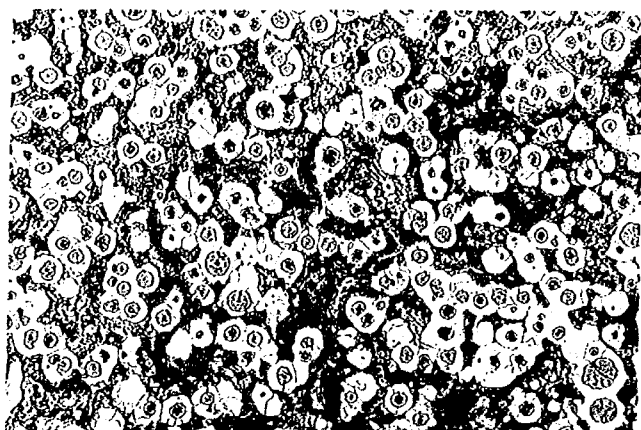
引張後



(a) スリーブ中央-19mm



(b) スリーブ中央

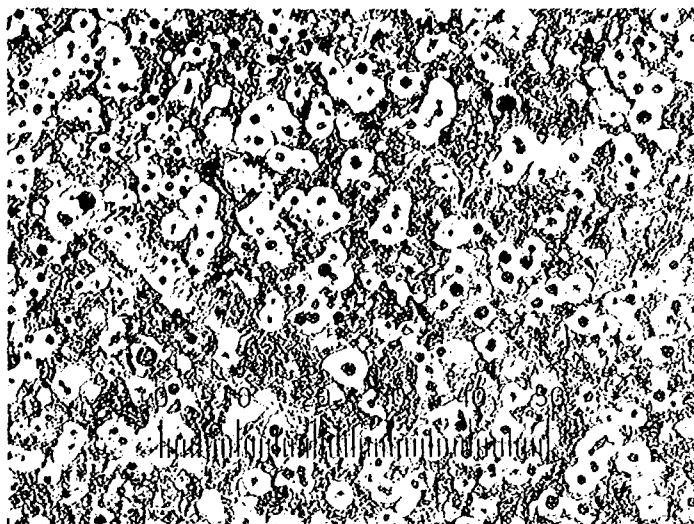
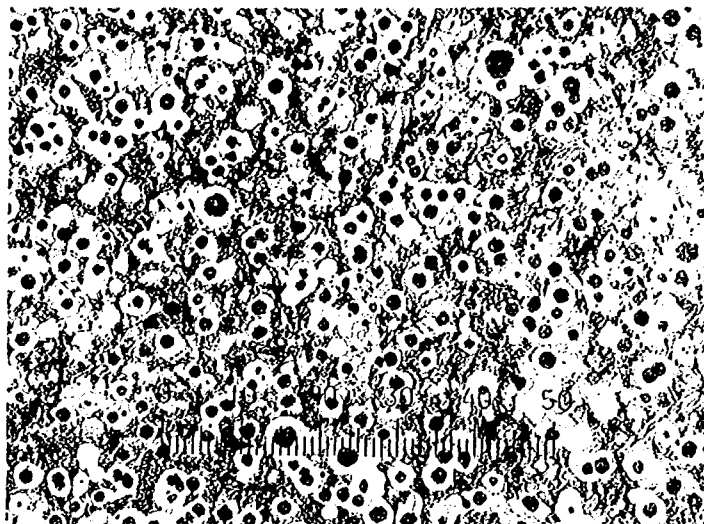


(c) スリーブ中央+19mm

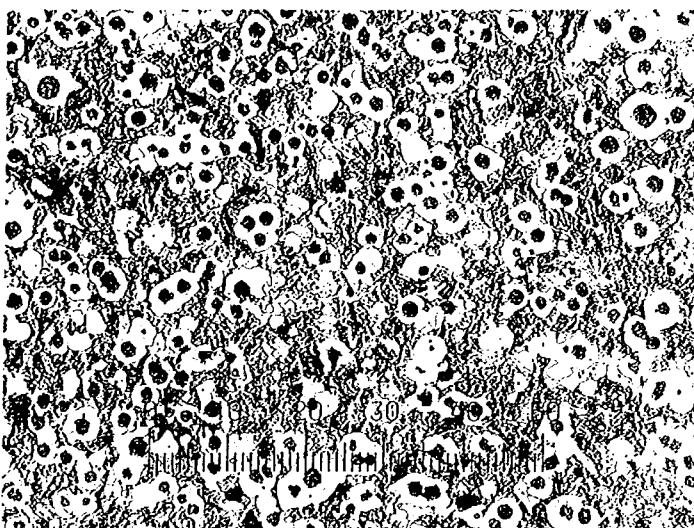
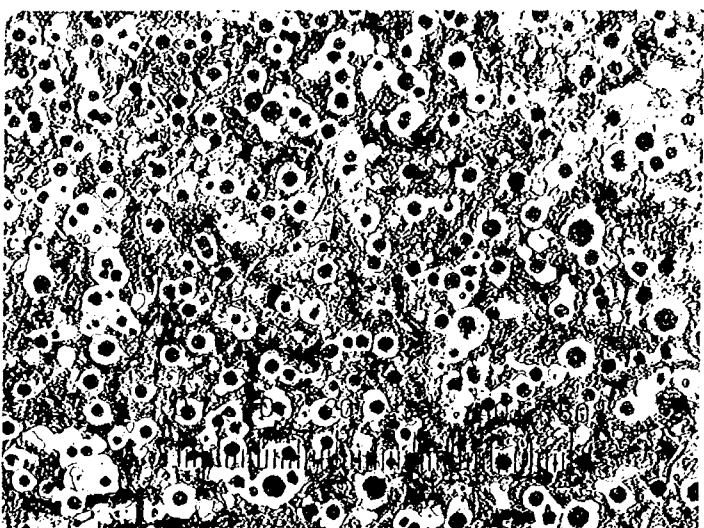
写真-6.2.8 継手E-1のミクロ組織

引張前

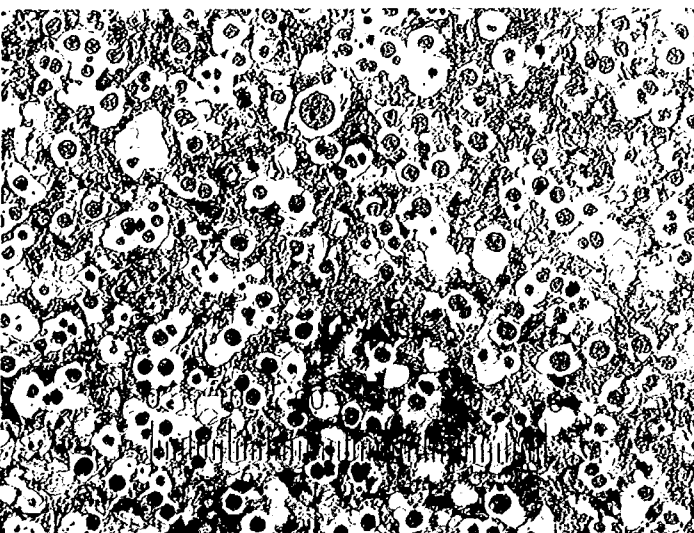
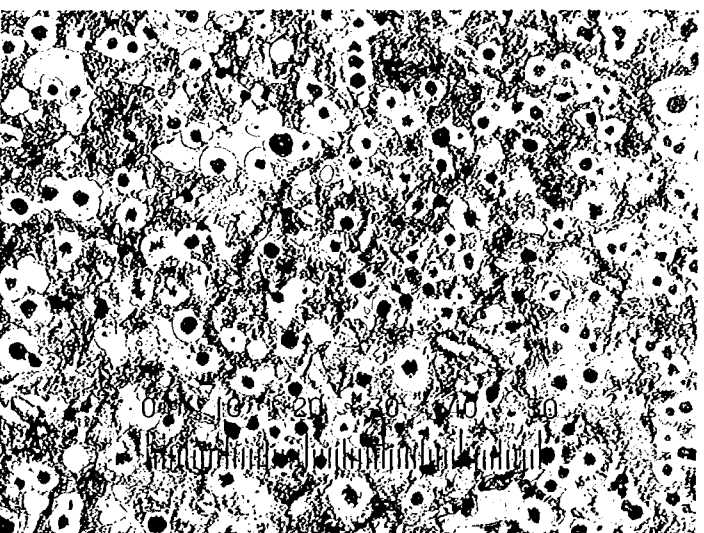
引張後



(a) スリーブ中央-19mm



(b) スリーブ中央



(c) スリーブ中央+19mm

写真-6.2.9 継手E-2のミクロ組織 (その2)

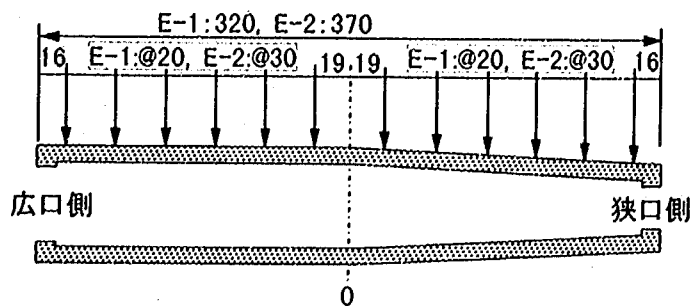


図-6.2.14 スリーブの硬さ測定位置

表-6.2.11 スリーブの硬さ試験結果

	E-1		E-2	
	試験前	試験後	試験前	試験後
全長	L=320mm		L=370mm	
	計測箇所 = 継手全長を20mm間隔で計測			
7	214	206		
6	223	223	241	241
5	214	214	241	235
4	223	223	235	229
3	206	214	229	229
2	223	223	229	229
1	214	214	229	223
0	214	206	235	229
1	206	214	229	229
2	223	214	235	223
3	214	223	241	217
4	223	214	229	223
5	214	214	241	217
6	214	223	241	217
7	214	223		
平均	216	217	235	226

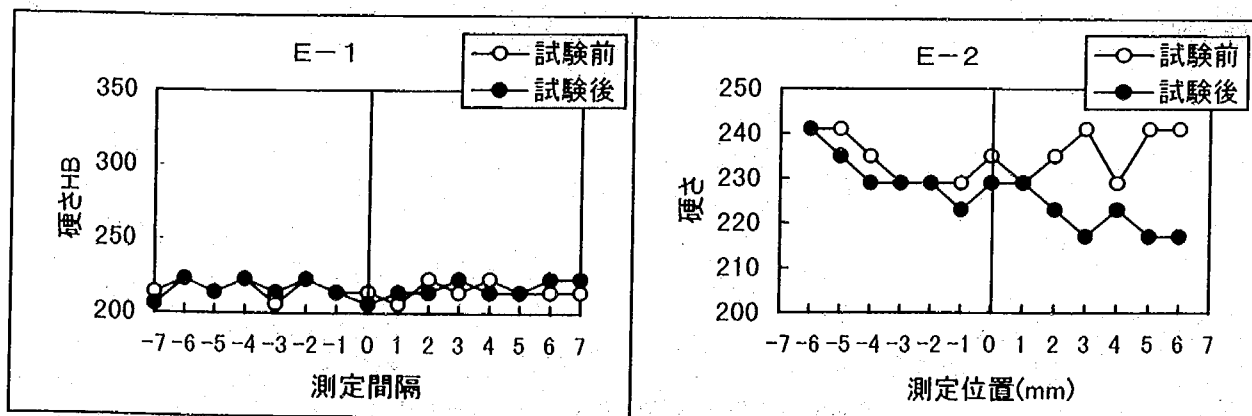


図-6.2.15 継手E-1, E-2の硬さ分布

表-6. 2. 12 継手E-1, E-2の鉄筋硬さ試験結果

(a) 継手E-1

試験位置	引張試験前		引張試験後	
	5mm	軸中央	5mm	軸中央
1	160	154	221	216
2	164	161	219	222
3	162	165	219	215
4	163	168	219	224
5	161	166	219	211
6	159	165	219	221
平均	162	163	219	218

(b) 継手E-2

測定位置 mm	破断側		伸び側		測定位置 mm	破断側		伸び側	
	D/2	D/4	D/2	D/4		D/2	D/4	D/2	D/4
2					102	194		177	
4	170	170	177	177	104	202.5	200	174.5	179.5
6	172.5		179.5		106	200		174.5	
8	170	172.5	179.5	177	108	201.5	202.5	181.5	180.5
10	168.5		179.5		110	200		179.5	
12	170	173	180.5	177	112	200	200	182	183.5
14	170		175.5		114	202.5		182.5	
16	168	172.5	178.5	178.5	116	204.5	205	182.5	193.5
18	170		176.5		118	214		187	
20	172.5	173.5	179.5	177	120	212.5	209.5	195	195
22	170		180.5		122	220		196.5	
24	172	174.5	181	177	124	217	217	198.5	192.5
26	171		180.5		126	219		201.5	
28	172.5	174.5	177	177	128	217.5	218	193.5	191.5
30	171		177		130	220		192.5	
32	174	174.5	174.5	176.5	132	220	219	195	197.5
34	172.5		178		134	227		197.5	
36	174	174.5	178	175.5	136	229	224.5	200.5	208
38	172.5		177		138	238		204	
40	173.5	172.5	178.5	175.5	140	239	239	208	207
42	170		178.5		142	243		208	
44	173	172.5	178	175.5	144	239	242	205	207
46	174		177		146	238		205	
48	177	175.5	177	175.5	148	236	239	206.5	207
50	175		176		150	239		209	
52	182	176.5	176.5	175.5	152	241	239	216	221
54	177		177		154	249		223	
56	182	179.5	176	175.5	156	248	246.5	226	229
58	178		174.5		158	253		229.5	
60	181	174.5	177	174	160	252	252	232	227
62	177		175.5		162	253		229	
64	182	177	175.5	175.5	164	252	250	226	227.5
66	176		177		166	247		226	
68	182	174.5	175	175.5	168	247	245	226	232
70	177		175.5		170	250		226	
72	181	174.5	175.5	176	172	252	247	235	241.5
74	182		176.5		174	260		237	
76	182	172.5	171	174.5	176	265	260	239	241
78	178		179.5		178	270		243	
80	178.5	174.5	177	174.5	180	272	270	239	235
82	176		175		182	277		236	
84	181	182	175	176	184	276	273	232	232
86	184		175.5		186	273		231	
88	192.5	188	178.5	174.5	188	273	273	229	239
90	192.5		174.5		190	270		235	
92	192.5	191.5	175.5	174.5	192	272	273	239	246.5
94	192.5		175.5						
96	190	186	177	175.5					
98	185.5		177.5						
100	193.5	191.5	177	175.5					

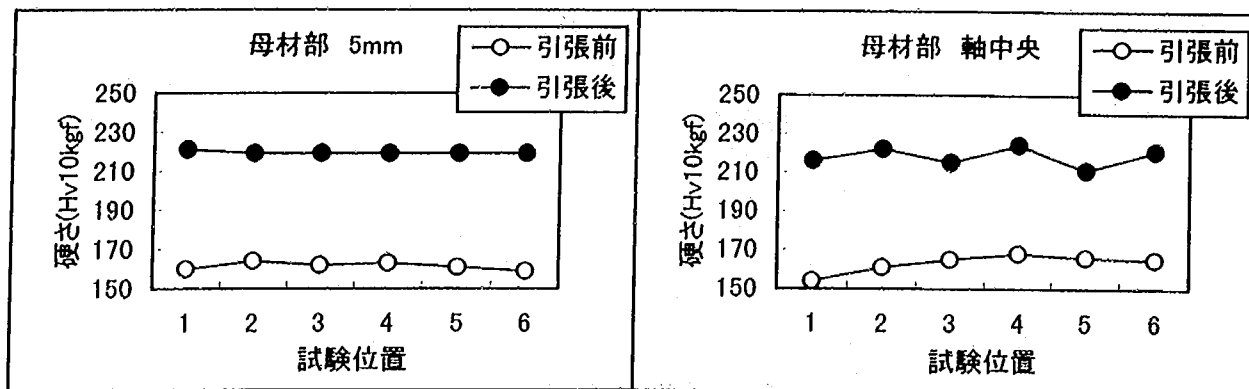


図-6.2.16 継手E-1の母材部の硬さ試験結果

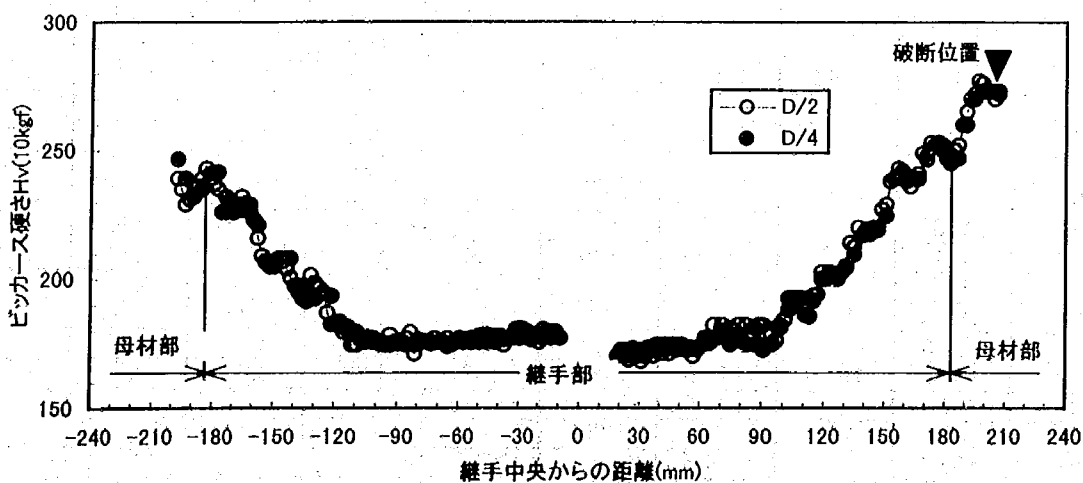
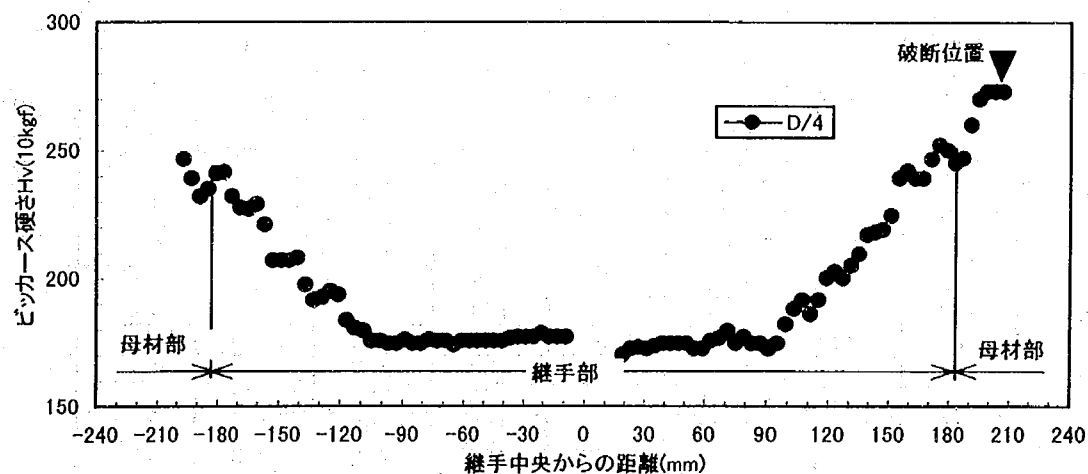
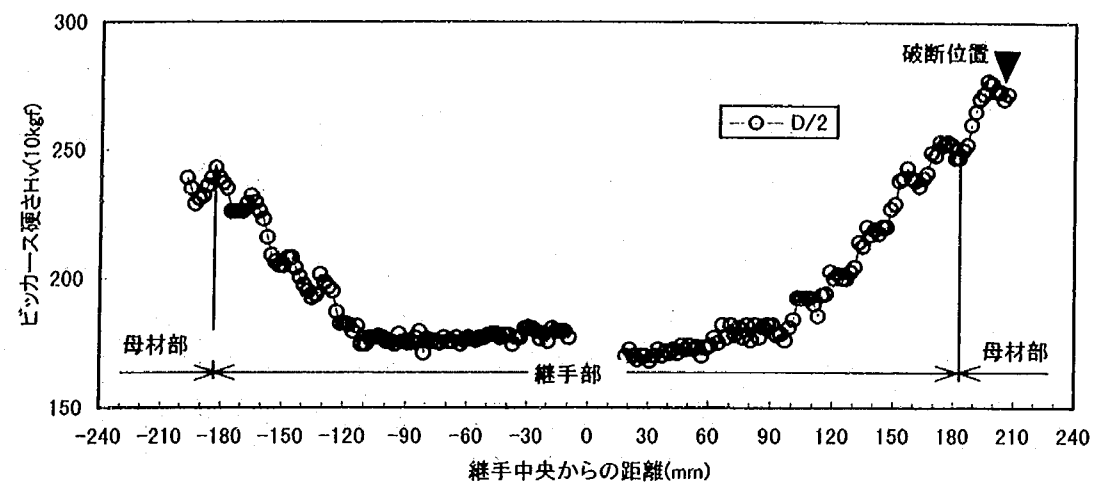


図-6.2.17 継手E-2のスリーブ内の鉄筋の硬さ分布 (引張後)

表-6.2.13 継手E-1の鉄筋のシャルピー衝撃試験結果

試料番号	試験温度 (°C)	吸収エネルギー kgf-m	吸収エネルギー J	脆性破面率 (%)
スリーブ端部 ①	0	9.0	88	45
		4.9	48	65
		5.2	51	60
		平均 6.4	62	57
スリーブ端部 ②	0	6.2	61	60
		5.6	55	60
			56	60
		平均 5.9	57	60

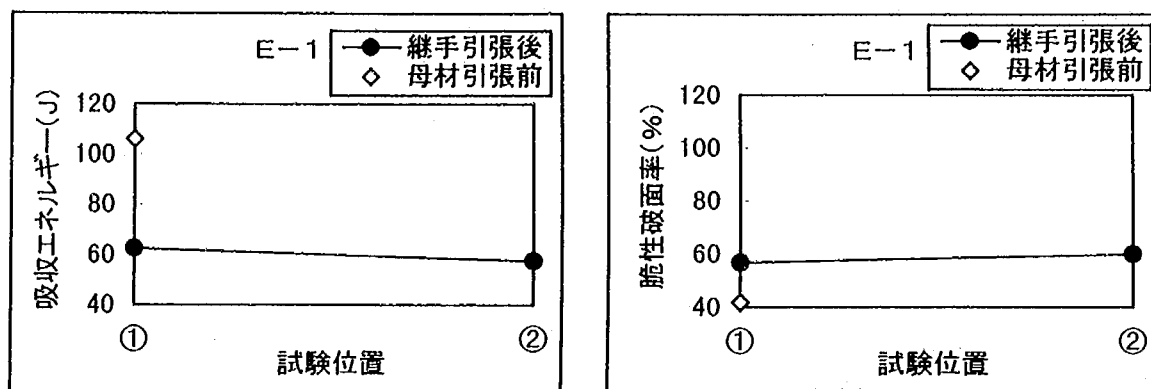


図-6.2.18 継手E-1のシャルピー衝撃試験結果

6.2.6 スリーブ・圧着継手F

(1) ミクロ組織

スリーブの横断面、軸方向のミクロ組織を写真-6.2.10 に、引張前・後のスリーブ内の鉄筋のスリーブ端部、スリーブ中央部の鉄筋突合せ部、それらの中間部は写真-6.2.11 のように正常な組織である。

(2) 硬さ試験結果

1) スリーブ

スリーブ自体(素材)の横断面および軸方向の硬さは、表-6.2.14、図-6.2.19 のとおりであった。横断面は $HV=135\sim147$ 、軸方向は $HV=132\sim147$ であった。

2) 継手部の軸直角方向の硬さ分布

表-6.2.15、図-6.2.20 に節の位置と節間の軸直角方向の硬さ分布を示す。節の位置は、継手Dと同様にスリーブ表面から鉄筋位置まで急激に大きくなる。その位置ではスリーブと鉄筋の硬さはほぼ同じであり、鉄筋内部に行くにしたがい小さくなっている。

節間のスリーブは、節の位置ほどではないが、表面から内部になるにしたがい大きくなるが、節の位置ほどではない。鉄筋の $HV=160\sim180$ 程度であり、母材とほぼ同じであり、継手Dの場合とは異なっている。これは圧着方法の違いによるものと考えられる。

3) 鉄筋母材部の硬さ分布

鉄筋母材部の横断面のX方向(リブを通る線に直角)とY方向(リブを通る線)、軸方向の硬さは、表-6.2.16 および図-6.2.21 のとおりである。

横断面および軸方向とも、他の継手と同様に引張前は鉄筋母材の硬さである $HV=160\sim180$ に対し、引張後は $HV=220\sim240$ になった。

4) スリーブおよびスリーブ内鉄筋の軸方向の硬さ分布

図-6.2.22 のようにスリーブの両端部①④、スリーブ中央の鉄筋突合せ位置③、①と③の中間の②、鉄筋のスリーブの端部の両側⑤、鉄筋突合せ位置⑦、⑤と⑦の中間の⑥の硬さ分布を表-6.2.17 および図-6.2.22 に示す。

スリーブの硬さは圧着前 $HV=135\sim145$ であった(表-6.2.14、図-6.2.19)が、圧着後(引張前)は塑性変形により $HV=180\sim210$ と大きくなっている。波打っているのは鉄筋の節の影響と考えられる。引張後も、節の位置の違いにより波の位置がずれているものの、硬さはほぼ同じである。鉄筋突合せ位置に置いてもほとんど変化はなく、ひずみの測定からも明らかなように、塑性変形は受けていないものと考えられる。

スリーブ内の鉄筋は、継手Dと同様、スリーブ内ではほとんど引張前・後で変化はない。ただし、スリーブ端部のスリーブ内では、25mm 程度内部で引張前・後の硬さはほぼ一致している。

5) スリーブ端部付近の横断面の硬さ分布

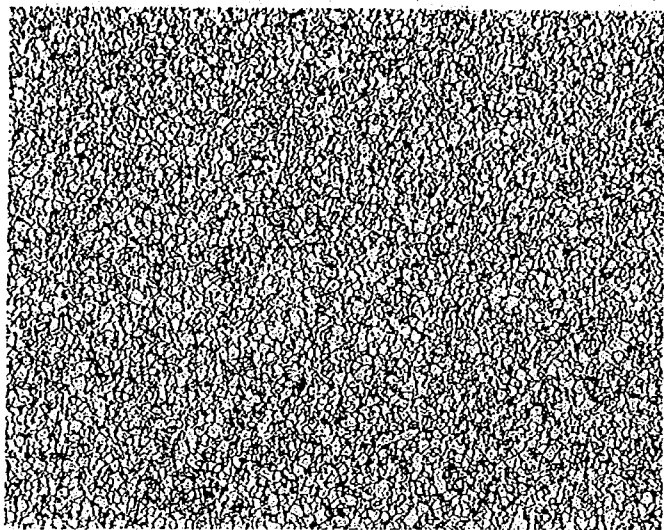
表-6.2.18、図-6.2.23 にスリーブ端部付近の横断面のスリーブと鉄筋の硬さ分布を示す。

スリーブ素材および鉄筋母材の硬さは、それぞれ $HV=約 140, 160$ に対し、圧着することにより両者は $180\sim200$ 程度になり、引張後は、スリーブはほとんど変化していないが、さらに硬くなっていることがわかる。

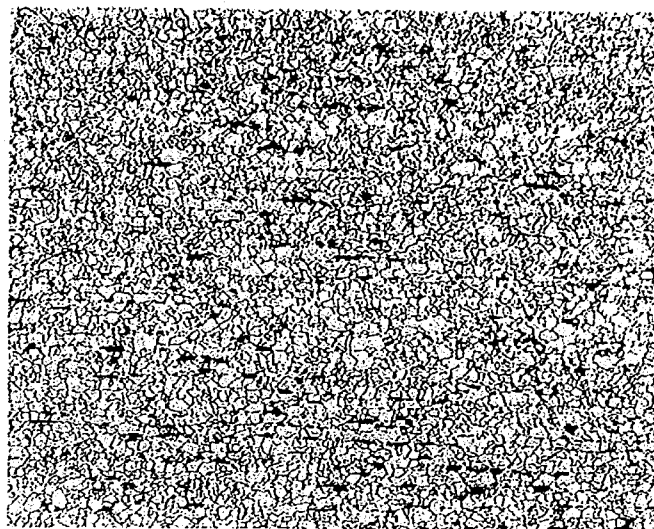
(3) シャルピー衝撃試験

鉄筋母材①，スリーブ端部の鉄筋②，スリーブ端部と中央の突合せ位置の中間の鉄筋(スリーブ内)③の，引張前・後のシャルピー試験結果を表-6.2.19，図-6.2.24に示す。

スリーブ内③は引張前・後の吸収エネルギーの変化はほとんどない。スリーブ端部は引張後大きく低下している。鉄筋母材は今回，低下はわずかであったが，これは塑性変形の小さいところの試験片を採取したためと考えられる。



(a) スリーブ横断面図



(b) スリーブ縦断面図

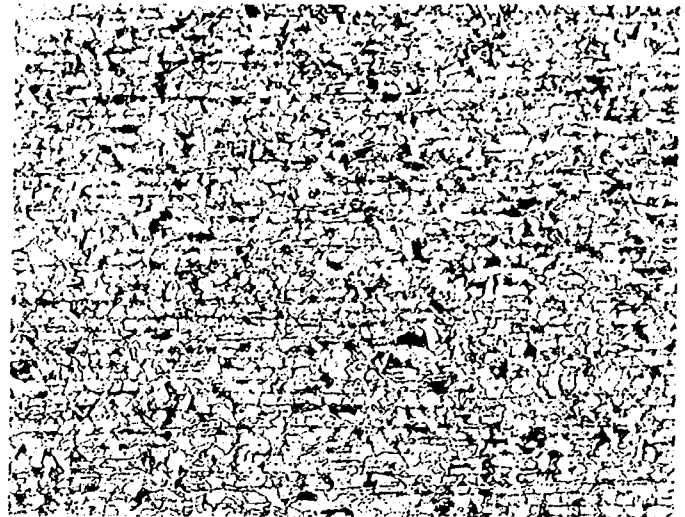
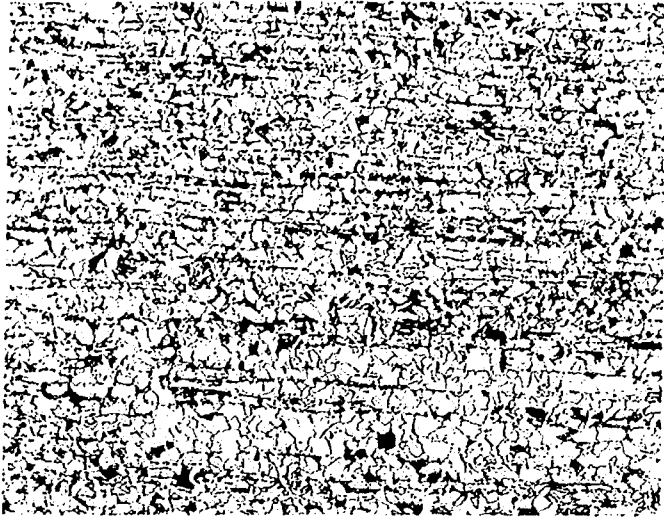
写真-6.2.10 スリーブの組織

表-6.2.14

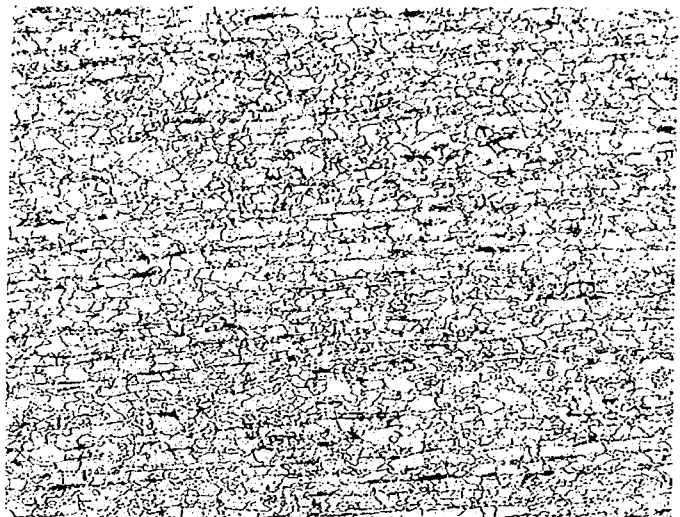
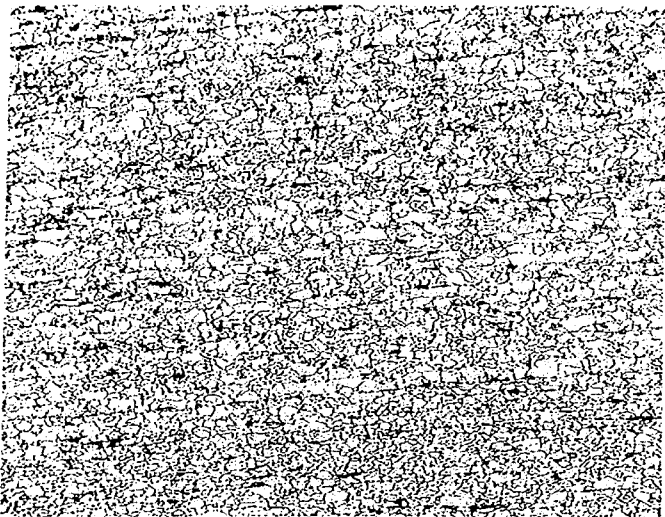
測定 間隔	ビッカース硬さ				
	0度	270度	180度	90度	軸方向
1	144.3	137.5	145.5	143	132.1
2	139.6	135.1	140.5	145.6	133.2
3	145.1	135.6	136.6	145.8	137.2
4	145.6	134.9	137.7	145.7	143.2
5	147.3	138.8	133.7	144	136.4
6					135.7
7					145.1
8					146.7
9					140.8
10					135.6
11					142.9
12					139.4
13					143.3
14					135.6
15					139.5
16					146.5
17					138.9
18					134.6
19					135.9
20					143.2
21					138.3
22					139.6
23					141.4
24					139.7
25					133.4
26					146.9
27					140.2
28					136
29					137.7

引張前

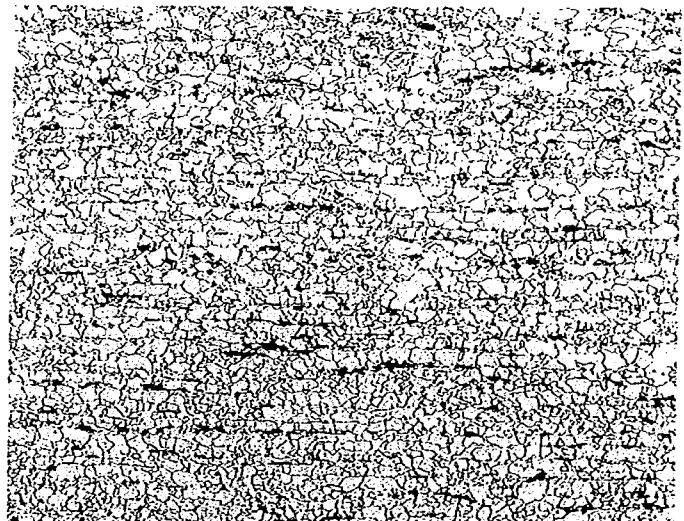
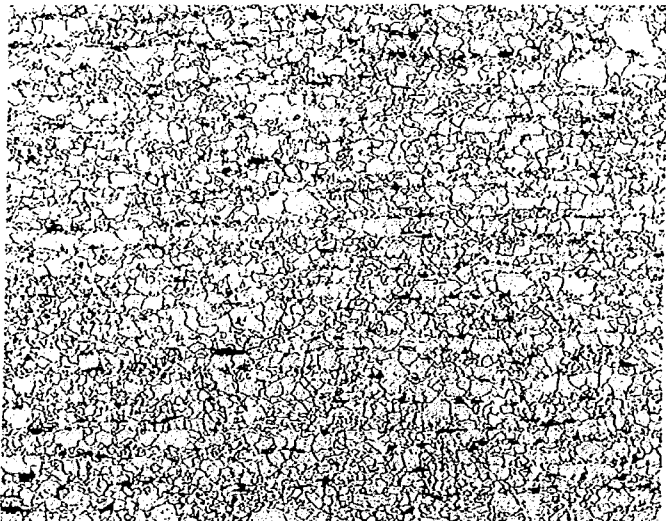
引張後



(a) スリーブ端部



(b) (a) と (c) の中央部



(c) スリーブ中央、鉄筋突合せ部

写真－6.2.11 スリーブ内の鉄筋の組織

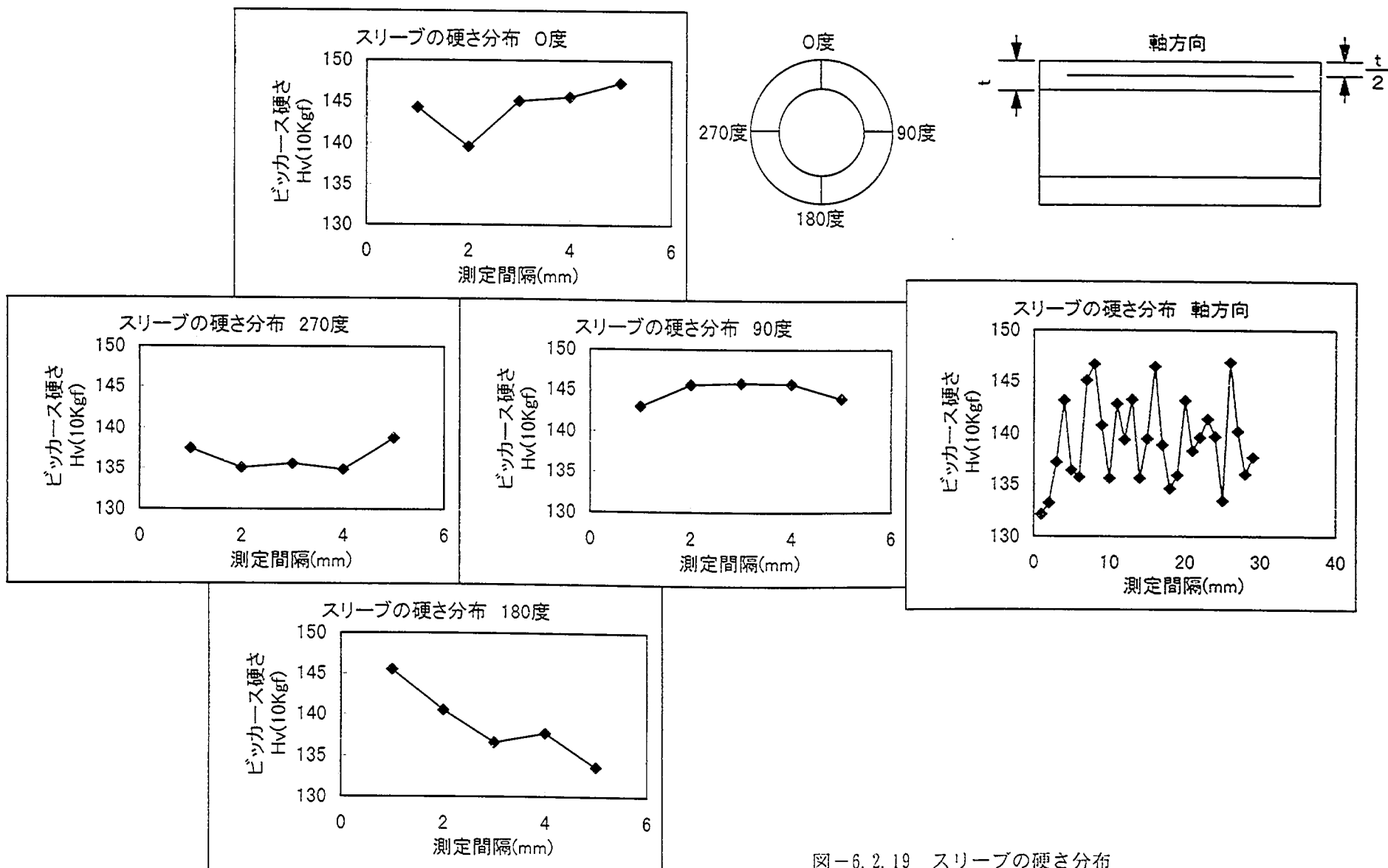


図-6. 2. 19 スリーブの硬さ分布

表-6.2.15 ビッカース硬さ

測定 間隔	ビッカース硬さ	
	節	節間
1	170.2	172.5
2	183.2	172.7
3	193	179.2
4	197.8	181.4
5	190	186.1
6	200.3	189.7
7	201.9	164.9
8	199.7	162.2
9	196.6	158.1
10	195.2	160.7
11	190.1	157.4
12	192.2	160.4
13	190.3	155
14	187.7	157.2
15	188.9	159.9
16	187	158.5
17	187.8	157.9
18	189	158
19	190.6	153
20	190.1	160.8
21	196.7	156.4
22	194.8	154.1
23	200.1	158
24	202.3	154
25	200.9	194.1
26	203.5	192.3
27	194.5	186.7
28	203.7	184.1
29	202.7	181.7
30	192.9	174.9
31	184.7	173.1

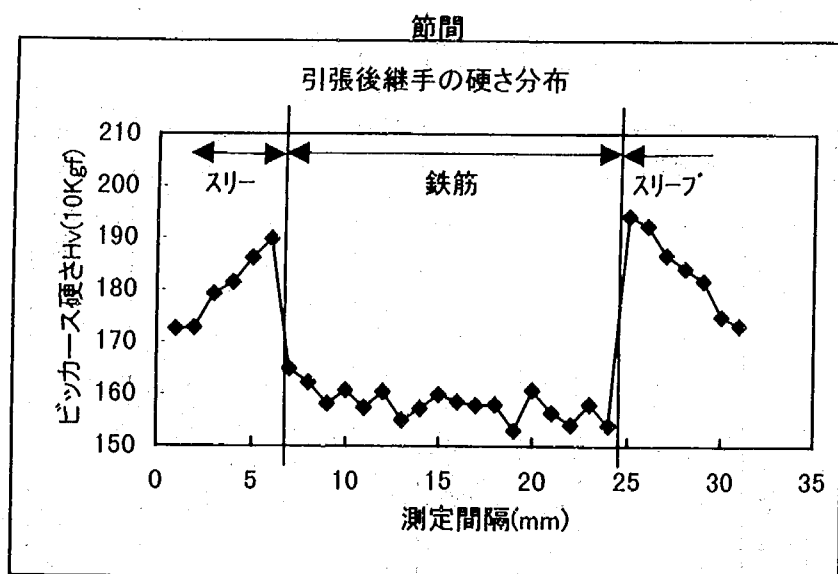
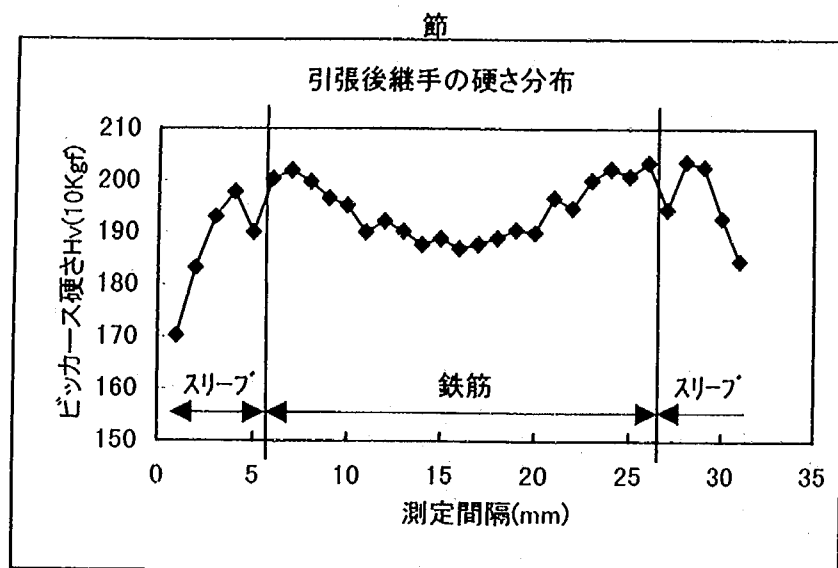
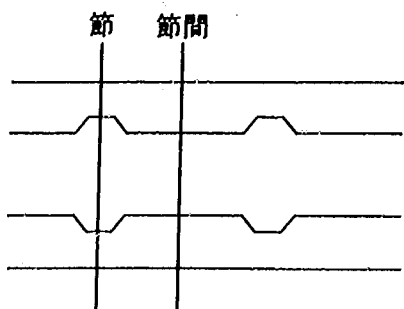


図-6.2.20 軸直角方向の硬さ分布

表-6.2.16 鉄筋母材の硬さ分布

測定 間隔	ビッカース硬さ					
	X方向		Y方向		軸方向	
	引張前	引張後	引張前	引張後	引張前	引張後
-11	162.7	233.2	165.2	229.3		
-10	162.8	234.8	168.6	222.4		
-9	162.9	235.5	167	225.5		
-8	162.9	233.5	163.9	232.9		
-7	163.6	232	163.5	233.4		
-6	165.9	233.9	167.6	234.3		
-5	167.2	235.8	166.7	238.6		
-4	164.5	236.1	166.6	231.8		
-3	165.8	233.4	165.8	231.9		
-2	164	220.7	166.8	235.1		
-1	151.4	221.6	166.1	233.1		
0	189.6	225.8	164.4	238.1		
1	148.2	236.4	147.5	232.2	179	241.5
2	163.6	232	150.7	235.4	176.8	243.3
3	165.9	233.4	163.6	239.8	178.2	239.1
4	165.5	232.1	166.2	233.4	176.9	235.8
5	166.4	230.3	162.3	233.7	179.3	231.4
6	166.5	230.6	166.4	237	179.7	243.2
7	163.5	233.8	167.6	238.7	183	239.1
8	166.2	238.7	165.1	236.3	182	241.2
9	165.8	244.3	163.1	240.1	187.1	236.8
10	164.8		165	235.4	181.9	237
11	165.3		167.8		178.8	237.6
12	165		169.5		184	235.1
13			167		183.7	233.5
14					184.4	238.1
15					181.5	238.7
16					182.1	240.6
17					184.1	244.7
18					185.2	244.3
19					184	239.1
20					187.8	242.2
21					188.3	241.1
22					185.6	240.9
23					186.3	232.9
24					185.5	235.5
25					184.7	234.5
26					189.3	239.8
27					185.6	239.3
28					185.6	238.7
29					185.7	237.5

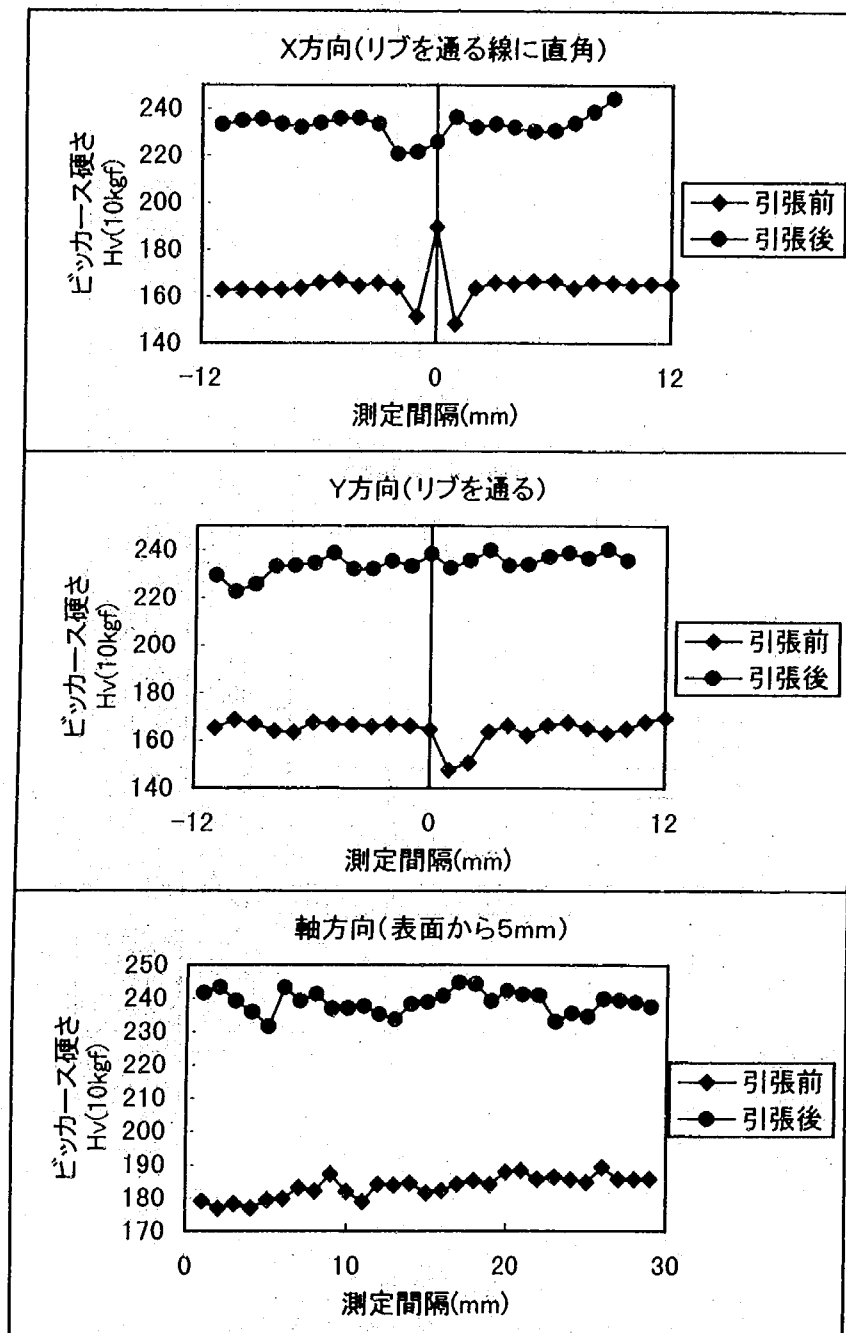
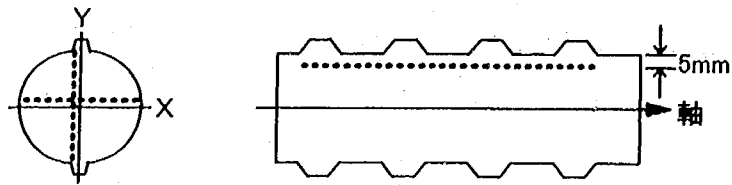


図-6.2.21 鉄筋母材の硬さ分布

表-6.2.17 スリーブおよびスリーブ内鉄筋の軸方向の硬さ試験結果

①			②			③			④			⑤			⑥			⑦		
測定 間隔	引張前 17a 1/2t	引張後 FMF1a 1/2t	測定 間隔	引張前 17b 1/2t	引張後 FMF1b 1/2t	測定 間隔	引張前 17c 1/2t	引張後 FMF1c 1/2t	測定 間隔	引張前 17d 1/2t	引張後 FMF1d 1/2t	測定 間隔	引張前 17a 5ミリタ	引張後 FMF1a 5ミリタ	測定 間隔	引張前 17b 5ミリタ	引張後 FMF1b 5ミリタ	測定 間隔	引張前 17c 5ミリタ	引張後 FMF1c 5ミリタ
-125	170.7	188.9	-82	186.1	182.8	-25		190.1	82	181.8		-147	162.9	231.9	-82	206.5	166.9	-25		184.5
-124	178.7	187.5	-81	187.4	183.1	-24	185.6	189.8	83	184.1		-146	162.5	237.4	-81	203.5	160.2	-24	185.5	189.8
-123	191.4	189.8	-80	187.6	182.8	-23	185.3	193.2	84	188.6		-145	166.1	233.6	-80	202.7	162	-23	180.3	195
-122	196.8	187.8	-79	187.8	184.6	-22	185.4	199.3	85	195.4	192.3	-144	163.4	237.3	-79	202	164.6	-22	177	198
-121	188.4	182.5	-78	187.2	186.1	-21	183.4	203.2	86	195.9	197.2	-143	164.3	237.7	-78	201.1	165.8	-21	165.4	194.1
-120	183.1	180.1	-77	180.9	184	-20	179	211	87	195.4	195	-142	162.2	234.7	-77	201	172.5	-20	161.7	195.2
-119	177.7	178.1	-76	180.9	188.4	-19	179.7	201.8	88	189.1	195.4	-141	162.5	237.8	-76	197.4	179.4	-19	165.8	198.3
-118	178.1	178.2	-75	180.4	187.2	-18	177.7	188	89	191.1	194.4	-140	161.3	230.8	-75	193.5	181.9	-18	167.5	194.7
-117	178.6	179.3	-74	182.1	189.1	-17	180.2	183.3	90	185.8	192.2	-139	160.1	229.7	-74	189.8	188.9	-17	168.2	192.4
-116	179.2	180.4	-73	177.1	200	-16	179.4	184.2	91	184.5	190.8	-138	163.3	229.2	-73	197.2	194.5	-16	169.7	188.3
-115	178.4	177.9	-72	180.9	199.9	-15	179.4	184	92	182.3	190.4	-137	163.1	237.5	-72	199.7	200.6	-15	174.8	185.5
-114	176.9	181.8	-71	180.6	199	-14	175	183.9	93	180.9	190.1	-136	160.4	233.4	-71	199.1	198.9	-14	179.4	182.4
-113	179.6	186.8	-70	178.2	195.1	-13	177.5	183.8	94	179.8	192.2	-135	160.4	238.9	-70	200.5	196.9	-13	184.6	181
-112	179.1	195.5	-69	176.5	189.6	-12	186.9	179.3	95	182.9	189.3	-134	162.9	240.5	-69	201.7	193.2	-12	188.3	175.3
-111	180.1	203.3	-68	176.2	185.4	-11	191.4	180.1	96	182.7	186.3	-133	163.8	240.1	-68	203.3	187.7	-11	191.2	172.8
-110	179.7	201.7	-67	177	188.1	-10	192	183.4	97	180.6	184.1	-132	163.8	235.8	-67	205.1	180.3	-10	189.6	171.9
-109	187.2	197.3	-66	177.5	188.6	-9	189.5	186.5	98	181	180.6	-131	164.1	235	-66	207	173.8	-9	189.2	175.2
-108	188.9	194.8	-65	184.4	186.1	-8	185.1	188.9	99	183.1	183.3	-130	162.4	232	-65	206.1	168.6	-8	186.8	181
-107	193.7	187.9	-64	181.9	184.8	-7	182.2	190.5	100	189.7	185.1	-129	164.1	228.7	-64	206.3	160.8	-7	182.3	189.6
-106	196.2	187.7	-63	184.4	184.6	-6	179.2	192	101	190.6	190.9	-128	162.2	232.9	-63	203.3	160.5	-6	178.5	193.9
-105	193.4		-62	179.7	185.1	-5	176.1	202.1	102	193	192.3	-127	160.9	224.4	-62	201.3	162.7	-5	172.4	198.7
			-61	178.7	183.6	-4	175.7	204.1	103	193.6	195.5	-126	161.7	225.6	-61	199.1	172.4	-4	161.6	198
			-60	175.8	181.6	-3	176.9	200.3	104	190.4	191.1	-125	160.9	228.5	-60	193.8	175.5	-3	164	196.7
			-59	177.5	180.9	-2	175.9	193.5	105	188.9	195	-124	164.7	227.8	-59	200.3	179.7	-2	165.2	192.8
			-58	177.7	183.8	-1	173.9	189.4	106	186.1	194.2	-123	170.9	228.1	-58	195.4	185	-1	161.9	195.4
			-57	176.6	188.7	1	173.1	186	107	188.6	191.3	-122	176.9	224.3	-57	191.1	191.8	1	185.9	195.2
			-56	177.6	190.5	2	172.5	191.9	108	187.7	191.2	-121	181.5	222	-56	196	192.1	2	189.7	184
			-55	178.2	195.2	3	171.7	191.1	109	188.2	191.7	-120	180	221.8	-55	200.3	194	3	189.5	184.4
			-54	176.4	190.6	4	171.4	193.8	110	185	189.5	-119	182.8	220.8	-54	202.5	194.2	4	192.8	180.5
			-53	177.6	192.3	5	175.3	191.7	111	183.8	192	-118	185.1	219	-53	200.3	197	5	190	180.8
			-52	176.5	190.1	6	183.6	186.9	112	182.5	193.3	-117	183.1	215	-52	204.2	190.3	6	184.5	176.4
			-51	181.2	184	7	191.4	184.9	113	180	190	-116	184.5	222.7	-51	203.2	189.5	7	182.9	173.3
			-50	181.3	183.8	8	188.8	186.8	114	178.1	183.8	-115	179.8	224.3	-50	208	178.1	8	177.1	172.5
			-49	185.1	185.4	9	185.7	186.7	115	174.1	185.4	-114	177.4	226.8	-49	204.5	176.9	9	162.3	178.4
			-48	187.1	184.7	10	180.8	185.2	116	168.3	178.2	-113	175.6	224.8	-48	205.7	172.4	10	163.7	184
			-47	185.8	184	11	179.9	184.2	117	164.9	172.9	-112	172.4	221.9	-47	204.5	171.9	11	164.5	189.8
			-46	186.3	183.1	12	178.7	181.2	118	159.2	170.4	-111	181.2	217.6	-46	197.7	176.3	12	165.2	193.6
			-45	185.6	187.8	13	178.4	184	119	156.6	166.9	-110	178.7	221	-45	199.4	181.7	13	167	197.8
			-44	183.1	181.7	14	177.8	185.8	120	155.4	166.9	-109	183.9	228.9	-44	193.3	175.2	14	172.1	196.7
			-43	181.7	183.8	15	177.1	192.2	121	155.2	167	-108	184.9	228.9	-43	195.5	185.1	15	174.9	198.2
						16	178	195.7	122	152.7	167.8	-107	189.6	227.5				16	176.6	205.2
						17	175.9	198.3	123	154.2	168.9	-106	188.4	222.9				17	181.2	197.5
						18	175.1	205.4	124	158.3	171	-105	193.8	223.8				18	181.9	201.1
						19	174.8	209.6	125	164.8	179	-104	199	218.2				19	191.6	196.8
						20	176.9	204.5				-103	198.4	212.5				20	189.5	194.8
						21	180.3	194.8				-102	199.5	207.1				21	189.7	192.7
						22	186.9	184.7				-101	198.2					22	191.4	182.4
						23	193.6	181.9										23	190	
						24	195.3	184.7										24	189.8	
						25	194.9	185.2										25		
						26	182.8											26		

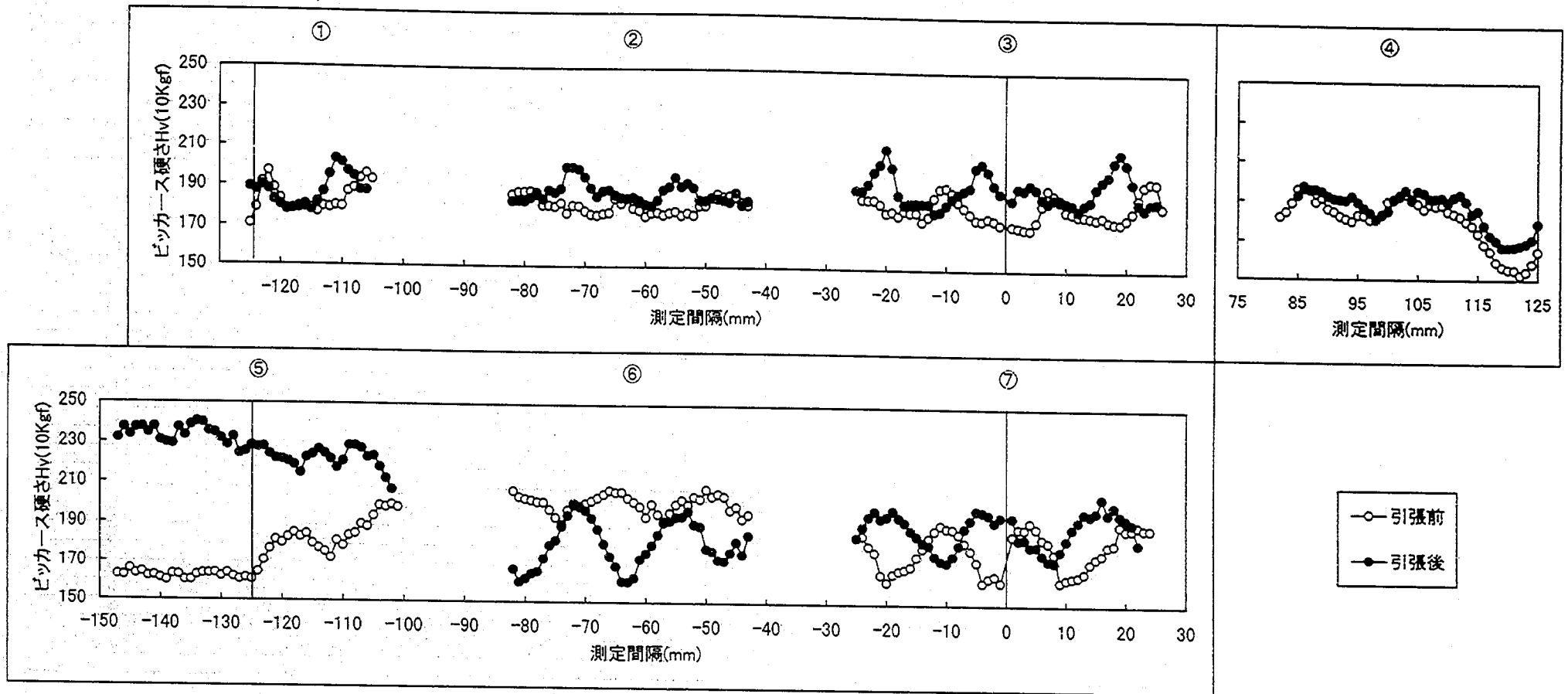
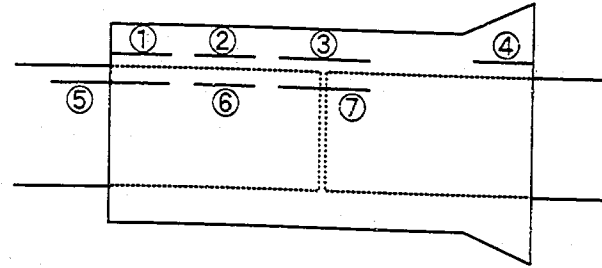


図-6.2.22 スリーブおよびスリーブ内の鉄筋の硬さ分布

表-18 横断面の硬さ分布

X方向					Y方向				
測定 間隔	母材引張前		スリーブ		測定 間隔	母材引張前		スリーブ	
			引張前	引張後				引張前	引張後
1	143	ス リ ー ブ	183	190.7	1	145.5	ス リ ー ブ	190.1	190.5
2	145.6		185.7	188.3	2	140.5		183.6	191.2
3	145.8		185.4	183.9	3	136.6		187.2	181.5
4	145.7		185.1	186.4	4	137.7		193.1	179.8
5	144		186.5	190.6	5	133.7		197.7	181.8
6	162.7		194.1	189.5	6	165.2		217.1	263.7
7	162.8		179.8	216.6	7	168.6		213.8	247.2
8	162.9		180	221.4	8	167		204.8	237.5
9	162.9		186.6	217.8	9	163.9		200.6	237
10	163.6		186.3	226.2	10	163.5		199.7	231.8
11	165.9	187.4	227.2	11	167.6	197.1	230.9		
12	167.2	186	228.2	12	166.7	197.7	232.2		
13	164.5	187.7	227.5	13	166.6	198	231.1		
14	165.8	187.2	232.9	14	165.8	193.5	225.4		
15	164	185.9	225.6	15	166.8	189.1	224.7		
16	151.4	188	222.9	16	166.1	189.6	231.1		
17	189.6	鉄 筋	186.1	226.9	17	164.4	鉄 筋	191.1	229.5
18	148.2		186.7	216.2	18	147.5		189.8	229.1
19	163.6		206.1	220.3	19	150.7		192.3	219.9
20	165.9		192.5	226	20	163.6		194.1	229.3
21	165.5		193.9	231.7	21	166.2		192.5	232.4
22	166.4		193.6	228.7	22	162.3		190.8	230.6
23	166.5		193	232.8	23	166.4		191.7	233.2
24	163.5		198.6	229.1	24	167.6		194.6	227.3
25	166.2		200.1	230.2	25	165.1		194.9	234.9
26	165.8		201.8	229.8	26	163.1		199.5	234.3
27	164.8	204.8	235.9	27	165	204.6	235.5		
28	165.3	207.4	240.6	28	167.8	202.2	234.3		
29	165	214	236.9	29	169.5	206.2	240.6		
30	137.5	ス リ ー ブ	216.5	240.5	30	167	ス リ ー ブ	206.1	237.2
31	135.1		223.5	188.5	31	144.3		214.9	239
32	135.6		201.7	191.7	32	139.6		204.7	185.8
33	134.9		202.2	202.3	33	145.1		199.5	179.9
34	138.8		200.9	212.8	34	145.6		195.3	179.4
35			198.3	210	35	147.3		191.9	184.5
36			191.5		36			190.9	189.8
37			188.5		37			188.5	

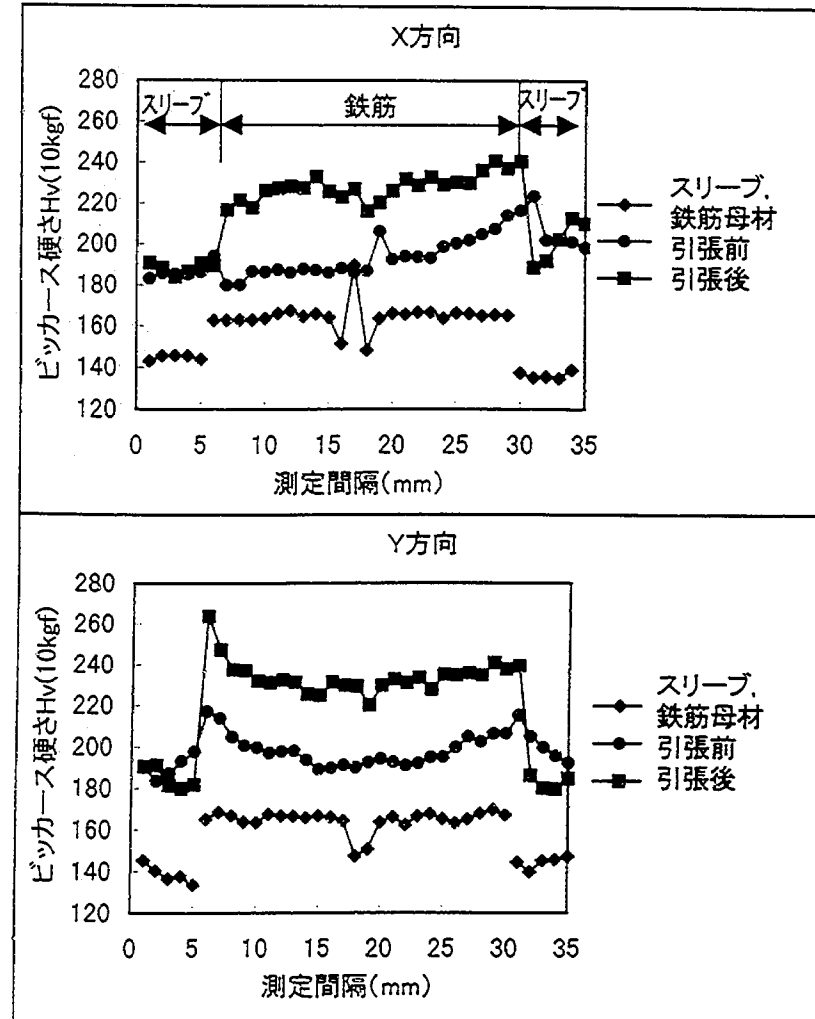
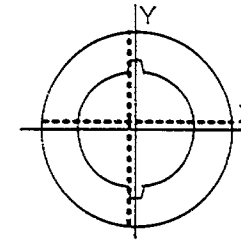


図-6.2.23 スリーブ端部付近の横断面の硬さ分布

表-6.2.19 鉄筋のシャルピー衝撃試験

	試験位置	吸収エネルギー (J)	脆性破面率 (%)
引張試験前	鉄筋母材部 ①	115.7	40
		120.1	40
		113.7	40
	平均	116.5	40.0
	スリーブ端部 ②	108.4	45
		93.0	45
		103.4	40
	平均	101.6	43.3
引張試験後	スリーブ内 ③	95.2	55
		89.0	45
		87.4	40
	平均	90.5	46.7
	鉄筋母材部 ①	106.8	50
		125.2	35
		101.2	50
	平均	111.1	45.0
引張試験後	スリーブ端部 ②	77.0	50
		62.8	60
		61.1	55
	平均	67.0	55.0
	スリーブ内 ③	100.4	40
		101.0	45
		67.4	70
	平均	89.6	51.7

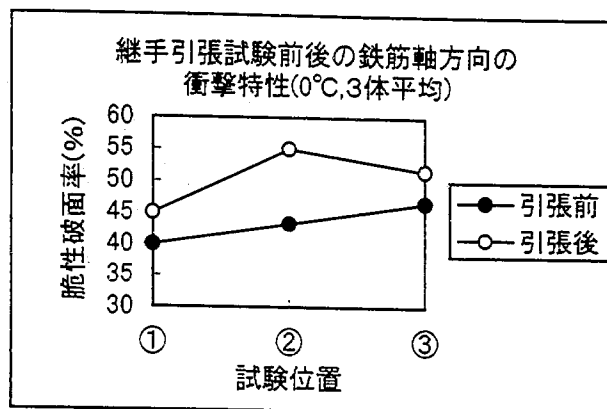
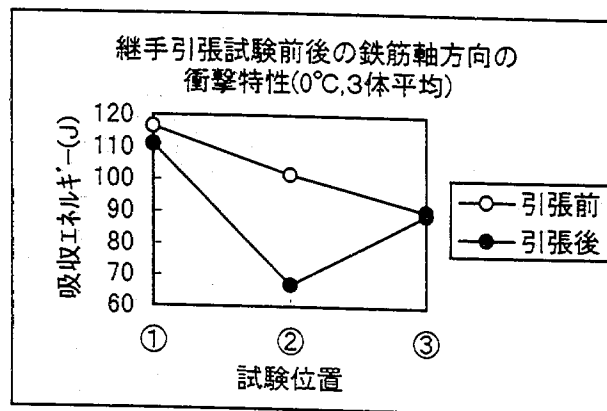


図-6.2.24 鉄筋の衝撃特性

6.2.7 エンクローズ溶接継手G

(1) マクロ組織

溶接部とその近傍の引張前・後のマクロ組織は写真-6.2.12のとおりである。

(2) ミクロ組織

溶接金属の中央部，鉄筋とのボンド部，熱影響部，鉄筋母材部(図-6.2.25)のミクロ組織は写真-6.2.13のとおりである。

溶接金属はベイナイト組織を主体とした通常の組織である。ボンド部では良好な接合状態が認められる。その鉄筋部分(写真の右側)は，高熱の影響により組織が粗粒化している。熱影響部は，焼なましにより微細化している。鉄筋母材部は通常のフェライト-パーライト組織である。引張前・後のミクロ組織上の違いは認められなかった。

(3) 硬さ

硬さ試験結果は表-6.2.20，図-6.2.26のとおりである。

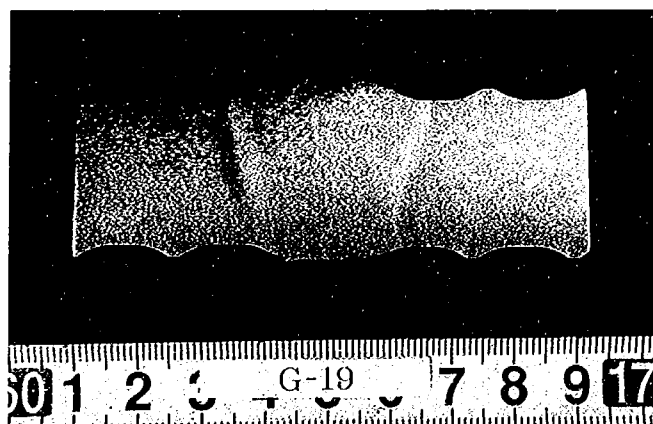
引張前は，鉄筋母材部 HV=160 程度，溶接金属部は HV=210 程度であった。

引張後は，全体にわたって硬くなっているものの，溶接部とその近傍は 20 程度増加し，溶接部 HV=230 程度であるが，鉄筋母材部は HV=240 程にもなっており溶接部よりも硬く，増加の程度が大きい。

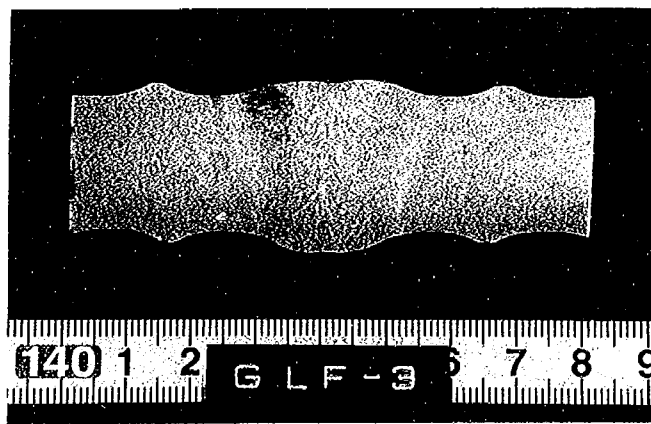
(4) 衝撃特性

シャルピー衝撃試験結果を表-6.2.21，図-6.2.27に示す。

溶接金属，ボンド部，熱影響部の吸収エネルギーは，引張前・後でほとんど変化はないが，母材部は引張前 118J に対し引張後 60J と大きく脆化している。これは引張試験における塑性変形による硬化の程度が大きかったためと考えられる。



(a) 引張前

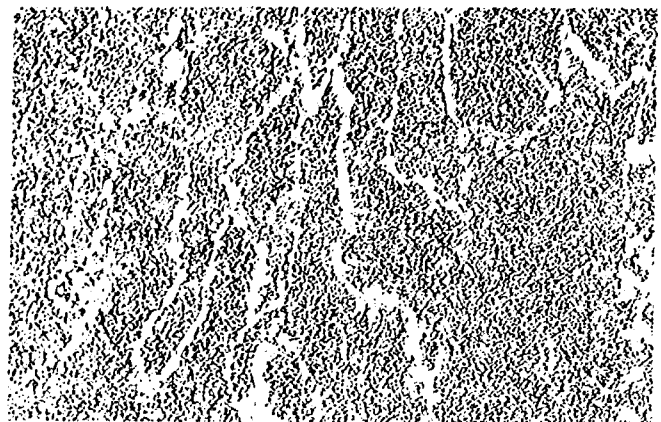
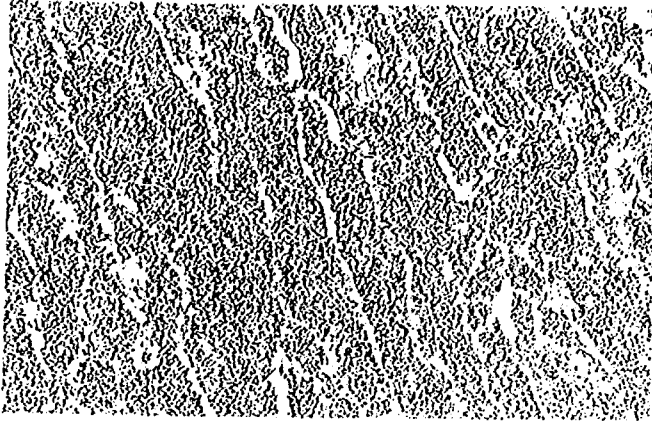


(b) 引張後

写真-6.2.12 エンクローズ溶接部のマクロ組織

引張前

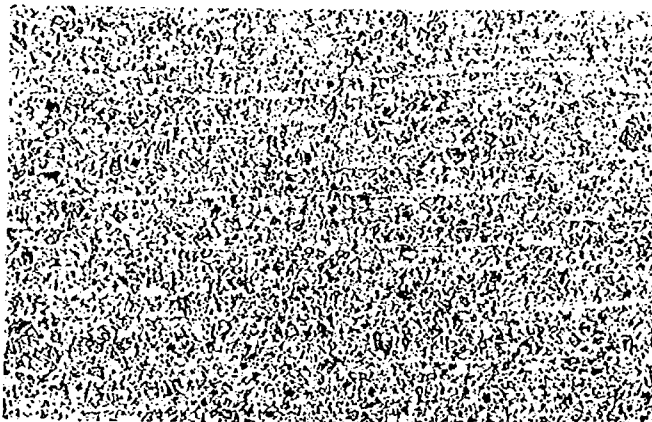
引張後



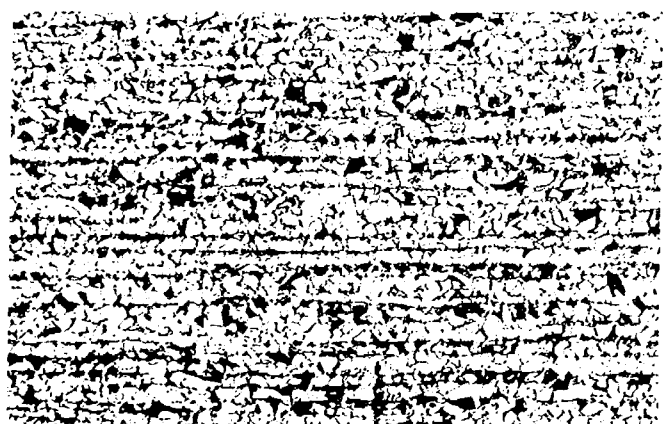
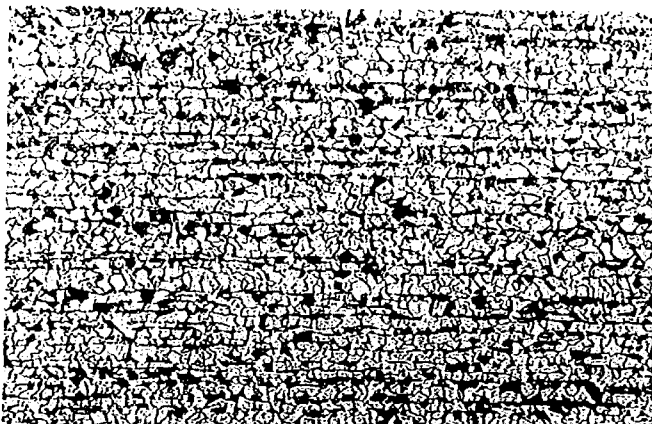
(a) 溶接金属中央



(b) ボンド部



(c) 熱影響部



(d) 鉄筋母材部

写真-6.2.13 ミク口組織

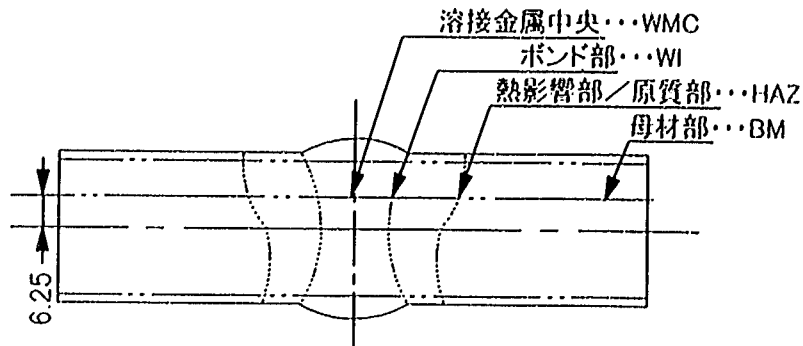


図-6. 2. 25 ミクロ観察およびシャルピー試験片採取位置

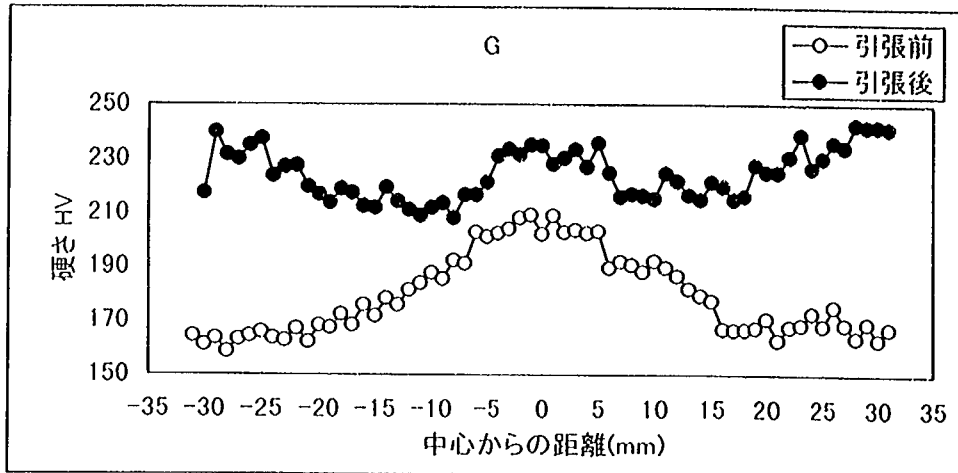


図-6. 2. 26 硬さ試験結果

表-6. 2. 20 硬さ試験結果

測定位置	引張前	引張後	測定位置	引張前	引張後
-31	164.4		1	208.9	227.9
-30	161.2	217.3	2	202.8	230.1
-29	163.6	239.7	3	203.5	233.2
-28	158.6	231.4	4	202.4	226.9
-27	163.2	229.8	5	203.1	235.6
-26	164.5	234.9	6	189.6	224.7
-25	166	237.3	7	191.8	215.8
-24	163.7	223.6	8	190.7	216.8
-23	162.8	226.9	9	188.1	216.2
-22	167.1	227.3	10	192.1	215.1
-21	162.2	219.6	11	189.7	224.5
-20	168.3	216.7	12	186.6	221.6
-19	167.5	213.7	13	181.8	216.4
-18	172.4	218.7	14	179.3	214.9
-17	168.5	217.3	15	177.3	221.2
-16	175.9	212.3	16	166.9	219.5
-15	171.8	211.8	17	166.6	214.7
-14	178.3	219.2	18	166.7	216.1
-13	175.9	214.1	19	167.3	227.5
-12	181.4	211	20	170.6	225
-11	183.9	208.9	21	162.8	224.8
-10	187.8	211.8	22	167.7	230.6
-9	185.5	213.4	23	168.5	238.7
-8	192.3	208	24	172.8	226.5
-7	191.3	216.4	25	168.2	230.1
-6	202.7	216.5	26	175.2	235.8
-5	201.2	221.2	27	168.6	234.2
-4	202.4	230.8	28	163.8	242.6
-3	203.9	233.3	29	169.1	241.9
-2	208	231.4	30	163.1	241.9
-1	209.1	234.9	31	167.2	241.3
0	202.2	234.6			

表-6.2.21 シャルピー衝撃試験結果

	試験位置	吸収エネルギー (J)	脆性破面率 (%)
引張試験前	WMC	121	25
	溶接金属中央	113	25
		95	30
	平均	109.7	26.7
	B	72	65
	ボンド部	85	55
		87	55
	平均	81.3	58.3
	HAZ	125	40
	熱影響部 ／原質部	132	40
		157	20
	平均	138.0	33.3
	BM	102	40
	母材部	129	30
		122	35
	平均	117.7	35.0
引張試験後	WMC	110	30
	溶接金属中央	110	30
		109	30
	平均	109.7	30.0
	B	72	80
	ボンド部	65	80
		68	80
	平均	68.3	80.0
	HAZ	142	35
	熱影響部 ／原質部	138	35
		154	30
	平均	144.7	33.3
	BM	71	65
	母材部	55	70
		53	70
	平均	59.7	68.3

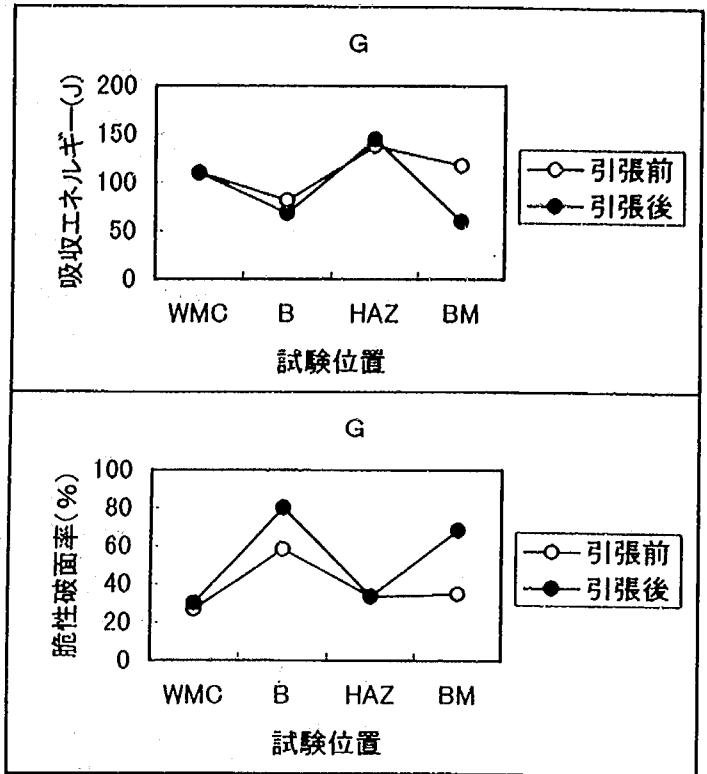


図-6.2.27 衝撃特性

6.2.8 フラッシュ溶接継手H

(1) マクロ組織

溶接部とその近傍のマクロ組織は写真-6.2.14 のとおりである。

接合部は、フラッシュ溶接の一般的な特徴である白色層が認められ、良好な接合状態を示している。

(2) ミクロ組織

図-6.2.28 のように溶接部、熱影響部、鉄筋母材部でミクロ組織を観察した。

接合部の白色層は、通常のフェライト-パーライト組織である。熱影響部については、エンクローズ溶接継手と同様に微細化している。引張前・後のミクロ組織上の変化も見受けられない。

(3) 硬さ試験結果

硬さ試験結果を表-6.2.22, 図-6.2.29 に示す。

溶接部分は熱影響により硬くなっている。しかしながら、その範囲は10数mmである。エンクローズ溶接やガス圧接のように鉄筋径かそれ以上の範囲になっているのに対し、フラッシュ溶接は鉄筋径の1/2程度と、かなり小さくなっている。

引張後は、エンクローズ溶接と同様に、溶接部は塑性ひずみを生じているので引張前に比べてHV=20程硬くなっているものの、母材部の増加はそれよりもはるかに大きく、溶接部の硬さを上回っている。

(4) 衝撃特性

シャルピー衝撃試験結果は表-6.2.23, 図-6.2.30 のとおりである。

熱影響部および母材部に比較して接合部（白色層部）の吸収エネルギーは脱炭作用などにより小さい。

引張試験前・後の接合部と熱影響部の吸収エネルギーはほとんど変化はないが、エンクローズ溶接継手の場合と同様に母材部の低下は著しい。

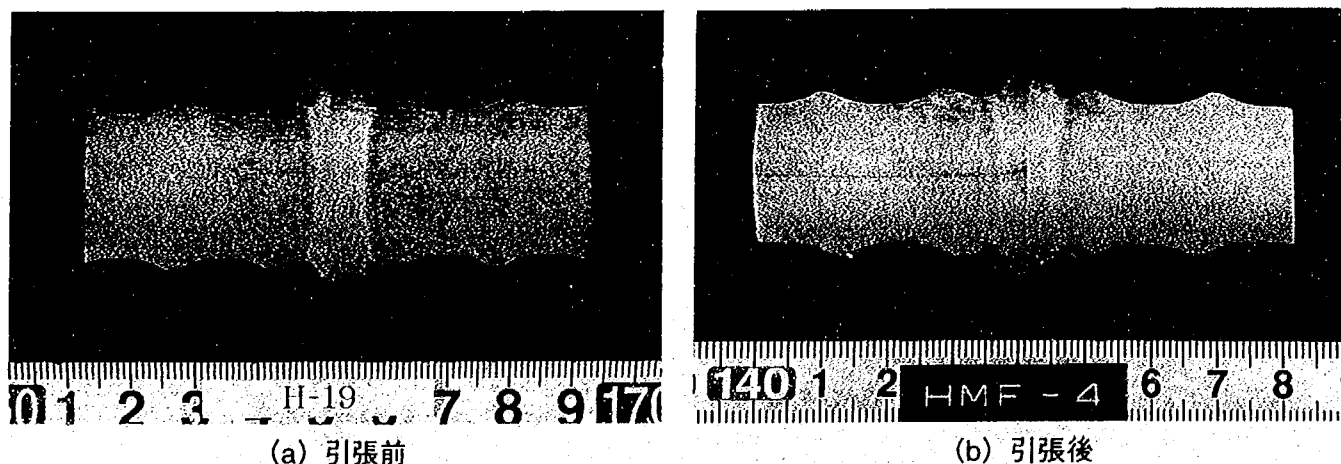
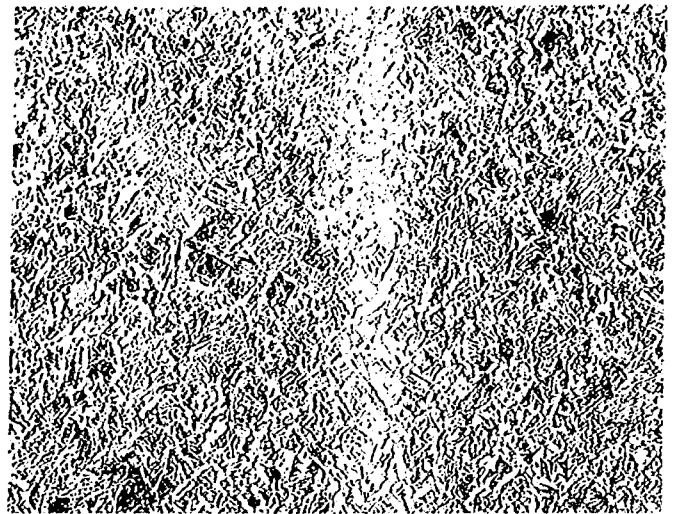
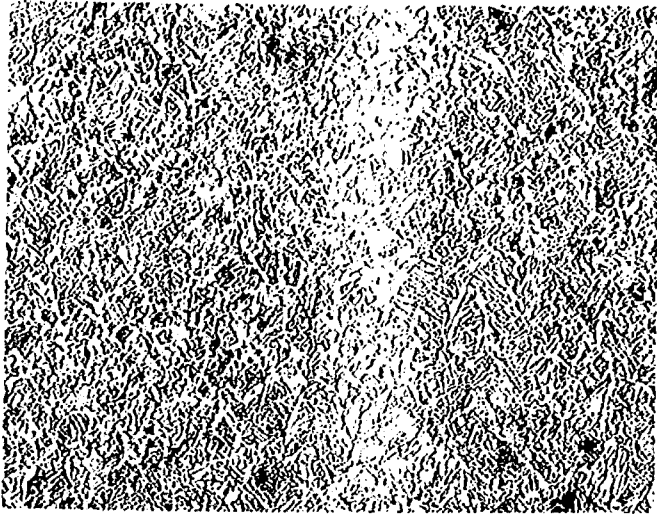


写真-6.2.14 マクロ組織

引張前

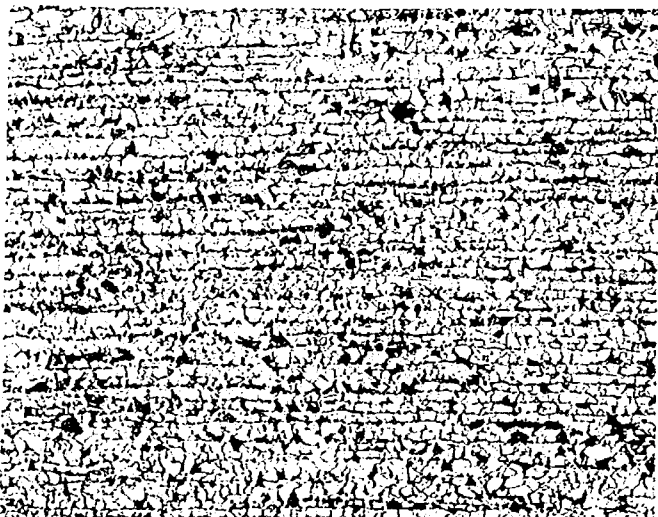
引張後



(a) 溶接部



(b) 熱影響部



(c) 鉄筋母材

写真-6.2.15 ミクロ組織

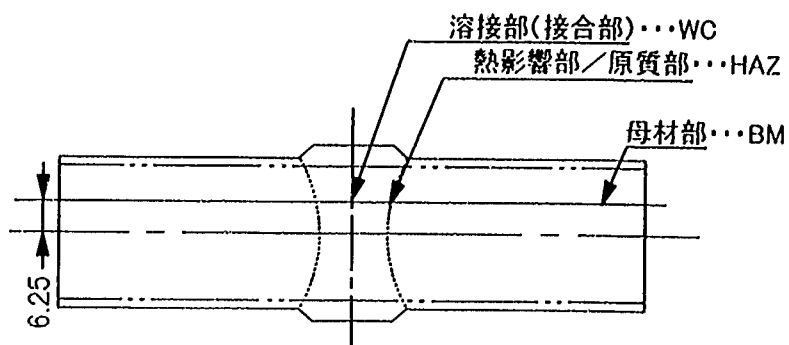


図-6. 2. 28 ミクロ観察およびシャルピー試験片採取位置

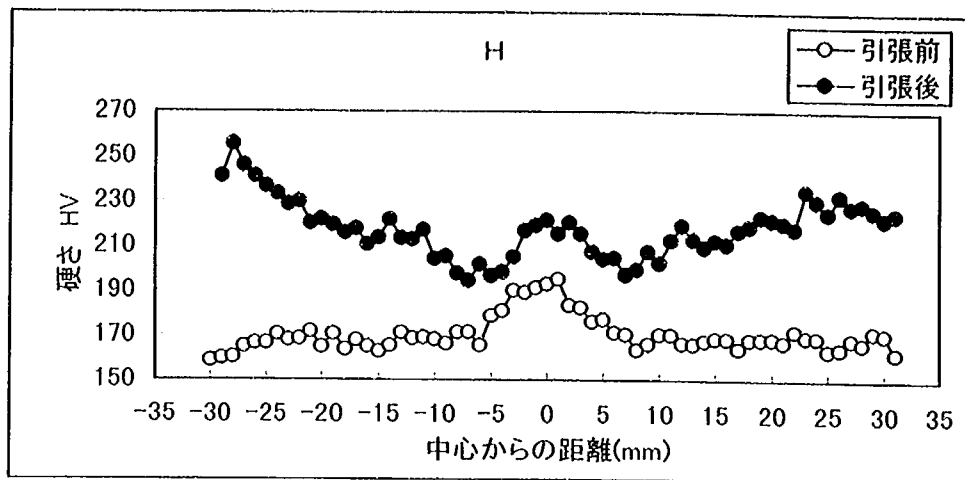


図-6. 2. 29 硬さ試験結果

表-6. 2. 22 硬さ試験結果

測定位置	引張前	引張後	測定位置	引張前	引張後
-30	158.5		1	195.2	215.5
-29	159.5	241.1	2	183.4	220.3
-28	160.1	255.4	3	182.4	215.5
-27	164.9	245.8	4	176.2	207.3
-26	166.4	241.1	5	177.1	204.2
-25	166.5	236.6	6	171.3	204.5
-24	170.4	233.3	7	170.4	197.1
-23	167.9	228.6	8	163.4	199.3
-22	168.4	229.7	9	166.1	207.3
-21	171.5	220.1	10	170.3	202.3
-20	164.8	221.8	11	170.1	212.4
-19	170.6	219.4	12	166.4	219.1
-18	163.6	215.8	13	165.9	212.8
-17	167.8	217.6	14	167.5	209.4
-16	164.9	210.7	15	168.6	212.2
-15	162.8	213.6	16	168.4	210.8
-14	165.3	221.7	17	164	216.8
-13	171.2	213.4	18	168.1	218.6
-12	168.5	212.8	19	168.2	222.9
-11	169	217	20	168.4	221.6
-10	168.1	204.1	21	166.9	220.2
-9	166.2	205.3	22	171.9	217.8
-8	171.3	197.6	23	169.3	234.5
-7	171.4	194.4	24	168.9	230.1
-6	165.5	201.7	25	163.3	224.7
-5	178.6	196.6	26	164.1	232.4
-4	181	198.4	27	168.3	227.5
-3	190.1	205.1	28	166.3	228.5
-2	189.3	216.7	29	171.6	225.5
-1	191.3	219.1	30	170.5	222.1
0	193	221.4	31	162.1	224.3

表-6.2.23 シャルピー衝撃試験結果

	試験位置	吸収エネルギー (J)	脆性破面率 (%)
引張試験前	WC	42	90
	溶接部 (接合部)	42	95
		48	85
	平均	44.0	90.0
	HAZ	152	35
	熱影響部 /原質部	133	50
		144	35
	平均	143.0	40.0
	BM	102	40
	母材部	129	30
引張試験後		122	35
	平均	117.7	35.0
	WC	22	100
	溶接部 (接合部)	32	100
		29	100
	平均	27.7	100.0
	HAZ	128	45
	熱影響部 /原質部	113	55
		154	30
	平均	131.7	43.3
	BM	72	60
	母材部	56	85
		79	55
	平均	69.0	66.7

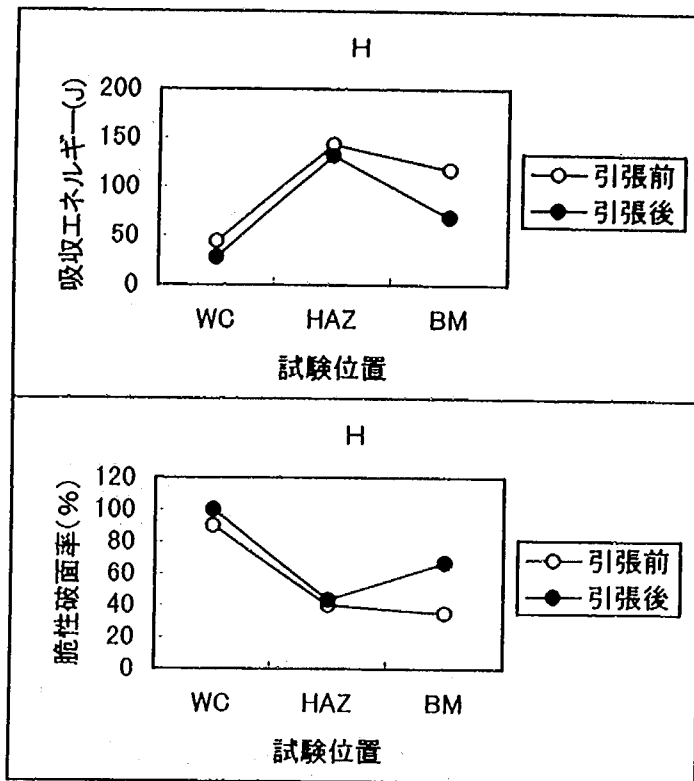


図-6.2.30 衝撃特性

7. まとめ

鉄筋コンクリート用鉄筋の機械式継手 7 種類および溶接継手 2 種類に対し、地震時に作用する荷重を想定し、常温・高速、低温・高速、一部高温・高速、弾性域・塑性域正負漸増繰返し載荷試験を行った。また、引張試験前・後に継手部の主な位置の顕微鏡によるマクロ、ミクロ観察、ビッカースまたはブリネル硬さ、シャルピー衝撃試験を行った。これらの試験結果より以下のことが分かった。

(1) 全継手とも、破断は鉄筋母材部で生じており延性的な破断であった。引張強さも鉄筋母材と同等であり、継手は鉄筋に対して十分な強度を有していた。

(2) 継手ごとの挙動の特徴は以下のとおりであった。

機械式継手は、継手の構造形式の違いによるスリーブなどからの鉄筋の伸出により変形が異なる。

ねじ節・ロックナット継手 A は、ねじの角度が大きく、しかもガタが大きいので、ナットによる締付の効果がなくなると急に変形量が大きくなり、鉄筋とカプラーがガタガタになってしまう。そのような状態でもねじ節によってカプラーに応力が伝達されるので強度が低下することはない。

ねじ節・充填継手 B は、節とカプラーのすき間を樹脂充填しているのでカプラー両端部の一部の樹脂が剥離するのみで、継手 A ほど変形せず、しっかり接合されている。

端部ねじ・摩擦圧接継手 C の摩擦圧接部は、ガス圧接などと同じようによく接合されておれば硬くなりほとんど変形しない。ねじ部も通常のねじ加工なのでガタを生じることもなく、この継手の変形は極めてわずかであった。

端部ねじ・圧着継手 D のねじ部は継手 C と同様にほとんど変形することはない。スリーブ圧着部は鉄筋が引っ張られて細くなることにより端部からの圧着切れにより鉄筋が伸び出すものの、影響が大きいのは節 1 個分程度であった。

スリーブ・充填継手 E は、充填材がモルタルなので付着切れが大きく両端部から 70～80mm 程度であった。そのため伸出量もかなり大きかったものの、継手長も長いので継手部の伸びは、継手 A、B と同程度であった。

スリーブ・圧着継手 F は、継手 D の圧着部と同様に、圧着切れによって伸び出す。その影響範囲は継手 D より大きめであり、圧着方法により圧着の効果が異なるようである。

エンクローズ溶接およびフラッシュ溶接による溶接継手は機械式継手のように鉄筋の伸出はなく、鉄筋母材より強度の高い溶接材料を用いること、母材熱影響部の変化などにより溶接部は健全な機械的性質を示した。

以上のように機械式継手、溶接継手とも実験室内の試験では地震時に作用する荷重に対して十分に耐えることができるものと考えられる。この性能を十分に発揮させるためには、施工不良などを見落とさないような施工管理が重要である。機械式継手はカプラー、スリーブ内に十分な長さの鉄筋を確保されていること、すき間への充填などが確実に行われていることなどを確認すればよく、2. 2 節のとおり、すでに管理方法は確立されているといっているであろう。溶接継手も溶融させることから、固相接合であるガス圧接継手よりは信頼性は高いといえ

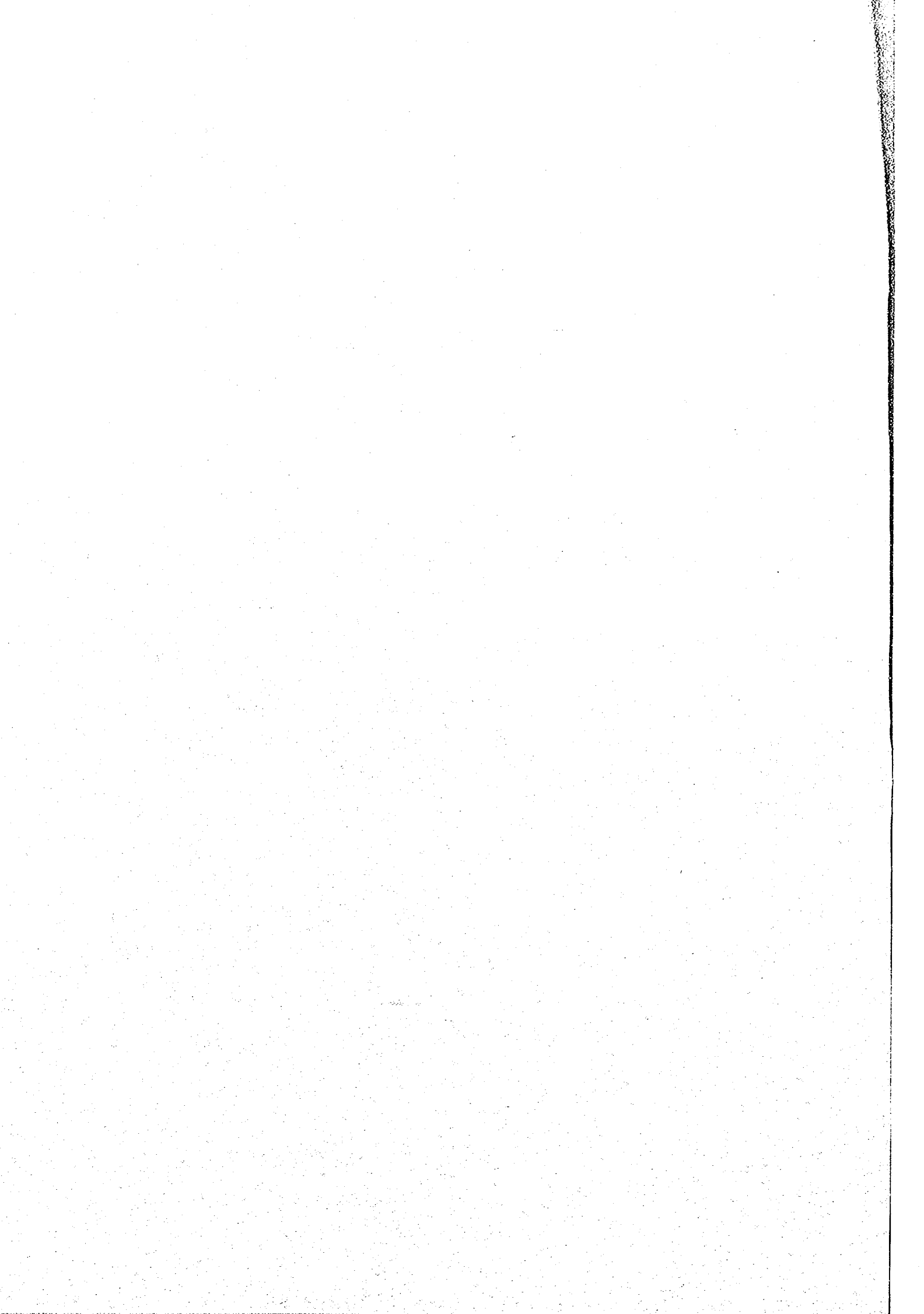
るであろう。

最後に、継手の評価試験に関してふれておく。土木学会「鉄筋継手指針」は主に疲労について検討されたものであり、塑性域での正負繰返しを受ける地震のような挙動に対しては不十分といえるであろう。建築では、「特殊な鉄筋継手」の規定として、建設省住宅局建築指導課長通達(建設省住指発第31号、平成3(1991)年1月31日)による「鉄筋継手判定基準」がある。今回の検討はこれを参考にして弾性域・塑性域での正負繰返し試験を行った。同基準の判定は、強度の他、弾性域の剛性、すべり(残留変形)量が判定基準になっている。後2者の判定は変位量の測定結果から得られる。変位の測定には標点長(検長)の決め方が重要になる。ところが、同基準では「特定検長」を定めているものの、ただし書きによってある範囲内で自由に検長を決めることができるようになっており、不明確である。さらに重要な問題として、兵庫県南部地震によって破断した継手はもちろん、鉄筋母材も伸びて破断したものがあつたことを考えると、塑性域での正負繰返し試験では、繰返す正負のひずみまたは応力段階と繰返し回数について検討する必要があるものと考えられる。

なお、現在道路橋示方書では、橋脚の設計において塑性ヒンジが生じると想定される区間には鉄筋継手を設けることを禁じている。今回の試験結果からは、強度的には、この制限規定がきびしすぎる結果となったが、継手部の幾何学的な形状の塑性ヒンジの挙動への影響など未知の部分も多いため、ヒンジ区間には継手を設けないという原則は残すべきであると考ええる。

資料編

- 引張試験結果



継手の 種類	試験片 番号	パラメータ		実測 温度 温度 (℃)	荷重			伸び (%)	絞り (%)	一様 伸び (mm)	強度		ひずみ速度		ヤング 係数 (kN/mm ²)
		温度	速度		降伏点	最大	破断				降伏応力	引張強さ	降伏前	降伏後	
ねじ節 ロックナット	AMJ1	常温	標準	18.3	209.4	305.0	275.4	13.85	44.0	50.37	413.3	602.0	0.0118	0.1063	183.9
	AMJ2			19.0	208.7	306.0	276.7	13.62	46.8	50.80	411.9	603.9	0.0111	0.1117	177.0
	AMJ3			19.3	206.1	305.2	269.4	9.35	39.3	52.86	406.7	602.3	0.0112	0.1102	184.0
	平均			18.9	208.1	305.4	273.8	12.27	43.4	51.34	410.6	602.7	0.0114	0.1094	181.6
	AMF1		高速	16.8	232.6	321.5	274.1	11.35	46.3	46.89	459.0	634.6	5.7102	7.5390	197.0
	AMF2			17.8	232.0	321.6	277.2	16.59	44.9	46.42	457.8	634.7	6.0789	7.4313	185.3
	AMF3			17.9	233.7	321.7	271.9	14.15	45.0	47.19	461.2	635.0	6.1363	7.5992	193.5
	平均			17.5	232.8	321.6	274.4	14.03	45.4	46.83	459.3	634.8	5.9751	7.5232	191.9
	ALF1	低温	高速	-40.4	261.6	339.5	274.0	11.50	42.4		516.3	670.1	0.8579	3.8101	194.6
	ALF2			-40.2	267.5	339.4	290.9	12.08	40.7		528.0	669.9	0.8243	3.8008	198.2
	ALF3			-39.9	255.5	338.2	288.5	12.11	40.4		504.2	667.4	0.8036	3.8291	191.4
	平均			-40.2	261.5	339.0	284.5	11.90	41.2	#DIV/0!	516.2	669.1	0.8286	3.8133	194.7

継手の 種類	試験片 番号	パラメータ		実測 温度 (℃)	荷重			伸び (%)	絞り (%)	一様 伸び (mm)	強度		ひずみ速度		ヤング 係数 (kN/mm ²)
		温度	速度		降伏点	最大	破断				降伏応力	引張強さ	降伏前	降伏後	
ねじ節 充填	BMJ1	常温	標準	19.8	206.9	305.1	270.7	13.42	46.6	37.85	408.4	602.0	0.0112	0.1173	184.3
	BMJ2			20.6	207.9	304.9	266.2	14.65	42.5	36.00	410.4	601.7	0.0110	0.1231	185.8
	BMJ3			20.8	206.6	304.7	272.9	12.71	42.3	39.33	407.7	601.3	0.0114	0.1260	183.0
	平均			20.4	207.1	304.9	269.9	13.59	43.8	37.73	408.8	601.7	0.0112	0.1221	184.4
	BMF1		高速	19.7	237.3	320.7	273.3	13.16	45.9	36.24	468.3	632.9	5.8809	7.6710	198.7
	BMF2			16.9	230.8	322.7	280.3	13.29	48.6	33.97	455.5	636.9	6.3449	7.4935	199.8
	BMF3			17.4	236.4	321.6	272.9	11.82	47.4	32.43	466.6	634.8	6.0166	7.9812	188.9
	平均			18.0	234.8	321.7	275.5	12.76	47.3	34.21	463.5	634.9	6.0808	7.7152	195.8
	BLF1	低温	高速	-40.4	267.1	323.4	311.0	4.24			527.1		1.0123	4.4155	185.4
	BLF2			-40.0	268.5	340.7	308.5	11.90	39.1		530.0	672.3	1.0232	4.7517	189.0
	BLF3			-40.6	264.7	340.2	307.1	12.66	41.4		522.4	671.4	1.0065	4.6421	188.6
	平均			-40.3	266.8	334.8	308.9	9.60	40.3	#DIV/0!	526.5	671.9	1.0140	4.6031	187.7
	BHF1	高温	高速	40.6	226.4	311.0	266.4	12.90	46.5		446.8	613.8	0.9484	4.6210	180.3
	BHF2			40.4	225.4	311.0	267.7	12.16	48.7		444.9	613.8	1.0511	4.6608	178.5
	BHF3			40.6	223.1	310.6	276.8	12.46	48.3		440.3	613.0	1.0243	4.6640	180.5
	平均			40.5	225.0	310.9	270.3	12.51	47.8	#DIV/0!	444.0	613.5	1.0079	4.6486	179.8

継手の 種類	試験片 番号	パラメータ		実測 温度 温度 (℃)	荷重			伸び	絞り	一様 伸び	強度		ひずみ速度		ヤング 係数
		温度	速度		降伏点	最大	破断				降伏応力	引張強さ	降伏前	降伏後	
					(kN)										
ねじ接合 摩擦圧接	CMJ1	常温	標準	19.3	193.5	276.1	213.1	11.71	56.2	31.68	382.0	544.8	0.0107	0.1049	183.1
	CMJ2			19.3	191.6	275.2	231.7	11.85	49.4	35.91	378.1	543.1	0.0119	0.1072	191.0
	CMJ3			19.1	192.0	275.2	217.9	12.47	57.0	38.83	378.9	543.2	0.0113	0.1046	183.1
	CMJ4			18.9	192.3	275.5	234.7	11.23	47.7	32.54	379.5	543.7	0.0113	0.1066	182.3
	平均			19.2	192.4	275.5	224.4	11.81	52.6	34.74	379.6	543.7	0.0113	0.1058	184.9
	CMF1	高速		18.7	215.8	290.4	231.4	12.55	53.5	31.85	425.9	573.2	6.0715	6.8166	200.5
	CMF2			20.4	218.7	289.9	226.7	11.76	54.9	27.03	431.6	572.1	5.9628	6.3381	193.3
	CMF3			20.5	221.6	289.5	233.2	11.92	55.3	30.74	437.2	571.3	6.0821	6.5599	194.6
	平均			19.9	218.7	289.9	230.4	12.08	54.6	29.87	431.6	572.2	6.0388	6.5715	196.1
	CLF1	低温	高速	-40.5	241.2	306.2	246.4	10.60	47.2		476.0	604.3	0.9217	4.5962	198.0
	CLF2			-40.3	245.1	304.3	300.6	5.75			483.7		0.9916	4.4979	186.9
	CLF3			-40.6	244.9	306.9	244.8	10.29	50.5		483.4	605.7	0.9236	4.4399	194.4
	平均			-40.5	243.7	305.8	263.9	8.88	48.9	#DIV/0!	481.0	605.0	0.9456	4.5113	193.1

継手の 種類	試験片 番号	パラメータ		実測 温度 温度 (℃)	荷重			伸び (%)	絞り (%)	一様 伸び (mm)	強度		ひずみ速度		ヤング 係数 (kN/mm ²)
		温度	速度		降伏点	最大	破断				降伏応力	引張強さ	降伏前	降伏後	
ねじ接合 圧着	DMJ1	常温	標準	18.5	193.3	274.9	255.0	9.60	48.1	41.35	381.5	542.6	0.0102	0.0833	188.0
	DMJ2			18.6	192.6	274.5	216.3	9.65	55.8	36.51	380.1	541.7	0.0111	0.0858	187.1
	DMJ3			18.4	192.2	274.1	211.1	8.51	56.3	38.24	379.4	540.9	0.0114	0.0835	183.8
	平均			18.5	192.7	274.5	227.5	9.25	53.4	38.70	380.3	541.7	0.0109	0.0842	186.3
	DMF1	高速		19.2	266.6	289.5	233.0	10.34	50.2	33.07	526.1	571.3	5.7635	5.3259	186.7
	DMF2			19.2	221.0	288.0	229.3	10.62	54.3	35.96	436.1	568.4	5.4853	5.1999	199.4
	DMF3			14.6	225.5	290.8	242.6	8.09	52.8	36.82	445.0	574.0	6.2638	5.0376	193.8
	平均			17.7	237.7	289.4	235.0	9.68	52.4	35.28	469.1	571.2	5.8375	5.1878	193.3
	DLF1	低温	高速	-40.6	250.9	307.0	249.7	9.24	46.1		495.1	605.8	0.9930	3.5930	178.7
	DLF2			-40.8	245.0	304.8	239.7	8.87	39.8		483.5	601.6	0.9549	3.5963	190.2
	DLF3			-40.6	251.2	305.2	266.9	8.84	34.1		495.8	602.3	0.9320	3.6161	193.7
	平均			-40.7	249.0	305.7	252.1	8.98	40.0	#DIV/0!	491.5	603.2	0.9600	3.6018	187.5

継手の 種類	試験片 番号	パラメータ		実測 温度 (℃)	荷重			伸び (%)	絞り (%)	一様 伸び (mm)	強度		ひずみ速度		ヤング 係数 (kN/mm ²)
		温度	速度		降伏点 (kN)	最大	破断				降伏応力	引張強さ	降伏前	降伏後	
スリーブ 充填A	E1MJ1	常温	標準	20.7	192.5	273.5	210.4	11.96	58.1	54.19	380.0	539.8	0.0113	0.0876	184.6
	E1MJ2			20.4	193.2	276.0	242.0	13.03	43.1	58.80	381.3	544.6	0.0115	0.0877	183.6
	E1MJ3			20.6	192.4	273.7	213.7	11.30	50.6	55.96	379.6	540.1	0.0118	0.0908	179.6
	平均			20.6	192.7	274.4	222.0	12.10	50.6	56.32	380.3	541.5	0.0115	0.0887	182.6
	E1MF1	高速		16.3	225.8	289.4	230.2	11.99	51.4	57.65	445.6	571.2	5.8548	6.1727	195.3
	E1MF2			15.6	233.1	291.7	271.5	12.75		56.07	460.1	575.8	6.1663	6.1828	187.0
	E1MF3			16.7	230.7	291.9	237.6	12.71	38.9	58.04	455.3	576.0	5.6944	6.5409	190.8
	平均			16.2	229.9	291.0	246.4	12.48	45.2	57.25	453.7	574.3	5.9052	6.2988	191.0
	E1LF1	低温	高速	-40.9	259.1	307.1	258.1	11.63	44.5		511.3	606.1	0.9252	3.2069	188.1
	E1LF2			-40.6	246.7	302.9	273.8	11.93	33.8		487.0	597.9	0.9060	3.2126	199.4
	E1LF3			-39.7	262.3	306.6	258.5	10.17	37.9		517.7	605.1	0.9165	3.1817	198.7
	平均			-40.4	256.0	305.5	263.5	11.25	38.7	#DIV/0!	505.3	603.0	0.9159	3.2004	195.4

継手の 種類	試験片 番号	パラメータ		実測 温度 (℃)	荷重			伸び (%)	絞り (%)	一様 伸び (mm)	強度		ひずみ速度		ヤング 係数 (kN/mm ²)
		温度	速度		降伏点 (kN)	最大 (kN)	破断				降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏前 (%/sec)	降伏後 (%/sec)	
スリーブ 充填B	E2MJ1	常温	標準	20.6	190.9	273.5	217.3	11.11	51.3	60.98	376.7	539.8	0.0115	0.0974	180.2
	E2MJ2			20.5	191.6	273.4	213.2	10.97	43.8	59.11	378.2	539.5	0.0117	0.0840	175.7
	E2MJ3			20.5	193.6	274.9	236.5	10.88	41.2	58.51	382.1	542.5	0.0130	0.0853	179.5
	平均			20.5	192.0	273.9	222.3	10.99	45.4	59.53	379.0	540.6	0.0121	0.0889	178.5
	E2MF1	高速		17.0	226.1	289.6	226.6	9.95	46.4	51.90	446.3	571.5	3.3488	5.6400	305.5
	E2MF2			17.0	222.8	290.7	248.2	9.72	41.9	50.72	439.8	573.6	5.5134	5.5072	188.4
	E2MF3			17.0	231.2	290.5	229.8	11.20	51.5	52.85	456.4	573.4	5.4040	5.4111	197.3
	平均			17.0	226.7	290.3	234.9	10.29	46.6	51.82	447.5	572.8	4.7554	5.5194	230.4
	E2LF1	低温	高速	-40.0	246.9	302.2	264.4	8.66	33.6		87.2	596.3	0.9585	2.9443	201.2
	E2LF2			-40.5	245.6	303.7	269.1	9.13	44.3		484.7	599.3	0.8796	2.9569	191.4
	E2LF3			-40.0	249.5	303.1	272.5	9.40	35.2		492.4	598.2	0.9261	2.9176	191.4
	平均			-40.2	247.3	303.0	268.7	9.06	37.7	#DIV/0!	354.8	597.9	0.9214	2.9396	194.7

継手の 種類	試験片 番号	パラメータ		実測 温度 (℃)	荷重			伸び (%)	絞り (%)	一様 伸び (mm)	強度		ひずみ速度		ヤング 係数 (kN/mm ²)
		温度	速度		降伏点 (kN)	最大 (kN)	破断				降伏応力引張強さ (N/mm ²)		降伏前 降伏後 (%/sec)		
スリーブ 圧着	FMJ1	常温	標準	21.4	190.8	273.2	220.8	10.44	55.2	42.10	376.5	539.1	0.0121	0.0933	171.0
	FMJ2			21.3	191.8	273.8	215.4	9.11	53.7	36.80	378.5	540.4	0.0127	0.0879	167.0
	FMJ3			19.5	192.2	274.1	232.6	12.07	49.9	41.14	379.3	540.9	0.0109	0.0919	184.3
	平均			20.7	191.6	273.7	222.9	10.54	52.9	40.01	378.1	540.1	0.0119	0.0910	174.1
	FMF1	高速	20.4	217.8	287.5	240.2	10.72	52.8	48.11	429.8	567.3	5.8286	6.9986	185.6	
	FMF2		20.1	217.5	288.0	250.8	11.11	47.1	39.67	429.2	568.4	5.3498	5.8575	198.2	
	FMF3		19.8	221.0	288.7	230.7	12.83	54.2	39.40	436.1	569.8	5.8513	5.7377	194.1	
	平均		20.1	218.8	288.1	240.6	11.55	51.4	42.39	431.7	568.5	5.6766	6.1979	192.6	
	FLF1	低温	高速	-40.8	245.1	306.4	244.3	9.72	51.1		483.7	604.6	1.0031	3.6181	183.3
	FLF2			-40.6	250.8	305.5	249.9	9.55	48.2		494.9	603.0	0.9694	3.6231	192.5
	FLF3			-40.6	251.6	305.3	244.4	10.35	45.4		496.6	602.6	0.8954	3.6288	204.1
	平均			-40.7	249.2	305.7	246.2	9.87	48.2	#DIV/0!	491.7	603.4	0.9560	3.6233	193.3

継手の 種類	試験片 番号	パラメータ		実測 温度 温度 (℃)	荷重			伸び	絞り	一様 伸び	強度		ひずみ速度		ヤング 係数
		温度	速度		降伏点	最大	破断				降伏応力	引張強さ	降伏前	降伏後	
溶接 エンクロース	GMJ1	常温	標準	19.7	193.4	274.5	234.9	16.71	44.8	28.83	381.6	541.8	0.0119	0.1919	175.3
	GMJ2			20.2	193.7	275.0	220.3	20.40	56.0	26.37	382.3	542.8	0.0125	0.1794	166.3
	GMJ3			20.5	191.6	272.9	239.5	18.03	43.9	27.23	378.1	538.6	0.0124	0.1757	171.3
	平均			20.1	192.9	274.1	231.6	18.38	48.2	27.48	380.7	541.1	0.0123	0.1823	171.0
	GMF1			高速	22.2	226.9	288.0	238.8	23.07	51.9	28.35	447.8	568.3	7.2574	10.7947
	GMF2	22.2	230.1		288.6	225.4	21.11	55.6	27.78	454.2	569.5	7.0187	10.6996	176.8	
	GMF3	22.0	227.0		288.0	239.6	19.51	44.8	27.58	448.1	568.3	6.7470	10.5043	176.9	
	平均	22.1	228.0		288.2	234.6	21.23	50.8	27.90	450.0	568.7	7.0077	10.6662	175.8	
	GLF1	低温	高速	-40.2	252.5	304.4	242.4	20.08	48.7	28.63	498.4	600.7	1.1307	5.1954	179.4
	GLF2			-40.4	252.1	302.7	244.8	20.47	46.5	28.10	197.5	597.4	1.1377	4.3777	177.6
	GLF3			-39.8	247.3	300.9	242.1	19.08	41.7	28.01	488.1	593.8	1.0685	5.0571	188.3
	平均			-40.1	250.6	302.7	243.1	19.88	45.6	28.25	394.7	597.3	1.1123	4.8767	181.8

継手の種類	試験片番号	パラメータ		実測温度 温度 (℃)	荷重			伸び (%)	絞り (%)	一様 伸び (mm)	強度		ひずみ速度		ヤング 係数 (kN/mm ²)
		温度	速度		降伏点	最大	破断				降伏応力	引張強さ	降伏前	降伏後	
溶接 フラッシュ	HMJ1	常温	標準	21.8	191.4	274.6	244.5	19.14	42.2	28.87	377.7	541.9	0.0118	0.1895	177.3
	HMJ2			21.8	190.0	273.1	221.1	20.70	54.6	28.30	374.9	538.9	0.0106	0.1895	189.8
	HMJ3			22.0	190.8	273.1	220.7	18.20	53.6	29.58	376.5	539.0	0.0105	0.1810	196.7
	平均			21.9	190.7	273.6	228.8	19.35	50.1	28.92	376.4	539.9	0.0110	0.1867	187.9
	HMF1	高速		21.2	224.9	287.9	242.5	20.29	48.4	29.69	443.9	568.2	5.8968	11.3784	212.8
	HMF2			20.4	224.4	288.4	248.4	19.60	41.8	27.30	442.9	569.1	7.0553	7.1587	180.7
	HMF3			20.3	221.5	288.3	243.2	20.62	44.7	26.14	437.2	569.0	6.4689	10.8663	182.2
	平均			20.6	223.6	288.2	244.7	20.17	45.0	27.71	441.3	568.8	6.4737	9.8011	191.9
	HLF1	低温	高速	-39.7	246.0	306.3	259.9	19.29	32.1	28.70	485.4	604.4	0.9301	7.3114	174.4
	HLF2			-40.7	249.0	306.7	247.2	20.14	33.9	28.76	491.5	605.2	1.0717	7.3949	185.4
	HLF3			-40.4	247.1	303.4	242.9	19.57	52.0	28.70	487.6	598.8	1.1423	9.6072	179.5
	平均			-40.3	247.4	305.5	250.0	19.67	39.3	28.72	488.2	602.8	1.0480	8.1045	179.8

継手の破断伸び

縦手の種類	8D		4D		縦手部	4D		8D		縦手部	縦手部	縦手部を除いた母材部	8D	縦手の種類	8D		4D		縦手部	4D		8D	縦手部	縦手部	縦手部を除いた母材部	8D										
	上	上上	上下	(4D)		(8D)	下上	下下	下						+16D	+8D	16D	8D		上	上上						上下	(4D)	(8D)	下上	下下	下	+16D	+8D	16D	8D
	平均	平均	平均	平均		平均	平均	平均	平均						平均	平均	平均	平均		平均	平均						平均	平均	平均	平均	平均	平均	平均	平均	平均	平均
縦手ナット	S	15.4	14.2	16.5	6.9		26.5	13.8	20.2	13.9	13.9	21.6	29.1	充填A	S	27.8	23.8	31.8	5.2			13.9	13.7	13.8	13.8	120	25.1	31.3								
		20.8	17.7	24.0	7.5		18.8	15.3	16.0	14.5	13.6	22.8	28.6			19.9	18.0	21.7	5.6			28.2	18.9	23.6	14.5	13.0	26.3	34.0								
	平均	16.7	20.0	13.5	6.3		12.0	12.5	12.3	11.5	9.3	18.0	19.7		平均	13.3	13.4	13.3	5.7			27.6	14.5	21.1	12.0	11.3	21.8	29.6								
	H	19.8	22.8	17.1	7.4		14.5	13.9	14.2	13.6	11.4	21.1	23.9		平均	20.4	18.4	22.3	5.5			23.2	15.7	19.5	13.5	12.1	24.4	31.6								
	平均	14.4	14.0	14.7	12.3		28.0	16.1	22.0	16.1	16.6	25.1	35.0		H	13.9	13.5	14.4	6.9			26.1	16.9	21.5	12.9	12.0	23.4	31.5								
	平均	16.3	13.9	18.6	7.2		25.1	15.1	20.1	14.3	14.2	22.2	29.8		平均	19.5	18.1	20.9	7.4			21.9	17.0	19.5	14.1	12.7	25.5	33.4								
	LH	16.8	16.8	16.8	9.0		22.5	15.0	18.8	14.6	14.0	22.8	29.6		平均	17.1	17.4	16.9	7.0			27.2	17.6	22.4	14.0	12.7	25.5	33.3								
	平均														LH	16.9	16.3	17.4	7.1			25.1	17.2	21.1	13.7	12.5	24.8	32.8								
	平均														平均							14.6			6.1	11.6		30.3								
	C	14.5	15.3	13.8	7.8		23.0	13.6	18.3	13.3	12.7	20.6	26.7		平均							25.6			6.0	11.9		31.7								
	平均	14.4	15.9	13.0	8.7		22.8	17.5	20.1	14.2	13.0	22.1	27.5		平均	23.5	17.1	29.7	6.0			24.5			4.5	10.2		26.9								
	平均	20.5	25.7	15.4	7.8		14.0	14.3	14.2	13.9	11.1	21.7	23.3		C	18.7	17.4	19.9	6.2			15.3	13.5	14.4	13.1	12.3	23.8	32.3								
平均	16.5	19.0	14.1	8.0		19.9	15.1	17.5	13.8	12.3	21.5	25.8	平均	22.8	17.2	28.3	5.7			31.5	14.4	23.0	14.3	13.6	25.8	35.7										
充填	S	22.4	17.5	27.5	3.4		14.1	13.5	13.8	14.2	13.4	19.3	23.2	スリッパ	S	21.6	17.3	28.0	6.0			21.2	14.7	18.0	13.6	12.7	24.7	33.3								
	平均	21.7	16.4	27.1	3.5		18.7	16.1	17.4	15.2	14.6	20.8	25.4		平均	16.2	17.3	15.0	5.3			28.9	13.5	21.2	12.2	11.1	23.6	31.8								
	平均	14.8	15.3	14.2	3.8		24.3	14.5	19.4	13.5	12.7	18.5	22.1		平均	23.9	19.9	27.9	5.0			16.4	15.3	15.8	12.7	11.0	24.5	31.5								
	平均	19.6	16.4	22.9	3.6		19.0	14.7	16.9	14.3	13.6	19.5	23.5		平均	25.4	22.9	28.0	4.4			17.8	16.2	17.0	13.1	10.9	25.4	31.2								
	H	13.8	14.4	13.2	4.8		25.7	13.5	19.6	13.5	13.2	18.4	23.0		平均	21.8	20.0	23.6	4.9			21.0	15.0	18.0	12.7	11.0	24.5	31.5								
	平均	19.0	15.1	22.8	4.6		16.3	14.8	15.6	13.9	13.3	19.0	23.0		H	21.8	16.9	26.7	4.4			13.9	13.7	13.8	11.3	10.0	21.9	28.5								
	平均	12.3	11.8	12.7	4.4		21.6	11.6	16.6	11.8	11.8	16.0	20.3		平均	20.8	16.4	25.2	4.2			14.7	16.1	15.4	11.4	9.7	22.1	27.9								
	LH						21.2	13.3	17.3	13.0	12.8	17.8	22.1		平均	17.8	16.7	18.9	4.7			27.6	17.7	22.7	12.8	11.2	24.6	32.1								
	平均														平均	20.1	16.7	23.6	4.5			18.7	15.8	17.3	11.8	10.3	22.9	29.5								
	平均														LH							24.9			3.3	8.7		24.8								
	平均														平均							23.7			3.8	9.1		26.1								
	HH														平均							14.6			3.8	9.4		27.1								
平均													平均							25.5			3.6	9.1		26.0										
平均													C	21.8	16.3	27.3	4.3			15.1	13.7	14.4	11.4	10.2	22.1	29.1										
平均													平均	22.7	17.6	27.8	4.3			14.3	13.6	13.9	11.5	10.1	22.3	29.0										
平均													平均	23.4	19.1	27.8	4.5			17.0	14.8	15.9	12.3	10.7	23.9	30.8										
平均													平均	22.6	17.6	27.6	4.3			15.4	14.0	14.8	11.8	10.3	22.8	29.7										
C	21.9	17.7	25.9	4.4		18.6	16.4	17.5	15.6	14.8	21.3	25.5	圧着	S	22.0	16.7	27.3	1.9			15.6	16.0	15.8	12.2	10.4	20.2	24.0									
平均	18.2	15.1	21.2	4.8		15.4	13.4	14.4	13.2	12.7	18.0	21.7		平均	25.0	28.5	21.4	2.3			14.6	13.9	14.2	12.8	9.1	21.1	20.9									
平均	14.3	14.4	14.3	3.7		28.2	18.3	23.2	14.8	13.9	20.1	23.8		平均	19.1	18.0	20.2	2.6			28.8	16.2	22.6	13.6	12.1	22.5	27.9									
平均	18.1	15.7	20.5	4.3		20.7	16.0	18.4	14.6	13.8	19.8	23.7		平均	22.0	21.1	23.0	2.3			19.7	15.4	17.5	12.9	10.5	21.3	24.3									
S	23.9	20.4	27.4	0.8		15.0	14.8	14.9	13.8	11.7	19.7	21.9		平均	16.5	17.3	15.8	2.3			27.6	16.8	22.2	12.6	10.7	20.8	24.6									
平均	23.5	18.5	28.5	0.5		14.8	14.5	14.7	13.5	11.8	19.3	22.1		平均	15.7	15.5	15.9	2.5			28.6	14.1	21.4	12.2	11.1	20.2	25.5									
平均	15.9	14.7	17.1	0.8		28.3	17.1	22.7	13.7	12.5	19.6	23.4		平均	23.3	23.4	23.2	2.6			29.2	16.6	22.9	15.0	12.8	24.8	29.5									
平均	21.4	14.3	28.4	0.7		13.0	13.5	13.3	12.2	11.2	17.6	21.3		平均	18.5	18.7	18.3	2.5			28.5	15.8	22.2	13.3	11.6	21.9	26.6									
平均	20.3	15.8	24.7	0.7		18.7	15.0	16.9	13.1	11.8	19.1	22.2		LH											1.2	9.7		22.5								
H	23.8	17.1	30.4	1.2		14.9	13.7	14.3	13.5	12.5	19.6	23.8		平均							25.5				1.8	9.6		22.5								
平均	14.7	14.9	14.5	0.9		28.0	15.0	21.5	12.9	11.8	18.5	22.0		平均							25.3				1.8	9.6		22.5								
平均	22.6	18.5	26.6	0.8		16.6	14.6	15.6	13.5	11.9	19.5	22.3		平均							17.5				1.8	10.3		24.0								
平均	20.3	16.8	23.8	1.0		19.8	14.4	17.1	13.3	12.1	19.2	22.7	C	18.2	17.7	18.8	1.9			28.8	19.5	24.1	13.6	11.4	22.4	26.3										
LH													平均	15.6	14.7	16.4	2.4			29.0	18.0	23.5	12.8	11.2	21.1	25.9										
平均													平均	14.4	14.3	14.5	2.2			29.3	18.7	24.0	12.5	10.8	20.6	24.7										
平均													平均	16.1	15.6	16.6	2.2			29.0	18.7	23.9	13.0	11.1	21.4	25.6										
C	16.8	17.0	16.6	0.5		28.8	18.1	23.4	14.2	12.4	20.3	23.1	エンロ ス溶接	S	12.8	13.3	12.3	1.6			16.7	17.8	24.5	21.0												
平均	16.0	15.7	16.2	0.9		30.5	15.5	23.0	13.7	12.8	19.9	24.2		平均	22.8	20.5	24.8	20.4			20.4	12.2	14.2	13.1												
平均	14.0	14.3	13.6	0.8		29.1	16.7	22.9	13.0	11.7	18.8	22.1		平均	21.9	28.1	16.4	18.0			18.0	14.8	17.4	16.0												
平均	15.6	15.7	15.5	0.7		29.5	16.8	23.1	13.6	12.3	19.7	23.1		平均	19.1	20.6	17.8	18.4			18.4	14.9	18.7	16.7												
S	23.8	21.7	25.9	0.5		16.8	16.9	16.8	12.5	9.6	20.6	22.0		平均	17.1	18.5	15.9	23.1			23.1	25.2	20.3	22.9												
平均	14.9	15.7	14.1	0.6		28.2	17.0	22.7	11.7	9.6	19.2	22.0		平均	14.7	16.1	13.6	21.1			21.1	24.3	19.8	22.2												
平均	25.3	30.9	19.8	0.6		17.6	16.8	17.2	13.1	8.5	21.6	19.4		平均	23.2	26.4	20.3	19.5			19.5	14.8	17.9	16.3												
平均	21.3	22.8	19.9	0.6		20.8	16.9	18.9	12.4	9.3	20.5	21.1		平均	18.3	20.3	16.6																			