

曲面部材の高力ボルト継手の引張実験

橋 肇¹⁾ 谷口 利行²⁾ 秋山 寿行³⁾

近年、橋梁に美観的な配慮が求められることが多くなり、鋼橋においても曲面を有する部材が用いられている。このたび当社が施工する実橋においては半径 486 mmや 435.2 mmの鋼管部材を用い、現場継手として高力ボルト摩擦接合を採用している。これに対し、曲面部材の高力ボルト継手について、継手強度の検証を目的として高力ボルト継手の引張実験を行った。この実験供試体については、実橋部材の断面の曲率半径および継手のすべり強度・降伏強度比 (β) を考慮した。実験の結果、すべり強度については、道路橋示方書の公称値に対して約30%前後の余裕があることを確認した。また、継手部材の降伏強度については、公称値に対して 20 %以上の余裕があり、継手強度の安全性を確保していることを確認した。

まえがき

近年、橋梁に美観的な配慮が求められることが多くなっている。鋼橋においても、美観上の理由により、曲面を有する部材が用いられている。たとえば、鋼製橋脚の柱では、鋼管やコーナー部に曲率を有する箱断面部材が用いられている。また、アーチ橋の横支材に長円形断面部材が用いられることもある。一般的に、このような曲面部材の現場継手は溶接接合であることが多い。

本実験の対象となった古志橋（下路式ローゼ橋：建設省中国地方建設局）において、前述と同様に美観上の理由により、補剛桁の吊材とアーチリブの上支材に鋼管を用いている。また、上支材の現場継手として高力ボルト摩擦接合が用いられている。高力ボルト摩擦接合は一般的に平面継手に用いられ、曲面部に用いられることは少ない。また、道路橋示方書（以下「道示」と示す）¹⁾においても曲面部の高力ボルト摩擦接合のことは特に示されていない。そのため、曲面部材の高力ボルト摩擦接合継手について、その強度が平面継手の場合と同様であるかどうかを確認する必要があると考えた。

曲面部材の高力ボルト摩擦接合継手の強度について、文献2にすべり試験の報告がなされている。これによると、半径800mmまたは600mmの曲率を有する部材の高力ボルト摩擦接合継手についても、通常の平面部材と同程度の摩擦耐力を確保できるとある。一方、今回の古志橋では、半径486mmや435.2mmの鋼管部材の高力ボルト継手であり、この曲率半径は文献2の場合よりさらに小さい。したがって、曲率半径が小さい曲面部材の高力ボルト継手について、その強度を確認する必要がある。よって、このような継手強度の検証を目的として、高力ボルト継手の引張実験を行った。本文では、この引張実験の結果について述べる。

1. 実験内容

(1) 対象とする高力ボルト継手

高力ボルト継手引張実験の対象モデルの鋼管部材は、外径1016mmの上支材Aおよび外径914.4mmの上支材Bの2種類である。これらの部材の継手は美観を考慮して、トルシア形高力ボルトを用いている。ボルト孔の径は施工性を考慮して、呼びM22に対し $\phi 26.5$ mmとしている。また、曲面および拡大孔を考慮して、ボルト頭部側にも座金を配

1) 橋梁設計部大阪設計一課 2) 大阪工場橋梁部生産設計課副課長 3) 技術部次長

表-1 対象とする高力ボルト継手の断面諸元

		上支材 A	上支材 B
母材	鋼種	STK400	
	外径 ϕ (mm)	1016	914.4
	板厚 t (mm)	22	
	総断面積 A_g (cm ²)	687.0	616.8
連結板	鋼種	SS400	
	板厚 t (mm)	外側：12，内側：13	
	総断面積 A_g (cm ²)	775.2	695.4
	純断面積 A_n (cm ²)	613.1	533.3
高力ボルト	等級 (呼び)	S10T (M22)	
	本数 (本/片側)	88	88
ボルト孔の径 ϕ (mm)		26.5	
N_{sL}^* (すべり強度公称値) (kN)		14140	14140
$N_{Vn,i}^*$ (降伏強度公称値) (kN)		13700	12150
$\beta = N_{sL}^* / N_{Vn,i}^*$		1.03	1.16

注) β はすべり強度・降伏強度比である³⁾。

置した。上支材 A および B の高力ボルト継手の断面諸元を表-1に示す。表-1中の β はすべり強度・降伏強度比³⁾である。

文献3および4では、継手部の β 値によって、高力ボルト継手の線形限界および終局状態が異なり、すべり係数もまた異なることを示している。この上支材 A および B の場合、 β 値は1.0以上であるので、母材の降伏現象がすべり現象に先行する継手形式である。また、すべり係数は基本すべり係数を低減した値になる。したがって、対象とする高力ボルト継手の強度を検証するためには、この β 値を実験供試体の形状に反映する必要がある。

(2) 供試体の製作条件

供試体の製作条件は以下のとおりである。

- ① β 値を対象モデルと同程度とする。
- ② 鋼板の鋼種は対象モデル (STK400 および SS400) と同等とし、SS400 とする。
- ③ 高力ボルトは等級 S10T，ねじの呼び M22 とし、平座金を 2 枚用いる。そして、ボルト孔の径は ϕ 26.5 mm とする。
- ④ 引張試験機容量 (載荷能力 200tf) を考慮し、高力ボルトは 2 行 3 列配置の 6 本とする。
- ⑤ すべり面は、ショットブラストによりミルスケールを除去した後、赤錆を発生させ、組み立て時に浮き錆を除去する。
- ⑥ ボルトの締め付け軸力は設計軸力(201kN)の 1 割増しとする。

(3) 供試体の形状

供試体は上支材 A ($\beta = 1.03$) に対応する A タイプ ($\beta = 1.02$) と上支材 B ($\beta = 1.16$) に対応する B タイプ ($\beta = 1.15$) の 2 種類とし、各 3 体で合計 6 体である。A タイプの 3 体を A-1, A-2, A-3 とし、B タイプの 3 体を B-1, B-2, B-3 とする。供試体の形状を図-1 および表-2 に示す。

供試体に用いる鋼板の材料試験をあらかじめ行い、その結果を表-3 に示す。

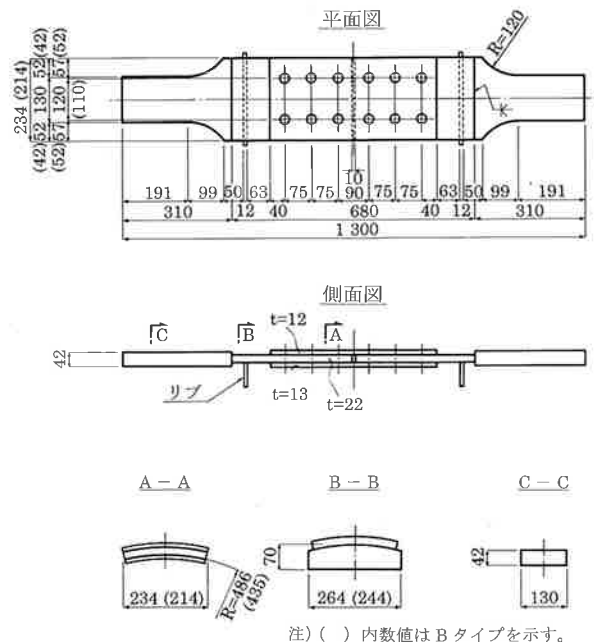


図-1 供試体の形状

表-2 供試体の断面諸元

供試体の記号		A - 1,2,3	B - 1,2,3
母材の曲率半径 (mm)		497	446
母材	板厚 (mm)	22 (21.8)	22 (22.2)
	板幅 (mm)	236.2 (233.1)	216.1 (212.5)
	A_g (cm ²)	51.96	47.54
	A_n (cm ²)	40.08	35.66
外側連結板	板厚 (mm)	12 (12.0)	12 (12.0)
	板幅 (mm)	244.3 (239.5)	224.3 (218.7)
	A_g (cm ²)	29.32	26.92
	A_n (cm ²)	22.84	20.44
内側連結板	板厚 (mm)	13 (13.0)	13 (12.9)
	板幅 (mm)	227.9 (222.9)	207.6 (202.8)
	A_g (cm ²)	29.63	26.99
	A_n (cm ²)	22.61	19.97
高力ボルト本数 (本)		6	6
N_{sL}^* (kN)		964	964
$N_{Vn,i}^*$ (kN)		943	839
$\beta = N_{sL}^* / N_{Vn,i}^*$		1.02	1.15

注) ・ () 内は実測値の平均値である。
 ・ 母材と連結板の鋼種はいずれも SS400 である。
 ・ 母材の曲率半径は板厚中心位置を示す。
 ・ 高力ボルトは等級 S10T，呼び M22 である。
 ・ ボルト孔の径は ϕ 26.5 mm である。

表-3 供試体材料の機械的性質

部 位	板 厚 (mm)	降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_b (N/mm ²)	伸び率 (%)
母 材	22	285	457	31
連結板 (外)	12	293	430	34
連結板 (内)	13	296	440	28

注) 鋼種はいずれも SS400 である。

(4) 引張試験要領

載荷能力200tfの万能引張試験機に供試体を鉛直に取り付ける。そして、継手部にすべりが発生するまで、徐々に引張荷重を載荷する。なお、引張試験は、ボルト締め付け後少なくとも7日以上経過した後に行う。

測定項目は以下のとおりである。

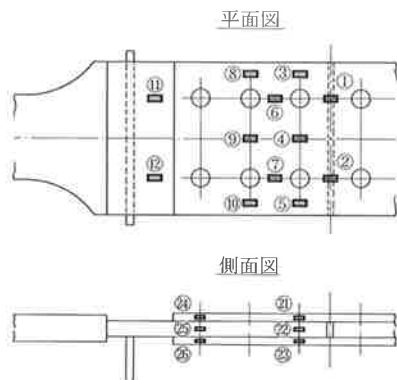
- ①高力ボルトの軸力
- ②母材および連結板のひずみ
- ③供試体の全伸び
- ④母材と連結板の相対変位量
- ⑤すべり荷重

高力ボルトの軸力測定は、ボルト軸部にひずみゲージを貼付して行う。あらかじめキャリブレーションによりひずみ-軸力の校正曲線を作成し、これを用いて試験前の軸力のレラクセーションおよび試験中の軸力測定を行う。

母材および連結板のひずみは、鋼板の表面およびコバ面に貼付したひずみゲージにより測定する。図-2にひずみゲージの配置を示す。

供試体の全伸びおよび母材と連結板の相対変位量は、変位計により測定する。全伸びはリブ間の伸びを測定する。

すべり荷重の評価は、引張試験機の載荷指針の停止または急激な低減、変位量の急激な変化、す



①～⑫：表と裏の両面に貼付
⑬～⑳：両コバ面に貼付

図-2 ひずみゲージ貼付位置

べり音の発生などに着目して行う。なお、継手のすべりについては、供試体の片方をすべり側、他方を固定側とする。そのため、供試体の製作時において、固定側のボルト軸力を割り増ししておく。

2. 実験結果および考察

(1) ボルト軸力の減衰

ボルト軸力の測定は、供試体A-3およびB-3のすべり側のボルト全数について、ボルト締め付け時からすべり発生時までの間を行った。ボルト締め付け後のボルト軸力の変動を見るため、引張試験開始までの8日間にわたって軸力の調査を行った。その調査結果を図-3に示す。ここに図中のグラフは、A-3およびB-3のそれぞれボルト6本の平均値をプロットしている。また、A-1とA-2、B-1とB-2のボルト締め付け時軸力の値 (=226 kN/本) は使用ボルトセットの工場製作時の値である。

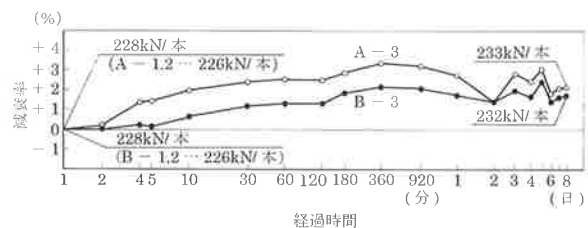


図-3 ボルト軸力のレラクセーション

図-3によると、ボルト締め付け後の軸力は初期導入軸力よりも大きくなり、8日後の引張試験開始時においてはA-3で2.2%、B-3で1.7%の軸力増加になっている。また、それまでの軸力変動はA-3およびB-3ともに、初期導入軸力より大きい状態で増加と減少を繰り返している。軸力増加率の最大値はA-3で3.3%、B-3で2.2%である。

通常の平面部材の高力ボルト継手においてボルト軸力は、初期導入軸力から数%の減衰が現れている。しかし、本実験の曲面部材の継手においては、ボルト軸力は数%増加している。この原因として以下のことが考えられる。すなわち、本供試体の母材および連結板は鋼板を冷間曲げ加工して製作している。そのため、母材および連結板は完全な円弧状ではなく、その表面は多少でこぼこしている。したがって、この母材と連結板の接触面の多くの箇所にすきまが生じることになる。また

円弧内側のボルト座金と連結板との間にもすき間がある。ボルト締め付け時において、これらのすきまが様々に変形し、供試体の円弧形状も締め付けによって変形する。これらが周期的にバネ効果となり、ボルト軸力が周期的に変動するのではないと思われる。しかし、実構造物の部材は円形断面であるので、ボルト締め付けによる部材形状の変形がなく、ボルト軸力の周期的な変動や増加はないと思われる。

(2) すべり強度

図-4に継手全体の伸びおよび母材と連結板のずれを示す。また、表-4にすべり荷重の実験値 N_{SL} およびすべり係数 μ を示す。ここに、すべり係数 μ は引張開始時のボルト軸力に基づく値である。

AタイプおよびBタイプともに $\beta > 1.0$ で、母材降伏がすべりに先行するタイプである。すべり現象が母材の降伏およびボルト軸力抜けにより、最初に最外列のボルト位置で部分すべりが発生し、その後主すべりが発生していることが図-4よりわかる。部分すべりについては、図-4中の黒塗りマークの線によっても確認できる。

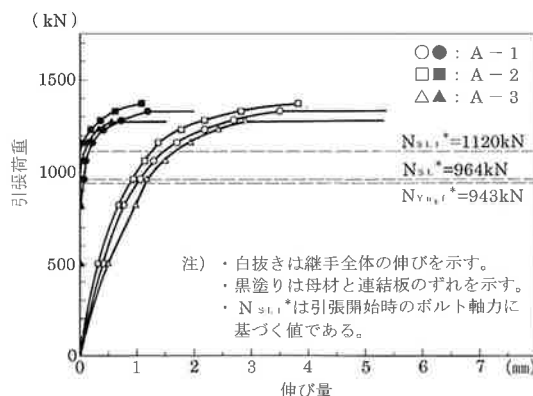
すべり現象はAタイプおよびBタイプともに、道示によるすべり荷重公称値 N_{SL}^* よりも大きい荷重状態で発生している。また、引張開始時のボルト軸力と公称すべり係数(=0.4)に基づくすべり荷重 N_{SL1}^* よりも大きい荷重で発生している。

表-4よりすべり荷重の実験値は、Aタイプで公称値の約1.38倍、Bタイプで約1.28倍であり、公称値に対して約30%前後の余裕がある。また、すべり係数についても、Aタイプで公称値の約1.19倍、Bタイプで約1.11倍であり、公称すべり強度を確保している。AタイプとBタイプのすべり係数を比較した場合、Aタイプの方が大きいですが、これは継手断面の曲率半径よりもむしろ β 値の大小の影響によるものであると考えられる。

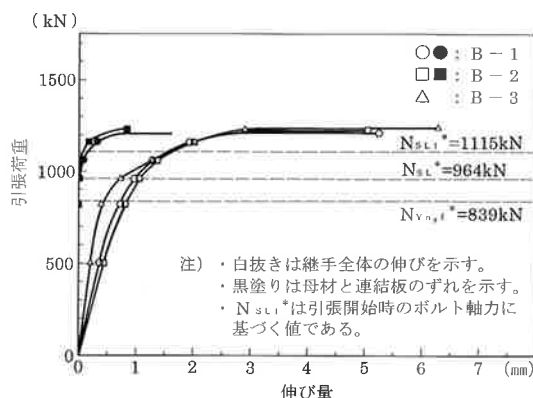
ボルト孔を拡大孔としたことによるすべり強度への影響については、通常孔の実験データがないため明らかではない。しかし、少なくとも本実験データでは、拡大孔によるすべり強度の安全性については問題ないと思われる。

(3) 降伏強度

図-5に母材および連結板の一般部と最外ボルト列位置の荷重-ひずみ図を示す。グラフの値は供



(a) Aタイプ



(b) Bタイプ

図-4 荷重-伸び

表-4 すべり強度

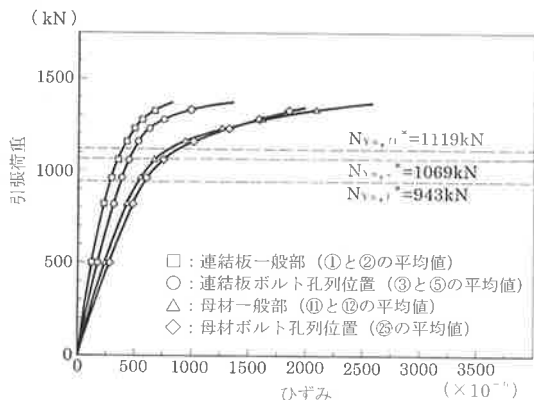
供試体 記号	すべり荷重 (kN)		すべり係数 μ
	実験値 N_{SL}	N_{SL}/N_{SL}^*	
A-1	1332	1.382	(0.476)
A-2	1372	1.423	(0.491)
A-3	1278	1.326	0.457
平均値		1.377	0.475
B-1	1214	1.259	(0.436)
B-2	1230	1.276	(0.442)
B-3	1244	1.290	0.447
平均値		1.275	0.442

注)・ N_{SL}^* はすべり荷重公称値である(表-2参照)。
 ・すべり係数 μ は引張開始時のボルト軸力を基に算出した値であり、()内は推定値である。
 (ボルト軸力: A-3 233kN/本, B-3 232kN/本)

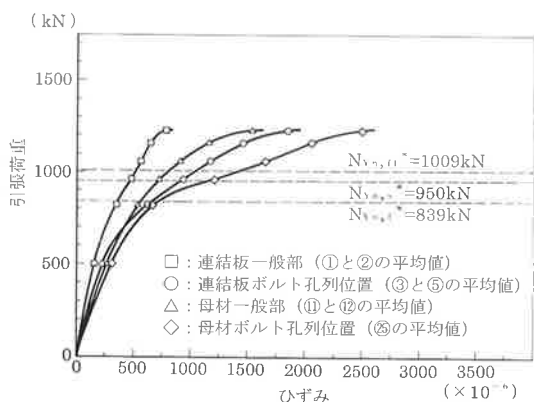
試体のおもて面とうら面との平均値、または、両コバ面の平均値である。また、表-5に供試体の降伏強度を示す。ここに、 $N_{Yn, f}^*$ および $N_{Yn, s}^*$ は降伏点公称値と純断面積公称値に基づく値である。 $N_{Yn, f1}^*$ および $N_{Yn, s1}^*$ は降伏点材料試験値と純断面積計測値に基づく値である。

全般的に連結板は、母材に比べて断面積が大きいので、そのひずみは小さい。

Aタイプの母材について、一般部と最外ボルト



(a) Aタイプ



(b) Bタイプ

図-5 荷重—ひずみ

表-5 降伏強度

供試体の記号	A - 1,2,3	B - 1,2,3
母材純断面降伏強度		
$N_{Yn, r1}^*$ (kN) 注1)	943	839
$N_{Yn, r1}^*$ (kN) 注2)	1119	1009
連結板純断面降伏強度		
$N_{Yn, s}^*$ (kN) 注1)	1069	950
$N_{Yn, s1}^*$ (kN) 注2)	1303	1149
降伏強度実験値		
N_Y (kN)	1160	1120
比率		
$N_Y/N_{Yn, r1}^*$	1.230	1.335
$N_Y/N_{Yn, r1}^*$	1.037	1.110

注1) 降伏点公称値および純断面積公称値に基づく。
 注2) 降伏点材料試験値および純断面積計測値に基づく。

列位置コバ面のひずみは同程度である。また、荷重 $N_{Yn, r1}^*$ 付近までは、ひずみは線形的に変化している。それ以降において降伏が進んでいるようであるが、そのひずみ値は小さく見える。

一方、Bタイプの母材について、 $N_{Yn, r1}^*$ 付近までは一般部と最外ボルト列位置コバ面のひずみの差は小さい。それ以降ではコバ面のひずみが大きく変化し、一般部との差が大きくなっている。また、連結板についても同様である。

これらの傾向について、以下の理由が考えられる。すなわち、供試体の断面が円弧状であり、これに作用する引張荷重が偏心していたため、偏心曲げが作用したと思われる。このことは、実験データにおいて供試体のおもて面とうら面の発生ひずみが異なり、また、供試体軸線付近とコバ面側の発生ひずみが異なっていたことから推定できる。そして、一般部および最外ボルト列位置でのそれぞれのひずみ平均値を評価したために、このような傾向が現れたものと思われる。

継手部材の降伏強度の実験値はAタイプで1160 kN、Bタイプで1120 kNである。そして、母材純断面降伏強度公称値 $N_{Yn, r1}^*$ に対する比率はAタイプが1.23、Bタイプで1.34であり、いずれも公称強度に対して20%以上の余裕がある。しかし、材料強度試験値や純断面積の計測値に基づく降伏強度 $N_{Yn, r1}^*$ に対する比率はAタイプが1.04、Bタイプで1.11であり、あまり余裕はない。このことは前述のように、偏心曲げの影響により部分的に鋼板の降伏が進んだためと思われる。

以上より、継手部材の降伏強度は公称強度に対して安全性を確保していることがわかる。

3. まとめ

曲率半径が小さい曲面部材の高力ボルト摩擦接合継手について、継手強度の検証を目的として、高力ボルト継手の引張実験を行った。この場合、実験供試体の β 値を実橋の高力ボルト継手と同程度とした。実験の結果、以下の知見を得ることができた。

- ① ボルト軸力の減衰について、通常の平面部材の高力ボルト継手においてボルト軸力は、初期導入軸力から数%の減衰が現れている。しかし、本実験の曲面部材の継手においては、ボルト軸力は数%増加している。これについて、母材および連結板が完全な円弧状ではなく、また、母材と連結板の接触面の多くの箇所にすきまがある。このことがバネ効果となっており、ボルト軸力が増加するのではないかとと思われる。
- ② すべり荷重については、道示の公称値に対して約30%前後の余裕がある。また、すべり係数についても公称値より約10%以上大きく、公称すべり強度を確保している。

- ③ ボルト孔を拡大孔としたことによるすべり強度の安全性については問題ない。
- ④ 継手部材の降伏強度については、公称強度に対して20%以上の余裕があり、安全性を確保している。

高力ボルト継手の設計法に関しては、上記のとおり安全性を確認することができた。ただし、実橋の施工においては以下の注意が必要である。

- ① 座金に通常の平座金を用いる場合、座金と連結板との間に0.1~0.5mmのわずかなすきまが生じる。これに対して、塗装や充填材などによって雨水の浸入を防止する。
- ② 連結板が母材に密着するように、連結板の曲げ精度およびボルト孔位置の精度を高める。
- ③ 連結板と母材との間にすきまが生じないように、ボルトの締め付け順序に注意する。

あとがき

ここでは曲面部材の高力ボルト継手を対象にして、引張実験により継手強度の安全性を検証した。今回は作用荷重として引張荷重を対象としたが、今後は、曲げ荷重が作用するケースについての実験的研究が望まれる。そして、曲面部材の高力ボルト継手について、曲げが作用する場合の合理的な継手設計法を検討することも必要であると考えられる。

今後、鋼構造物について景観を考慮して、鋼管部材や曲面部材を用いることが多くなると思われる。また、その部材の現場継手として高力ボルト摩擦接合が採用されることも考えられる。この高力ボルト継手の設計法に対して本報告が参考になれば幸いである。

最後に、本実験に際して多大なご指導、ご協力を頂いた建設省中国地方建設局出雲工事事務所の方々をはじめ、日鐵ボルテン株式会社の方々、そして、関係各位に対して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編），1996.12.
- 2) 杉山 功・金子俊一・明田啓史：半径600~800mmの曲面部材の高力ボルト摩擦継手のすべり試験報告，土木学会第45回年次学術講演

会講演概要集，Ⅰ-138，1990.9.

- 3) 秋山寿行・西村宣男・亀井義典・池端文哉：高力ボルト摩擦接合引張継手の限界状態の区分，鋼構造年次論文報告集，第3巻，pp.289-296，1995.11.
- 4) 秋山寿行・播本章一：高力ボルト摩擦接合引張継手の強度に関する実験，駒井技報，Vol.12，pp.9-22，1993.3.