

# 接合面にエポキシ樹脂を塗布したボルト継手の力学的挙動に関する実験的研究

Experimental study on static behavior of bolted connections with epoxy resin filler

村越 潤\*, 田中良樹\*\*, 船木孝仁\*\*\*

Jun Murakoshi, Yoshiki Tanaka, Takahito Funaki

\* 工修, 独立行政法人土木研究所, 構造物研究グループ橋梁チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

\*\* 独立行政法人土木研究所, 構造物研究グループ橋梁チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

\*\*\* 修(工), 秋田県建設交通部 (〒010-8570 秋田県秋田市山王 4-1-1)

(研究当時: 独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ橋梁チーム)

Epoxy resin filler is usually applied to ensure the slip resistance and to protect further corrosion on the friction surfaces when corroded steel members were strengthened by additional plates with high strength bolts. In order to clarify the influence of epoxy resin filler on the strengthening, tensile tests of bolted connections with various thickness of resin layers were conducted. It was found that slip resistances of the bolted connections were somewhat higher than those of the connections without resin, even though thicker resin layer definitely caused reduction of bolt tension.

*Keyword : strengthening, bolted connection, high strength bolts, epoxy resin, creep*

キーワード: 補強, ボルト接合継手, 高力ボルト, エポキシ樹脂, クリープ

## 1. まえがき

鋼道路橋に見られる主要な劣化現象として、鋼部材の腐食が挙げられる。鋼部材の腐食は、鋼道路橋の主な架替理由の1つにも挙げられており<sup>1)</sup>、長期にわたって維持管理していくためには、定期的な塗替えに加えて、腐食原因除去などの腐食環境の改善と、腐食により断面欠損が生じた部位への適切な補強が重要である。特に、橋桁端部は、狭隘なため湿気がこもりやすい上に、場合により塩分を含む水が伸縮装置から漏水すること等により、腐食しやすい部位であることが知られている。このため、桁端部の断面欠損やウェブ等に孔が開く状況に至る事例も見られ(図-1)、防食のみならず、これらの部位の断面補強が余儀なくされることがある。

腐食した鋼部材の補強方法の1つとして、高力ボルトによる当て板補強が挙げられる。この場合、腐食による凹凸を伴う接合面でのすべり耐力の確保や防食のため、パテ状のエポキシ樹脂を充填する事例が見られる。しかし、断面欠損が著しい部材にボルト孔を削孔した場合、その周囲で局部的に樹脂が厚くなることが想定され(図-2)、樹脂のクリープ変形とそれに起因したボルト軸力の低下やすべり耐力の低下が懸念される。このような樹脂厚の影響については、既往の研究<sup>2)~5)</sup>における試験のデータ数が少なく、かつ断面欠損深さ(樹脂厚)が限定的

であるため必ずしも明確ではない。そこで本研究では、一般的な高力ボルト継手小型供試体の接合面(腐食が生じていない平滑面)に樹脂厚が1~5mmとなるようにエポキシ樹脂を塗布して、その樹脂厚の違いがボルト軸力やすべり耐力に及ぼす影響について実験的検討を行った。



図-1 鋼道路橋の桁端部における腐食事例

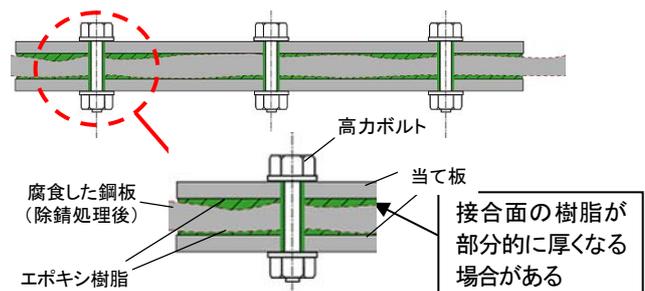


図-2 腐食鋼板の当て板補強 (模式図)

## 2. ボルトによる当て板補強に関する既往の報告

### (1) 腐食した鋼部材の断面欠損部の補強方法

腐食が生じ、著しい断面欠損に至った鋼部材の場合、初期の部材断面の有する強度・剛性に回復するための補強が行われることがある。断面欠損部の補強方法としては、部分的な部材交換<sup>6)~8)</sup>、あるいは高力ボルトを用いた当て板による断面補強<sup>4)・6)</sup>が挙げられる。

部分的な部材交換は、部材の断面欠損が著しい範囲が比較的広い場合に採用される。一時的ではあるが断面欠損部の周囲を切除するので、作用力の解放が必要となる。桁端部の限られた空間かつ交通供用下で、そのような交換作業は容易でない<sup>7)</sup>。

当て板補強は、断面欠損部を切取らずに鋼板を当てるため、作業は部材交換に比べて容易である<sup>4)・6)</sup>。腐食した鋼板はケレンによりさび層を除去するが、鋼材表面は凹凸が残るので、エポキシ樹脂(パテ)を塗布した後に鋼板を当てる事例が見られる<sup>9)</sup>。

### (2) 既往の研究

#### a) ボルト軸力の低下と樹脂の影響

一般に高力ボルトの軸力は、締付け後から10日程度で5%程度の低下が見られる<sup>9)</sup>。部材の接合面にエポキシ樹脂が充填されたボルト継手は、樹脂の無い場合に比べて、ボルト軸力の低下が大きい<sup>2)~4)</sup>。文献2)~4)では、測定に用いた供試体の接合面への樹脂の充填方法は明示されていないが、いずれの場合も部材に樹脂を塗布してから接合したと思われる。接合面に樹脂が塗布された場合の高力ボルトの軸力低下は、ボルトのリラクセーションのほか、樹脂の収縮やクリープ変形の影響を受けると考えられ、母材の凹凸の程度(樹脂の厚さ)や、樹脂塗布時期、ボルト締付けからの経過時間の影響を受けるものと考えられる。例えば、文献2)及び3)では、継手の母材に最大断面欠損深さ2.5mm程度の実腐食材を使用しているが、ボルトの締付けは、母材と当て板を接着した直後に行っている。ボルトの締付けから7日後に10%程度軸力が低下していた。また、文献4)では、ボルト周囲の樹脂厚が約3mmとなるように母材(健全材)と当て板を接着して、

ボルトで仮締めしてから2日養生後にボルトの締付けを行った。この場合、ボルトの締付けから5日後に12~25%程度軸力が低下していた。文献2)~4)の試験データでは、樹脂塗布後の当て板接着からボルト締付けまでの時間やボルト軸力の測定期間が異なっているため、軸力の低下量について、必ずしも統一的な比較はできない。

#### b) すべり耐力に及ぼす樹脂の影響

接合面に樹脂を塗布したボルト継手のすべり耐力は、樹脂による母材と当て板の接着効果により、通常の摩擦接合継手よりも大きくなる<sup>10)</sup>。また、腐食部材を用いた場合、樹脂厚が厚くなる傾向にあり、ボルト軸力の著しい低下が生じるが、軸力が著しく低下しても樹脂無しの高力ボルト摩擦接合に比べて高くなる傾向が見られた<sup>2)・3)</sup>。また、実際に腐食した鋼材を母材に用いた場合(母材、当て板の両接合面をブラスト処理した)で、接合部のボルトによる締付けを低い軸力で行っても、接着剤の効果によって高いすべり耐力が得られ、高い軸力(所定の設計軸力)で締付けた場合と大差なかったことが報告されている<sup>2)</sup>。しかし既往の研究では、断面欠損深さが限定的であり、樹脂厚に着目した実験例が無く(表-1)、樹脂厚がすべり耐力に及ぼす影響は必ずしも明らかでない。

## 3. 試験方法

図-3に、試験のフローを示す。

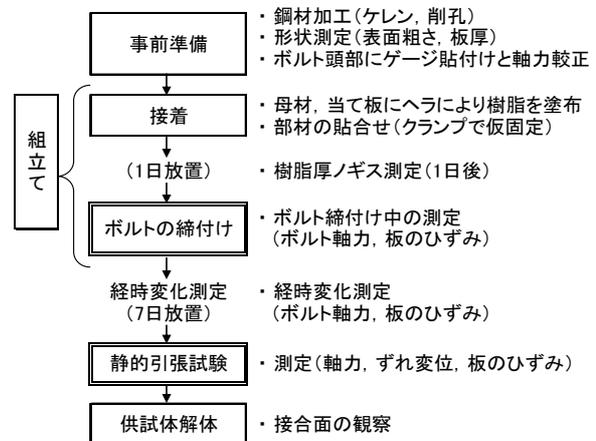


図-3 試験のフロー

表-1 既往の研究によるボルト接合面に樹脂を塗布した供試体の試験データ

文献番号	使用材料諸元						ボルト軸力測定					引張試験		
	母材	公称板厚 (mm)	最大断面欠損深さ (mm)	当て板	板厚 (mm)	樹脂厚	ボルト	導入軸力 (kN)	測定軸力 (kN)	軸力低下率 (%)	ボルトの締付け時期	軸力の測定期間	すべり荷重 (kN)	供試体数
2)	実腐食材 (鋼種不明)	9	2.3	鋼種不明	9	不明	S10T M20	180	-	10%以下	部材接着直後	7日程度	560~620	10
3)	実腐食材 (SMA50W)	10	2.6	SM490	9	不明	F10T M22	221	-	4~6%	部材接着直後	3日間	269~278 (*)	10
4)	平滑材 (鋼種不明)	22	0	鋼種不明	14	約0mm	S10T	241	216	10.2%	部材接着後、一旦ボルトで仮締めし、2日後に本締め	5日間	677	1
							M22	238	211	11.4%			578	1
								234	220	5.7%			487	1
	S10T	219	168	23.0%	581	1								
腐食模擬 (鋼種不明)	22	5	鋼種不明	14	ボルト孔周り約3mm	M22	233	175	24.9%			488	1	
							224	197	12.1%			373	1	

注1): 供試体は、2面の高力ボルト摩擦接合継手で、エポキシ樹脂を使用

注2): 表中(\*)は、すべり発生前に母材が降伏したため、そのときのピーク荷重

**(1) 供試体**

図-4 に供試体の形状寸法とひずみゲージ等の測定位置を示す。母材と当て板は、いずれも腐食していない平滑材とした。表-2 に使用した鋼材の引張試験結果(母材、当て板ともに各 3 体の平均値)とグリットブラスト処理した接合面の表面粗さを示す。また、表-3 にエポキシ樹脂の仕様を示す。樹脂は、主剤と硬化剤の 2 液混合型エポキシ樹脂パテ(市販品)を用いた。

接合面の樹脂の厚さ(目標値)は 0mm(樹脂無し)、1, 2, 3, 5mm とした。導入するボルト軸力は、使用した高力ボルト

表-2 鋼材の引張試験結果と表面粗さ

鋼材	板厚 (mm)	降伏荷重 (kN)	降伏点* (MPa)	最大荷重 (kN)	引張強さ (MPa)	弾性係数 (GPa)	表面粗さ (ブラスト後) Rz**
SM490A	22	306	348	462	524	211	51
	12	177	371	263	553	215	52

\*) 各3体の平均値(上降伏点)

\*\*): Rz: 最大高さ粗さ(JIS B 0601)

ト(F10T, M22)の設計軸力 205kN の 1 割増し 225kN を基準として、225kN(100%導入)、112kN(50%導入)、45kN(20%導入)を目標値とした。

供試体の組立てでは、樹脂を母材と当て板の両接合面に塗布した後、貼り合わせた。その際、母材と当て板の

表-3 エポキシ樹脂の仕様

主 剤	エポキシ樹脂
硬化剤	変形脂肪族ポリアミン
配合比	主剤:硬化剤=7:3
添加材	繊維、骨材 (質量比は、樹脂:添加材=1:2)
可使時間	90分/10℃
硬化時間	24時間/5℃
強度性能(10℃) 7日養生/1日養生	引張強さ: 27.5MPa/15.4MPa
	引張せん断強度: 14.3MPa/12.7MPa
	圧縮降伏強さ: 79.5MPa/36.8MPa 圧縮弾性係数: 56.9GPa/8.6GPa
線収縮率/体積収縮率	0.06% / 0.18%
熱膨張係数	$3.22 \times 10^{-5}$ (20℃~50℃)

注) 数値は、メーカーのカタログ値

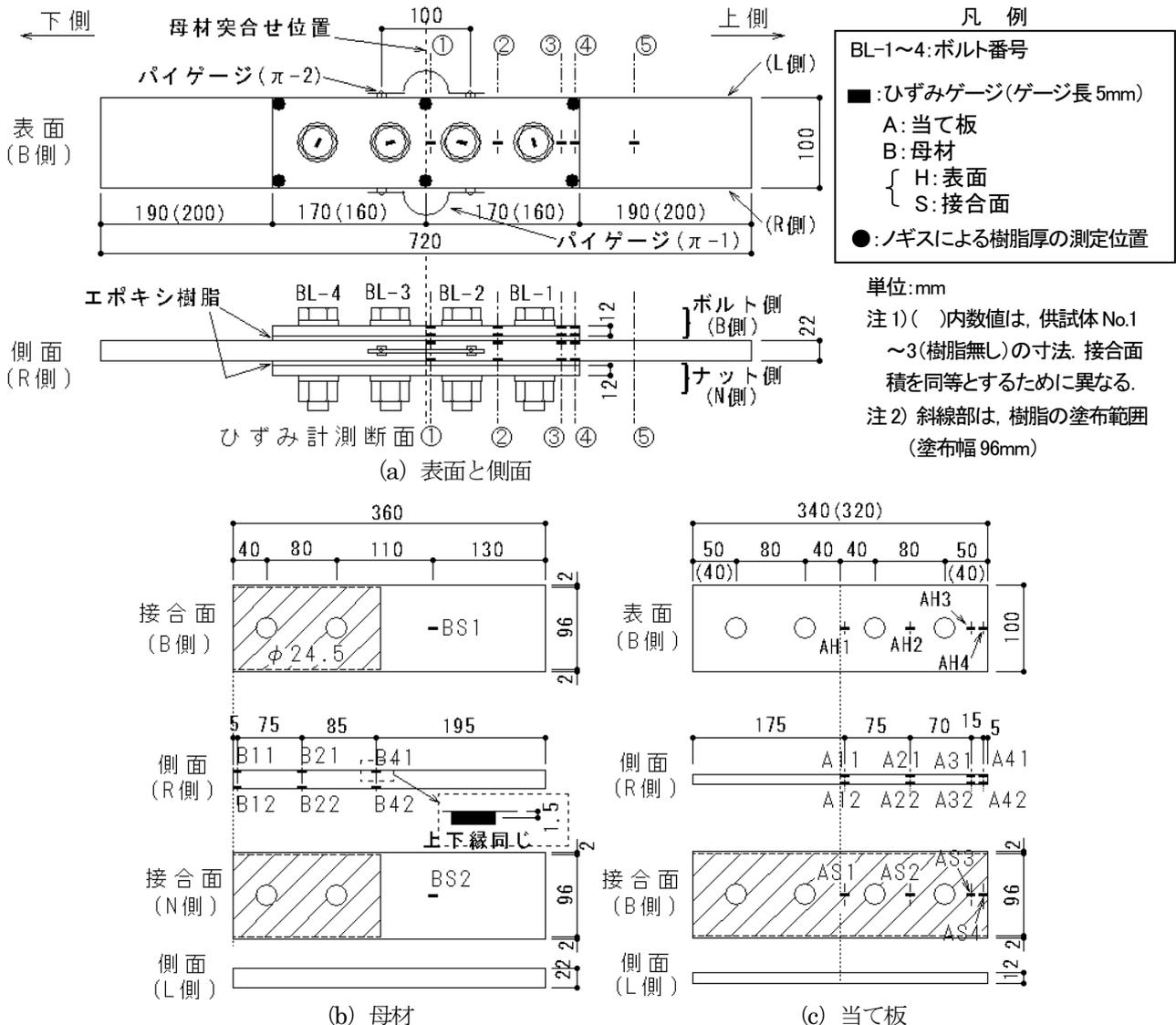


図-4 供試体の形状と測定位置  
(母材、当て板のひずみゲージは、供試体 No.7~9 及び No.13~15 に設置)

表-4 エポキシ樹脂の厚さの測定結果

供試体 No.	目標樹脂厚 (mm)	目標導入軸力 (kN)	ひずみゲージの有無	各接合面の実測樹脂厚 (mm)						平均値** (A+B)/2 (mm)
				接合部(ボルト側)			接合部(ナット側)			
				締付前*	締付後(A)*	差	締付前*	締付後(B)*	差	
1	0	225								
2	(樹脂無し)	112								
3		45								
4	225			1.51	1.37	-0.14	1.46	1.35	-0.11	1.4
5	1	112		1.43	1.38	-0.06	1.48	1.32	-0.16	1.3
6		45		1.77	1.46	-0.31	1.23	1.21	-0.02	1.3
7	225		○	2.01	2.27	0.26	2.08	1.97	-0.11	2.1
8	2	112	○	2.63	2.62	-0.01	2.63	2.88	0.25	2.7
9		45	○	2.27	2.24	-0.03	2.79	3.06	0.27	2.6
10	225			3.37	3.58	0.21	3.44	3.62	0.19	3.6
11	3	112		3.28	3.47	0.19	3.77	3.97	0.19	3.7
12		45		3.58	3.51	-0.07	3.34	3.36	0.02	3.4
13	225		○	5.55	5.83	0.28	5.61	5.76	0.14	5.8
14	5	112	○	5.35	5.32	-0.03	5.80	5.72	-0.08	5.5
15		45	○	5.98	5.98	0.00	5.61	5.60	-0.01	5.8

\*)6測点の平均値

\*\*)ボルト締付け後における2接合面の実測樹脂厚の平均値

間に、部材幅 100mm のうち両側の幅端から 2mm の範囲に目標樹脂厚相当のアルミ板を挟むことにより、所要の樹脂厚を確保した。接着直後(樹脂が硬化する前)、図-5 に示したクランプにより接合部を挟むとともに、供試体の側面及びボルト孔部分から樹脂が漏れ出る程度に加圧し、その樹脂は取り除いた。なお、母材の突合せ部のすき間にも若干樹脂が入り込んだ。1日(室温 5~25℃)養生後、アルミ板を取り外して設定した締付け順(図-4 中のボルト記号 BL2→3→1→4)に 2 度締め(1 回目:目標値の 60%, 2 回目:目標値)によりボルト軸力を導入した。なお、樹脂の硬化時間は、温度 5℃ の場合は 24 時間(15℃ の場合は 12 時間)であるため、室温下に置かれた供試体の樹脂は、ボルト軸力導入時には十分硬化していたと推測される。ボルトは、目標導入軸力まで一旦締付けた後は、再締付けを行わなかった。

ボルト締付け前後に、図-4 に記した●の位置において接合面 1 面当たりの樹脂厚をノギスにより測定した。実測樹脂厚は、測定した母材と当て板を含む接合部の厚さから母材厚、当て板厚を差し引いたものとした。表-4 にその結果を示す。実測樹脂厚(6 測点の平均値)は、いずれも目標値に比べてやや大きくなった。また、ボルト締付け前後で -0.3~0.3mm 程度の変化が見られた。樹脂厚に若干の増減が見られた要因としては、ボルト締付けによって生じた当て板の反りの影響が考えられる。この変化は、事前に部材の任意箇所の樹脂厚を数回測定することで把握した測定誤差(1/100mm 程度)を超えるものであった。

## (2) ボルト軸力の管理と経時変化測定

目標導入軸力の管理及び軸力の経時変化測定は、ボルト軸力との比例関係にあるボルト頭部のひずみ(ひずみゲージ長 5mm)により行った<sup>9)</sup>。締付け前に、供試体を使用する全ボルトに対して軸力計を用いて軸力とひずみの較正を行った。以下、本文で示すボルト軸力は、個々の

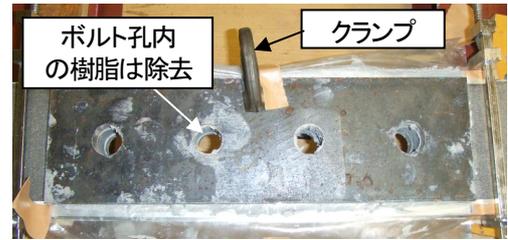


図-5 クランプによる接合部の加圧状況

表-5 ボルト軸力及びひずみの経時変化測定間隔

測定期間 (締付け完了後の経過時間)	0~6 時間	6~12 時間	12~24 時間	1~7 日
測定間隔	5分	10分	30分	1時間

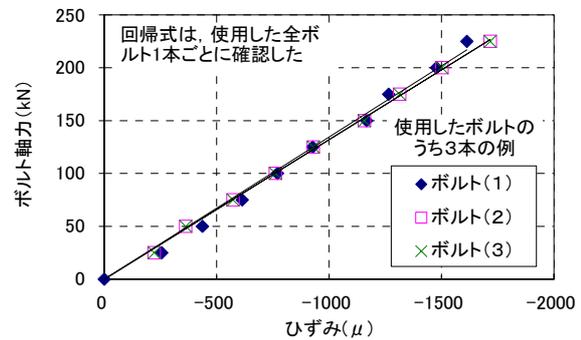


図-6 ボルト軸力較正の例

ボルトの較正值(回帰から得られた傾き)を用いて実測ひずみから換算した値である。図-6 に任意のボルト 3 本について較正時のひずみ測定結果の例を示す。ボルト軸力の経時変化測定は、表-5 に示す測定間隔で 7 日間実施した。最後に締付けたボルト BL-4 の本締め完了時点を経時変化測定の起点(0 時間)とし、先に締付けたボルト BL-1, 2, 3 とともに経時変化の測定を開始した。7 日間の測定期間中は、室温の測定とともに、締付けていないボルト(ダミーボルト)のひずみを測定した。ボルト軸力は、試験中におけるボルト単体の温度変化によるひずみ変化の影響を除くため、ボルトのひずみからダミーボルトのひずみを差引くことによって求めた。供試体 No.7~9(目標樹脂厚 2mm)と No.13~15(同 5mm)については、部材に貼付けたひずみゲージ(測定断面①~④)により、ボルトの締付けによって生じる板のひずみとその経時変化を測定した。

## (3) 静的引張試験

7 日間のボルト軸力の経時変化測定後、静的引張試験を実施した。载荷は、継手のすべり挙動を確認するまでの単調载荷(変位制御, 载荷速度 0.15mm/min)とした。すべりの観察は、試験中におけるすべり音の発生や供試体側面の野書き線のずれ発生の目視確認によっても行ったが、すべり荷重は、パイゲージの読み値で、突合せた母材間の最初のピーク値の荷重とした。供試体 No.7~9(目

表-6 締付け完了時におけるボルト軸力の測定結果

供試体 No.	樹脂厚(mm)		目標導入軸力(kN)	BL-4締付け時点の軸力 (目標導入軸力に対する導入軸力の比(%))				
	目標値	実測値		BL-1 (3)	BL-2 (1)	BL-3 (2)	BL-4 (4)	平均値
1	0	—	225	99.6	99.0	99.7		99.6
2	(樹脂無し)	—	112	99.6	99.3	99.6		99.6
3		—	45	99.7	98.3	99.7		99.4
4		1.4	225	97.2	93.0	96.2		96.6
5	1	1.3	112	96.1	93.5	95.4		96.3
6		1.3	45	96.4	91.1	96.1		95.9
7		2.1	225	94.2	94.4	93.9		95.6
8	2	2.7	112	96.5	93.7	93.8	100.0	96.0
9		2.6	45	94.9	92.2	92.5		94.9
10		3.6	225	92.3	91.7	93.9		94.5
11	3	3.7	112	95.6	94.5	94.1		96.1
12		3.4	45	96.2	95.4	90.7		95.6
13		5.8	225	91.3	88.1	87.4		91.7
14	5	5.5	112	92.2	89.2	89.1		92.6
15		5.8	45	94.8	89.3	93.8		94.5

注)BL-1~4は、高力ボルト番号。( )内の数値は、ボルト締付け順

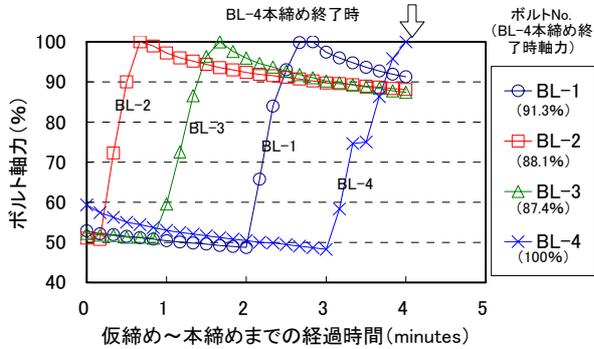


図-7 導入直後の軸力変化(供試体 No.13 の例)

標樹脂厚 2mm)と No.13~15(同 5mm)については、载荷中の板のひずみも測定した。ひずみの測定位置は、ボルト締付け時に測定したひずみと同じ位置である。

#### 4. ボルト軸力測定結果

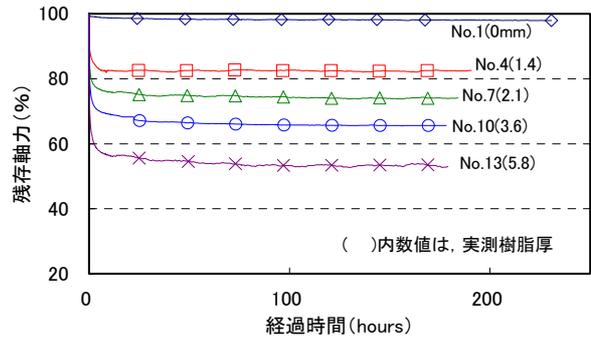
##### (1) 初期導入軸力

表-6 に、締付け完了時点におけるボルト軸力の測定結果を示す。樹脂有りの供試体 No.4~15 の場合は、3~13%の範囲で軸力が低下していた。各供試体の初期導入軸力の平均値でみると、樹脂が厚いほど軸力が大きく低下する傾向が認められた。最も樹脂が厚い供試体 No.13~15(目標樹脂厚 5mm)では、目標導入軸力が高いほど軸力の低下が大きかったが、樹脂が薄い供試体 No.4~12 では、目標導入軸力が締付け完了時の軸力の低下に及ぼす影響は明確でなかった。

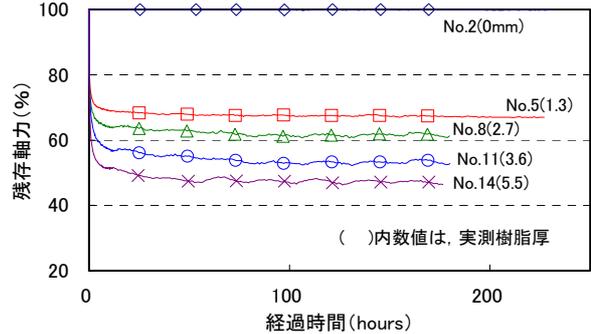
図-7 に、ボルト BL-4 の仮締め終了時から本締め終了時までの各ボルトの軸力の挙動について、供試体 No.13 を例に示す。ボルト軸力の低下は、それぞれのボルトの本締め直後から、時間の経過とともに生じていた。

##### (2) ボルト軸力の経時変化

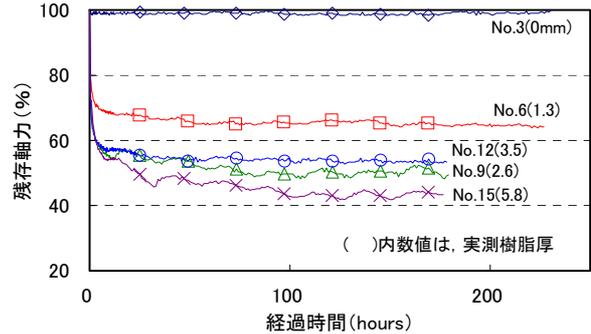
図-8 に、ボルト軸力の経時変化について、各供試体



(a) 目標導入軸力 225kN 供試体



(b) 目標導入軸力 112kN 供試体



(c) 目標導入軸力 45kN 供試体

図-8 ボルト軸力の経時変化 (ボルト BL-4 の例)

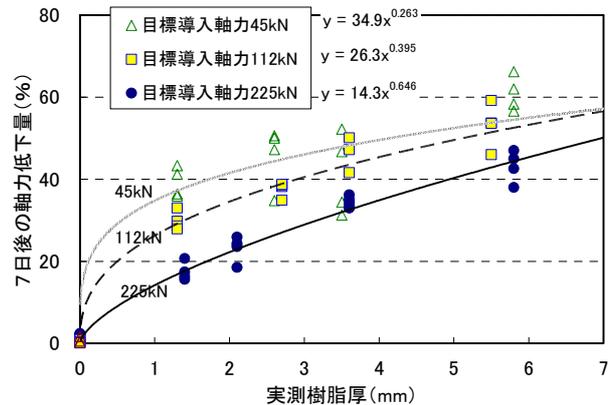
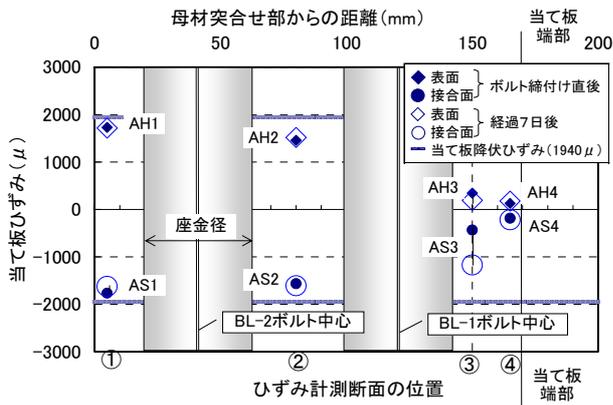
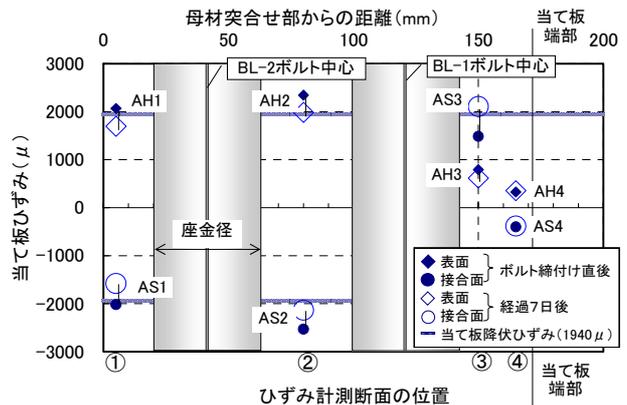


図-9 ボルト締付けから7日後の軸力低下量と樹脂厚との関係

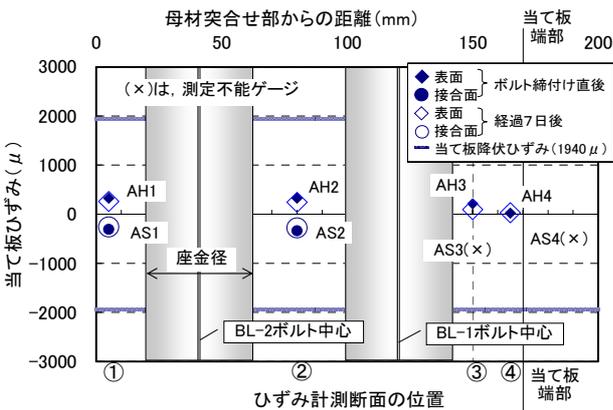
において最後に締付けたボルト(BL-4)の結果を例に示す。残存軸力は、表-6 に示した締付け完了時の軸力を 100% として示す。ボルト締付けから7日後のボルト軸力は、



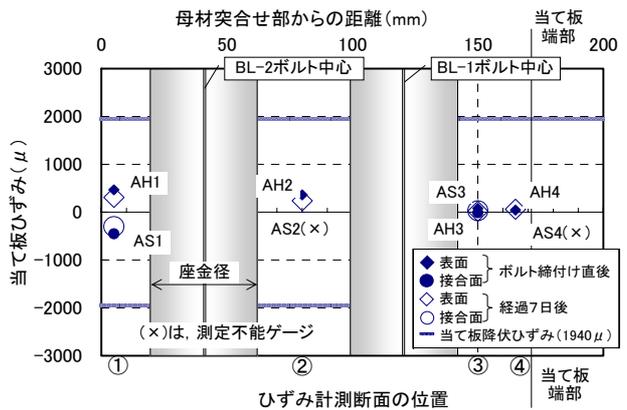
(a) 供試体 No.7  
(樹脂厚 2.1mm, 目標導入軸力 225kN)



(b) 供試体 No.13  
(樹脂厚 5.8mm, 目標導入軸力 225kN)



(c) 供試体 No.9  
(樹脂厚 2.1mm, 目標導入軸力 45kN)



(d) 供試体 No.15  
(樹脂厚 5.8mm, 目標導入軸力 45kN)

図-10 ボルト締付け完了時及び7日後における当て板のひずみ(当て板の表面及びひき接合面)

樹脂無しの供試体 No.1~3 では、目標導入軸力に比べて 2%程度低下していた。

樹脂有りの場合、ボルト軸力の低下の速度は経過時間が短いほど著しいが、経過 1 日以降で軽微になり、経過 4~7 日で低下は落ち着いた。ボルト締付けから 7 日後におけるボルト軸力の低下量は、目標導入軸力に対し、樹脂厚に応じて 20~60%程度であった。

図-9 に、目標導入軸力に対する 7 日後におけるボルト 4 本の軸力低下量と、実測樹脂厚(表-4)の関係を示す。図中、目標導入軸力別にべき乗式による相関曲線を併記した。樹脂有りの供試体 No.4~15 を比較した場合、樹脂が厚く、目標導入軸力が低いほど導入軸力に対する軸力の低下の割合が大きい傾向にあった。なお、曲線の相関係数は、本試験における樹脂厚の範囲では 0.68(目標導入軸力 45kN), 0.98(同 112kN), 0.99(同 225kN)であった。

### (3) ボルト締付けに伴う当て板のひずみ

図-10 に、ボルト締付けに伴う当て板のひずみについて、目標導入軸力 225kN 及び 45kN に着目し、供試体 No.7, 9(目標樹脂厚 2mm)及び No.13, 15(同 5mm)を例に示す。図中の数値は、正が引張側、負が圧縮側を表す。また、当て板の降伏ひずみを併記した。

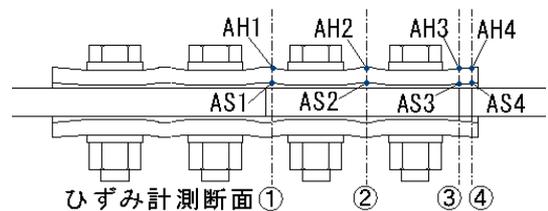


図-11 供試体の変形模式図(文献 11)を参考とした)

いずれの図においても当て板の表面(AH1~4)では引張側、接合面(AS1~4)では圧縮側にひずみが生じる傾向にあり、ボルト締付け時に当て板に曲げ変形が生じていたことがわかる。目標導入軸力 225kN の場合、測定断面 ②では、樹脂が厚い方でひずみが大きかった。供試体 No.7(樹脂厚 2.1mm)では、ボルト締付け直後のひずみが 1600~1800 μ 程度であったのに対し、供試体 No.13(同 5.8mm) の場合、2000~2500 μ 程度であり、降伏ひずみに達していた。これらのひずみは、経過 7 日後においてもほとんど変化が見られなかった。

供試体 No.13 の測定断面 ③では、表面及びひき接合面ともに引張ひずみが生じていた。ひずみゲージが座金に近く、樹脂が厚かつ軸力が高い場合にその影響が出た可能性もあるが、明確でない。

ボルト締付けに伴う当て板のひずみの発生については、

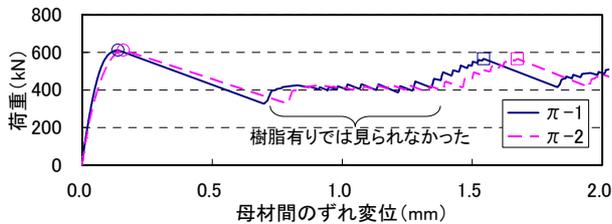
表-7 すべりの発生状況

供試体 No.	目標樹脂厚 (mm)	実測樹脂厚 (mm)	目標導入軸力 (kN)		引張試験前軸力* (kN)		接合面へのゲージ貼付けの有無 有:○	すべり荷重 (kN)	すべり音の有無 有:○	樹脂のひび割れの有無 有:○	すべり・降伏耐力比 $\beta^{**}$
			上側	下側	上側	下側					
1	0	—	225	220	221	220		612	○		1.06
2	(樹脂無し)	—	112	112	111	112		412	○		0.71
3		—	45	44	45		135				0.23
4		1.4	225	183	188		700	○	○		
5	1	1.3	112	79	78		655	○	○		
6		1.3	45	26	29		596	○	○		
7	2	2.1	225	178	169	○	676	○	○		
8		2.7	112	71	69	○	530	○	○		
9		2.6	45	26	23	○	420	○	○		
10	3	3.6	225	147	149		668	○	○		
11		3.7	112	65	62		628	○	○		
12		3.4	45	30	23		512	○	○		
13	5	5.8	225	134	122	○	654	○	○		
14		5.5	112	53	52	○	485	○	○		
15		5.8	45	17	18	○	370	○	○		

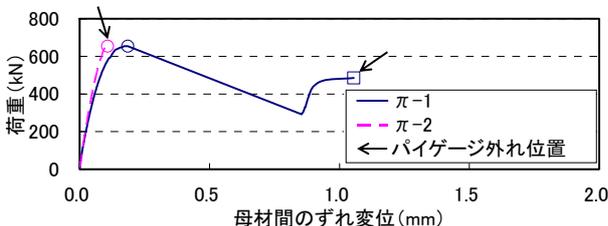
\*) 引張試験前軸力は、ボルト2本の平均値(上側はBL-1,2 下側はBL-3,4)

\*\*\*) すべり・降伏耐力比  $\beta = P_s / (A_n \times \sigma_y)^{12)}$

$P_s$ : すべり荷重       $A_n$ : 母材純断面       $\sigma_y$ : 母材降伏点



(a) 供試体No.1 (樹脂無し)



(b) 供試体No.13 (樹脂厚5mm)

図-12 荷重-母材間の変位

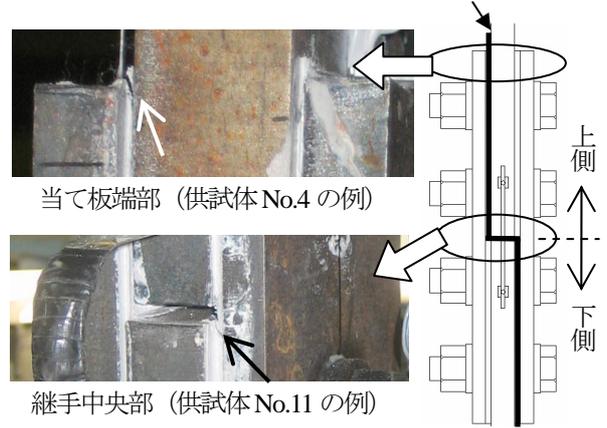
文献 11)で観察されており、その原因としては、図-11に示すようにボルトの締付けにより当て板が変形するためとされている。本試験では、接合面の樹脂が厚くなるほど、その変形が大きくなる傾向が確認できた。なお、図示していないが、母材側面でのひずみは、最大で50 $\mu$ 程度と軽微であり、ボルト締付けによる変形はほとんど見られなかった。

## 5. 静的引張試験結果

### (1) すべりの発生状況

表-7に、各供試体におけるすべりの発生状況を示す。また、図-12に、荷重とパイゲージで測定した母材間の変位の関係について、樹脂無しの供試体 No.1 及び No.13 (樹脂厚5mm) を例に示す。パイゲージで測定した母材間の変位は、すべり音の発生とともに急激に増加した場合

樹脂有りにおける初回すべり時の典型的なすべり面



当て板端部 (供試体 No.4 の例)

継手中央部 (供試体 No.11 の例)

図-13 すべり発生時における樹脂のひび割れ (↑: ひび割れ発生位置)

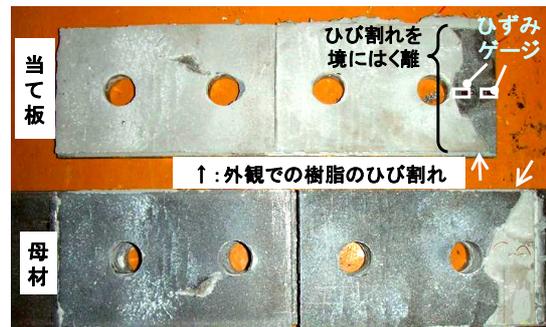


図-14 解体後の接合面の状況 (供試体 No.9 B 側の例)

がほとんどであった。樹脂を塗布した供試体では、初回のすべり音の発生と同時に、図-13の太線部で示したように、すべり面が同一母材の両面ではなく、かぎ状となる場合が多く見られた。その後、さらに荷重を続けて残り部分のすべりも確認した。樹脂無しの供試体 No.1 では、初回のすべり後から2回目のすべり発生までに、荷重が一旦横ばいの状態でずれ変位が増加していたが(図-12(a)), 樹脂有りの場合では、このような傾向は見られなかった。なお、樹脂有りの供試体では、初回すべり時に、パイゲージが外れる場合も見られた。

供試体の側面から樹脂を観察すると、図-13に示すように、すべり発生と同時に、継手の中央部や当て板の端部で樹脂のひび割れが発生した。なお、図-14に示すように、接合面にひずみゲージを貼付けた供試体では、そのゲージ位置の近傍で樹脂のひび割れが生じた場合も認められた。

### (2) すべり荷重

図-15に、すべり荷重と実測樹脂厚の関係を示す。樹脂有りの供試体におけるすべり荷重は、目標導入軸力が低い場合に、樹脂が厚いほど低くなる傾向が見られた。目標導入軸力225kNとした供試体(No.4, 7, 10, 13)のすべり荷重は、樹脂厚にかかわらず、樹脂無しの供試体 No.1 に比べて同等以上であった。また目標導入軸力を112kNと低くした供試体であっても、すべり荷重が供試体 No.1 より高くなる場合も認められた(No.5, 11)。

図-16に、すべり荷重と試験前(経過7日後)のボルト軸力の関係を示す。ボルト軸力は上側、下側それぞれ2本の平均値のうち低い側の値を用いた。樹脂有りの供試体の場合、試験前のボルト軸力が低いほど、すべり荷重が低くなる傾向が見られた。

図-15, 16の両方において、点線で囲んだデータは、当て板の接合面にひずみゲージを貼付けた供試体であるが、これらのすべり荷重は、導入軸力の変化に対して低下の程度が大きい傾向にあった。ひずみゲージを貼り付けた供試体では、破壊が生じた当て板の界面にひずみゲージが接着したままの状態であったことから、接合面のゲージが当て板と樹脂の接着における欠陥となって、すべり耐力を低下させた可能性があると考えられる。

### (3) 荷重-母材間の変位

図-17に、各供試体における初回のすべり発生までの、パイゲージ2本の平均値で整理した母材間の変位を、荷重との関係で示す。図中、パイゲージの標点間での母材と当て板の総断面(46mm×100mm、樹脂の剛性は無視)で算出した鋼板の弾性変位を併記した。

また、ボルト孔周りでの応力集中の影響を考慮して、計算上孔周りで降伏が始まる荷重  $P_{y1}$  及び  $P_{y2}$  を示した。計算の対象とした断面は、 $P_{y1}$ (280kN)では当て板2枚の純断面(合計材厚24mm)とし、 $P_{y2}$ (504kN)では母材と当て板が一体であると仮定した場合の純断面(材厚46mm、樹

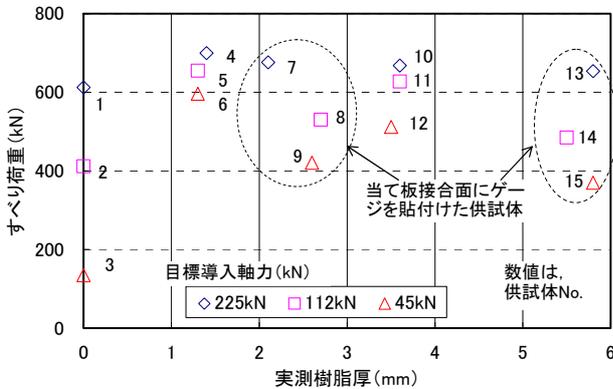


図-15 すべり荷重と実測樹脂厚の関係

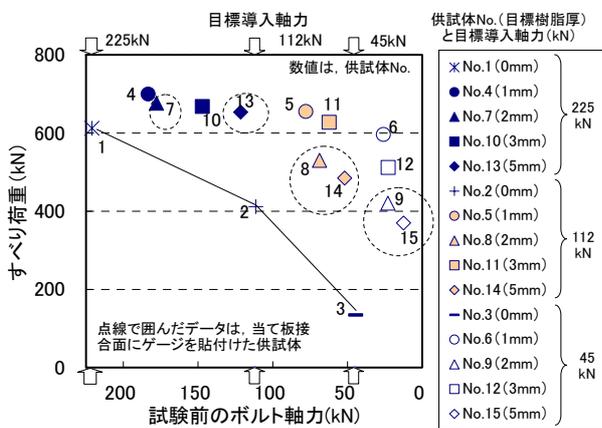
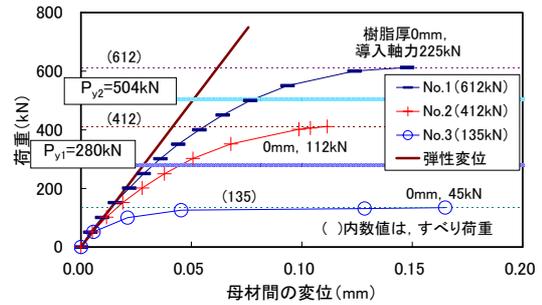
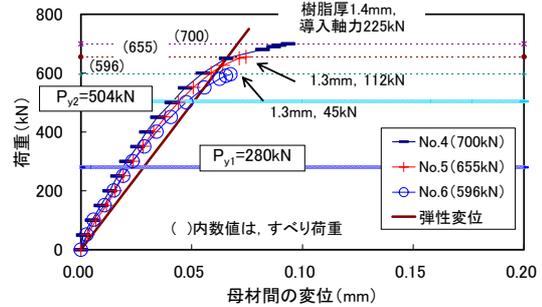


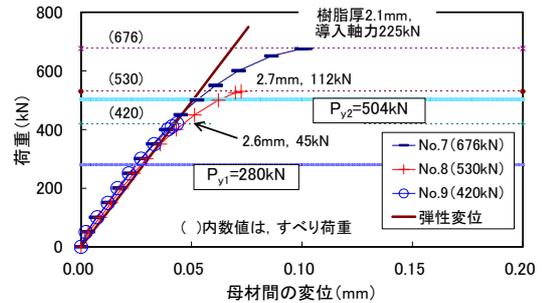
図-16 すべり荷重と試験前のボルト軸力の関係



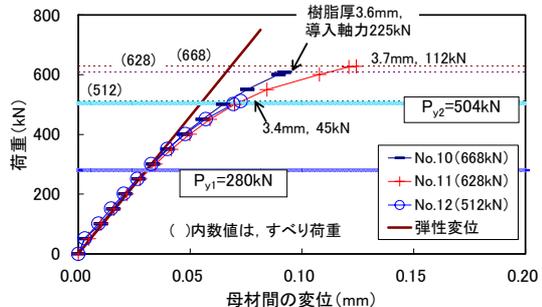
(a) 供試体No.1~3 (樹脂無し)



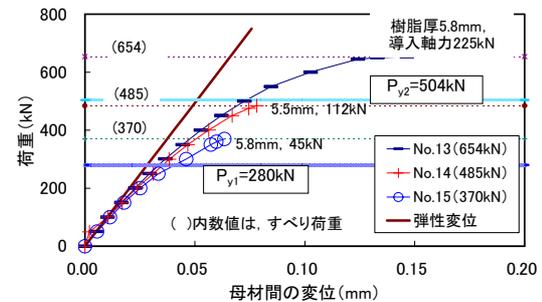
(b) 供試体No.4~6 (目標樹脂厚1mm)



(c) 供試体No.7~9 (目標樹脂厚2mm)



(d) 供試体No.10~12 (目標樹脂厚3mm)



(e) 供試体No.13~15 (目標樹脂厚5mm)

図-17 初回のすべりまでの荷重と母材間の変位の関係

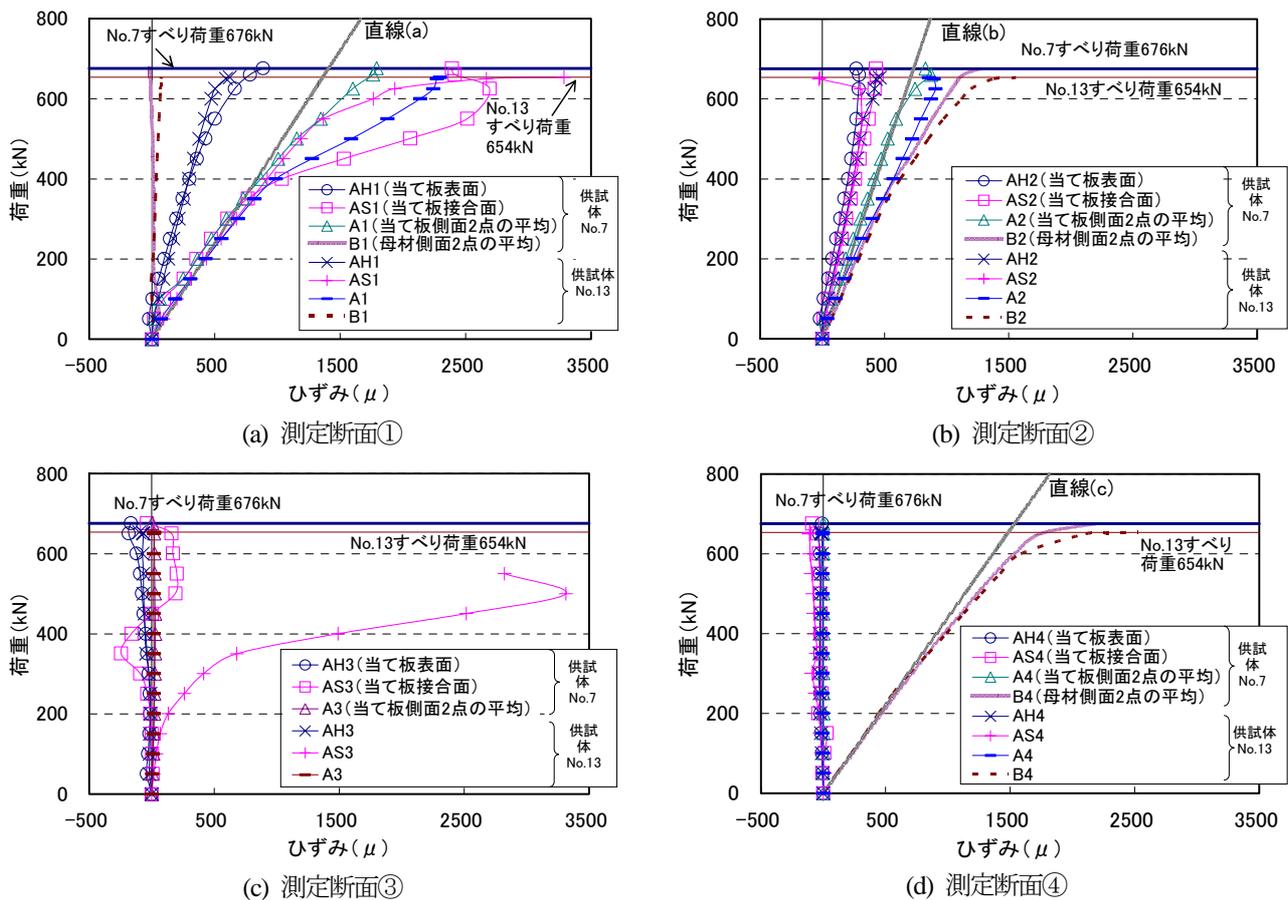


図-18 樹脂有りの供試体における荷重-ひずみの関係 (供試体 No.7 及び No.13 の例)

脂厚は無視)とした。それぞれ次式(1)により計算を行った。

$$P_{y_i} = (A_{ni} \times f_{y_i}) / k / 1,000 \quad (1)$$

ここに、

$P_{y_i}$  : 円孔周りでの応力集中の影響を考慮して、計算上孔周りで降伏が始まる荷重(kN)  $i = 1, 2$

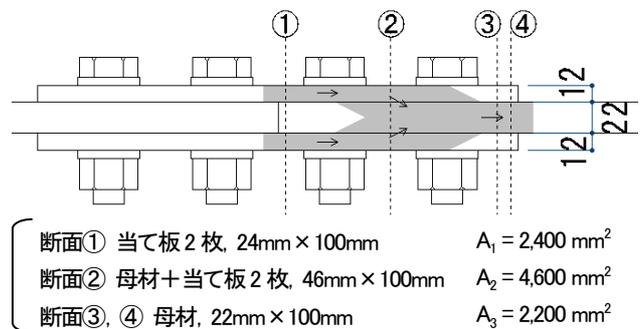
$A_{ni}$  : 純断面積 ( $A_{n1} = 24\text{mm} \times 75.5\text{mm}$ ,  $A_{n2} = 46\text{mm} \times 75.5\text{mm}$ )

$f_{y_i}$  : 降伏点 ( $f_{y1} = 371\text{MPa}$ ,  $f_{y2} = 348\text{MPa}$ )

$k$  : 帯板の円孔縁における応力集中係数 (=2.4)<sup>13)</sup>

鋼板の弾性変位を表す直線の傾きは、荷重 200kN 程度まで一般の高力ボルト摩擦接合継手である供試体 No.1 の傾きとほぼ一致していた(図-17(a))。樹脂有りの供試体では、いずれの樹脂厚の場合も樹脂無しの場合に比べてずれ変位が小さく、またその差は、樹脂が薄いほど明確であった。なお、樹脂が薄い場合には、鋼板の弾性変位の剛性を上回っていたが、本試験で得たデータだけでは、この挙動の説明まで至らなかった。

ボルト孔の応力集中の影響を考慮した降伏荷重  $P_{y1}$  及び  $P_{y2}$  に着目して、各供試体の荷重に伴うずれ変位挙動を比較した場合、樹脂無しの場合の供試体 No.1 の挙動は  $P_{y1}$  まで直線的であったのに対し、樹脂を塗布した供試体 No.4~6 及び No.7 の挙動は  $P_{y2}$  まで概ね直線的であった。これは供試体 No.4~6 及び No.7 のパイゲージによるずれ変位の測定対象区間において(少なくともその区間のうち



注) 網掛け部は、荷重を分担している断面(図-18より推定) 矢印は、応力の流れ

図-19 ひずみ(計算値)の算出断面と力の流れのイメージ

のボルト孔周辺において、樹脂の接着効果により母材と当て板の一体化の範囲が樹脂無しの場合に比べて広がっていたものと考えられる。

#### (4) 載荷中のひずみ

図-18 に、樹脂有りの供試体における荷重-ひずみの関係について、目標導入軸力 225kN の供試体 No.7(目標樹脂厚 2mm) 及び No.13(同 5mm)を例に示す。

図中の直線(a)~(c)は、図-19 に示す断面①~④を対象とし、以下の式(2)によりひずみ  $\varepsilon$  を算出した。

$$\varepsilon = P / (E \times A_i) \quad (2)$$

ここに、P：荷重、E：弾性係数（215GPa）

$A_i$ ：断面①～④それぞれの断面積（ $i=1\sim3$ ）

測定断面①における当て板のひずみ挙動と直線(a)の算出ひずみ、及び測定断面④における母材のひずみ挙動と直線(c)の算出ひずみが、どちらの場合も荷重400kN程度まではほとんど一致していた。測定断面②では、母材と当て板のひずみ挙動が似てくる傾向にあり、また直線(b)の算出ひずみに近づく傾向が見られた。

これらの図から、図-19に示すように、①、②、④の各測定断面における、母材と当て板それぞれの荷重分担の程度をある程度把握できるが、樹脂の接着効果は明確に現れなかった。測定断面①の結果より、約400kN以降、この断面付近の当て板の負担が急激に増加していたことがわかった。なお、供試体No.7におけるAS1、A1のひずみが100kN程度まで小さかったのは、組立ての際に母材の突合せ部に入り込んだ樹脂の影響によると考えられる。

## 6. 考察

### (1) すべり耐力に及ぼす樹脂厚の影響

接着継手<sup>14)</sup>や接合面に樹脂を塗布した高力ボルト継手<sup>10)</sup>（いずれもせん断継手）における破壊時またはすべり時の強度は、式(3)に示すせん断強度 $v_s$ で表されることがある。図-20に、式(3)で計算した各供試体のせん断強度 $v_s$ と、式(4)による試験前ボルト軸力(上側、下側それぞれ2本の平均値のうち低い側の値)による接合面の支圧応力度 $\sigma_o$ の関係を示す。

$$v_s = (P_s / 2) / A_c \quad (3)$$

$$\sigma_o = (m \times N_r) / A_c \quad (4)$$

ここに、 $P_s / 2$ ：接合面1面当たりのすべり荷重

$N_r$ ：試験前ボルト軸力(表-7で平均値が低い側の値)

$m$ ：ボルト本数(=2)

$A_c$ ：接合面積（樹脂有り：幅96mm×170mm-2 $A_h$ ，

樹脂無し：幅100mm×160mm-2 $A_h$ ）

$A_h$ ：ボルト孔面積（孔径 $\phi$ 24.5mm）

樹脂有りの場合、せん断強度 $v_s$ はボルトによる支圧応力度 $\sigma_o$ の低下に応じて減少する傾向にあった。また、目標導入軸力別に見た場合、前述のひずみゲージの影響は多少あるものの、樹脂が厚いほど $v_s$ が小さい傾向が見られた。これらの結果から、接合面の樹脂厚が厚くなると、ボルト軸力の低下による $\sigma_o$ の減少がせん断強度 $v_s$ を低下させるだけでなく、樹脂の接着効果の低下によっても $v_s$ の低下をもたらすことがわかった。

図-20では、参考値として樹脂無しのデータ(供試体No.1, 2, 3)を樹脂有りの結果と同様に示した。図中の実線の傾きは、供試体No.2とNo.3のすべり係数の平均値を用いた。供試体No.1は、母材の降伏の影響により実線をやや下回る結果であった。樹脂有りの供試体No.4, 7, 10, 13についても、供試体No.1の結果を超えていたことから、母材の降伏の影響が現れていた可能性がある。

### (2) ボルト軸力に及ぼす樹脂のクリープの影響

図-8に示したとおりボルト軸力の経時変化において、樹脂厚が大きいほど、軸力低下の程度が著しい。樹脂によるボルト軸力変動の要因は、樹脂の硬化時の収縮、温度変化に伴う膨張・収縮、クリープによる収縮及びボルトのリラクゼーションが考えられる。ここでは、次に示す式(5)、式(6)に基づき、これらの影響の程度とクリープの影響の算定方法について検討する。式(5)は、接合面の樹脂のひずみとボルトの軸ひずみの関係を示すものである。

$$\epsilon_{bolt} = \epsilon_{resin} \times t_{resin} \times n / L_{bolt} \quad (5)$$

ここに、

$\epsilon_{bolt}$ ：樹脂の膨張・収縮に伴うボルトの軸ひずみ

$\epsilon_{resin}$ ：樹脂の膨張・収縮ひずみ

$t_{resin}$ ：樹脂厚

$n$ ：接合面数(=2)

$L_{bolt}$ ：ボルトの軸長(=板厚46mm+2× $t_{resin}$ +2× $t_w$ )

$t_w$ ：座金高さ(=6mm)

また、式(6)は、実測したボルト軸力の経時変化から、幾つかの仮定に基づき上記の影響因子を考慮して、樹脂のクリープによるボルト軸ひずみ減少量 $\epsilon_{cr}$ を算出するものである。

$$\epsilon_{cr}(t) = \epsilon_o - \epsilon(t) - \epsilon_{relax}(t) - \epsilon_{sh}(t) - \epsilon_T(t) \quad (6)$$

ここに、

$\epsilon_{cr}(t)$ ：樹脂のクリープに伴うボルトの軸ひずみ

$t$ ：ボルト締付け後から経過時間(時間)

$\epsilon_o$ ：初期導入軸力によるボルトの軸ひずみ

$\epsilon(t) = N(t) / (A_{bolt} \times E_o)$

$\epsilon(t)$ ：締付け後 $t$ 時間におけるボルトの軸ひずみ

$N(t)$ ：締付け後 $t$ 時間におけるボルト軸力

$A_{bolt}$ ：高力ボルト軸断面積(直径22mm)

$E_o$ ：高力ボルトの弾性係数(200GPa)

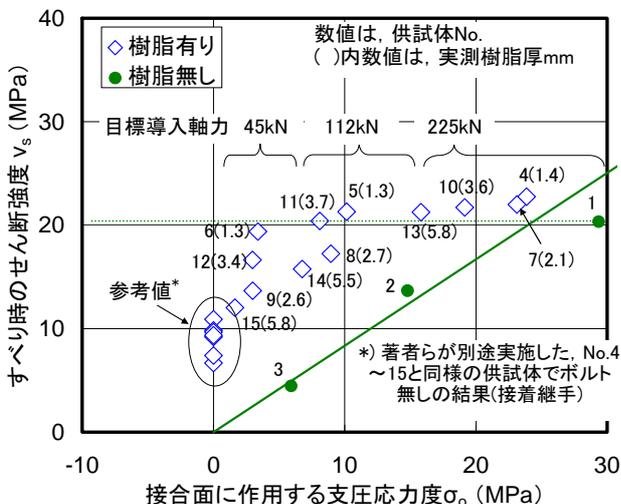


図-20 継手のせん断強度 $v_s$ とボルトの締付けによる支圧応力度 $\sigma_o$ の関係

$$\epsilon_{relax}(t) = N_i(t) / (A_{bolt} \times E_o)$$

$\epsilon_{relax}(t)$ : 樹脂無しの供試体における締付け後 t 時間におけるボルトの軸ひずみ  
 $N_i(t)$ : 樹脂無しの供試体における締付け後 t 時間におけるボルト軸力  
 $\epsilon_{sh}(t) = t \times (200/24) \times (n \times t_{resin}) / L_{bolt}$   
 $\epsilon_{sh}(t)$ : 樹脂硬化時の収縮によるボルトの軸ひずみ (t > 24 の場合, t = 24)  
 $\epsilon_T(t) = \Delta T(t) \times 32.2 \times (n \times t_{resin}) / L_{bolt}$   
 $\epsilon_T(t)$ : 樹脂の温度変化に伴うボルトの軸ひずみ  
 $\Delta T(t)$ : 締付け後 t 時間における温度変化量

式(6)中の主なパラメータの仮定を以下に示す。

a) 硬化時の収縮

本試験で用いた樹脂のメーカー技術資料<sup>15)</sup>によると、硬化時の収縮量は 24 時間で約 600 μ, 48 時間で約 800 μ であり、48 時間で概ね収束する傾向にある。試算では、これらの値を用いて、ボルト締付け時(樹脂塗布後 24 時間後)から 24 時間以内において 200 μ の収縮が直線的に発生すると考える。樹脂の 200 μ の収縮は、樹脂厚を 5.8mm とした場合、ボルト軸ひずみで約 50 μ, 軸力 3.8kN に相当する。

b) 温度変化の影響

室内の温度変化に伴う樹脂の膨張・収縮は、図-8の結果を見ても影響は軽微であることがわかるが、ボルト締付け時の温度に対する相対変化として、表-3に示した熱膨張係数を用いて計算する。

図-21 に、樹脂のクリープ量に関する測定結果(式(6))により算定した樹脂のクリープによるボルト軸ひずみ減少量  $\epsilon_{cr}(t)$  の例を示す。クリープの検討に用いた軸力の経時変化のデータは、各供試体とも最後に締付けた 1 本のボルト(BL-4)の結果を用いた。比較のため、同図には、各影響を分離する前の軸ひずみ減少量( $\epsilon_o - \epsilon(t)$ )を合わせて示した。本試験の範囲では、硬化時の収縮及び温度変化の影響、ボルトのリラクセーションの影響は、いずれもクリープの影響に比べると軽微であった。供試体 No.7 の例では、これらの要因すべてを含めた軸ひずみ減少量におけるクリープの影響の割合は 92 % (経過 24 時間後)であった。これらの影響を除いた  $\epsilon_{cr}(t)$  は、時間とともに一定値に収束する傾向がより明確に現れた。各供試体の測定結果によれば、樹脂のクリープによるボルト軸力の低下は締付け後 1~2 日程度で収束していた。

式(6)のうち t=24~168 時間のデータの平均値を、樹脂の最終クリープひずみによるボルトの軸ひずみ  $\epsilon_{cr}^*$  として算定した。図-22 に、目標導入軸力別に  $\epsilon_{cr}^*$  と実測樹脂厚の関係を示す。目標導入軸力が 225kN の場合、樹脂厚が  $\epsilon_{cr}^*$  に及ぼす影響が明確に認められる。しかし、目標導入軸力が 45kN 及び 112kN の場合は、樹脂厚の影響は顕著でないことがわかる。

次に、 $\epsilon_{cr}(t)$  をクリープのモデルの一つである式(7)<sup>16)</sup>に当てはめ、パラメータ  $\tau$  を算定する。

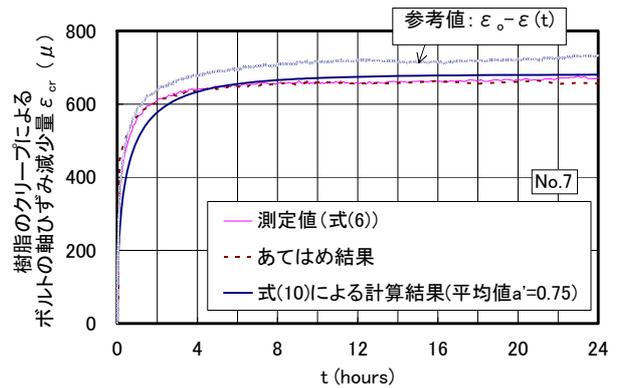


図-21 樹脂のクリープによるボルト軸ひずみの計算例(供試体No.7)

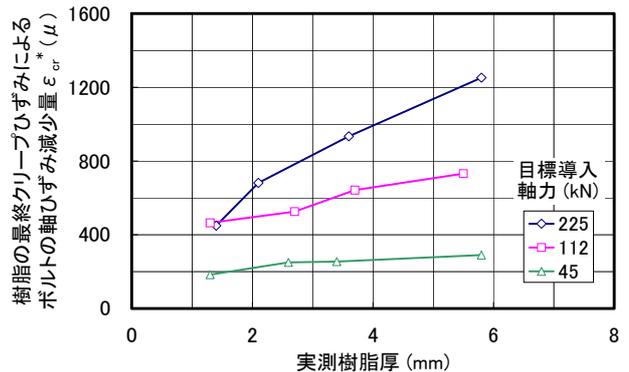


図-22  $\epsilon_{cr}^*$  と実測樹脂厚の関係

表-8  $\epsilon_{cr}^*$  の算定結果及びあてはめ結果

供試体 No.	実測樹脂厚 (mm)	目標導入軸力 (kN)	$\epsilon_{cr}^*$ (μ)	a	b	a'
4	1.4	225	449	0.58	0.51	0.58
5	1.3	112	464	0.63	0.66	0.65
6	1.3	45	183	0.86	0.63	0.80
7	2.1	225	681	0.60	0.69	0.71
8	2.7	112	525	0.63	0.66	0.65
9	2.6	45	250	0.78	0.65	0.78
10	3.6	225	934	0.72	0.66	0.75
11	3.7	112	642	0.79	0.60	0.79
12	3.4	45	254	0.68	0.50	0.78
13	5.8	225	1252	0.62	0.67	0.64
14	5.5	112	732	0.76	0.63	0.75
15	5.8	45	290	1.14	0.56	1.15
平均値				0.73	0.62	0.75

$$\epsilon_{cr}(t) = \epsilon_{cr}^* (1 - e^{-t/\tau}) \quad (7)$$

ここに、

$\epsilon_{cr}^*$ : 樹脂の最終クリープひずみによるボルト軸ひずみ減少量 (t=24~168 時間のデータ  $\epsilon_{cr}(t)$  の平均値)

ただし、本試験の結果では、 $\tau$  は一定値とならないことから、次に示す式(8)または単純化した式(9)のとおり表わすこととした。

$$\tau = a \cdot t^b \quad (8)$$

$$\tau = a' \cdot t^{0.5} \quad (9)$$

ここに、a, b, a': 定数

図-21 にあてはめ結果の一例を示す。あてはめ結果は式

(6)とよく一致することが確認できる。

表-8 に各供試体の  $\varepsilon_{\alpha}$  の測定結果に対する式(7)のあてはめ結果を示す。これらのあてはめ結果から、供試体 No.4~15 の定数 a, b, a' の平均は、それぞれ 0.73, 0.62, 0.75 であった(各供試体の相関係数は式(8), (9)ともに 0.90 以上)。式(7)と単純化した式(9), 及び a' の平均値(表-8) から次式(10)が得られる。

$$\varepsilon_{\alpha}(t) = \varepsilon_{\alpha}^* (1 - \exp(-t^{0.5}/0.75)) \quad (10)$$

図-21 に、式(10)による計算結果を示す。式(10)は、 $\varepsilon_{\alpha}(t)$  の傾向を必ずしも厳密に表すものではなかったが、締付け後 6 時間以内の急激な変化の傾向を概ねよく表していた。

## 7. まとめ

腐食により著しく断面欠損した鋼部材に対する当て板補強を行う場合に、ボルト孔周囲の凹凸の影響により、厚いエポキシ樹脂(パテ)が塗布されることを想定し、接合面に比較的厚いエポキシ樹脂を塗布した高力ボルト摩擦接合継手について、7 日間のボルト軸力測定と静的引張試験を実施した。樹脂有りの供試体は、母材と当て板の両面(いずれも平滑面)にエポキシ樹脂を塗布して接着した後、24 時間放置してから高力ボルトで締付けを行った。従来の試験結果でも見られたように、接合面に樹脂が有る場合は、樹脂の無い高力ボルト摩擦接合継手に比べて、ボルト軸力が大きく低下するにもかかわらず、すべり耐力はむしろ樹脂無しの結果よりも高くなる傾向が改めて確認された。本検討によって得られた主な結果は次のとおりである。

- 1) ボルト軸力の導入軸力に対する低下の割合は、接合面の樹脂が厚く、導入した軸力が低いほど大きい傾向が見られた。また、ボルト軸力の変化は、温度変化の影響を除くとボルト締付け後 1~2 日程度でほとんど見られなくなった。
- 2) 各供試体のすべり時のせん断強度  $v_s$  (すべり荷重/2 面の接合面積)と引張試験時のボルト軸力による支圧応力度  $\sigma_o$  (2 本のボルト軸力/接合面積)の関係を整理した結果、接合面の樹脂厚が厚くなると、ボルト軸力の低下による  $\sigma_o$  の減少がせん断強度  $v_s$  を低下させるだけでなく、樹脂の接着効果も低下して、さらに  $v_s$  の低下をもたらすことがわかった。
- 3) 樹脂有りの供試体のボルト軸力の変動は、樹脂のクリープによる影響が大きいと考えられる。本試験でのボルト締付け時期や室内温度では、樹脂の硬化時の収縮、温度変化の影響及びボルトのリラクセーションの影響はクリープの影響に比べると軽微であった。
- 4) 樹脂のクリープに伴うボルト軸ひずみの経時変化を表す  $(1 - \exp(-t^{0.5}/0.75))$  は、本試験における樹脂厚、

目標導入締付け軸力に関係なく、測定結果とよく一致していた。また、樹脂の最終クリープひずみによるボルト軸ひずみの減少量  $\varepsilon_{\alpha}^*$  は、導入軸力が 225kN の場合に、樹脂厚の増加とともに大きくなる傾向が明確に見られた。しかし、導入軸力が 45kN 及び 112kN の場合は、樹脂厚が  $\varepsilon_{\alpha}^*$  に及ぼす影響は小さかった。

## 参考文献

- 1) 西川和廣, 村越潤, 上仙靖, 福地友博, 中島浩之: 橋梁の架替に関する調査結果(III), 土木研究所資料第 3512 号, 1997.10.
- 2) 村中昭典, 皆田理, 重吉勝: 腐食部材を用いた樹脂併用高力ボルト接合の静的強度, 土木学会第 46 回年次学術講演会, pp.594-595, 1991.9.
- 3) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 腐食部材の添接板補強に関する研究, 土木学会論文集 No.682/I-56, pp.207-224, 2001.7.
- 4) 茂手木博, 島辺政秀, 北野勇一: 鋼橋腐食部の断面補修工法, 川田工業技報 No.16, pp.105-107, 1997.1.
- 5) 大野崇, 名取暢, 稲田育朗: 腐食部材の健全度評価に関する研究, 横河ブリッジ技報 No.27, pp.82-94, 1998.1.
- 6) 古関俊之, 福田芳夫: 鋼橋の腐食部補修事例, 横河ブリッジ技報 No.25, pp.181-190, 1996.1.
- 7) 沓掛靖夫, 新田政司, 永見研二: 磐城舞子橋の桁端部取替工事, 宮地技報 No.21, pp.62-65, 2006.3.
- 8) 菱沼健一郎, 笹井知弘: 供用橋梁の下フランジ取り替えと補強, 技報まつお No.21, pp.65-77, 1991.4.
- 9) 藤原稔, 村越潤, 田中良樹: 高力ボルト摩擦接合継手に関する試験調査-接合面に無機ジンクリッチペイントを塗布した継手のすべり耐力等(その 2) -, 土木研究所資料第 2796 号, 1989.8.
- 10) Albrecht, P. and Sahli, A.H.: Static Strength of Bolted and Adhesively Bonded Joints for Steel Structures, Adhesively Bonded Joints -Testing, Analysis and Design-, ASTM STP981, pp.229-251, 1988.
- 11) 横山健司, 松本茂, 田畑晶子: トラス橋の腐食による継手部の補修方法と確認実験, 阪神高速道路公団技報第 16 号, pp.118-128, 1998.
- 12) (社)土木学会: 鋼構造シリーズ 15 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案), 2006.12.
- 13) 西田正孝: 応力集中, 森北出版, 1967.9.
- 14) 有原隆雄, 田中一實: 接着剤の構造物への適用に関する実験的研究, 横河橋梁技報 No.10, pp.33-40, 1980.11.
- 15) ショーボント技術資料 R-TKE060712, 硬化収縮率測定
- 16) 複合材料ハンドブック, 日本複合材料学会, 1989.11.

(2007 年 9 月 18 日受付)