

# 超鉄鋼高力ボルトを用いた摩擦接合パイロット試験

山口 隆司, 増田 浩志, 木村 勇次

<b>Citation</b>	財団法人国土技術研究センター研究開発助成研究成果報告書.
<b>Issue Date</b>	2005-03
<b>Type</b>	Research Paper
<b>Textversion</b>	Publisher
<b>Rights</b>	© Author(s).

Self-Archiving by Author(s)  
Placed on: Osaka City University

# 超鉄鋼高力ボルトを用いた摩擦接合パイロット試験

(助成番号 04010)

平成16年度

財団法人国土技術研究センター研究開発助成

研究成果報告書

平成18年3月

助成研究者 山口 隆司

(大阪市立大学大学院工学研究科)

共同研究者 増田 浩志

(宇都宮大学工学部建設学科)

共同研究者 木村 勇次

(物質・材料研究機構新構造材料センター)

## 目次

1.	はじめに	1
1.1	研究目的およびその概要	
2.	素材試験	2
3.	製品引張試験	4
4.	単純引張試験	6
4.1	概要	
4.2	試験体および計測項目	
4.3	試験結果と考察	
4.2.1	ボルト張力なしの場合	
4.2.2	ボルト張力ありの場合	
5.	ナット回転角試験	12
5.1	概要および試験方法	
5.2	試験体	
5.3	試験結果と考察	
6.	摩擦接合継手引張試験	15
6.1	概要	
6.2	試験体	
6.3	試験方法および計測項目	
6.4	試験結果と考察	
6.4.1	ボルト導入軸力	
6.4.2	荷重 - 変位関係	
6.4.3	すべり係数	
6.4.4	座金下面の表面状態	
7.	まとめ	27

## 1. はじめに

### 1.1 研究目的およびその概要

超鉄鋼プロジェクト(物質・材料研究機構)において開発された超鉄鋼高力ボルトを,土木・建築鋼構造物の代表的な現場接合法である高力ボルト摩擦接合継手に適用するために,これらに対するパイロット実験を行い,超鉄鋼高力ボルト摩擦接合の実用化に向けた基礎的資料の収集と技術的検討課題について整理・抽出することを目的とする。

超鉄鋼プロジェクトによって開発されたボルト用プロトタイプ鋼は,強度は従来鋼(F10T)の1.8倍の1800MPa級でありながら,水素トラップサイトの利用により優れた耐遅れ破壊を有する。その製法は,これまでの従来鋼の製法を基本に,焼入れおよび高温焼戻し処理により強度特性が付与される。特に,本鋼材は,他の金属元素などの付加を極力抑えており,リサイクル性が良い点も特徴である。

本研究で用いたボルトは,プロトタイプ鋼から,東部を熱間成形,ネジ部を冷間成形で作製した後,焼入れ,焼戻しを施している。

本研究では,以下の3つのパイロット実験を行う。

- 1 単純引張試験
- 2 ナット回転角試験
- 3 摩擦接合引張試験

単純引張試験および ナット回転角試験は,超高力ボルト摩擦接合継手の引張試験のための予備試験と位置づけられ,摩擦接合引張試験の成立の可否(軸力導入の可否,母板および座金の有害変形の有無や超高力ボルトがこれらに与える影響など)について検討する。摩擦接合引張試験では,継手構造としての成立の可否,従来設計基準の適用の可否などの検討項目に対しての基礎的資料を収集する。

これら から の試験では,載荷に用いる万能試験機の載荷能力,超鉄鋼高力ボルトが現時点で製造可能な呼び径等を考慮し,土木・建築分野で多用される呼び径M22のボルトではなく,呼び径M16のボルトを用いる。

### 1.2 研究組織

本研究の研究組織を以下に示す。

大阪市立大学大学院	工学研究科	助教授	山口隆司	研究総括,研究実施
宇都宮大学	工学部	助教授	増田浩志	研究実施
物質・材料研究機構		主任研究員	木村勇次	研究実施

単純引張試験と ナット回転角試験は宇都宮大学で, 摩擦接合引張試験は,宇都宮大学と大阪市立大学とで分担して行った。また,超鉄鋼高力ボルトの製造,製造された超鉄鋼高力ボルトの性能試験(高力ボルトの性能試験としてJISで定められている試験)は,物質・材料研究機構が行った。

### 1.3 研究経費

2,000千円

## 2. 素材試験

超鉄鋼高力ボルトに用いられた超鉄鋼材料の機械的性質を調べるために、JISB1186「摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット」に示される方法に従って、製作された超鉄鋼高力ボルトから材料試験片を切り出し、引張試験を行った。引張試験は、首下長さの異なる2種類のボルト（首下長さ75mmと115mm）に対して行った。

試験結果のまとめを表1に、引張試験から得られた応力-ひずみ関係を図1にそれぞれ示す。

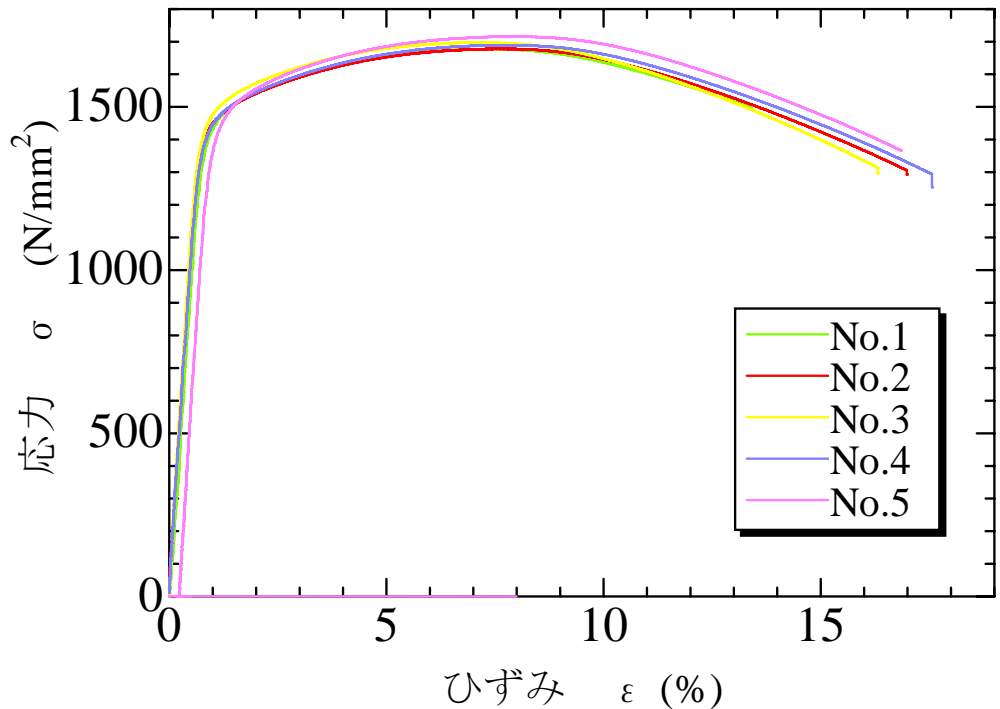
引張強さは当初目標である、1800N/mm<sup>2</sup>に到達せず、1700N/mm<sup>2</sup>にとどまっている。これは、超高力ボルトを通常の焼入れおよび焼戻しプロセスで量産しようとした場合では焼入処理中にボルトのねじ底部に焼割れが生じたため、ボルトの焼入れ方法を一部変更したことによる。一方、伸びと絞りについてはF10T高力ボルトで要求されている値（伸び14%以上、絞り40%以上）と同等の値を示している。これらのことから、本研究で用いた超鉄鋼高力ボルトの素材はF16Tクラスの高力ボルトとしての性能を満足していると判断できる。

表1 試験結果のまとめ  
(a) 首下長さ75mm

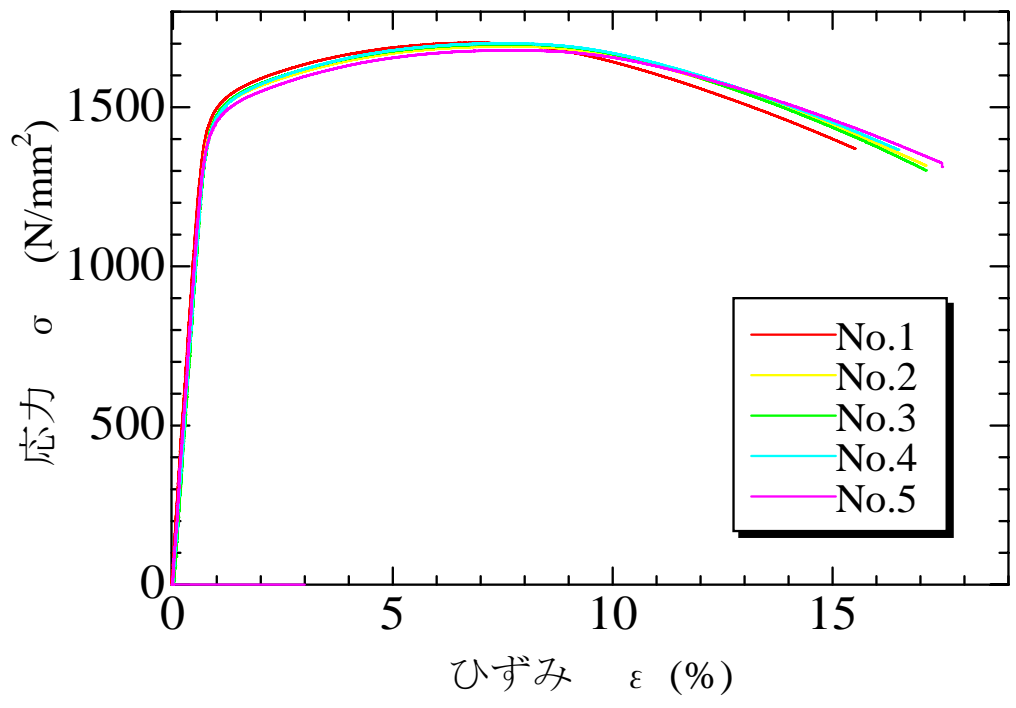
試験片	0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	均一伸び (%)	全伸び (%)	絞り(%)
No.1	1422	1677	6.86	12.5	30.5
No.2	1425	1678	7.04	16.3	45.1
No.3	1440	1697	6.57	15.7	44.4
No.4	1417	1689	6.93	16.9	46.8
No.5	1422	1715	7.05	15.9	43.5
平均	1425	1691	6.9	15.5	42.1
min	1417	1677	6.6	12.5	30.5
max	1440	1715	7.1	16.9	46.8

(b) 首下長さ115mm

試験片	0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	均一伸び (%)	全伸び (%)	絞り(%)
No.1	1472	1702	6.12	14.8	41
No.2	1465	1691	7.05	16.4	44.9
No.3	1472	1698	7.02	16.4	45.7
No.4	1457	1700	6.98	15.7	42.5
No.5	1440	1679	7.23	16.8	43.8
平均	1461	1694	6.9	16.0	43.6
min	1440	1679	6.1	14.8	41.0
max	1472	1702	7.2	16.8	45.7



(a) 首下長さ 75mm



(b) 首下長さ 115mm

図1 素材の応力-ひずみの関係

### 3. 製品引張試験

超鉄鋼高力ボルト製品の機械的性質を調べるために、JIS B1186「摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット」に示される手法に従って製品引張試験を行った。製品引張試験の結果を表2にまとめる。製品の引張試験時の様子を写真1に、引張試験後のボルトの一例を写真2に示す。

首下長さが115mmのボルトについては、5本中1本が頭部破断、2本が頭部とねじ部の2カ所で破断した。それ以外の首下長さのボルトについては全数がねじ部で破断した。製品では、ボルト頭部の頭飛びをしないことが求められており、問題である。これについては、ボルトの製造過程で生じた欠陥等が影響したものと考えられる。

ボルト頭部硬さについては、F10T高力ボルトでHRC27～38となっており、超鉄鋼高力ボルトの方が硬いことがわかる。

表2 製品引張試験結果のまとめ

(a) 首下長さ115mm			
	製品引張荷重(kN)	破断部	
No.1	262	ねじ部	
No.2	264	頭部+ねじ部	
No.3	259	頭部+ねじ部	
No.4	256	ねじ部	
No.5	35	頭部	
(b) 首下長さ85mm			
	製品引張荷重(kN)	破断部	ボルト頭部硬さ(HRC)
No.1	267	ねじ部	47.2
No.2	262	ねじ部	48.8
No.3	273	ねじ部	49.2
No.4	266	ねじ部	49.7
No.5	258	ねじ部	47.5
(c) 首下長さ75mm			
	製品引張荷重(kN)	破断部	ボルト頭部硬さ(HRC)
No.1	259	ねじ部	48.7
No.2	254	ねじ部	47.7
No.3	255	ねじ部	49.8
No.4	256	ねじ部	48
No.5	追加トルク試験紙使用したため、試験できず		
(d) 首下長さ60mm			
	製品引張荷重(kN)	破断部	ボルト頭部硬さ(HRC)
No.1	179	ねじ部	47.8
No.2	236	ねじ部	47.8
No.3	237	ねじ部	48.3
No.4	229	ねじ部	48.5
No.5	220	ねじ部	49.0



写真1 引張試験時の様子



写真2 引張試験後の一例



## 4. 単純引張試験

### 4.1 概要

本試験は、2枚の締結板を介して超鉄鋼高力ボルトに引張力を作用させ、ボルトが破断に至るまで載荷するものである。試験の概要を図2に示す。図に示すように、上下の治具を万能試験機により圧縮することで、ボルトに引張力が作用する構造となっている。締結板の厚さは28mmである。本試験はJISで規定される製品の引張試験とは異なり、実際に用いられる接合形式に近い状態でのボルトの引張特性を調べるものである。

### 4.2 試験体および計測項目

本試験で用いた超鉄鋼高力ボルト試験体の一覧を表3に示す。試験は、ボルトに張力を導入する場合と導入しない場合の2種類の場合に対して行った。また、ねじ部長さの影響を調べるために、ねじ部長さを通常のねじ部長さである30mmとしたものと75mmとしたものの2種類を用意した。試験体名の最初の英数字(T1/T2)が張力の有無(T1:張力なし, T2:張力あり)を、2番目の数字がねじ部長さを表している。試験体の形状を図3に示す。あらかじめ張力を導入するT2試験体に対する導入張力は、本超鉄鋼高力ボルトがF16T相当であることを考慮し、F16T相当ボルトの設計導入張力185kNとした。

本試験では、作用力(万能試験機で示される圧縮荷重)、締結板間の離間変位(4カ所)を計測した。離間変位の計測位置を図2に、載荷時の様子を写真3に示す。

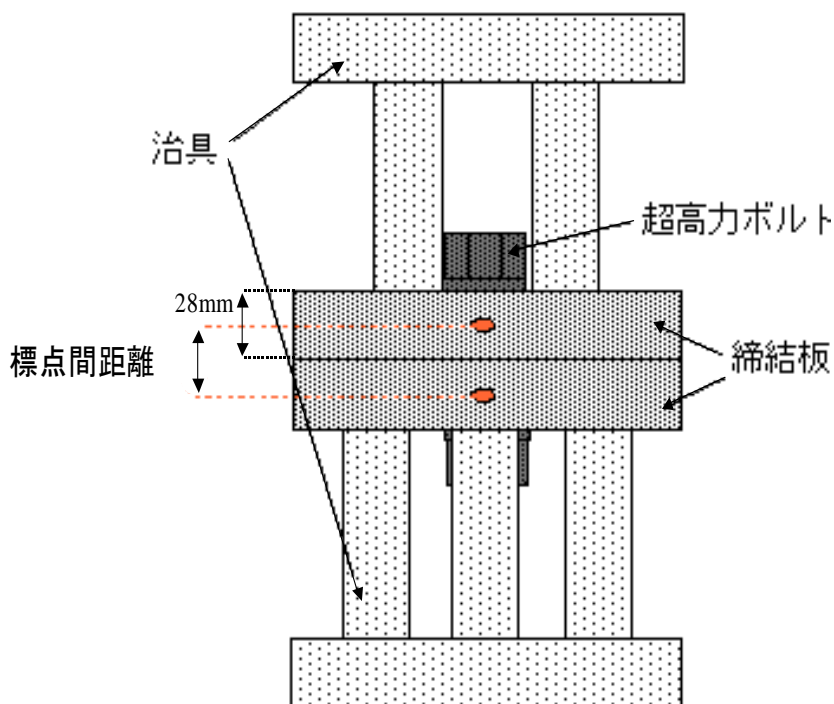
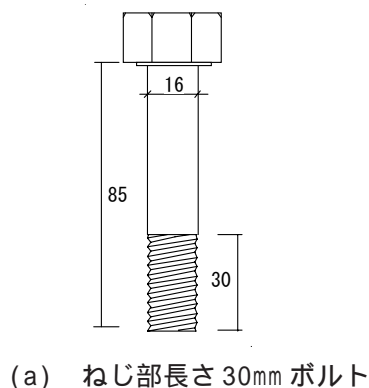
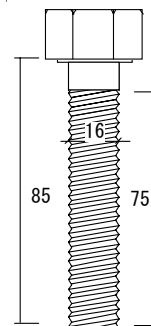


図2 載荷治具概要



(a) ねじ部長さ 30mm ボルト



(b) ねじ部長さ 75mm ボルト

図3 試験体の形状(単位 mm)

表3 単純引張試験試験体リスト

試験体名	試験名	鋼種	ボルト径	首下長さ	ねじ部長さ
T1-UH-30-1	単純引張試験(ボルト張力無)	F18T (F16T)	M16	85mm	30mm
T1-UH-30-2					
T1-UH-30-3					
T1-UH-75-1					75mm
T1-UH-75-2					
T1-UH-75-3					
T2-UH-30-1	単純引張試験(ボルト張力有)	F18T (F16T)	M16	85mm	30mm
T2-UH-30-2					
T2-UH-30-3					
T2-UH-75-1					75mm
T2-UH-75-2					
T2-UH-75-3					



写真3 載荷時の様子

#### 4.3 試験結果と考察

##### 4.3.1 ボルト張力なしの場合

ボルト張力なしの場合の単純引張試験の結果のまとめを表4に示す。また、得られた荷重と平均離間変位の関係を図4に示す。比較のため、F10T高力ボルトの場合の結果もそれぞれ示す。また、破断後のボルトの写真を写真4に示す。

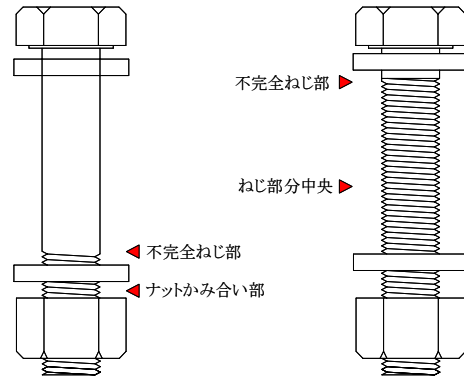
破断部位は、ねじ部長さが通常の30mmのもので、不完全ねじ部2体、ナットかみ合い部1体、ねじ部が長い75mmのもので不完全ねじ部2体、ねじ部中央部1体であった。試験体の破断部位については、F10T高力ボルトのそれと同様の傾向を有していると思われ、問題はないと思われる。荷重-平均離間変位関係については、ねじ部長さ30mmのものでは、試験体ボルト間に有意な差異は認められない。しかし、ねじ部長さが75mmのものでは、試験体間に大きな差異が認められ、最大荷重も大きく異なっている。これは、素材またはボルトの製造過程で生じたねじ部の欠陥が影響したためと考えられる。しかしながら、ねじ部長さが75mmのものでも、ねじ部長さが30mmのものと同様の強度を示しながら最大荷重時の変形量が大きく改善されたものもあり、ねじ部に問題を生じなければ、より高変形能な超鉄鋼高力ボルトが可能となると考えられる。

F10T高力ボルトとの比較では、ねじ部長さが30mmの場合、破断時の平均離間変位がF10T高力ボルトのそれに比べてかなり小さくなっている。したがって、超鉄鋼高力ボルト製品としては、変形性能がやや不足しているとも考えられ、ボルトの製造プロセスでの改善、ねじ部形状の改善などにより、ねじ底からの割れの進展を抑える工夫が必要である。

図4には、比較のため、F10T高力ボルトと同様の方法で算出した超鉄鋼高力ボルトの設計ボルト軸力を示している。F10T高力ボルトと同様の方法で設定した場合においても、その範囲内において荷重-平均離間変位関係は十分弾性範囲内にある。また、これらの関係から判断すると、さらに高い設計ボルト軸力とすることも可能であると考えられる。

表4 ボルト張力なしの場合の試験結果のまとめ

試験体名	Pu (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	破壊部位
T1-UH-30-1	266	3.12	ナットかみ合い部
T1-UH-30-2	264	2.59	不完全ねじ部
T1-UH-30-3	255	2.68	不完全ねじ部
T1-UH-75-1	268	5.20	ねじ部中央
T1-UH-75-2	125	0.98	不完全ねじ部
T1-UH-75-3	82	0.89	不完全ねじ部
HTB	163	6.28	ナットかみ合い部



(a) T1-UH-30 シリーズ (左から 1 2 3)

(b) T1-UH-75 シリーズ (左から 1 2 3)

写真4 破断後のボルト

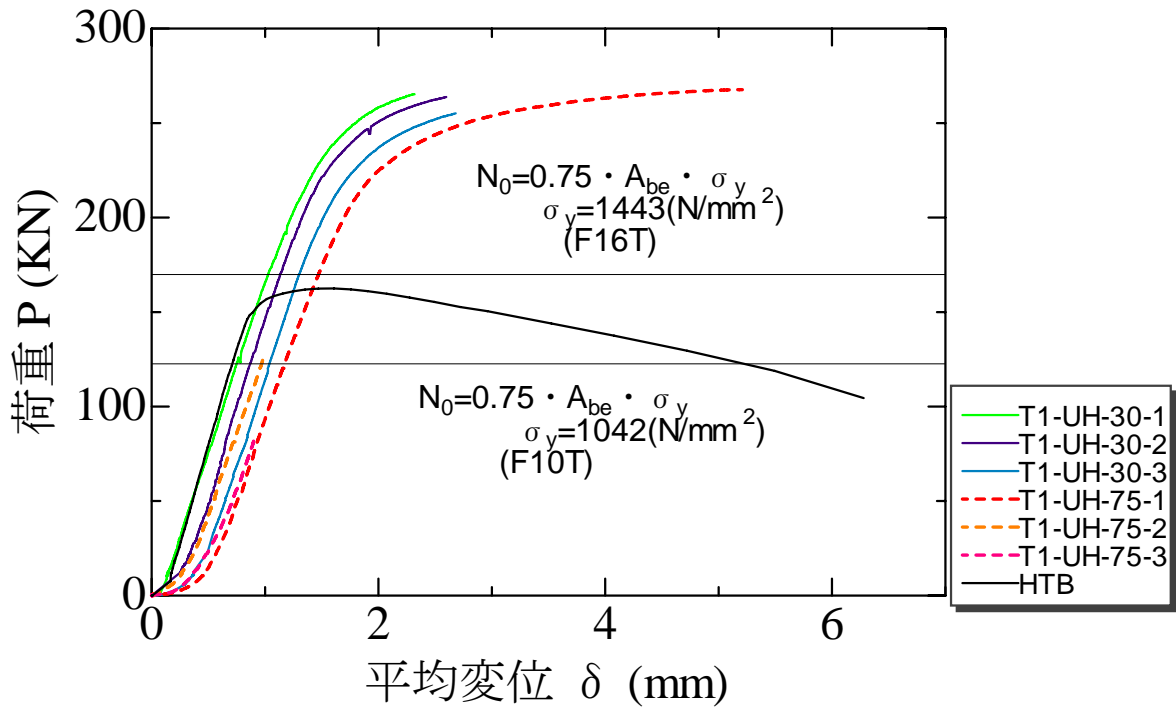


図4 ボルト張力なしの場合の荷重 - 平均変位関係

#### 4.3.2 ボルト張力ありの場合

ボルト張力ありの場合の単純引張試験の結果のまとめを表5に示す。また、得られた荷重と平均離間変位の関係を図5に、荷重とボルト張力の関係を図6にそれぞれ示す。比較のため、F10T高力ボルトの場合の結果もそれぞれ示した。さらに、破断後のボルトの写真を写真5に示す。本試験では、トルク係数も算出することとし、これらも併せて表5に記した。また、締結板のボルト締付痕一例を写真6に示す。

破断部位は、ねじ部中央が1体、不完全ねじ部が3体であった。超鉄鋼高力ボルトの破断部位は、F10T高力ボルトと同様の傾向を示しており、問題はないと考えられる。最大荷重は張力なしの場合とほぼ同様である。このことは、2枚の締結板が離間後破断に至ることから導入ボルト張力の影響がないことを裏付けている。

トルク係数については、ねじ部長さが30mmのもので、0.13から0.19の間にあり、F10T高力ボルトと変わらない。一方、ねじ部長さが75mmと長いボルトについては、ねじ部長さの短い30mmのものよりも低い値となった。このように、ねじ部長さがトルク係数に大きく影響しているものと考えられる。

荷重とボルト張力の関係については、T2-UH-30-3を除いて、一般的な荷重-ボルト張力関係を描いている。T2-UH-30-3は、荷重が約100kNのあたりから、ボルト張力の上昇が認められる。この傾向は図5の荷重-平均変位関係にも認められる。これは、2枚の締結板の接触状態が均一でなかったためではないかと考えられる。

表5 ボルト張力ありの場合の試験結果のまとめ

試験体名	導入張力 eNo(kN)	締付トルク (N・m)	トルク係数	離間耐力 Psep(kN)	Psep/eNo	Pu (kN)	$\delta$ max(mm)	破壊部位
T2-UH-30-1	185	380	0.13	174	0.9	256	0.65	ナットかみ合い部
T2-UH-30-2	185	550	0.19	173	0.9	257	0.87	不完全ねじ部
T3-UH-30-3	185	445	0.15	46	0.2	253	0.62	不完全ねじ部
T2-UH-75-1	186	330	0.11	201	1.1	264	2.21	不完全ねじ部
HTB	107			98	0.9	153	3.67	ねじ部中央



(a) T2-UH-30 シリーズ (左から 1 2 3)

(b) T2-UH-75 シリーズ (1)

写真5 破断後のボルト

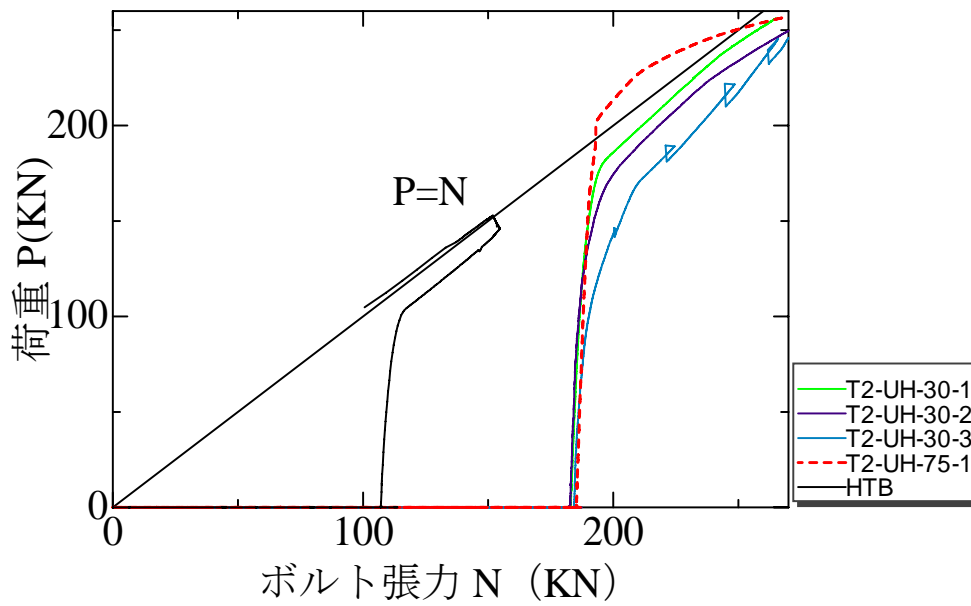


図5 ボルト張力ありの場合の荷重 - ボルト張力関係

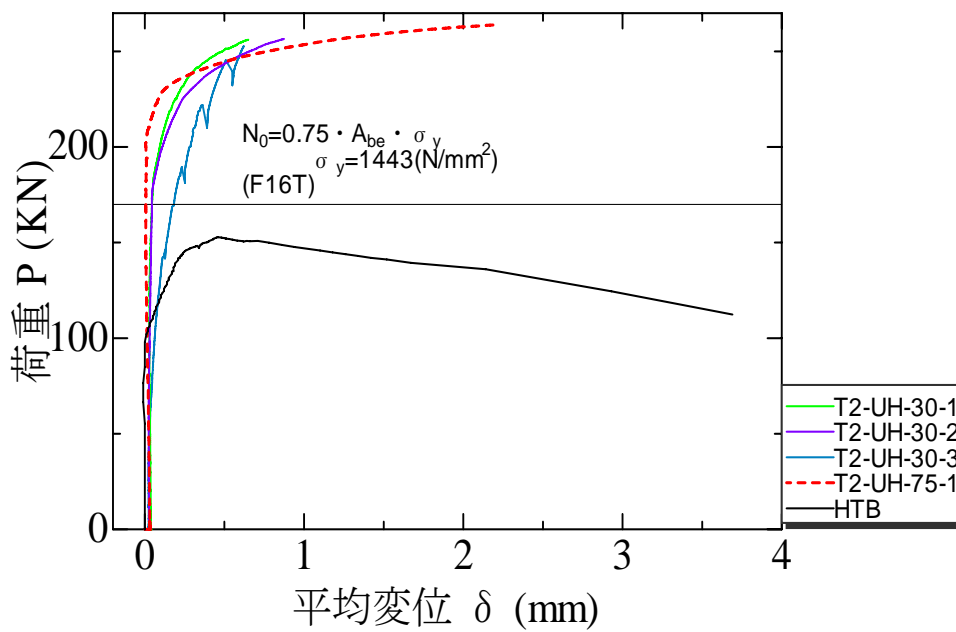


図6 ボルト張力ありの場合の荷重 - 平均変位関係



写真6 締結板のボルト締付痕の例

## 5. ナット回転角試験

### 5.1 概要および試験方法

超鉄鋼高力ボルトの締め付けトルクを検討するためにナット回転角試験を行う。本試験の概要を図7に、加力時の状況を写真7に示す。写真に示すように、回転角を判断できるシートを締結板上にのせ、回転角を測定した。ボルトへの張力導入は、まず、指締めにより締めた時点回転角0とし、トルクレンチによりボルトが破断するまでトルクを与えて行った。

計測項目は、締め付けトルク、ボルト軸部のひずみであり、ナット回転角15度ごとにこれらを計測した。

### 5.2 試験体

試験体は、ねじ部の長さの異なる2種類(30mm, 75mm)とし、それぞれ3体準備した。試験体の一覧を表6に示す。

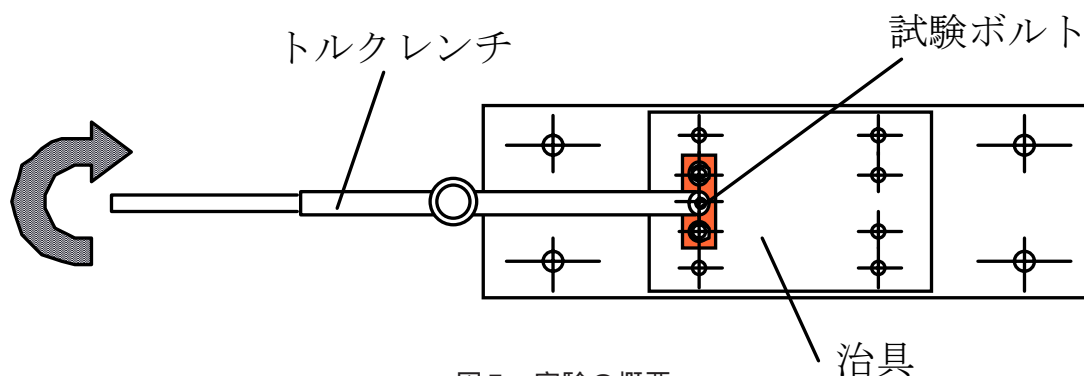


図7 実験の概要



写真7 加力時の状況

表6 試験体の一覧

試験体名	試験名	鋼種	ボルト径	首下長さ	ねじ部長さ
N-UH-30-1	ナット回転角試験	F18T (F16T)	M16	85mm	30
N-UH-30-2					
N-UH-30-3					
N-UH-75-1					75
N-UH-75-2					
N-UH-75-3					

### 5.3 試験結果と考察

ボルト張力 - 回転角関係を図8に、ボルト張力 - トルク関係を図9に、破断後のボルトの写真写真8にそれぞれ示す。

通常のねじ部長さである30mmのものは、300度から400度の間で破断している。一方、ねじ部長さが長い75mmのものでは、50kNまでしか張力を導入できないものが2体あった。ねじ部長さが長いものについては、ねじ部での製造プロセスに問題があると思われる。また、ねじ部が長いものは、回転角が大きくなる傾向が確認できる。ボルト張力とトルクの関係については、図9より、線形関係が認められ、F10T高力ボルトと変わらない。

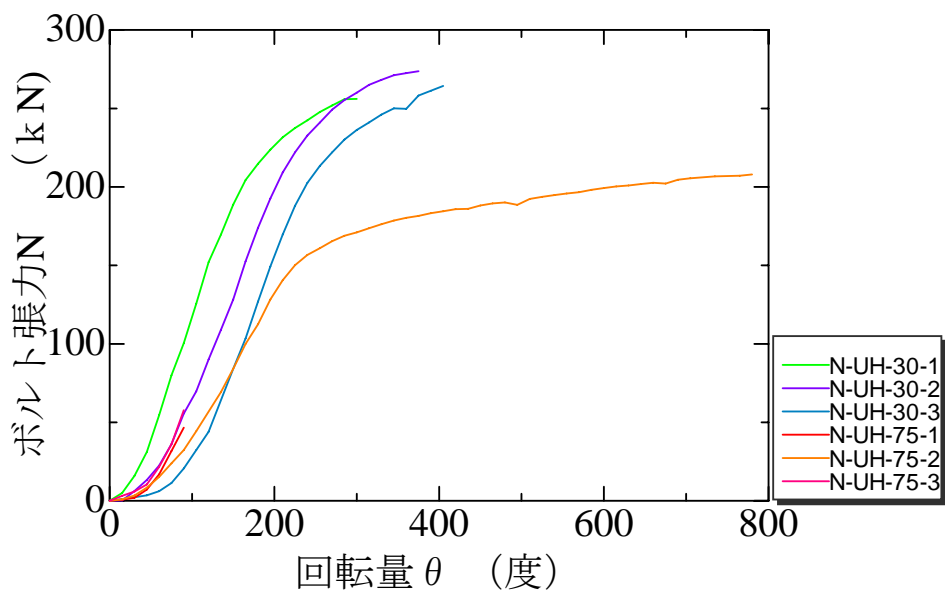


図8 ボルト張力 - 回転量関係

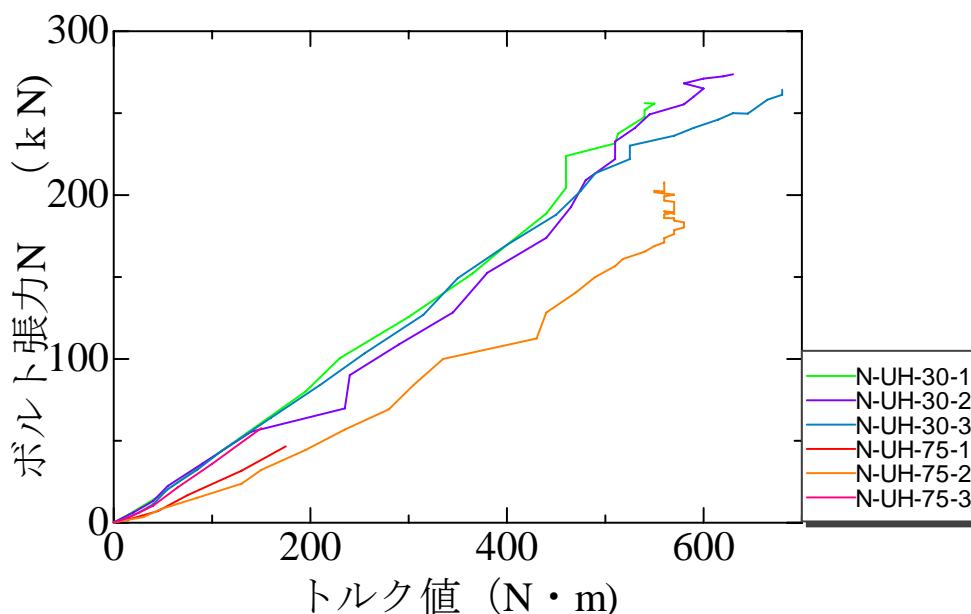


図9 ボルト張力 - トルク値関係





N-UH-30 シリーズ (左から 1 2 3)



N-UH-75 シリーズ (左から 1 2 3)



ねじ部中間破断

写真8 破断後のボルト

## 6. 摩擦接合継手引張試験

### 6.1 試験概要

超鉄鋼高力ボルトを摩擦接合に用いた場合、超鉄鋼高力ボルトに導入される非常に高いボルト締付力によって連結板が局部的に降伏したり、連結板への座金のめり込みなどが危惧される。これらは、ボルト軸力の低下と密接に関係しており、すべり耐力に影響を与えることが懸念される。

そこで、本研究では、土木・建築分野で一般的に使われる鋼材を母板に用いた摩擦接合引張試験体を製作し、引張試験を行った。

### 6.2 試験体

本研究で設定した試験体を表7に示す。試験体に用いた鋼材は、土木・建築構造物で一般的に用いられるSN400、SM570、SM490Y材である。試験体の形状および諸元を図10に示す。試験体の形状は、すべりが先行するもの(No.3, No.4試験体)、土木・建築構造それぞれの一般的なすべり耐力・降伏耐力比を有するもの(No.1, No.5, No.6)となるように配慮して決定した。なお、すべり耐力・降伏耐力比の算出には、降伏点の公称値およびすべり係数0.40を用いている。ただし、( )内の数値はすべり係数を建築構造物での評価法と同様に0.6として求めたすべり耐力・降伏耐力比である。ボルト中心間距離、縁端距離等のボルト配置は、道路橋示方書に基づいて決定している。また、比較のため、F10T高力ボルトを用いる試験体No.4Bも準備した。ただし、No.4B試験体については、ボルト軸力を計測せず、トルクレンチにより軸力管理した。

試験体の接合面の処理は、自然状態に放置し、赤さび面とした。なお、実験にあたっては、ワイヤブラシにより、浮きさびを除去した後、行っている。試験前の接合面の状態を写真9に示す。

表7 摩擦接合継手引張試験体の一覧

試験体名	ボルト配列	母材		連結版		$\beta$	試験体数
		板厚	材質	板厚	材質		
No.1	1行2列	25mm	SN400	16mm	SN400	0.61 (0.88)	3
No.3	1行2列	24mm	SM570	14mm	SM570	0.34	3
No.4A	1行2列	24mm	SM490Y	14mm	SM570	0.43	3
No.4B	1行2列	24mm	SM490Y	14mm	SM570	0.27	3
No.5	1行2列	12mm	SM490Y	8mm	SM490Y	0.85	3
No.6	1行2列	12mm	SM490Y	8mm	SM570	0.85	3



写真9 接合面の状態(No.6-1)試験前

### 6.3 試験方法および計測項目

試験は図9で示す試験体を万能試験機にセットし、引張力を作用させた。計測項目は、連結板と母板の間の相対変位、載荷荷重、ボルト軸力である。連結板と母板の相対変位は、写真に示すような治具を製作し、これに変位計をセットし(試験体ごとに4本(変位計ストローク25mm))計測している。変位計をセットした時の試験体の状況を写真10に示す。相対変位は、図9に示すように、片側2本の高力ボルトの中間点で計測した値の平均値として算出した。

高力ボルトの軸力は、軸平行部に2枚のひずみゲージを張り、これらの平均ひずみから、あらかじめ行ったキャリブレーション結果をもとに換算し求めた。高力ボルトの導入軸力はM16ボルト(F16T)の標準ボルト軸力である187kNとした。

試験体に用いたSN400, SM570, SM490Y鋼材の材料試験結果を表8に、応力-ひずみ関係の例を図11にそれぞれ示す。

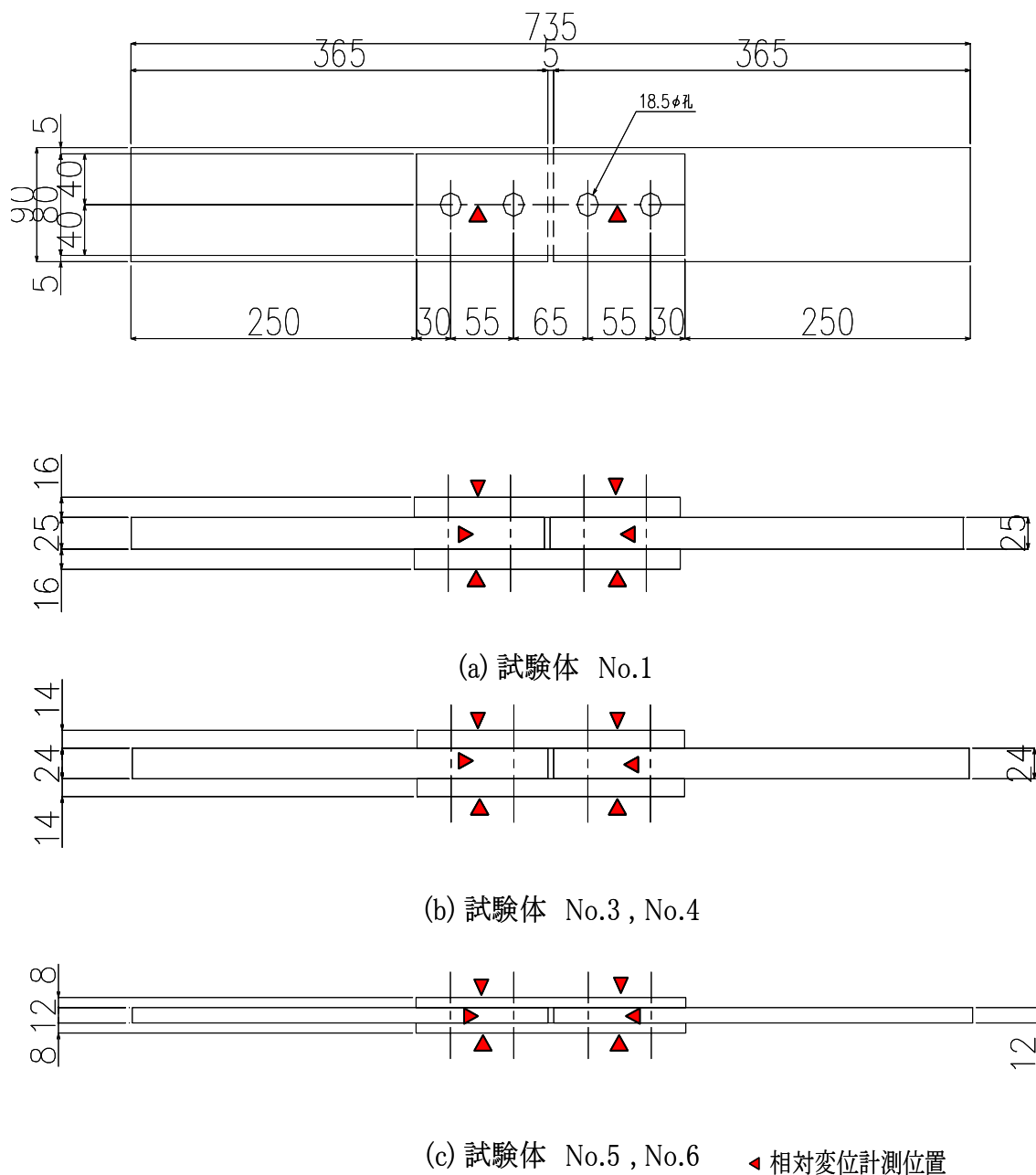


図10 試験体の形状



写真 10 設置後の試験体の状況

表 8 材料試験結果のまとめ

	thickness	No.	Yield Point		Tensile strength		Yield ration $\sigma_y/\sigma_u$	Young modulus			
			$\sigma_y$	Average	$\sigma_u$	Average		E	Average		
			(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )		(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )		
1	16	1	261	260	424	428	0.62	213150	211370		
2		2	258		432		0.60	214880			
3		3	262		429		0.61	206080			
4		25	1	253	253	433	433	0.58		211533	
5			2	253		434		0.58		208916	
6			3	252		432		0.58		210729	
7	SM490YB	8	1	412	413	553	553	0.75	215630	219003	
8			2	413		552		0.75	217010		
9			3	414		555		0.75	224370		
10		12	1	406	413	554	554	0.73	217480	217227	
11			2	416		553		0.75	211740		
12			3	418		555		0.75	222460		
13		22	1	389	387	541	539	0.72	226710	220247	
14			2	385		539		0.71	220320		
15			3	387		536		0.72	213710		
16		24	1	377	386	542	543	0.70	214720	210327	
17			2	392		543		0.72	203990		
18			3	389		544		0.71	212270		
19		SM570	8	1		567	570		-224947	-231801	
20				2		573			-232627		
21				3		569			-237828		
22			14	1	493	494	574	575	0.86	195970	199406
23				2	492		571		0.86	204251	
24				3	498		581		0.86	197998	
25	22		1	557	554		610		-2301095	-1537089	
26			2	593					-2513671		
27			3	512					610		0.84
28	24		1	543	531	627	620	0.87	201499	202225	
29			2	512		606		0.85	201197		
30			3	538		628		0.86	203978		

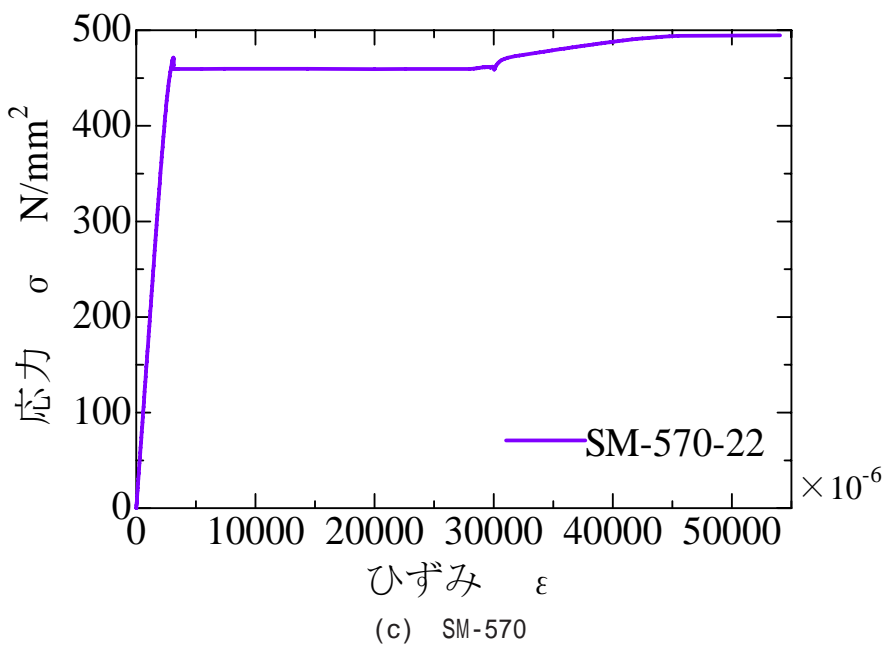
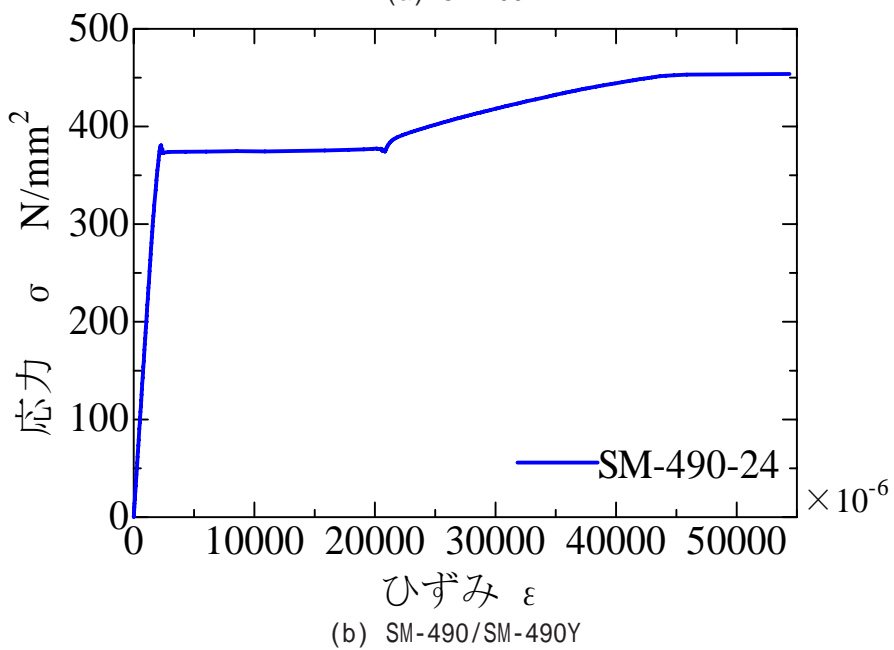
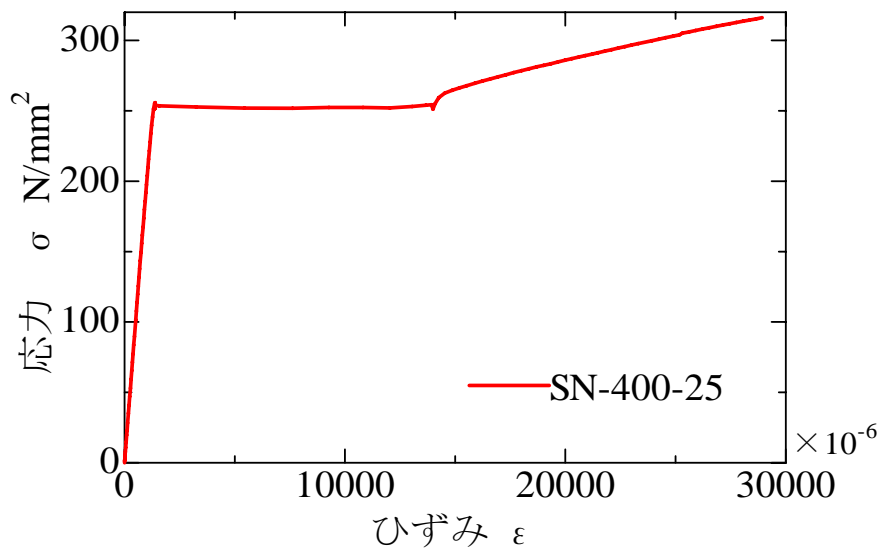


図 11 試験体に用いた鋼材の応力-ひずみ曲線の例

## 6.4 試験結果と考察

### 6.4.1 ボルト導入軸力

各試験体の試験前（引張力作用前）のボルト導入軸力を表9にまとめる。No.5, No.6試験体では、他の試験体（No.1, No.3, No.4）と同様のボルト軸力を導入することができなかった。特に、No.5試験体のうち、2体はボルトが軸力導入段階で破断したため、引張試験を行うことができなかった。これらの試験体は、首下長さが短いボルトであり、超鉄鋼高力ボルトの製造時に問題があったためと思われる。そのため、No.5, No.6試験体については、目標標準ボルト軸力を標準ボルト軸力である187kNの85%と低く設定した。

表9 導入軸力の一覧

試験体	ボルト1		ボルト2		ボルト3		ボルト4		
1-①	締付時 $(\mu)$	4421	****	****	4336	3969	4349	****	4284
	加力時 $(\mu)$	4433	****	****	4347	3981	4362	****	4290
	ボルト導入張力締付時(kN)	195		191		183		189	
	ボルト導入張力後加力時kN)	195		191		184		189	
1-②	締付時 $(\mu)$	****	4402	****	4562	4964	3989	4372	4426
	加力時 $(\mu)$	****	4296	****	4366	4855	3875	4254	4344
	ボルト導入張力締付時(kN)	194		201		197		194	
	ボルト導入張力後加力時kN)	189		192		192		187	
1-③	締付時 $(\mu)$	****	4458	4225	4786	4453	****	4941	3854
	加力時 $(\mu)$	****	4363	4013	4576	4324	****	****	4282
	ボルト導入張力締付時(kN)	196		198		196		194	
	ボルト導入張力後加力時kN)	192		189		190		189	
3-①	締付時 $(\mu)$	3435	5874	4581	4126	5464	3806	4456	****
	加力時 $(\mu)$	3290	5741	4403	3970	5338	3665	4302	****
	ボルト導入張力締付時(kN)	205		192		204		196	
	ボルト導入張力後加力時kN)	199		184		198		189	
3-②	締付時 $(\mu)$	4344	4597	4439	****	4801	****	****	4624
	加力時 $(\mu)$	4312	4594	4377	****	4711	****	****	4574
	ボルト導入張力締付時(kN)	197		195		211		204	
	ボルト導入張力後加力時kN)	196		193		207		201	
3-③	締付時 $(\mu)$	4571	4441	3696	4733	4575	4263	4702	3495
	加力時 $(\mu)$	4480	4313	3627	4637	4421	4142	****	****
	ボルト導入張力締付時(kN)	198		192		195		180	
	ボルト導入張力後加力時kN)	194		182		188			
4A-①	締付時 $(\mu)$	****	4653	4818	3327	3792	5231	4551	****
	加力時 $(\mu)$	****	4579	4742	3241	3663	5149	4434	****
	ボルト導入張力締付時(kN)	205		179		199		200	
	ボルト導入張力後加力時kN)	202		176		194		195	
4A-②	締付時 $(\mu)$	4464	4735	4021	5050	4401	4856	5066	3641
	加力時 $(\mu)$	4386	4665	3993	5033	5258	6043	****	4125
	ボルト導入張力締付時(kN)	203		200		204		192	
	ボルト導入張力後加力時kN)	199		199		249		182	
4A-③	締付時 $(\mu)$	3685	5249	4835	4776	4389	5318	5079	4684
	加力時 $(\mu)$	****	****	4761	4552	4233	5141	5004	4587
	ボルト導入張力締付時(kN)	197		212		214		215	
	ボルト導入張力後加力時kN)			205		206		211	

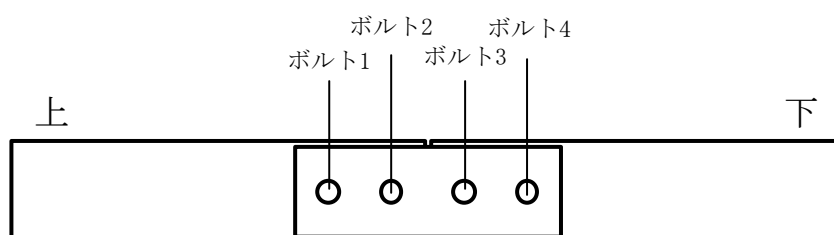
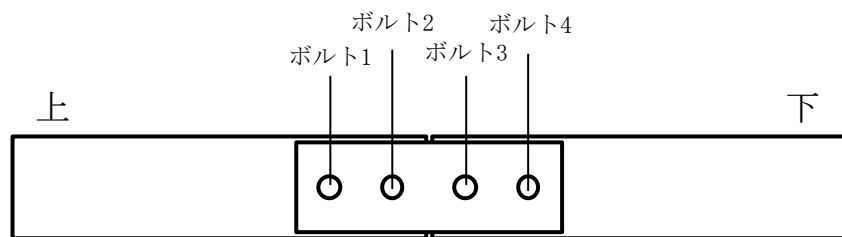


表9 導入軸力の一覧(続き)

試験体		ボルト1		ボルト2		ボルト3		ボルト4									
4B-①	締付時( $\mu$ )	/															
	加力時( $\mu$ )																
	ボルト導入張力締付時(kN)																
	ボルト導入張力後加力時kN)																
4B-②	締付時( $\mu$ )																
	加力時( $\mu$ )																
	ボルト導入張力締付時(kN)																
	ボルト導入張力後加力時kN)																
4B-③	締付時歪( $\mu$ )																
	加力時歪( $\mu$ )																
	ボルト導入張力締付時(kN)																
	ボルト導入張力後加力時kN)																
5-①	締付時歪( $\mu$ )	4807		4400		5709		5690									
	加力時歪( $\mu$ )	4859	4049	4459	5184	5756	4022	5732	4260								
	ボルト導入張力締付時(kN)	155		142		184		183									
	ボルト導入張力後加力時kN)	143		155		157		161									
5-②	締付時( $\mu$ )	/															
	加力時( $\mu$ )																
	ボルト導入張力締付時(kN)																
	ボルト導入張力後加力時kN)																
5-③	締付時( $\mu$ )																
	加力時( $\mu$ )																
	ボルト導入張力締付時(kN)																
	ボルト導入張力後加力時kN)																
6-①	締付時( $\mu$ )									5566	4208	4874	4675	6168	3871	3343	6412
	加力時( $\mu$ )									5566	4208	4874	4675	6168	3871	3343	6412
	ボルト導入張力締付時(kN)									157		154		162		157	
	ボルト導入張力後加力時kN)									157		154		162		157	
6-②	締付時( $\mu$ )	4300		4750		4300		5250									
	加力時( $\mu$ )	5048	3619	4636	4897	4090	4612	4509	5984								
	ボルト導入張力締付時(kN)	138		153		138		169									
	ボルト導入張力後加力時kN)	139		153		140		169									
6-③	締付時( $\mu$ )	4600		4800		5200		5200									
	加力時( $\mu$ )	4108	5361	5252	4494	5745	4702	5065	5341								
	ボルト導入張力締付時(kN)	148		154		167		167									
	ボルト導入張力後加力時kN)	152		157		168		167									





### 6.4.2 荷重 - 変位関係

荷重と母板と連結板の相対変位の関係を図 12 に示す．いずれの試験体についても明確なすべり現象が認められた．結果は，すべり耐力・降伏耐力比 から判定される継手の挙動（すべり先行型）を再現しており，超鉄鋼高力ボルトの使用による問題点は認められない．

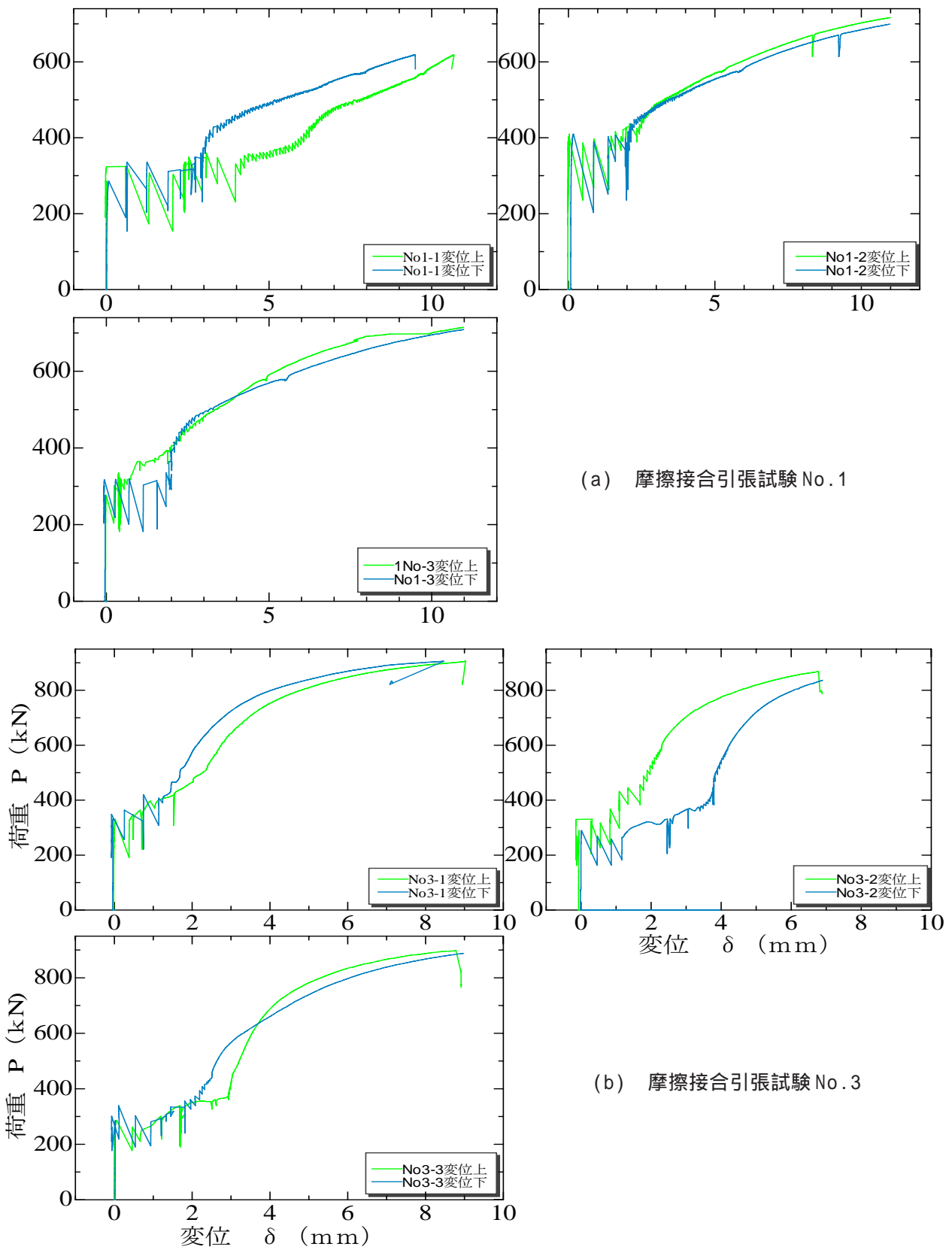
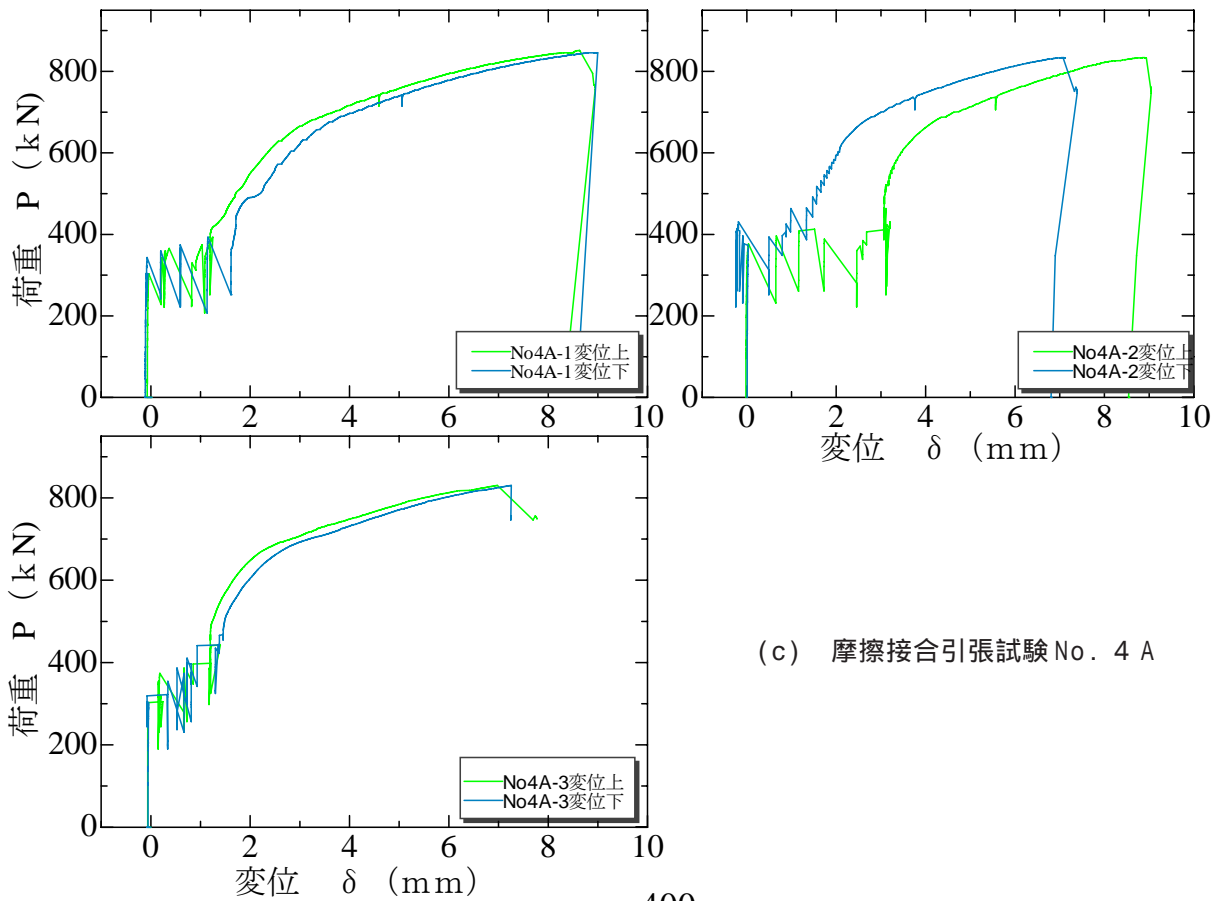
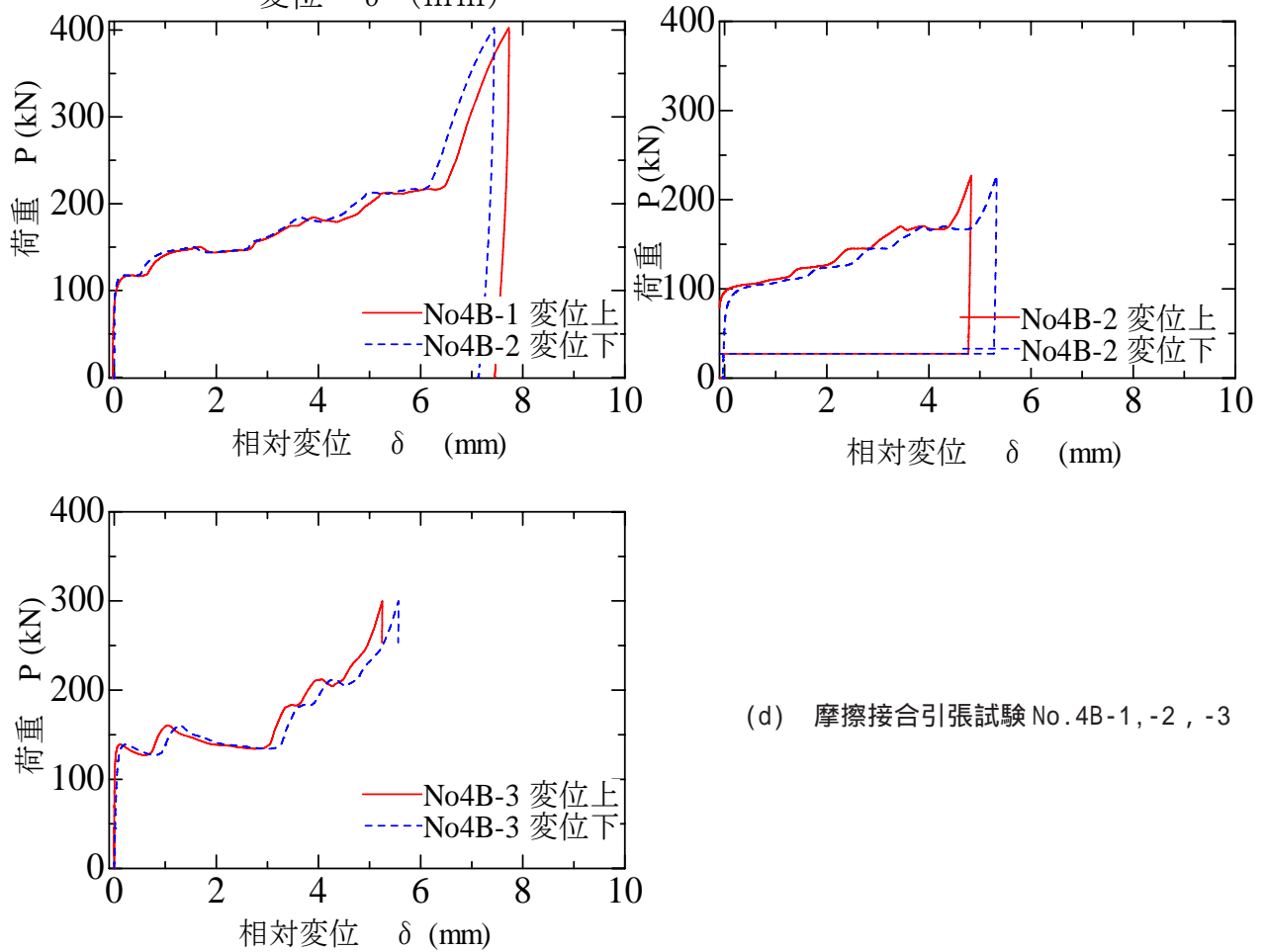


図 12 荷重-相対変位関係

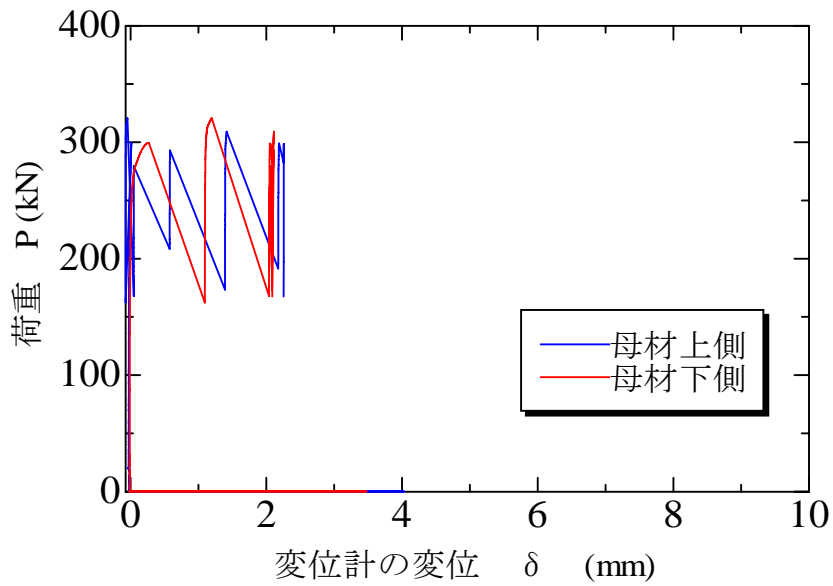


(c) 摩擦接合引張試験 No. 4 A

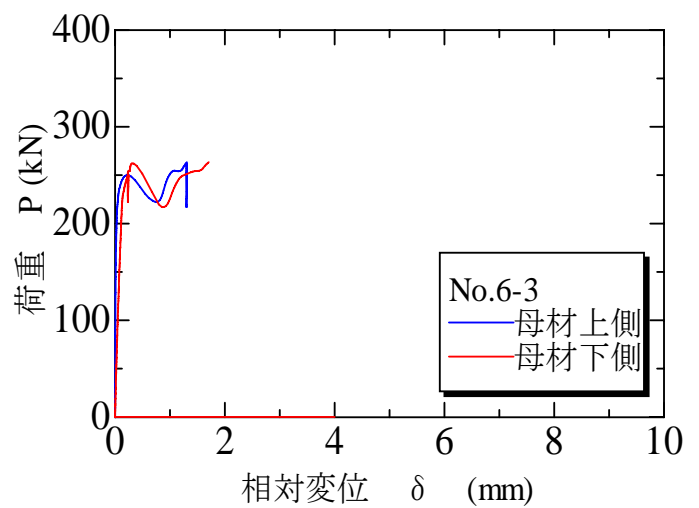
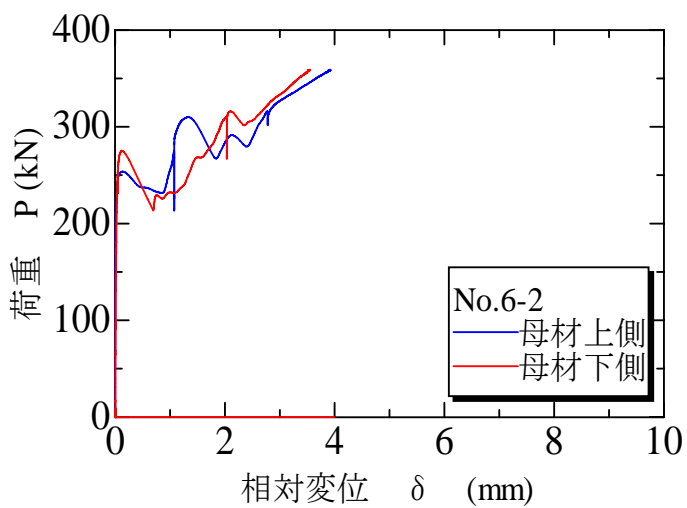
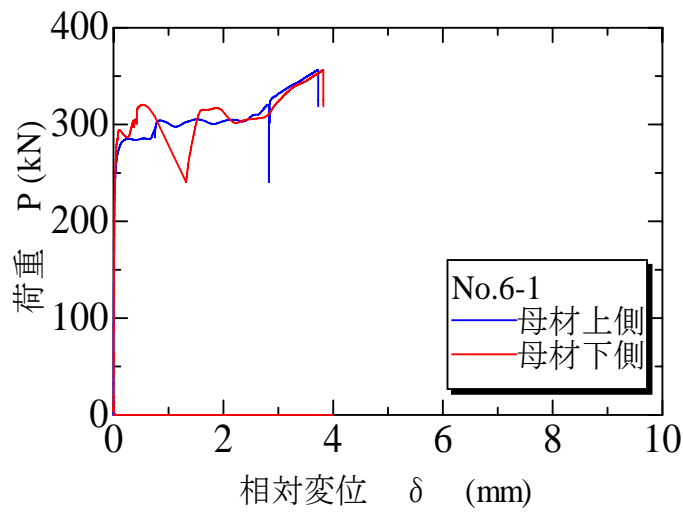


(d) 摩擦接合引張試験 No. 4B-1, -2, -3

図 12 荷重-相対変位関係(続き)



(e) 摩擦接合引張試験 No5-1



(f) 摩擦接合引張試験 No6-1, -2, -3

図 12 荷重-相対変位関係

### 6.4.3 すべり係数

引張試験より得られたすべり係数の一覧を表10に示す。

F10T高力ボルトを用いたNo.4B試験体では、すべり耐力・降伏耐力比 が0.27とかなり小さく、本試験での接合面のすべり係数を判断する上での基準とすることができると考えられる。No.4B試験体のすべり係数は、道路橋示方書等で示されるすべり係数の基準値である0.40よりは若干低くなっている。

これを基準に超鉄鋼高力ボルトを用いた場合と比較すると、超鉄鋼高力ボルトを用いた場合のすべり係数は、すべてこれ以上のすべり係数となっていることがわかる。特に、母板の降伏の影響が懸念されるすべり耐力・降伏耐力比 が1.0に近いNo.5試験体、No.6試験体においてもすべり係数の低下は認められない。また、No.5、No.6試験体において、連結板の材質の違いによる、すべり係数の違いはほとんど見られない。

表10 摩擦接合引張試験結果のまとめ

試験体名	Ps (kN)		eNo (kN)		nNo (kN)	eμ		nμ	
	上	下	上	下		上	下	上	下
No.1-1	324	286	193	186	187	0.42	0.38	0.43	0.38
No.1-2	410	410	191	190		0.54	0.54	0.55	0.55
No.1-3	277	277	191	189		0.36	0.37	0.37	0.37
No.3-1	331	331	192	194		0.43	0.43	0.44	0.44
No.3-2	289	289	194	204		0.37	0.35	0.39	0.39
No.3-3	286	286	188	188		0.38	0.38	0.38	0.38
No.4A-1	303	303	189	195		0.40	0.39	0.41	0.41
No.4A-2	377	377	199	215		0.47	0.44	0.50	0.50
No.4A-3	303	305	205	209		0.37	0.37	0.40	0.41
No.5-1	299	299	128	128	158	0.58	0.58	0.47	0.47
No.6-1	283	294	140	138		0.51	0.53	0.45	0.47
No.6-2	294	266	131	125		0.56	0.53	0.47	0.42
No.6-3	249	260	140	153		0.44	0.42	0.39	0.41

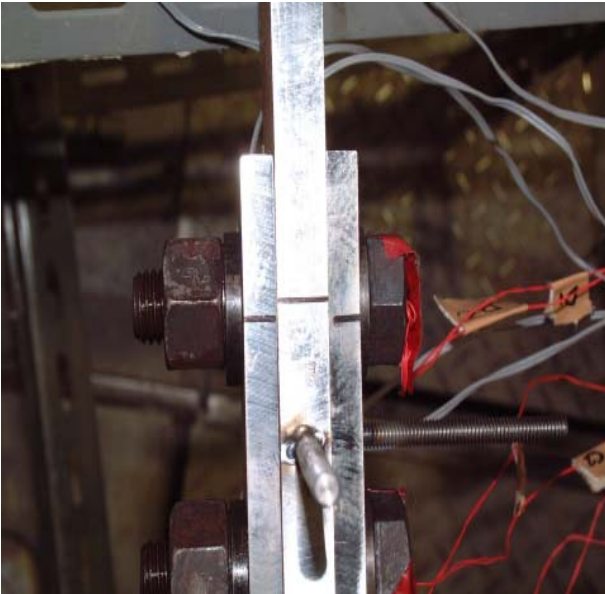
		すべり荷重(kN)	すべり係数	
			標準軸力で割った場合	設計軸力で割った場合
4B-1	1.1割増	152	0.324	0.357
	1.2割増	185	0.364	0.436
4B-2	1.1割増	100	0.21	0.235
	1.2割増	135	0.265	0.318
4B-3	1.1割増	140	0.298	0.329
	1.2割増	161	0.316	0.38

$${}_e\mu = \frac{P_s}{m \cdot n \cdot {}_eN_0} \quad {}_eN_0 : \text{導入ボルト張力実験値}$$

$${}_n\mu_0 = \frac{P_s}{m \cdot n \cdot {}_nN_0} \quad {}_nN_0 : \text{設計ボルト張力}$$

#### 6.4.4 座金下面の表面状態

試験後の座金下面，および接合面を観察した．これらの一例を写真11に示す．写真より，超鉄鋼高力ボルトを用いた場合に危惧された，座金の連結板へのめりこみ痕などは見られなかった．また，接合面におけるすべり痕についてもF10T高力ボルトのそれと大きな違いは認められない．



(a) 試験後の供試体の側面



(b) 連結板の内側面



(c) ボルト

写真11 試験後の試験体の一例

## 7. まとめ

本研究では、物質・材料研究機構で開発された超鉄鋼高力ボルトを土木・建築鋼構造物の接合部に適用するための基礎的資料の収集を目的として、素材試験、製品引張試験、単純引張試験、ナット回転角試験、摩擦接合引張試験からなるパイロット試験を行った。そして、超鉄鋼高力ボルト摩擦接合構造実現のための課題の整理抽出を行った。以下に本研究で得られた結論をまとめる。

- 1) 物質・材料研究機構で開発された超鉄鋼高力ボルトの量産を行った。素材試験、製品引張試験の結果、当初目標である1800MPaの強度を確保できず、強度は1700MPa級にとどまった。これは、製造過程における熱処理プロセスに問題があったと考えられる。しかしながら、現在、主に用いられているF10T高力ボルトに対し、超鉄鋼高力ボルトは1.6倍<sup>2)</sup>の強度を有するF16Tクラスの性能を有することを確認し、大量に製造可能であることがわかった。ただし、頭飛びやねじ部中央部での破断したものもあり、製造過程、ねじ形状、首下形状等の検討が必要である。
- 3) ねじ部長さの異なる高力ボルトに対して、単純引張試験を行った結果、ねじ部長さが短い通常の高力ボルト形状に対しては大きな問題は見られなかった。さらに、ねじ部長さの長いボルトに対しては、変形性能に大きな改善が見られた。ただし、これらのボルトの中には、ねじ部中央で破断したものもあり、ねじ部製造過程において改善が必要である。
- 4) 単純引張試験の結果、超鉄鋼高力ボルトの導入軸力については、F10T高力ボルトと同様の方法で設定できる(降伏点に対する校正係数  $=0.75$ とすることができ)ことがわかった。さらに、荷重 - 5) 変位関係から降伏点に対する校正係数 をF10T高力ボルトの0.75よりも大きくすることも可能と考えられ、さらに高い軸力を導入できる可能性がある。
- 6) ナット回転角試験の結果、通常のねじ部長さを有するねじ部が短いボルトでは、トルク - 7) 張力関係に問題は認められなかった。
- 8) 摩擦接合引張試験の結果、F10T高力ボルトを用いた場合と大きな差異は見られず、超高力ボルトの高い導入時軸力によるすべり係数への影響は認められなかった。また、連結板への座金のめりこみといった有害な変形も認められなかった。したがって、F16Tクラスの超高強度ボルトを用いた高力ボルト摩擦接合はこれまでのF10T高力ボルトを用いた摩擦接合の設計と同様の考え方によって設計が可能であると考えられる。

超鉄鋼高力ボルト摩擦接合実現のために以下の諸課題を解決する必要があると考えられる。

- 1) F16TクラスからF20Tクラスへの強度の向上と製造過程を考慮したねじ形状、首下形状の最適化
- 2) 降伏先行型(すべり耐力・降伏耐力比 が1.0程度)におけるすべり耐力への超鉄鋼高力ボルトを用いた場合の影響評価
- 3) 超鉄鋼高力ボルトに対する最大・最小ボルト中心間距離などのボルト配置に関する検討
- 4) F20Tクラスの強度を有する超鉄鋼高力ボルトを用いた場合のすべり耐力に与える影響の定量的評価

## 謝辞

本研究で行った実験に際し、宇都宮大学工学部の学生諸氏、大阪市立大学大学院工学研究科の学生諸氏には多大なご協力をいただきました。また、ボルトの製造および基礎性能評価にあたって、神鋼ボルト(株)の鎌形吉伸氏、長崎英二氏、寺門三郎氏をはじめとする皆様、物質・材料研究機構の創製技術チーム 藤原昌樹氏、黒田秀治氏、檜原高明氏、中里浩二氏、岩崎智氏、研究業務員の広田ゆり子氏ならびに多くの皆様に多大なるご協力およびご教示を頂きました。

ここに、心より深くお礼申し上げます。