ISSN 0386－5878
土木研究所資料第4091号

土 木 研 究 所 資 料

接合面にエポキシ樹脂を塗布したボルト継手に関する検討

平成20年3月

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

Copyright © (2008) 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 Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事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、独立行政法人土木研究所理事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。

土木研究所資料
第4091号2008年3月

接合面にエポキシ樹脂を塗布したボルト継手に関する検討

構造物研究グループ橋梁チーム　上席研究員　村越　潤
同　主任研究員　田中　良樹
同　交流研究員　船木　孝仁*

要　旨

腐食した鋼部材に対して，高力ボルトによる当て板補強を施す場合，すべり耐力の確保や防食のため，接合面にエポキシ樹脂を充填することがある。しかし，著しく断面欠損した鋼部材にボルト孔を開けた場合，孔周囲では局部的に樹脂が厚くなることが想定され，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。このことから，ボルト継手の接合面に比較的厚いエポキシ樹脂を塗布した供試体を用意して，ボルト軸力の経時変化の測定及び静的載荷試験を行い，樹脂厚がボルト軸力やすべり耐力に及ぼす影響について検討を行った。

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，引張試験，クリープ

＊　交流研究員在職期間（平成18年4月から平成20年3月）

目　　次

1. まえがき 1
2. 鋼橋桁端部における腐食損傷と補修・補強 3
　2.1 腐食環境と腐食事例 3
　2.2 桁端部における補修・補強事例 6
3. 既往の研究 8
　3.1 鋼部材の接着継手の特性 8
　3.2 接合面に塗布した樹脂がボルト継手に及ぼす影響 10
4. 試験方法 13
　4.1 試験計画 13
　4.2 供試体 15
　4.3 ボルト軸力の管理と経時変化測定 23
　4.4 静的引張試験 27
5. ボルト軸力の導入と経時変化の測定結果 29
　5.1 初期導入軸力 29
　5.2 ボルト軸力の経時変化 31
　5.3 ボルト締付けに伴う当て板のひずみ 40
6. 静的引張試験結果 44
　6.1 すべりの発生状況 44
　6.2 樹脂の破壊状況 52
　6.3 すべり荷重 73
　6.4 荷重－母材間の変位 75
　6.5 載荷中の母材及び当て板のひずみ 77
　6.6 載荷中のボルト軸力 82
7. 考察 86
　7.1 すべり耐力に及ぼす樹脂厚の影響 86
　7.2 ボルト軸力に及ぼす樹脂のクリープの影響 88
8. まとめ 97
参考文献 98

1. まえがき

鋼部材の腐食は，鋼道路橋の主要な劣化現象の一つであり，主な架替え理由の 1 つに挙げられている[1.1)1.2)] (図-1.1)。鋼橋を長期に渡り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。

鋼道路橋の桁端部は，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，鋼部材が腐食しやすい環境にあることが知られている[1.3)]。このため，桁端部の断面欠損やウエブ等に孔が開く状況に至る事例も見られ，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。スパイクタイヤが禁止されて以降，凍結防止剤の使用が増加する傾向にあり[1.4)]，桁端部での著しい腐食事例の増加が懸念される。これらを踏まえて，橋梁チームでは，平成 18 年度から 3 箇年の計画で鋼橋桁端部の腐食対策について検討を行っている。本研究は，その一環として，鋼橋の腐食した鋼部材に対する補強法について検討を行ったものである。

腐食した鋼部材の補強方法の一つとして，高力ボルトを用いた当て板補強が挙げられる。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ある。しかし，断面欠損が著しい部材にボルト孔を開けた場合，その周囲では局部的に樹脂が厚くなることが想定され(図-1.2)，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。このことから，ボルト継手の接合面に塗布するエポキシ樹脂の厚さを主たるパラメータとした供試体を用意して，ボルト軸力の経時変化を測定するとともに，引張試験を行い，樹脂厚がボルト軸力やすべり耐力に及ぼす影響について検討を行った。

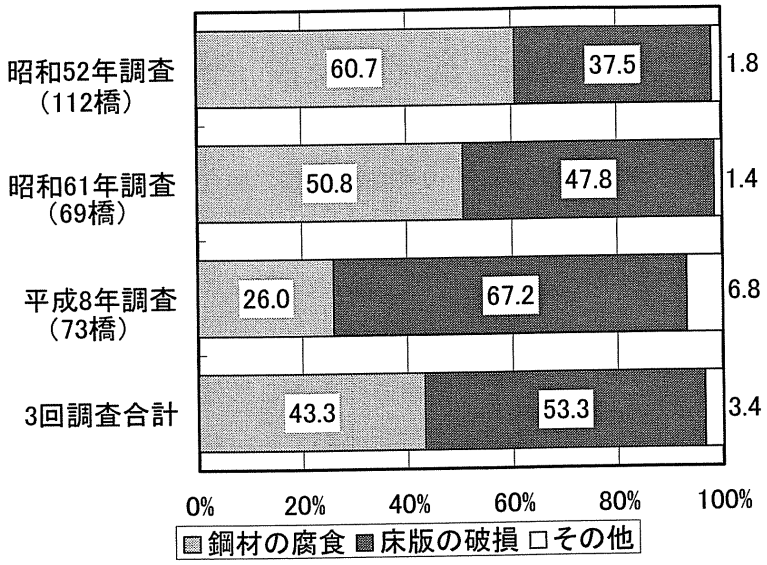


図-1.1　鋼道路橋の架替え理由に関する調査結果

(データは文献 1.2)による)

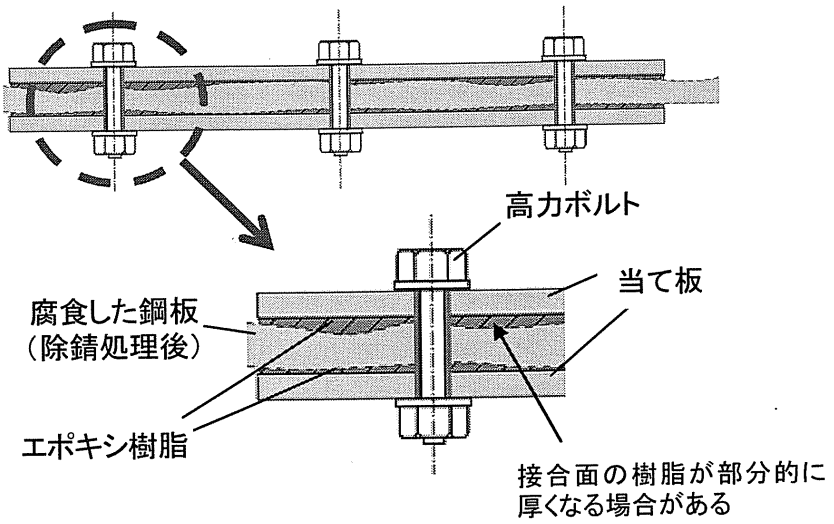


図-1.2　腐食鋼板の当て板補強（模式図）

2. 鋼橋桁端部における腐食損傷と補修・補強

2.1 腐食環境と腐食事例

鋼道路橋の桁端部は，鋼桁や橋台，支承との構造上の取り合いにより狭隘な空間となることが多く(図-2.1～3)，通気性が悪く，湿気がこもりやすい傾向にある。また，排水設備や伸縮装置の具合によっては，伸縮装置からの漏水や，土砂の堆積が生じやすい環境にある(図-2.4)。さらに，海岸部における海塩粒子の飛来や，冬季における凍結防止剤の散布により塩化物が付着する場合もある。特に排水型の伸縮装置を用いている場合，雨水や雪解け水に溶解した路面上の塩化物が，伸縮装置から流れ落ち，桁端部に供給される。このようなことから，鋼道路橋の桁端部は厳しい腐食環境にある。

図-2.5 に，伸縮装置からの漏水や土砂の堆積により桁端部が腐食した事例を示す。図-2.5(a)及び(b)では，橋台部及び橋脚部の鋼桁端部に漏水によると考えられる腐食が見られた。図-2.5(c)及び(d)では，ウエブに腐食による断面欠損が見られた。図-2.5(e)では，下フランジ上面に土砂が堆積した状態で，ウエブの土砂との界面に腐食が見られた。そのウエブの裏面(図-2.5(f))でも，下フランジとの境において局部的に腐食が見られた。

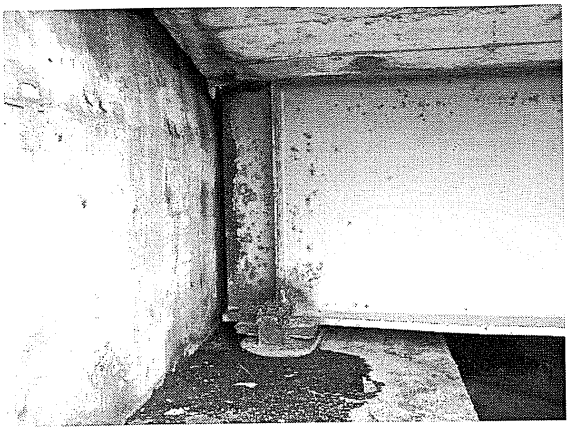


図-2.1　I 桁橋桁端部(外桁側面)

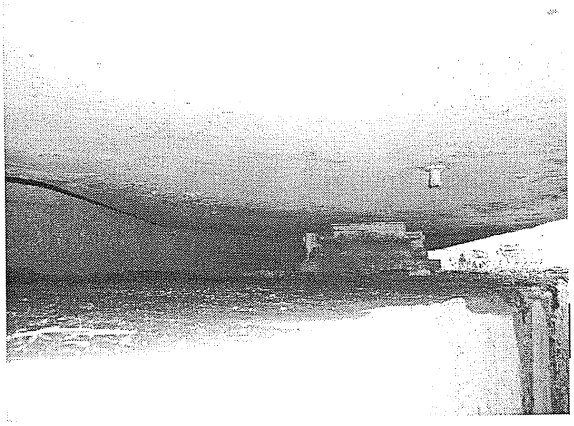
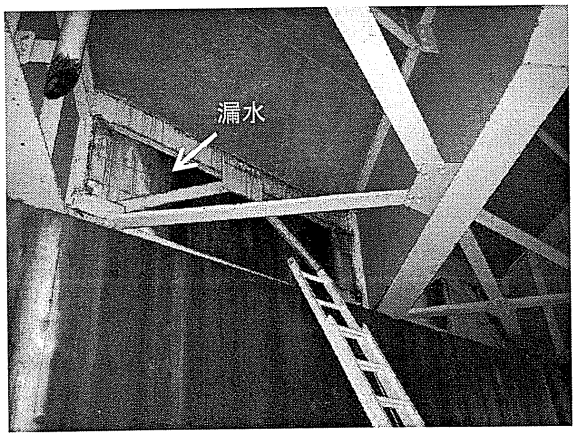


図-2.2　箱桁橋桁端部(下面)

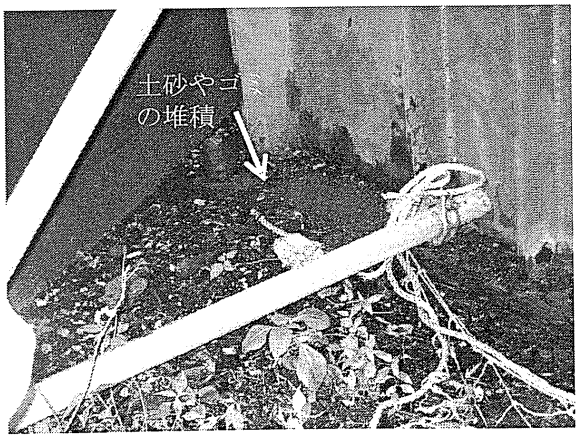


(a) 桁端部の状況

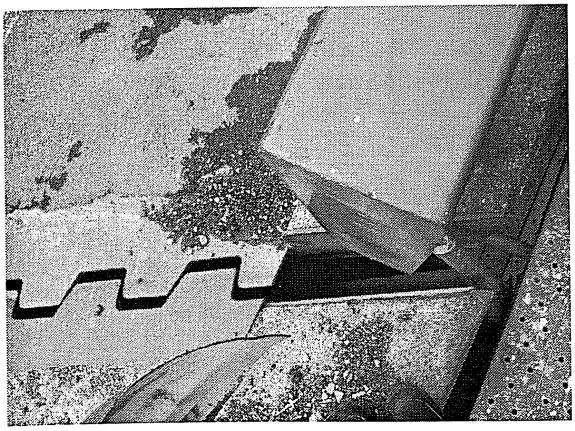


(b) 伸縮装置の状況(左図と同じ橋梁)

図-2.3　伸縮装置からの漏水

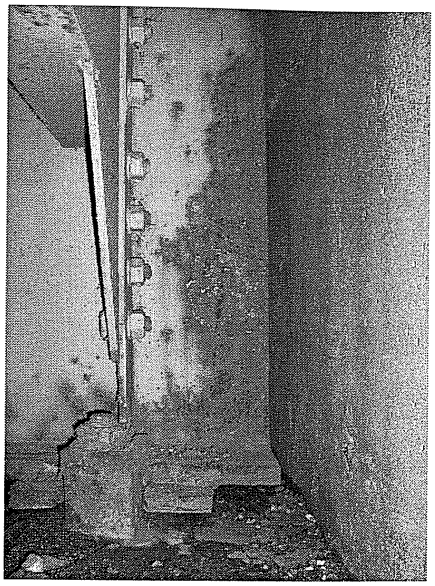


(a) 桁端部の状況

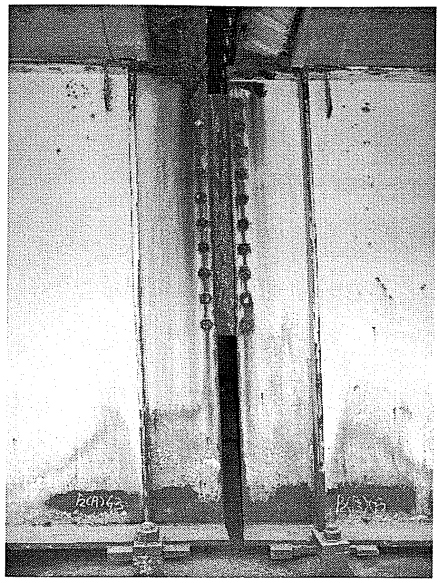


(b) 伸縮装置の状況(左図と同じ橋梁)

図-2.4　土砂やゴミの堆積



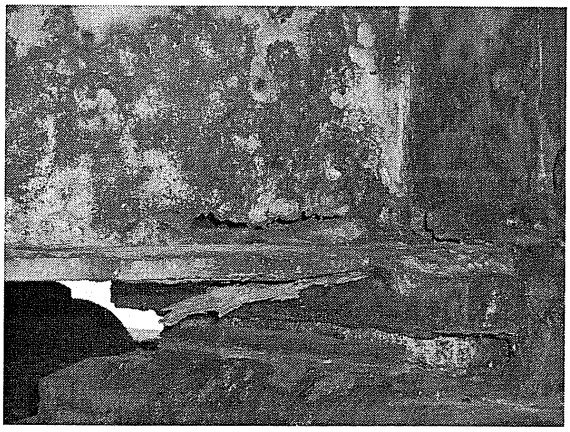
(a) 橋台部の伸縮装置からの漏水による腐食



(b) 橋脚部の伸縮装置からの漏水による腐食



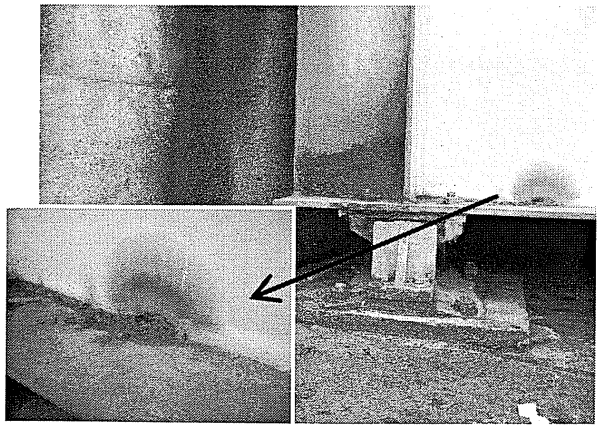
(c) 桁端部ウエブの局部腐食



(d) 桁端部ウエブの局部腐食



(e) 土砂堆積による腐食



(f) 左図(e)の裏面

図-2.5　鋼道路橋の桁端部における腐食事例

2.2 桁端部における補修・補強事例

腐食した部材の補修・補強対策は，腐食状況が軽微な場合，それ以上の腐食進行を抑制するために再塗装が実施されるが，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・剛性に回復する補強が行われる。

一般に断面欠損部の補強方法としては，部分的な部材交換[2.1), 2.2), 2.3)]，あるいは高力ボルトを用いた当て板による断面補強[2.1), 2.4)]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。部材交換では，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[2.1), 2.2)]。図-2.6 に，部分的な部材交換の事例を示す。

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，部材交換に比べて容易である[2.1),2.4)]。腐食した鋼板はケレンにより錆層を除去するが，鋼材表面は凹凸が残るので，エポキシ樹脂系接着剤(パテ)を塗布した後に鋼板を当てる事例が見られる[2.4)]。図-2.7，図-2.8 に，ボルトによる当て板補強を行った例を示す。図-2.7 は，疲労亀裂の補修のために当て板補強された例であるが，周囲が腐食していたため，腐食に対する処理も必要であった。図-2.8 の例では，腐食が著しかったため，施工後早期に接合面付近に錆が見られた(図-2.8(b))。

その他の補強事例として，図-2.9 に，腐食により貫通孔が生じたウエブに対して溶接により当て板補強を行った例を示す。溶接による当て板補強は，ボルト接合の場合に比べて補強範囲が小さく，コンパクトで静的荷重に対してある程度の補強効果があると考えられるが[2.3)]，現場溶接は鋼材の性能を低下させる可能性があるとともに，品質確保が難しく，疲労耐久性を著しく損ねることが懸念されることから，原則避けるべきである。

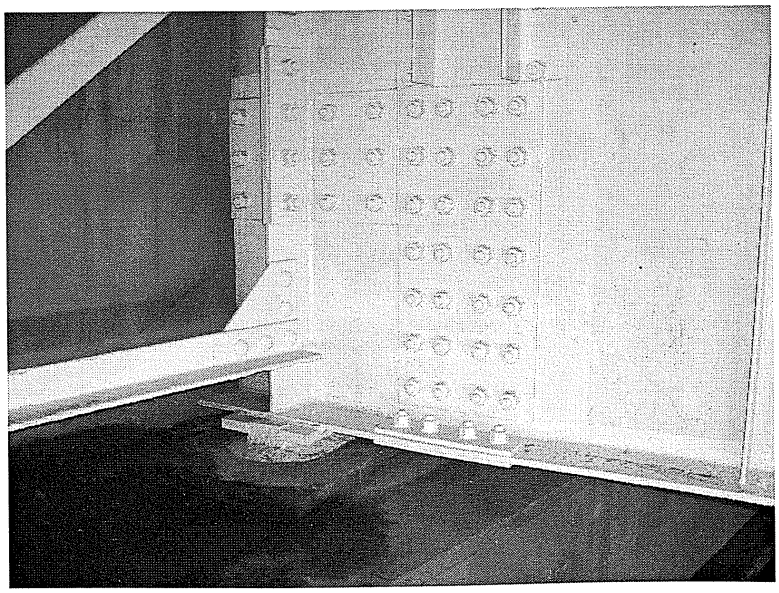


図-2.6　部分的な部材交換の事例

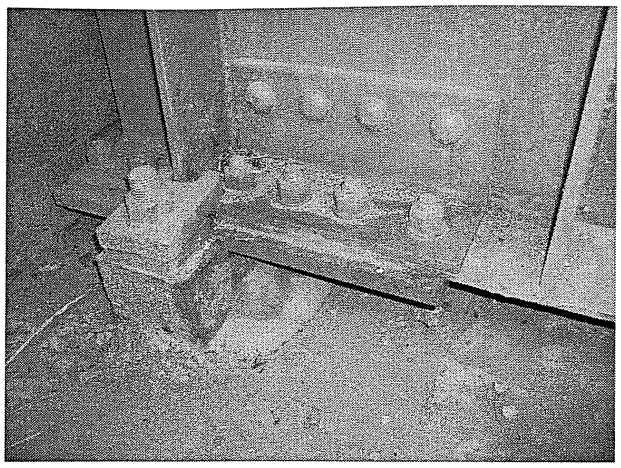
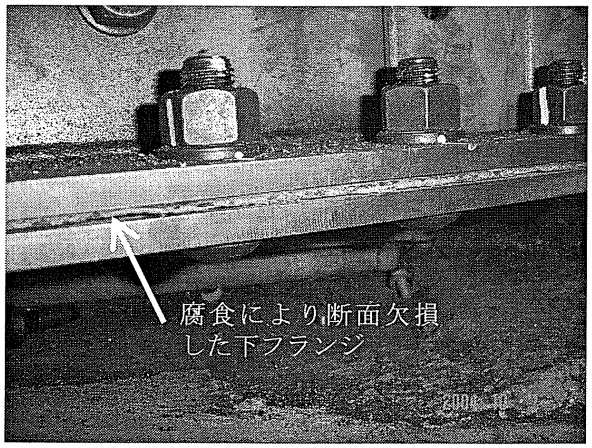
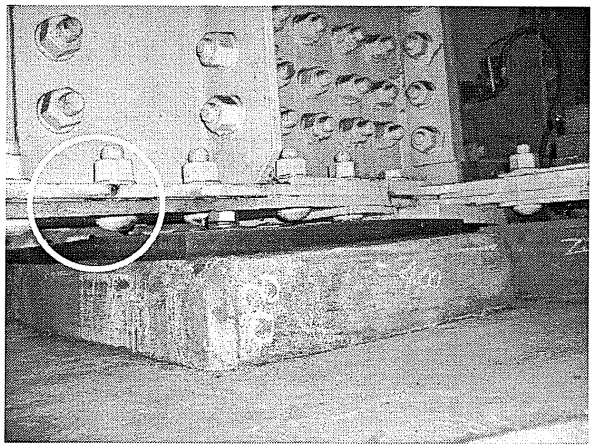


図-2.7　ボルトによる当て板補強の事例(その１)
(接合面における樹脂の有無は不明)

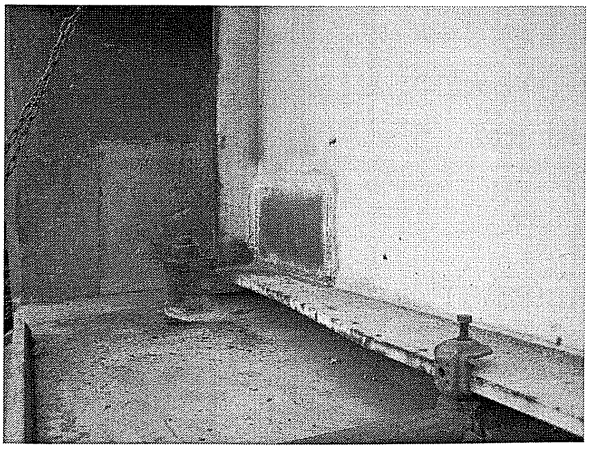


(a) 施工中

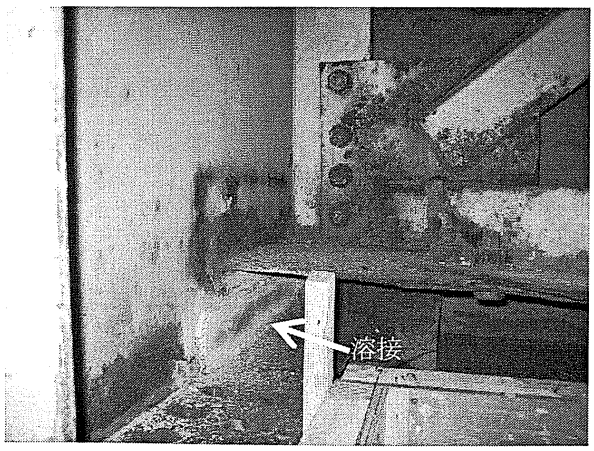


(b) 施工後

図-2.8　ボルトによる当て板補強の事例(その２)
(接合面における樹脂の有無は不明)



(a) 桁端部外側



(b) 桁端部内側

図-2.9　溶接による当て板補強の事例
(現場溶接は品質確保が難しいことから原則避けるべきである)

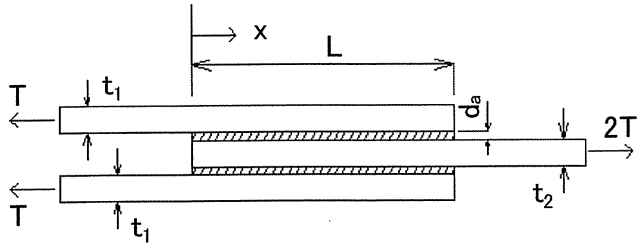
3. 既往の研究

3.1 鋼部材の接着継手の特性

(1) 接着継手の応力特性

せん断力を受ける接着継手における接着剤の応力分布については，Goland-Reissner[3.1)]や大沼[3.2)]による弾性理論に基づく算定方法により知ることができる。

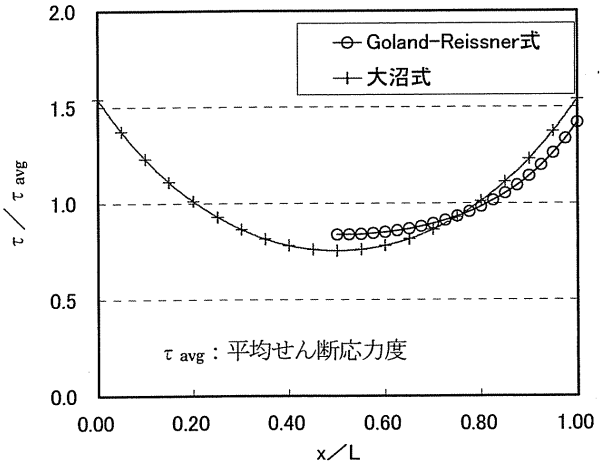
図-3.1.1 に，Goland-Reissner と大沼それぞれの計算式を用いて接着継手のせん断応力 τ を試算した例を示す。計算モデル及び計算条件は，図(a)に示すとおりである。ここでは 2 面せん断を想定して，荷重の偏心による曲げについては無視した。図(b)に示したせん断応力の分布を見ると，せん断応力は接合部長さの両端で集中することが分かる。また，両者の計算式による試算結果は，ほぼ一致していた。



〔計算条件〕
引張荷重 2T = 100 (kN)
板厚* $t_1 = t_2$ = 12 (mm)
接合部の長さ L=170 (mm)
板の弾性係数 $E=2.0\times10^5$ (MPa)
接着剤の厚さ d_a = 1.0 (mm)
接着剤のせん断弾性係数 G_a = 300 (MPa)
荷重の偏心による曲げを無視

*) Goland-Reissner式は，母材と当て板が同じ厚さでの適用となっている

(a) 計算モデルと計算条件



(b) せん断応力 τ の分布

図-3.1.1 Goland-Reissner の計算式[3.1)]と大沼の計算式[3.2)]による接着継手のせん断応力分布の比較

(2) 接着継手の破壊形態

接合面にせん断力を受ける接着継手には，接着剤の厚さ(樹脂厚)や接合長さなどの影響によって，4 種の破壊形態があると考えられている[3.3)]。その分類によれば，樹脂厚が薄い場合，接着剤と母材の界面で破壊する界面破壊を起こし，樹脂厚が厚い場合，接着剤内部で破壊する凝集破壊が起こる。また，樹脂厚が適切で接合長さが十分に長い場合，母材の破断(被着体破壊)が生じ，逆に接合長さが極端に短い場合，接着剤の単純せん断破壊(または単純引張破壊)が生じる。以上は簡単のため，樹脂厚と接合長さで整理されているが，樹脂のせん断弾性係数，温度特性などの物性や被着体の表面処理などによっても破壊形態が変化して，それ

ぞれの条件の下で4種のうちのいずれかクリティカルとなる破壊形態が先行して現れるものと考えられる。

(3) 接合面の寸法の影響

せん断力を受ける接着継手の破壊荷重は，接合面の長さ(接合長さ L)が長くなるほど大きくなるが，徐々に荷重の増分が小さくなる傾向にある[3.4]。この傾向は片面接合における場合だけでなく，両面接合の試験でも同様の傾向が見られた[3.5]。一方，破壊荷重と接合面の幅(接合幅 W)の関係は直線的であることが確認された[3.5]。

(4) 接合面の表面粗さの影響

接着継手のせん断強度は，ある程度までは接着する部材の表面が粗いほど増加するが，極端に粗く，凹凸のピッチが短い表面においては，凹み部分に接着剤が十分に充填されず，接着の性能が却って低下することがある[3.4]。凹みへの充填の観点から，そのせん断強度の増加の程度は，粘度などの樹脂の物性によっても異なる[3.4]。

(5) 樹脂厚の影響

接着継手のせん断強度は，樹脂厚が厚いほど低下する傾向がある[3.3), 3.6), 3.7)]。しかし，樹脂厚が極端に薄いと，樹脂の充填不足の影響などによって比較的低い荷重で界面破壊が生じる場合がある[3.6]。

(6) 水，温度の影響

数種類の樹脂系接着剤を用いて，−40℃から80℃前後までの温度条件下で引張せん断試験(JIS K 6850に準拠)を実施した結果，せん断強度の温度依存性が顕著に現れる接着剤が多く，接着剤によっては常温(20℃程度)でもせん断強度が著しく低下するものが見られた[3.5]。

高温多湿環境下(温度 50℃，湿度 95〜100%)において 12 ヶ月間の促進劣化試験を行った接着継手について，引張せん断試験(試験時温度は常温 20℃程度)を行った結果では，試験前に対して約 30%のせん断強度の低下が見られた[3.8]。また，屋外暴露試験を2年間行った継手では，試験前に対してエポキシ樹脂系接着剤のせん断強度は 15〜45%程度低下した[3.8]。

3.2　接合面に塗布した樹脂がボルト継手に及ぼす影響

(1) すべり耐力

Albrechtら[3.9]は，接合面に接着剤を塗布することによるボルト継手の性能向上の可能性を検討するため，小型供試体22体の引張載荷試験(樹脂あり11体，樹脂なし11体)及びはり供試体6体の曲げ試験を実施した。また，接着剤のせん断強さが限界に達した場合か，供試体の母材，あるいは当て板が降伏変形してそれに追随する接着剤のひずみが終局限界ひずみに達した場合に発生すると想定して，式(3.1)及び式(3.2)による計算値と試験結果を比較した。

$$P_{uv,a} = m \cdot A_c \cdot F_{uv,a} \qquad (3.1)$$

$$P_{yn} = A_n \cdot F_y \qquad (3.2)$$

ここに，

$P_{uv,a}$：接着剤の引張破壊荷重

m：接合面数

A_c：接合面1面のボルト孔を控除した面積

$F_{uv,a}$：接着剤のせん断強さ

P_{yn}：純断面降伏荷重

A_n：純断面積

F_y：板の降伏点

その結果，以下の結果が得られた。

1) 樹脂ありの引張載荷試験の結果は，式(3.1)とよく一致していた。
2) 樹脂ありの供試体の破壊は脆性的であった。すべった後は支圧接合に移行したが，支圧接合によってすべった時の荷重を超えることはなかった。
3) 接着継手としての耐力と支圧ボルト継手としての耐力は，それぞれの効果が現れる変位が異なるため，両者を足し合わせた耐力は期待できない。

(2) 接合面の処理の影響

有原らは，エポキシ樹脂を塗布する母材と当て板(ともに平滑材)の表面をディスクサンダー処理，またはブラスト処理したボルト継手について引張せん断試験を行った[3.5]。樹脂の破壊荷重は，接合面をブラスト処理した継手の方がディスクサンダー処理した継手よりも高かった。また，ブラスト処理した継手の破壊荷重は，ボルトの導入軸力が225kNと45kNの場合でほとんど違いが見られなかった。ブラストによる接着効果が高かったために，軸力が大きく異なっていても顕著な差が生じなかったか，鋼板の降伏荷重が支配的になったものと推察される。母材に実腐食材を用いて，樹脂を塗布する母材と当て板の表面をグラインダ処理，またはブラスト処理したボルト継手(接合面にエポキシ樹脂を塗布)について引張せん断試験を行った結果においても，ブラスト処理した継手の破壊荷重は，グラインダ処理した場合よりも高かった[3.10]。

(3) 樹脂厚の影響

接合面に塗布した樹脂の影響によってボルト軸力が著しく低下しても(次項(4)で述べる)，その継手のすべり耐力は，樹脂の接着効果により，樹脂無しの高力ボルト摩擦接合継手に比べて高くなる傾向が見られた[3.10-12]。また，前述のとおり接合面をブラスト処理した場合は，ボルトの締付け軸力を低くした場合でも，高いすべり耐力が得られ，所定の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[3.5), 3.10)]。しかし，既往の研究では，断面欠損深さが限定的であり(表-3.2.1)，接合面に樹脂を塗布した高力ボルト継手に関して，樹脂厚に着目した実験例が無く，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。

(4) ボルト軸力の低下に及ぼす影響

表-3.2.1 に，既往の研究による接合面に接着剤を塗布した高力ボルト継手の試験データを示す[3.5), 3.9-12)]。接合面にエポキシ樹脂を塗布した高力ボルト継手は，樹脂の無い場合に比べて，ボルト軸力の低下が大きくなる[3.10-12)]。その原因については，いずれの文献においても樹脂のクリープの影響であると考えられている[3.10-12)](考察で述べるように，樹脂塗布後の樹脂自体の硬化時における収縮の影響もある)。

文献 3.10)及び 3.11)の継手の引張強度では，継手の母材に最大断面欠損深さ 2.3～2.6mm 程度の実腐食材が使用された。ボルトの締付けは，母材と当て板を接着した直後に行われた。この場合，ボルト軸力は，締付けから 7 日後に 10%程度低下していた。文献 3.12)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が行われた。この場合，ボルト軸力は締付けから 5 日後に 12～25%程度低下していた。樹脂の厚さが軸力低下に及ぼす影響については，母材の断面欠損深さや当て板接着からボルト締付けまでの時間が異なっていたため，統一的な比較はできない。

なお，接合面をブラストのまま(黒皮除去)とした継手におけるボルトの軸力は，締付け後から 7～10 日で 3～5 %程度の低下が見られる[3.13-15)]。また，接合面に塗装(無機ジンクリッチペイント)を施した継手の場合，塗膜のクリープの影響により，塗装無しの継手に比べてボルト軸力の低下が大きく，接合面における塗膜が厚いほど軸力の低下が大きくなる傾向にある(1 接合面の合計塗膜厚が 60～500 μ の範囲での結果)[3.14-17)]。

表-3.2.1　高力ボルト接合の接合面に樹脂を塗布した供試体の試験データ [3.5), 3.9-12)]

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	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	軸力測定期間	すべり荷重(kN)	供試体数
3.5)	平滑材(SM50)	32	0	SM50	16	エポキシ	約0mm	F10T M22	225	—	—	—	—	966	1
									40	—	—	—	—	351～944	5
3.11)	実腐食材(鋼種不明)	9	2.3	鋼種不明	9	エポキシ	不明	S10T M20	180	—	10%以下	部材接着直後	7日程度	560～620	10
3.10)	実腐食材(SMA50W)	10	2.6	SM490	9	エポキシ	不明	F10T M22	221	—	4～6%	部材接着直後	3日間	269～278*	10
3.12)	平滑材(鋼種不明)	22	0	鋼種不明	14	エポキシ	約0mm	S10T M22	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
									238	211	11.4%			578	1
									234	220	5.7%			487	1
	腐食摸擬(鋼種不明)	22	5	鋼種不明	14	エポキシ	ボルト孔周り約3mm	S10T M22	219	168	23.0%			581	1
									233	175	24.9%			488	1
									224	197	12.1%			373	1
3.9)	平滑材(A588)**	16	0	平滑材(A588)**	8	アクリル	約0mm	A325**	—	—	—	—	—	399～425	7

注1)：供試体は，2面のボルト継手

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

注3)：表中(**)は，ASTM規格

4. 試験方法

4.1 試験計画

図-4.1.1 に，試験の主なフローを示す。

表-4.1.1 に，供試体 15 体のパラメータと測定項目一覧を示す。供試体の接合面におけるエポキシ樹脂(以下，樹脂という)の厚さ(目標値)は 0mm(樹脂無し)，1，2，3，5mm とした。ボルトの導入軸力は，使用したボルト(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 No.7～9(目標樹脂厚 2mm)及び No.13～15(同 5mm)については，母材及び当て板のひずみを測定することとした。

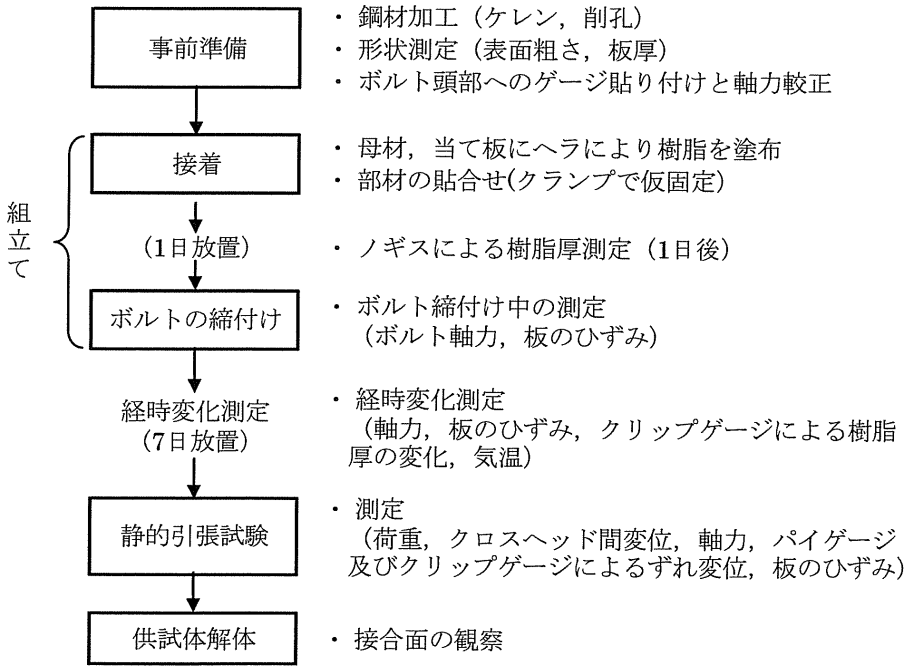


図-4.1.1　試験のフロー

表-4.1.1　供試体のパラメータと測定項目一覧

供試体			測定項目									
			ボルト軸力導入時			経時変化測定時			静的引張試験			
No.	目標樹脂厚(mm)	目標導入軸力(kN)	ボルト軸力	ノギスによる樹脂変位	母材及び当て板のひずみ	ボルト軸力	母材及び当て板のひずみ	クリップゲージによる樹脂厚の変化	荷重及びクロスヘッド間変位	ボルト軸力	パイゲージ及びクリップゲージによるずれ変位	母材及び当て板の軸方向ひずみ
1	0 樹脂無し	225	○			○			○	○	○	
2		112	○			○			○	○	○	
3		45	○			○			○	○	○	
4	1	225	○	○		○		○	○	○	○	
5		112	○	○		○		○	○	○	○	
6		45	○	○		○		○	○	○	○	
7	2	225	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8		112	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9		45	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10	3	225	○	○		○		○	○	○	○	
11		112	○	○		○		○	○	○	○	
12		45	○	○		○		○	○	○	○	
13	5	225	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
14		112	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
15		45	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注1) ボルトの目標導入軸力は，使用ボルト(F10T,M22)の設計軸力205kNの1割増し(225kN)を100%とし，
225kN(100%導入)，112kN(50%導入)，45kN(20%導入)を目標値とした

注2) ひずみゲージは，すべてFLA-5-11(ゲージ長5mm，ベース長さ10mm×幅3mm)を使用

4.2 供試体

(1) 形状寸法及び材料

図-4.2.1 に，供試体の形状寸法と，ひずみ及び樹脂厚の測定位置を示す。また表-4.2.1 に，使用した鋼材の引張試験結果(母材，当て板ともに 3 体実施)を示す。母材と当て板は，ともに SM490A であり，いずれも腐食していない平滑材である。母材が断面欠損を伴う腐食材の場合，接合面では腐食材表面の凹み部分において樹脂が局部的に厚くなるが，本試験では樹脂厚の影響を単純化して把握するため，母材，当て板ともに平滑材を用い，樹脂の厚さは継手の接合面全体において一様とした。母材と当て板には，ボルト孔(ϕ 24.5)を削孔した後，接合面にグリットブラスト処理を施した(図-4.2.2)。任意で選んだ母材と当て板の各 1 片について，表面粗さを測定した結果，最大高さ粗さ R_z は，いずれも 50 μ m 程度であった(表-4.2.2)。

表-4.2.3 に，エポキシ樹脂の仕様を示す。樹脂は，市販の 2 液混合型エポキシ樹脂系接着剤(S 社製，#101)であり，コンクリートや金属との接着に用いられ，パテ状であることからパテやシール材としても用いられているものである。

当て板の接合面に貼付けたひずみゲージは，板の接着に極力影響が無いよう，ビニル被覆の無いリード部分が長いものを使用した(図-4.2.3)。このリード線は，組立て時に切断されないよう，瞬間接着剤により当て板の接合面に這わせて接着した。

(2) 組立て

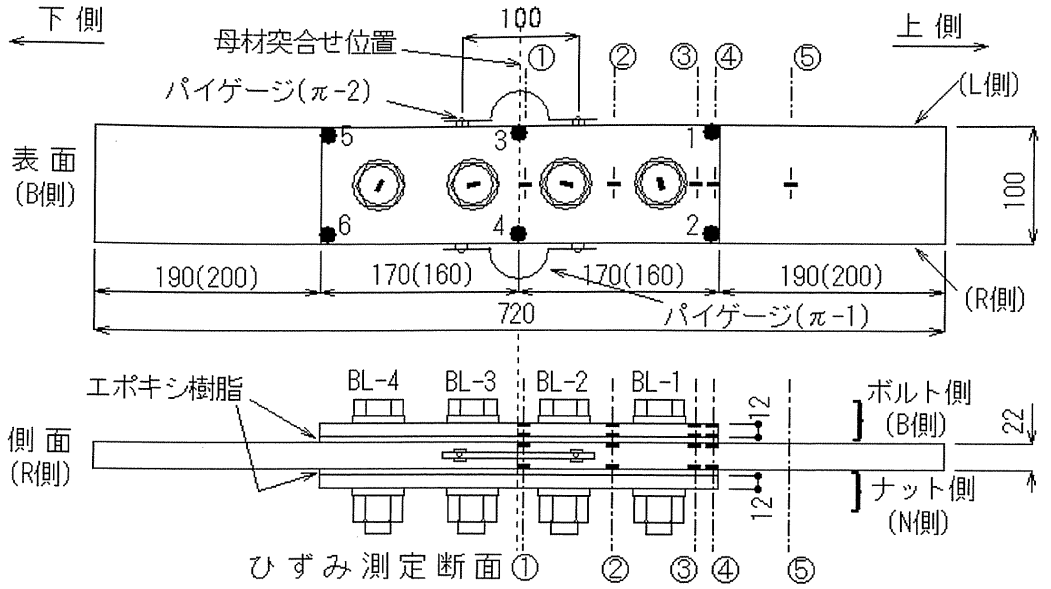
図-4.2.4 に供試体の組立て状況を示す。供試体の組立てでは，樹脂を母材と当て板の両接合面に塗布した後，貼り合わせた。その際，母材と当て板の間に，板幅 100mm のうち両側の幅端から 2mm の範囲に目標樹脂厚相当のアルミ板を挟むことにより，所要の樹脂厚を確保することとした。アルミ板は，樹脂硬化後の取り外しを考慮し，ビニルシートで保護した上で，クランプにより母材の側面に定着させた(図-4.2.4(a))。樹脂は，塗布量をアルミ板の挟み代 2mm を除いた接合面積と目標樹脂厚から算定し，接合面にヘラを使って塗布した(図-4.2.4(b))。樹脂を塗布する直前の接合面はブラストされたままの状態(塵埃を取り払う程度)とし，アセトン等による脱脂はしなかった。母材と当て板を貼り合わせ，接合部をクランプで挟み，供試体の側面及びボルト孔から樹脂が漏れ出る程度に加圧し(図-4.2.4(d))，漏れ出た樹脂は取り除いた。母材の突合せ部のすき間にも若干樹脂が入り込んだ。母材と当て板のずれを矯正するとともに，孔内に漏れ出た樹脂を除去するため，ビニルテープを巻いたボルト(M22，試験に用いない予備のもの)を孔に差し込んだ(図-4.2.4(e))。図-4.2.4(f)に，母材と当て板の間に挟み込んだアルミ板の状態を示す。

室温 5～25℃の中で 1 日養生後，アルミ板を取り外して設定した締付け順(図-4.2.1 中のボルト記号 BL-2→3→1→4 の順)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。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，室温下では，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。

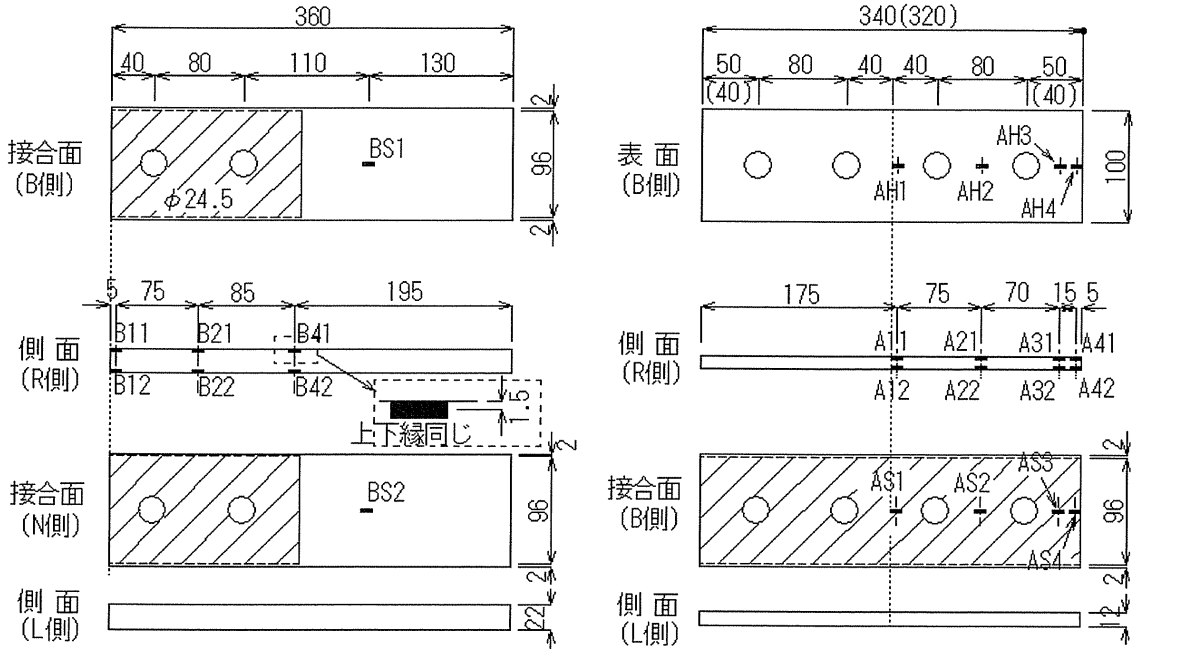
(3) ノギスによる樹脂厚の測定

表-4.2.4 に，樹脂有りの供試体 No.4～15 の接合面 2 面(B 側，N 側)における樹脂厚の測定結果を示す。接合面 1 面当たり樹脂厚は，ボルト締付け前後に図-4.2.1 に示した●(1～6)の位置においてノギスにより測定した。管理する樹脂厚は，接合面ごとに測定した母材及び当て板を含む接合部の全厚から，ノギスにより測定した母材厚，当て板厚を差し引いたものとした。

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(表-4.2.4)。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，事前に板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。



(a) 表面と側面



(b) 母材　　(c) 当て板

単位：mm

凡例	BL-1～4：ボルト番号　　①～⑤：ひずみ測定の対象とした断面の番号
	●：ノギスによる樹脂厚の測定位置
	■：ひずみゲージ(ゲージ長 5mm，A：当て板，B：母材，H：表面，S：接合面)

注1) (　)内数値は，供試体 No.1～3(樹脂無し)の寸法。接合面積を同等とするため異なる。

注2) 斜線部は，樹脂の塗布範囲(塗布幅 96mm)

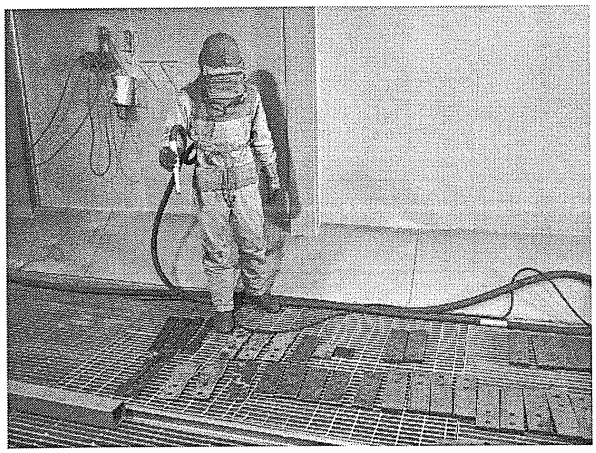
注3) 母材，当て板のひずみゲージは，供試体 No.7～9 及び No.13～15 に設置

図-4.2.1　供試体の形状寸法とひずみ及び樹脂厚の測定位置

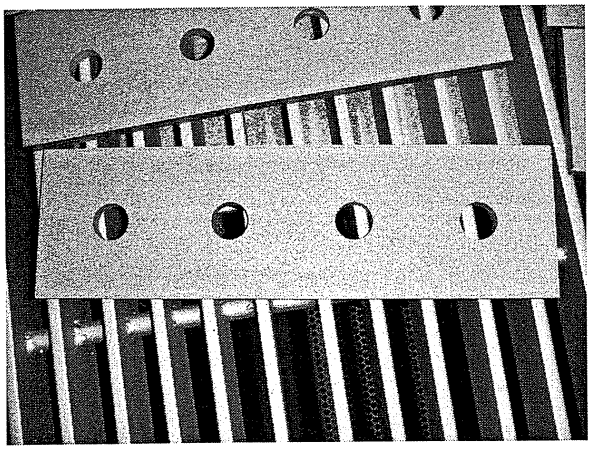
表-4.2.1　母材と当て板の材料試験結果

鋼材	板厚 (mm)	No.	降伏荷重 (kN)	降伏点＊ (MPa)	降伏時のひずみ（μ）	引張荷重 (kN)	引張強さ (MPa)	弾性係数 (GPa)
SM490A	22（母材）	1	303	343	1800	463	524	211
		2	309	351	1755	462	524	211
		3	307	349	1833	462	524	211
		平均値	306	348	1796	462	524	211
	12（当て板）	1	176	370	1889	265	556	216
		2	177	373	2079	262	550	215
		3	176	370	1849	264	554	213
		平均値	176	371	1939	263	553	215

＊）上降伏点



(a) グリットブラスト処理

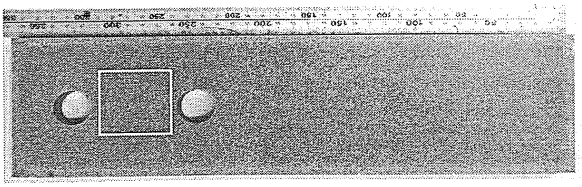


(b) ブラスト後の試験片

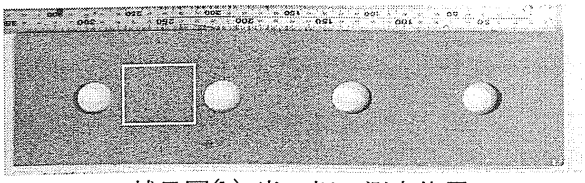
図-4.2.2　供試体のブラスト状況

表-4.2.2　供試体接合面の表面粗さ測定結果

		(a) 母材	(b) 当て板
測定範囲（右の補足図の□囲み部分）		50mm×50mm	
測定ピッチ（ＸＹ方向）		200μm	
表面粗さ	Ra：平均表面粗さ	8.0	6.7
	Rz：最大高さ粗さ	51.4	52.2
	Rzjis：十点平均粗さ	39.7	39.4



補足図(a) 母材の測定位置

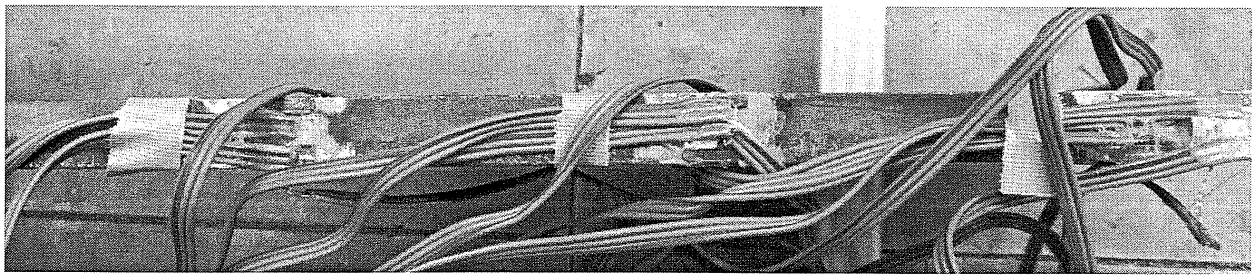


補足図(b) 当て板の測定位置

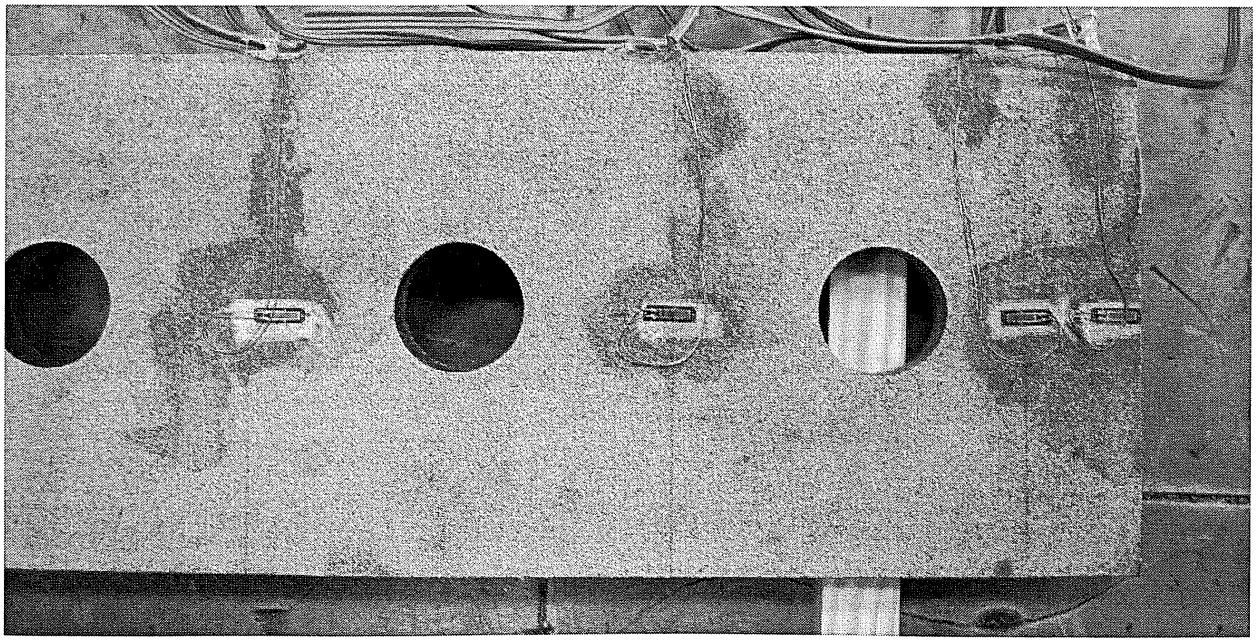
表-4.2.3　エポキシ樹脂の仕様

主　剤／硬化剤	エポキシ樹脂 ／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，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 引張せん断強さ：14.3MPa／12.7MPa
	圧縮降伏強さ：79.5MPa／36.8 MPa 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（1/℃）	3.22×10^{-5}（20℃～50℃）

注）数値は，メーカーのカタログ値，冬用を使用

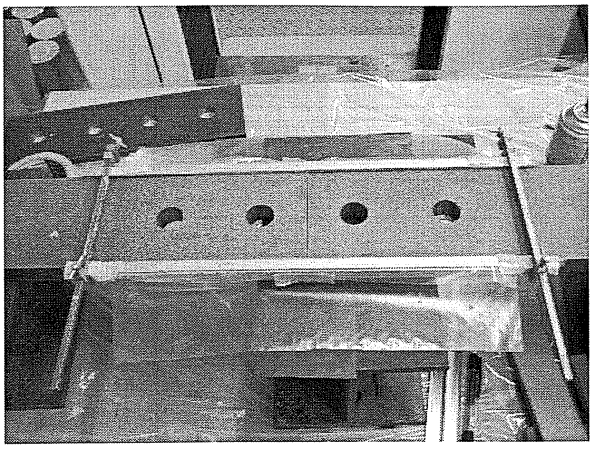


（a）側面(R 側)

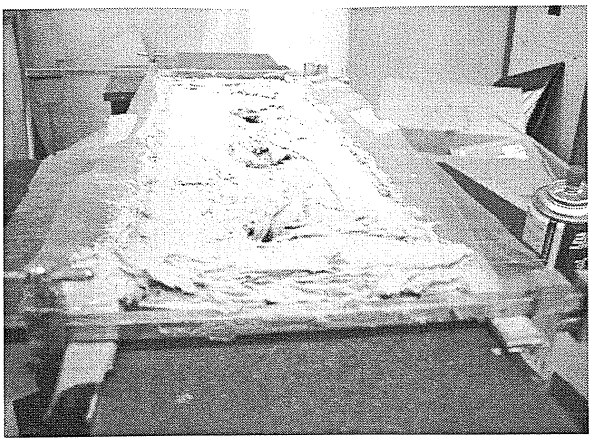


（b）接合面（B 側）

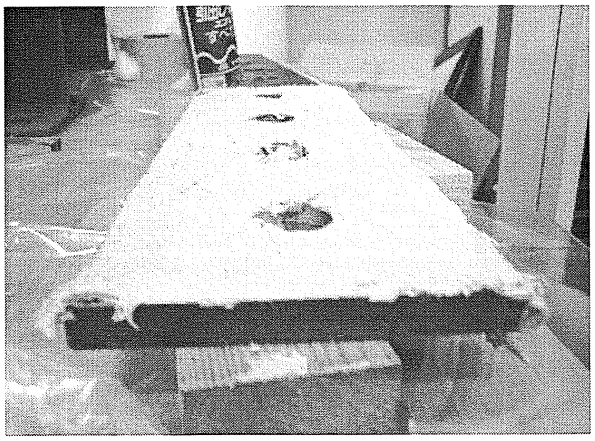
図-4.2.3　当て板のひずみゲージ貼付け状況



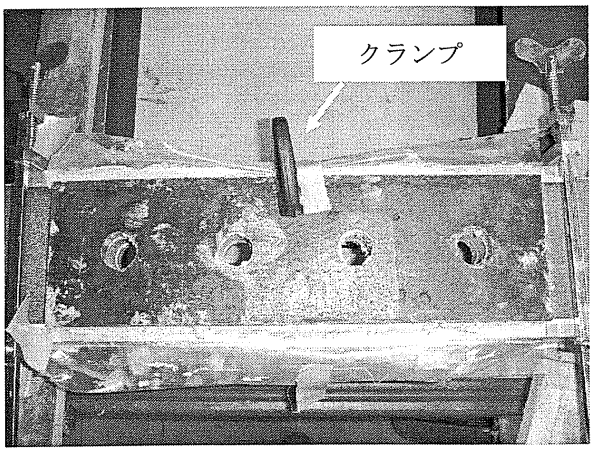
(a) アルミ板の固定



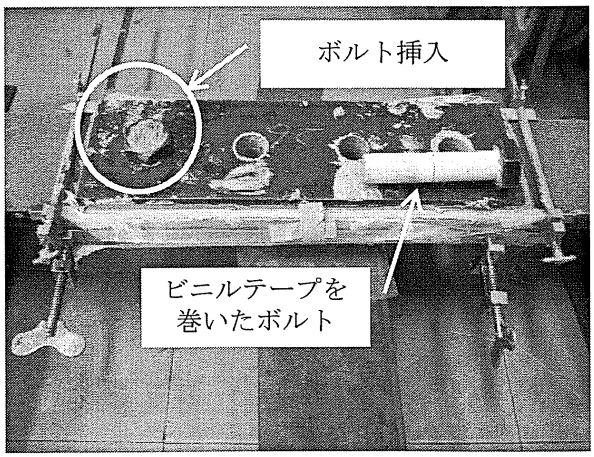
(b) 樹脂の塗布状況(母材)



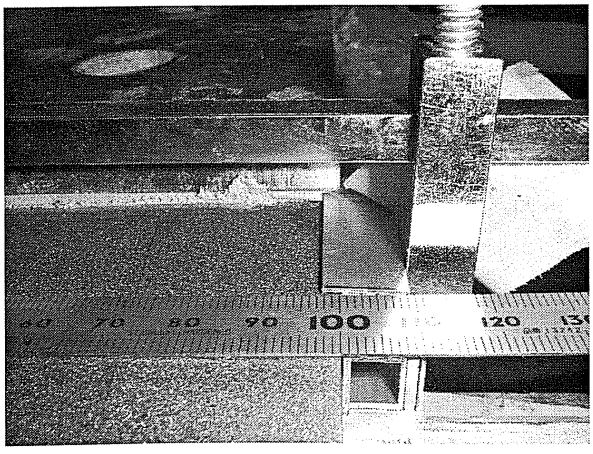
(c) 樹脂の塗布状況(当て板)



(d) 接着後のクランプによる加圧



(e) ボルト孔にはみ出た樹脂の除去とずれの修正



(f) アルミ板の挟み込み状況(樹脂厚 3mm の例)

図-4.2.4　供試体の組立て状況

表-4.2.4　各接合面(B 側及び N 側)における樹脂厚の測定結果

単位：mm

供試体 No.	目標樹脂厚 mm	目標導入軸力 kN	測点 No.	部材板厚			ボルト締付け前						ボルト締付け後						樹脂厚変化量（ボルト締付け前後）				実測樹脂厚
				母材	当て板		接合部の厚さ（樹脂厚含）		樹脂厚 B側:⑥=④-①-② N側:⑦=⑤-①-③				接合部の厚さ（樹脂厚含）		樹脂厚 B側:⑩=⑧-①-② N側:⑪=⑨-①-③								
					B側	N側	B側	N側	B側	平均	N側	平均	B側	N側	B側	平均 A	N側	平均 B	B側 ⑩-⑥	平均	N側 ⑪-⑦	平均	平均 (A+B)/2
				①	②	③	④	⑤	⑥		⑦		⑧	⑨	⑩		⑪						
4	1	225	1	21.93	11.71	11.67	35.04	35.00	1.40	1.51	1.40	1.46	34.91	34.96	1.27	1.37	1.36	1.35	-0.13	-0.14	-0.04	-0.11	1.4
			2	21.92	11.60	11.69	35.15	35.11	1.63		1.50		34.87	34.96	1.35		1.35		-0.28		-0.15		
			3	21.86	11.72	11.72	35.02	34.99	1.45		1.42		34.88	34.92	1.31		1.35		-0.14		-0.07		
			4	21.81	11.62	11.72	35.11	35.13	1.69		1.61		34.97	35.11	1.55		1.59		-0.14		-0.02		
			5	21.80	11.72	11.72	34.83	34.70	1.31		1.18		34.75	34.55	1.23		1.03		-0.08		-0.15		
			6	21.80	11.54	11.60	34.90	35.04	1.56		1.64		34.83	34.82	1.49		1.42		-0.07		-0.22		
5		112	1	21.93	11.71	11.67	34.94	34.79	1.30	1.43	1.19	1.48	34.74	34.75	1.10	1.38	1.15	1.32	-0.20	-0.06	-0.04	-0.16	1.3
			2	21.92	11.60	11.69	34.65	35.73	1.13		2.12		34.30	35.86	0.78		2.25		-0.35		0.13		
			3	21.86	11.72	11.72	35.17	34.40	1.60		0.82		34.98	34.16	1.41		0.58		-0.19		-0.24		
			4	21.81	11.72	11.72	34.82	34.93	1.30		1.41		35.44	34.94	1.92		1.42		0.62		0.01		
			5	21.81	11.72	11.72	34.95	34.80	1.42		1.27		34.79	34.80	1.26		1.27		-0.16		0.00		
			6	21.80	11.54	11.60	35.18	35.44	1.84		2.04		35.13	34.65	1.79		1.25		-0.05		-0.79		
6		45	1	21.87	11.73	11.78	35.44	34.59	1.84	1.77	0.94	1.23	35.54	34.45	1.94	1.46	0.80	1.21	0.10	-0.31	-0.14	-0.02	1.3
			2	21.88	11.56	11.72	35.70	34.59	2.26		0.99		35.00	34.63	1.56		1.03		-0.70		0.04		
			3	21.85	11.81	11.64	34.91	35.05	1.25		1.56		34.76	34.82	1.10		1.33		-0.15		-0.23		
			4	21.83	11.58	11.73	35.06	34.84	1.65		1.28		34.29	35.26	0.88		1.70		-0.77		0.42		
			5	21.85	11.76	11.62	35.14	34.78	1.53		1.31		34.92	34.70	1.31		1.23		-0.22		-0.08		
			6	21.76	11.63	11.77	35.49	34.80	2.10		1.27		35.36	34.68	1.97		1.15		-0.13		-0.12		
7	2	225	1	21.87	11.73	11.72	35.95	35.41	2.35	2.01	1.82	2.08	36.22	35.50	2.62	2.27	1.91	1.97	0.27	0.26	0.09	-0.11	2.1
			2	21.88	11.56	11.78	34.73	35.64	1.29		1.98		35.76	35.13	2.32		1.47		1.03		-0.51		
			3	21.85	11.71	11.73	35.65	35.95	2.09		2.37		35.59	35.83	2.03		2.25		-0.06		-0.12		
			4	21.83	11.58	11.63	35.86	35.26	2.45		1.80		35.42	35.56	2.01		2.10		-0.44		0.30		
			5	21.85	11.76	11.77	35.76	35.88	2.15		2.26		35.88	35.97	2.27		2.35		0.12		0.09		
			6	21.76	11.63	11.62	35.13	35.65	1.74		2.27		35.77	35.12	2.38		1.74		0.64		-0.53		
8		112	1	21.90	11.50	11.65	36.00	36.10	2.60	2.63	2.55	2.63	35.96	36.16	2.56	2.62	2.61	2.88	-0.04	-0.01	0.06	0.25	2.7
			2	21.91	11.48	11.63	35.09	37.00	1.70		3.46		34.93	37.25	1.54		3.71		-0.16		0.25		
			3	21.92	11.49	11.66	36.87	35.55	3.46		1.97		37.00	35.87	3.59		2.29		0.13		0.32		
			4	21.92	11.49	11.65	36.16	35.87	2.76		2.31		35.92	36.27	2.52		2.71		-0.24		0.40		
			5	21.93	11.49	11.66	36.03	36.14	2.61		2.55		36.31	36.22	2.89		2.63		0.28		0.08		
			6	21.90	11.49	11.62	36.02	36.48	2.63		2.96		35.99	36.84	2.60		3.32		-0.03		0.36		
9		45	1	21.77	11.62	11.65	34.88	36.73	1.49	2.27	3.31	2.79	35.04	36.80	1.65	2.24	3.38	3.06	0.16	-0.03	0.07	0.27	2.6
			2	21.88	11.61	11.64	35.93	37.06	2.44		3.54		36.00	37.29	2.51		3.77		0.07		0.23		
			3	21.76	11.63	11.64	35.45	35.60	2.06		2.20		35.61	35.70	2.22		2.30		0.16		0.10		
			4	21.88	11.60	11.68	36.66	35.82	3.19		2.27		35.89	36.79	2.42		3.24		-0.77		0.97		
			5	21.76	11.62	11.64	35.10	36.15	1.72		2.75		35.16	36.11	1.78		2.71		0.06		-0.04		
			6	21.87	11.62	11.66	36.19	36.21	2.70		2.68		36.33	36.48	2.84		2.95		0.14		0.27		

注1) 測点No.は，図-4.2.1の●位置に記載した番号

注2) B側：接合面ボルト側，N側:接合面ナット側

注3) 実測樹脂厚は，ボルトの締付け後におけるB側とN側の平均値で表す。

表-4.2.4　各接合面(B 側及び N 側)における樹脂厚の測定結果(つづき)

単位：mm

供試体 No.	目標樹脂厚 mm	目標導入軸力 kN	測点 No.	部材板厚			ボルト締付け前						ボルト締付け後						樹脂厚変化量（ボルト締付け前後）				実測樹脂厚
				母材	当て板		接合部の厚さ（樹脂厚含）		樹脂厚 B側：⑥=④-①-② N側：⑦=⑤-①-③				接合部の厚さ（樹脂厚含）		樹脂厚 B側：⑩=⑧-①-② N側：⑪=⑨-①-③								
					B側	N側	B側	N側	B側	平均	N側	平均	B側	N側	B側	平均 A	N側	平均 B	B側 ⑩-⑥	平均	N側 ⑪-⑦	平均	平均 (A+B)/2
				①	②	③	④	⑤	⑥		⑦		⑧	⑨	⑩		⑪						
10	3	225	1	21.83	11.58	11.65	36.72	36.97	3.31	3.37	3.49	3.44	36.92	37.25	3.51	3.58	3.77	3.63	0.20	0.21	0.28	0.19	3.6
			2	21.85	11.58	11.65	36.84	37.03	3.41		3.53		37.27	37.01	3.84		3.51		0.43		-0.02		
			3	21.91	11.58	11.66	36.75	36.67	3.27		3.11		36.86	37.09	3.38		3.53		0.11		0.42		
			4	21.89	11.60	11.64	36.84	36.81	3.35		3.28		36.91	36.88	3.42		3.35		0.07		0.07		
			5	21.94	11.58	11.67	36.93	37.03	3.41		3.42		37.10	37.34	3.58		3.73		0.17		0.31		
			6	21.90	11.59	11.65	36.95	37.37	3.46		3.82		37.23	37.45	3.74		3.90		0.28		0.08		
11		112	1	21.74	11.50	11.55	36.97	37.10	3.73	3.28	3.81	3.77	37.10	37.10	3.86	3.47	3.81	3.97	0.13	0.19	0.00	0.19	3.7
			2	21.76	11.54	11.54	36.33	37.26	3.03		3.96		36.36	37.30	3.06		4.00		0.03		0.04		
			3	21.68	11.62	11.55	36.85	37.10	3.56		3.88		36.78	37.18	3.49		3.96		-0.07		0.08		
			4	21.74	11.52	11.59	36.15	36.77	2.89		3.44		36.15	37.27	2.89		3.94		0.00		0.50		
			5	21.76	11.57	11.57	36.28	37.27	2.95		3.94		37.32	37.49	3.99		4.16		1.04		0.22		
			6	21.72	11.62	11.47	36.84	36.80	3.50		3.61		36.87	37.12	3.53		3.93		0.03		0.32		
12		45	1	21.95	11.53	11.60	37.37	36.86	3.89	3.58	3.31	3.34	37.46	36.73	3.98	3.51	3.18	3.36	0.09	-0.07	-0.13	0.02	3.4
			2	21.98	11.54	11.62	36.56	36.65	3.04		3.05		36.53	36.76	3.01		3.16		-0.03		0.11		
			3	21.94	11.52	11.61	36.98	36.88	3.52		3.33		36.95	36.87	3.49		3.32		-0.03		-0.01		
			4	21.95	11.53	11.62	36.96	36.51	3.49		2.95		36.37	36.96	2.90		3.40		-0.59		0.45		
			5	21.85	11.50	11.63	38.00	36.95	4.65		3.47		36.73	36.69	3.38		3.21		-1.27		-0.26		
			6	21.82	11.52	11.61	36.26	37.35	2.92		3.92		37.65	37.31	4.31		3.88		1.39		-0.04		
13	5	225	1	21.89	11.57	11.47	38.87	39.14	5.41	5.55	5.78	5.61	39.24	39.23	5.78	5.83	5.87	5.76	0.37	0.28	0.09	0.14	5.8
			2	21.76	11.58	11.56	39.07	39.19	5.73		5.87		39.23	39.32	5.89		6.00		0.16		0.13		
			3	21.90	11.58	11.51	38.19	38.63	4.71		5.23		38.58	39.10	5.11		5.70		0.39		0.47		
			4	21.73	11.58	11.55	38.85	39.08	5.54		5.80		38.99	38.94	5.68		5.66		0.14		-0.14		
			5	21.85	11.58	11.52	39.06	38.78	5.63		5.41		39.32	39.01	5.89		5.64		0.26		0.23		
			6	21.73	11.58	11.55	39.61	38.88	6.30		5.60		39.97	38.95	6.66		5.67		0.36		0.07		
14		112	1	21.97	11.69	11.61	39.27	39.17	5.61	5.35	5.59	5.80	39.10	39.10	5.44	5.32	5.52	5.72	-0.17	-0.03	-0.07	-0.08	5.5
			2	21.95	11.70	11.60	38.83	39.71	5.18		6.16		38.88	39.48	5.23		5.93		0.05		-0.23		
			3	21.96	11.71	11.62	39.17	38.69	5.51		5.12		39.33	38.66	5.67		5.09		0.16		-0.03		
			4	21.97	11.70	11.63	39.08	38.66	5.42		5.07		39.08	38.58	5.42		4.99		0.00		-0.08		
			5	21.95	11.71	11.60	39.30	39.64	5.64		6.09		39.05	39.64	5.39		6.09		-0.25		0.00		
			6	21.95	11.73	11.59	38.43	40.30	4.75		6.76		38.45	40.22	4.77		6.68		0.02		-0.08		
15		45	1	21.84	11.57	11.53	40.10	39.23	6.69	5.98	5.86	5.61	40.21	39.14	6.80	5.98	5.77	5.60	0.11	0.00	-0.09	-0.01	5.8
			2	21.76	11.58	11.53	39.80	39.03	6.46		5.74		39.86	39.03	6.52		5.74		0.06		0.00		
			3	21.75	11.57	11.55	38.89	38.86	5.57		5.56		38.77	38.86	5.45		5.56		-0.12		0.00		
			4	21.76	11.59	11.51	38.81	38.87	5.46		5.60		38.73	38.87	5.38		5.60		-0.08		0.00		
			5	21.75	11.58	11.55	39.23	38.81	5.90		5.51		39.24	38.81	5.91		5.51		0.01		0.00		
			6	21.78	11.59	11.55	39.19	38.73	5.82		5.40		39.19	38.73	5.82		5.40		0.00		0.00		

注1) 測点No.は，図-4.2.1の●位置に記載した番号

注2) B側：接合面ボルト側，N側:接合面ナット側

注3) 実測樹脂厚は，ボルトの締付け後におけるB側とN側の平均値で表す。

4.3 ボルト軸力の管理と経時変化測定

(1) ボルト軸力の管理

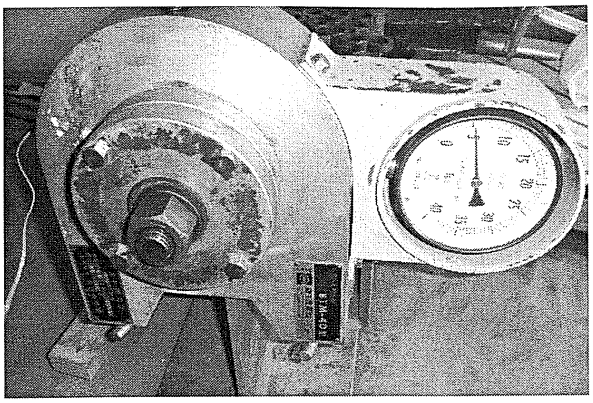
目標導入軸力の管理及び軸力の経時変化測定は，ボルト軸力と比例関係にあるボルト頭部のひずみ(ひずみゲージ長 5mm)により行った[4.1]。図-4.3.1 に，ボルトの軸力較正の状況を示す。ボルト締付けに伴うボルト頭部のひずみを軸力 25kN ピッチで計測した。使用するすべてのボルトについて，導入軸力 225kN までの軸力とひずみの比例関係を把握した(図-4.3.2)。以下，本文で示す実測のボルト軸力は，個々のボルトの較正値(回帰から得られた傾き)を用いて実測ひずみから換算した値である。

表-4.3.1 に，各ボルトの較正値(締付け軸力 225kN 時の値で表記)と本試験における目標導入軸力の管理値を示す。管理値については，各ボルトの軸力とひずみの比例関係から算定した。図-4.3.3 に，ボルトの軸力導入の状況を示す。各ボルトの締付け中，ひずみを測定し，ひずみがそれぞれの管理値になるまで締付けを行った。

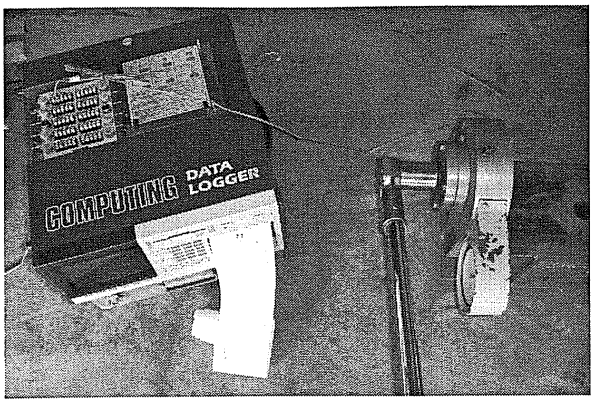
(2) ボルト軸力の経時変化の測定

図-4.3.4 に，ボルト軸力の経時変化の測定状況を示す。測定は，ボルト締付け開始時から始め，最後に締付けたボルト BL-4 の本締め終了時点以降は，先に締付けたボルト BL-1, 2, 3 とともに，表-4.3.2 に示す測定間隔で 7 日間実施した。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。

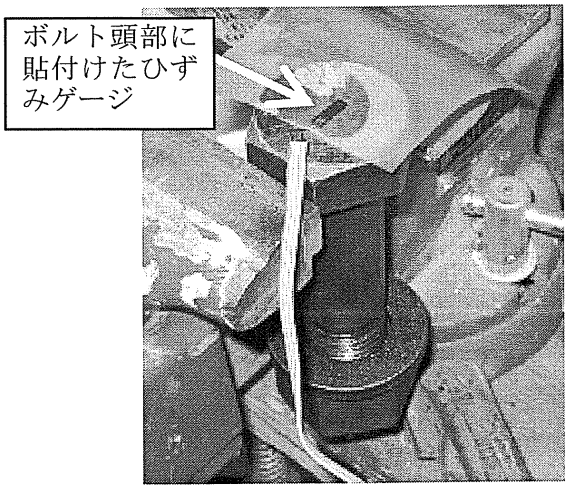
なお，経時変化測定では，図-4.3.4(b), (c)に示すように，各供試体の側面において接合面ごとに設置したクリップゲージ(CL1～4)により，樹脂厚の変位を 7 日間測定した。クリップゲージは，設置に治具を要するが，これがボルト締付け作業の妨げとなる可能性があったため，ボルト締付け後に設置して測定を始めた。また，供試体 No.7～9(目標樹脂厚 2mm)と No.13～15(同 5mm)については，鋼板に貼付けたひずみゲージ(測定断面①～④)により，ボルトの締付けによって生じる板のひずみとその経時変化を測定した。



(a) 使用したボルト軸力計



(b) 軸力較正(ボルト締付けとひずみの測定)



(c) ボルトとひずみゲージ

図-4.3.1　ボルトの軸力較正の状況

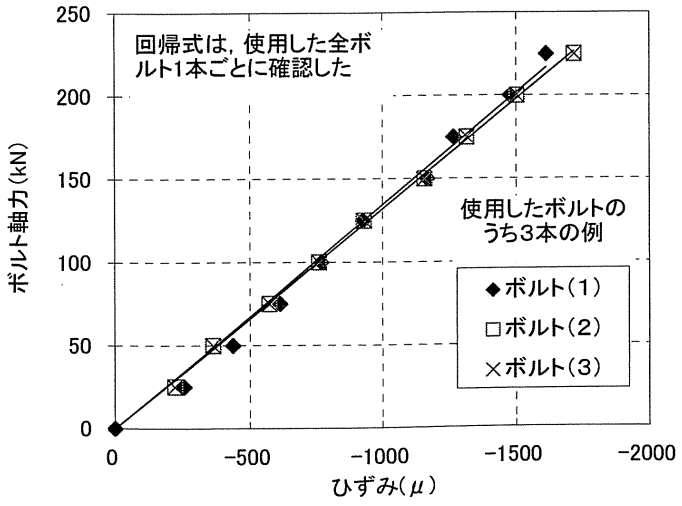
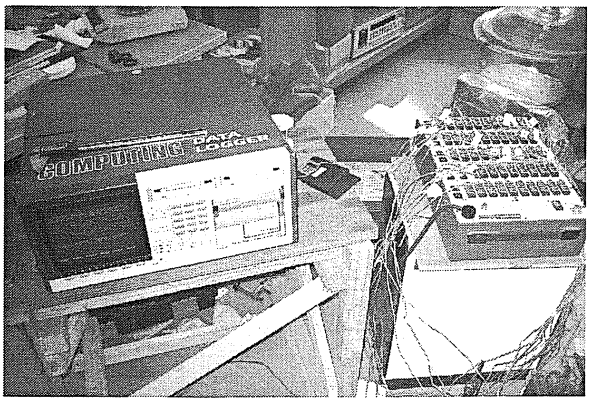


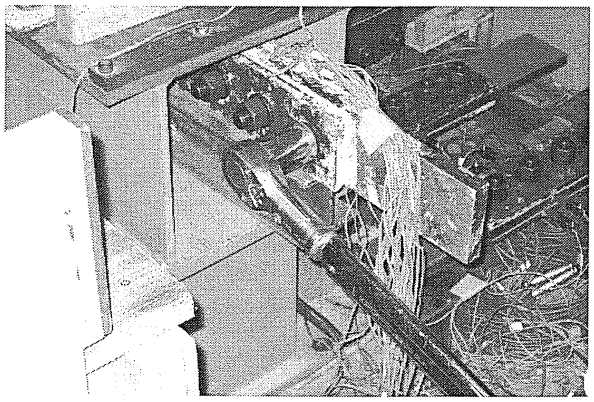
図-4.3.2　ボルトの軸力較正の例

表-4.3.1　ボルト頭部のひずみによる目標導入軸力の管理値

供試体No.	目標樹脂厚(mm)	目標導入軸力(kN)	ボルト頭部のひずみ（μ）							
			較正値（軸力225kN時の値）				目標導入軸力の管理値			
			BL-1	BL-2	BL-3	BL-4	BL-1	BL-2	BL-3	BL-4
1	0 樹脂無し	225	-1589	-1755	-1500	-1711	-1589	-1755	-1500	-1711
2		112	-1924	-1428	-1646	-1646	-962	-714	-823	-823
3		45	-1639	-1471	-1608	-1555	-328	-294	-322	-311
4	1	225	-1679	-1641	-1563	-1610	-1679	-1641	-1563	-1610
5		112	-1598	-1616	-1661	-1542	-799	-808	-831	-771
6		45	-1703	-1457	-1540	-1677	-341	-291	-308	-335
7	2	225	-1587	-1375	-1595	-1599	-1587	-1375	-1595	-1599
8		112	-1553	-1653	-1671	-1605	-777	-827	-836	-803
9		45	-1515	-1559	-1644	-1678	-303	-312	-329	-336
10	3	225	-1865	-1841	-1569	-1878	-1865	-1841	-1569	-1878
11		112	-1548	-1850	-1574	-1740	-774	-925	-787	-870
12		45	-1510	-1572	-1659	-1693	-302	-314	-332	-339
13	5	225	-1852	-1729	-1770	-1553	-1852	-1729	-1770	-1553
14		112	-1646	-1639	-1471	-1608	-823	-820	-736	-804
15		45	-1616	-1408	-1792	-1903	-323	-282	-358	-381

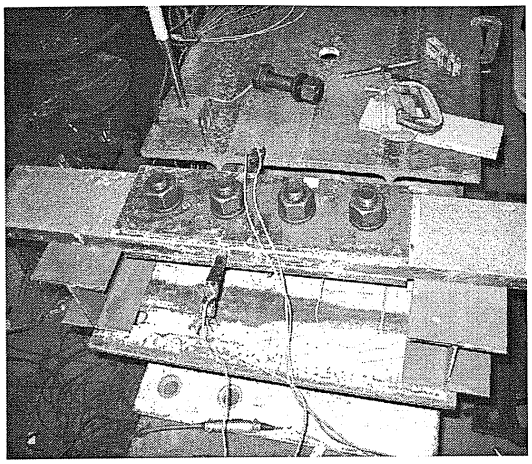


(a) ボルト軸力管理に用いたデータロガー

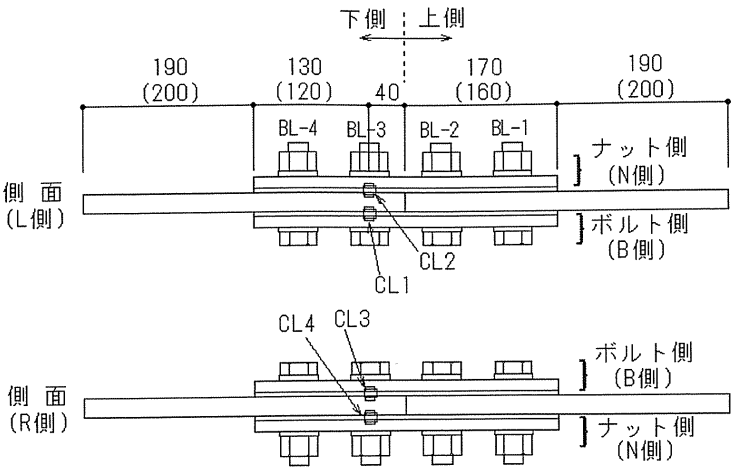


(b) ボルト BL-1 締付け

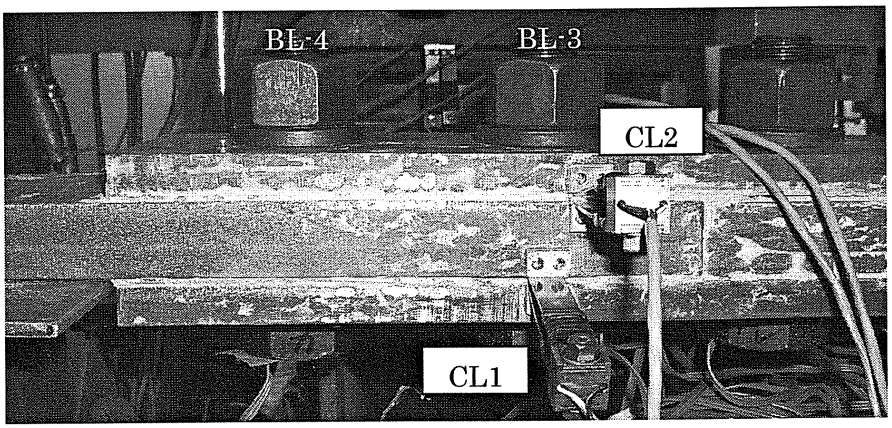
図-4.3.3　ボルトの軸力導入の状況

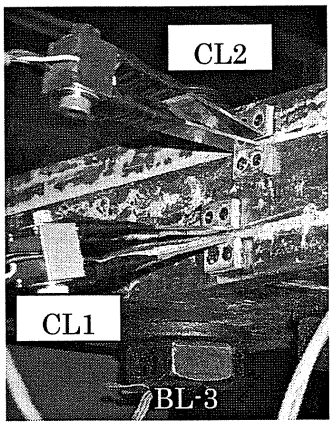


(a) 経時変化測定中の状況



(b) クリップゲージ位置(計 4 本)





(c) クリップゲージ(CL1,CL2)設置状況（供試体 No.4）

図-4.3.4　軸力及び樹脂厚の経時変化の測定状況

表-4.3.2　ボルト軸力，板のひずみ，樹脂厚の経時変化測定間隔

測定期間 (締付け終了後の経過時間)	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

注1) 板のひずみは，供試体 No.7～9(目標樹脂厚 2mm)及び No.13～15(同 5mm)のみを対象とした

注2) ボルト軸力：ボルト頭部のひずみゲージ(FLA-5-11)による

注3) 樹脂厚：クリップゲージ(UB-5)による

注4) 板のひずみ：ひずみゲージ(FLA-5-11)による

4.4　静的引張試験

図-4.4.1 に静的引張試験における供試体の設置状況を示す。引張載荷には，2000kN 載荷試験機(UH-F2000kNC)を使用した。載荷は，継手のすべり挙動を確認するまでの単調載荷(変位制御，載荷速度 0.15mm/min)とした。すべての供試体について，図-4.4.2 に示す位置にパイゲージ及びクリップゲージを設置し，載荷に伴うずれ変位を測定した。また，ボルト頭部に貼付けたひずみゲージにより，載荷中のボルト軸力を測定した。図-4.4.3 に，パイゲージ及びクリップゲージの設置状況を示す。

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罫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(目標樹脂厚 2mm)と No.13～15(同 5mm)については，載荷中における板のひずみ(測定断面①～⑤)を測定した。引張試験時の気温は 15～17℃であった。

試験後の供試体は，解体前の外観と解体後に接合面を観察することにより，樹脂の破壊形態や充填状況を確認した。

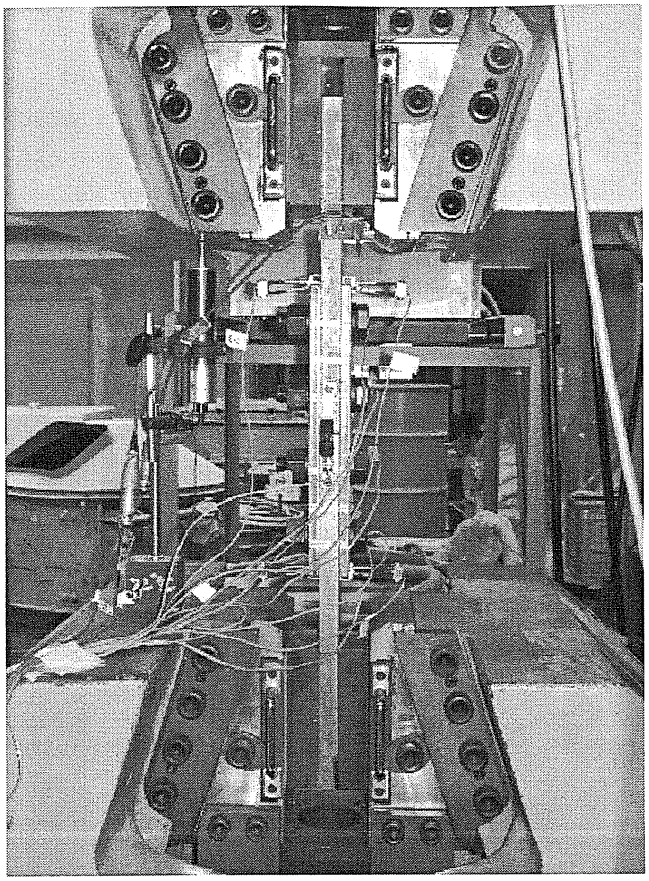
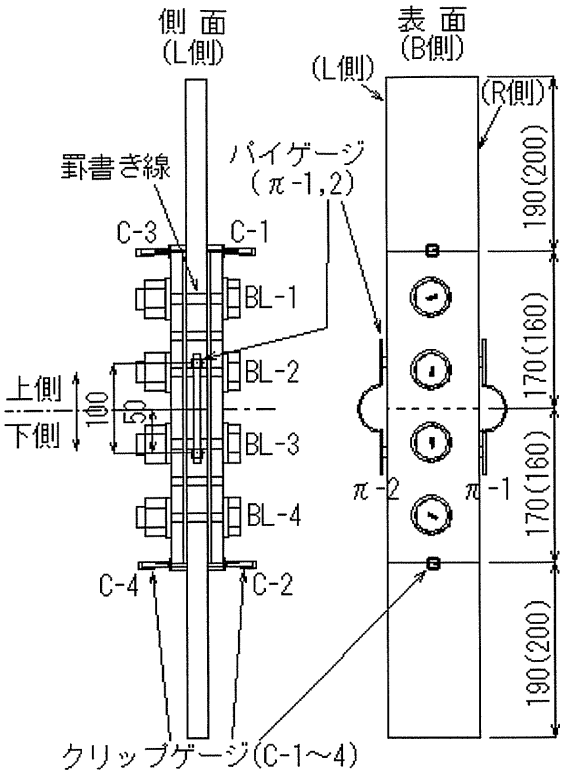
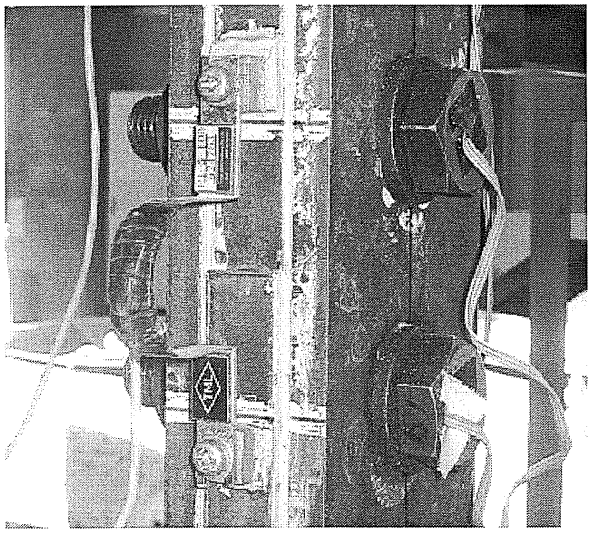


図-4.4.1　供試体の設置状況(静的引張試験)

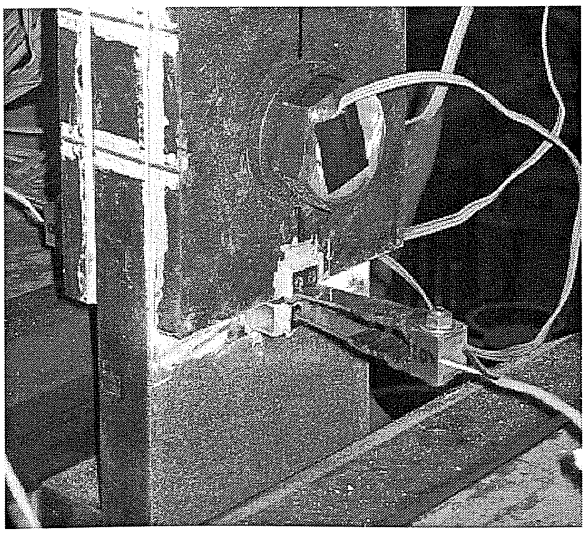


( )内数値は，供試体 No.1～3(樹脂無し)の寸法

図-4.4.2　パイゲージとクリップゲージの位置



a) パイゲージ(π-2)設置状況



b) クリップゲージ(C-2)設置状況

図-4.4.3　パイゲージ及びクリップゲージ設置状況

5. ボルト軸力の導入と経時変化の測定結果

5.1 初期導入軸力

表-5.1.1 に，各供試体の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，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(同 1～3mm)では，目標導入軸力が軸力の低下に及ぼす影響は明確でなかった。

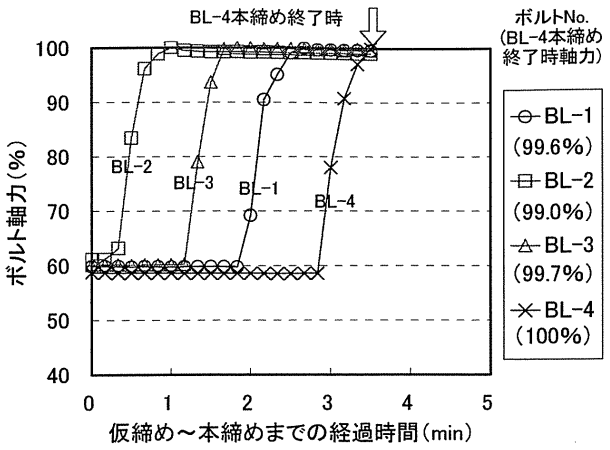
図-5.1.1 に，ボルト BL-4 の仮締め終了時から本締め終了時までの各ボルト軸力の挙動について，目標導入軸力 225kN の供試体(No.1，4，7，10，13)を例に示す。ボルト軸力の低下は，それぞれのボルトの本締め直後から，時間の経過とともに生じていた。

表-5.1.1 締付け完了時におけるボルト軸力の測定結果

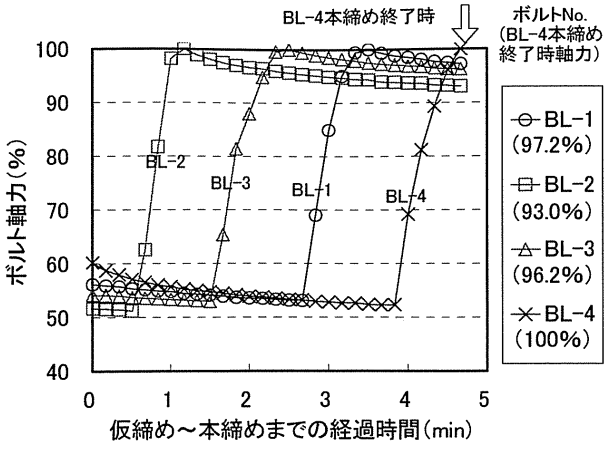
単位：%

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割合）				
	目標値	実測値		BL-1（3）	BL-2（1）	BL-3（2）	BL-4（4）	平均値
1	0（樹脂無し）		225	99.6	99.0	99.7	100.0	99.6
2			112	99.6	99.3	99.6		99.6
3			45	99.7	98.3	99.7		99.4
4	1	1.4	225	97.2	93.0	96.2		96.6
5		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	2.1	225	94.2	94.4	93.9		95.6
8		2.7	112	96.5	93.7	93.8		96.0
9		2.6	45	94.9	92.2	92.5		94.9
10	3	3.6	225	92.3	91.7	93.9		94.5
11		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	5.8	225	91.3	88.1	87.4		91.7
14		5.5	112	92.2	89.2	89.1		92.6
15		5.8	45	94.8	89.3	93.8		94.5

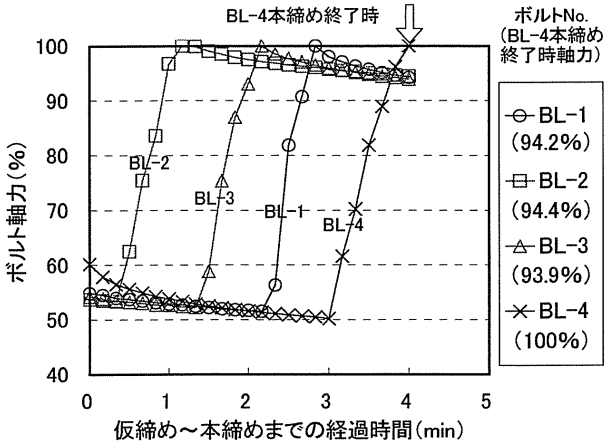
注１） BL-1～4は，高力ボルト番号
注２） （ ）内の数値は，ボルト締付け順



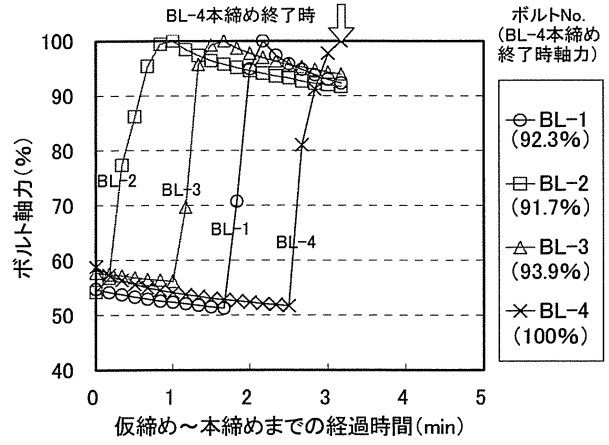
(a) 樹脂無し(供試体 No.1)



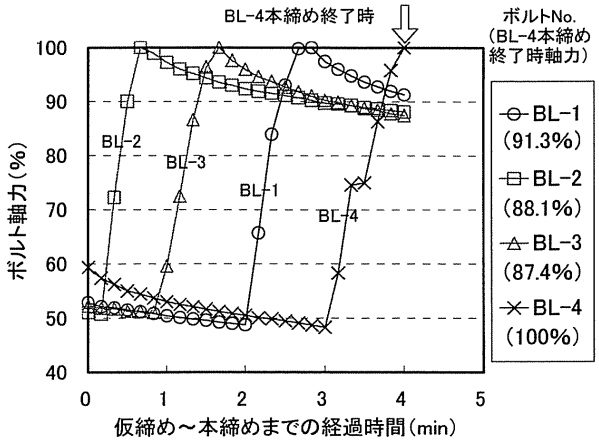
(b) 樹脂厚 1.4mm(供試体 No.4)



(c) 樹脂厚 2.1mm(供試体 No.7)



(d) 樹脂厚 3.6mm(供試体 No.10)



(e) 樹脂厚 5.8mm(供試体 No.13)

注) ボルト軸力は，目標導入軸力に対する割合で示す

図-5.1.1　導入直後の軸力の挙動（目標導入軸力 225kN の供試体の例）

5.2 ボルト軸力の経時変化

表-5.2.1 に，各供試体におけるボルト 4 本の軸力の経時変化を示す。残存軸力は，測定した軸力の目標導入軸力に対する割合で示し，各ボルトの本締め終了時を 0 時間とした場合の経過時間で整理した。ボルト締付けから 7 日後のボルト軸力は，樹脂無しの供試体 No.1～3 では，目標導入軸力に対して 1～2 %程度低下していた。

図-5.2.1～4 に，供試体 No.4～15 における各ボルト軸力の経時変化の挙動を示す。また図-5.2.5 に，各供試体のボルト軸力を 4 本の平均値(表-5.2.1)で整理し，軸力の経時変化について目標導入軸力別に示す。樹脂有りの場合，ボルト締付けから 7 日後におけるボルト軸力の低下量（目標導入軸力に対する残存軸力の割合，%)は，樹脂厚，導入軸力に応じて 20～60%程度であった。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(この章では，温度変化に伴う樹脂の収縮・膨張の影響は考慮していない)。

図-5.2.6 に，目標導入軸力に対する 7 日後における各ボルトの軸力低下量と，実測樹脂厚の関係を示す。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。樹脂有りの供試体の場合，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。

なお，図-5.2.7 に，樹脂無しにおける高力ボルトのリラクセーション(供試体 No.1)について，回帰式を示す。導入軸力を低減させた供試体 No.2～3 では，リラクセーションがほとんど生じていなかった。

表-5.2.1 各ボルト軸力の経時変化

単位：%

供試体 No.	ボルト No.	経過時間										
		10 分	30 分	1 時間	2 時間	4 時間	6 時間	12 時間	24 時間	2 日	4 日	7 日
1	BL-1	99.4	99.3	99.3	99.1	99.1	99.0	98.8	98.8	98.7	98.6	98.4
	BL-2	98.9	98.9	98.8	98.7	98.7	98.5	98.4	98.3	98.2	98.0	97.9
	BL-3	99.5	99.4	99.3	99.2	99.1	99.0	98.7	98.6	98.2	98.1	97.6
	BL-4	99.5	99.3	99.2	99.2	99.0	98.9	98.7	98.6	98.4	98.2	97.9
	平均	99.3	99.2	99.2	99.1	99.0	98.9	98.7	98.6	98.4	98.2	98.0
2	BL-1	99.6	99.6	99.6	99.4	99.5	99.5	99.4	99.4	99.4	99.3	99.1
	BL-2	99.6	99.5	99.5	99.3	99.5	99.5	99.3	99.3	99.7	99.6	99.6
	BL-3	99.7	99.7	99.5	99.4	99.5	99.5	99.7	99.5	99.8	99.7	99.8
	BL-4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9
	平均	99.7	99.7	99.7	99.5	99.6	99.6	99.6	99.6	99.7	99.7	99.6
3	BL-1	99.4	99.1	99.1	100.0	99.7	99.1	99.4	99.4	99.7	99.4	99.4
	BL-2	98.3	98.3	98.0	98.7	98.0	97.7	97.7	98.3	98.7	98.0	98.3
	BL-3	99.4	99.1	98.8	99.4	99.1	98.8	98.8	99.1	99.4	98.8	98.4
	BL-4	99.0	99.4	98.7	99.4	99.0	98.7	98.7	99.0	99.4	99.0	99.7
	平均	99.0	99.0	98.7	99.4	99.0	98.6	98.7	99.0	99.3	98.8	99.0

表-5.2.1　各ボルト軸力の経時変化（つづき）

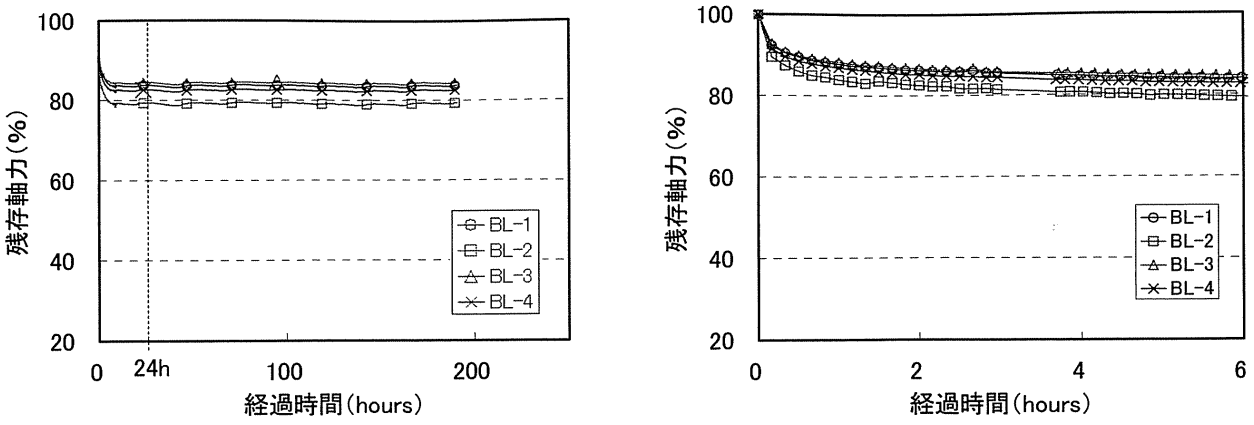
単位：%

供試体No.	ボルトNo.	経過時間										
		10分	30分	1時間	2時間	4時間	6時間	12時間	24時間	2日	4日	7日
4	BL-1	92.3	89.5	87.8	86.3	84.7	84.0	83.7	83.8	83.7	83.7	83.7
	BL-2	89.5	85.9	83.9	82.6	80.6	79.4	79.2	79.4	79.2	79.2	79.3
	BL-3	92.7	89.8	88.2	86.7	85.3	84.6	84.4	84.5	84.4	84.4	84.4
	BL-4	91.5	88.4	86.9	85.2	83.7	82.7	82.5	82.7	82.5	82.5	82.6
	平均	91.5	88.4	86.7	85.2	83.6	82.7	82.5	82.6	82.5	82.5	82.5
5	BL-1	85.5	80.2	77.0	74.3	73.2	72.6	71.9	71.6	70.9	70.6	70.2
	BL-2	86.3	81.4	78.4	76.2	74.8	74.2	73.4	73.3	72.4	72.2	71.4
	BL-3	87.4	82.3	79.4	77.1	75.5	75.0	74.2	73.8	73.1	72.9	72.1
	BL-4	82.3	77.1	74.2	71.6	70.2	69.6	69.0	68.5	67.9	67.7	67.0
	平均	85.4	80.3	77.3	74.8	73.4	72.9	72.1	71.8	71.1	70.9	70.2
6	BL-1	82.8	76.3	70.3	67.4	65.6	64.4	62.6	62.0	60.2	60.0	58.8
	BL-2	81.3	74.4	69.2	65.9	63.9	63.3	61.0	60.7	58.7	58.4	56.7
	BL-3	86.2	79.4	75.7	72.5	70.5	69.5	67.2	67.2	64.9	64.6	63.6
	BL-4	85.4	79.0	74.8	72.0	70.5	69.3	68.1	67.5	65.7	65.4	64.1
	平均	83.9	77.3	72.5	69.5	67.6	66.6	64.7	64.4	62.4	62.1	60.8
7	BL-1	87.1	83.7	81.6	80.0	79.1	78.6	77.9	77.4	77.3	76.7	76.4
	BL-2	90.3	87.6	85.9	84.5	83.6	83.2	82.6	82.3	82.3	81.8	81.5
	BL-3	87.3	83.6	81.4	79.6	78.3	77.8	77.0	76.8	76.5	76.0	75.7
	BL-4	87.5	83.0	80.3	78.5	77.2	76.7	75.7	75.4	75.0	74.5	74.1
	平均	88.0	84.5	82.3	80.7	79.6	79.1	78.3	78.0	77.8	77.3	76.9
8	BL-1	86.1	79.1	74.1	69.9	67.4	66.1	64.5	64.4	63.7	61.6	61.8
	BL-2	85.4	79.3	75.2	72.4	70.4	69.4	67.7	67.8	67.2	64.9	65.1
	BL-3	83.4	76.8	72.1	69.2	66.8	65.9	64.3	64.3	63.7	61.4	61.4
	BL-4	81.0	75.2	71.1	68.2	66.1	65.3	64.1	63.9	63.3	61.5	61.3
	平均	84.0	77.6	73.1	69.9	67.7	66.7	65.2	65.1	64.5	62.4	62.4
9	BL-1	82.4	77.0	73.0	71.0	68.6	66.9	66.6	67.2	65.9	64.5	65.2
	BL-2	82.4	73.2	68.3	63.7	59.8	58.5	55.9	56.2	53.6	50.3	50.0
	BL-3	80.4	71.7	66.2	63.1	59.6	57.8	56.2	56.5	54.7	52.5	52.8
	BL-4	80.1	71.7	66.9	63.0	59.0	56.9	54.8	55.7	53.6	49.7	49.4
	平均	81.3	73.4	68.6	65.2	61.8	60.0	58.4	58.9	57.0	54.3	54.4

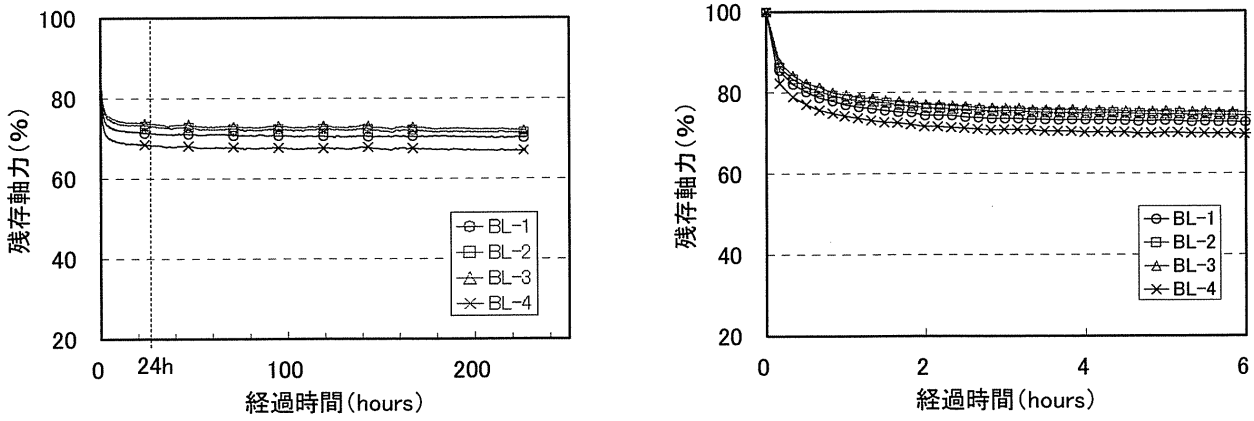
表-5.2.1　各ボルト軸力の経時変化（つづき）

単位：%

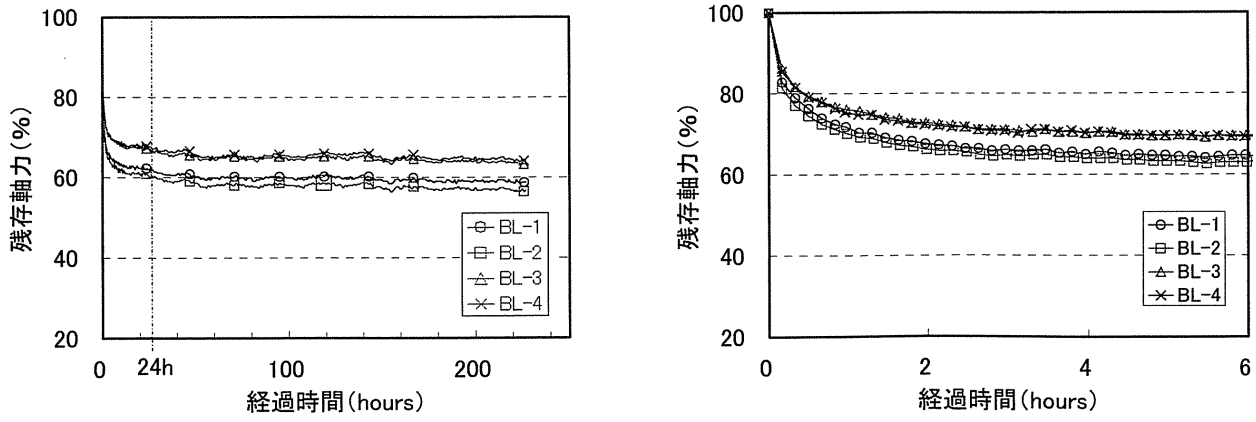
供試体No.	ボルトNo.	経過時間										
		10分	30分	1時間	2時間	4時間	6時間	12時間	24時間	2日	4日	7日
10	BL-1	81.4	76.1	73.1	70.5	68.7	68.0	67.0	65.4	64.7	64.1	63.8
	BL-2	84.5	79.2	76.2	73.6	71.8	71.1	70.1	68.5	67.8	67.2	66.9
	BL-3	85.6	80.2	77.1	74.3	72.3	71.5	70.5	68.8	68.1	67.4	67.0
	BL-4	83.5	78.2	75.1	72.4	70.6	69.8	68.9	67.2	66.5	65.8	65.6
	平均	83.7	78.4	75.4	72.7	70.9	70.1	69.1	67.5	66.8	66.1	65.8
11	BL-1	81.8	72.0	66.1	61.4	57.8	56.0	53.9	54.0	52.5	50.1	49.9
	BL-2	88.7	82.3	78.1	74.9	72.0	70.8	69.1	69.1	68.2	66.0	65.7
	BL-3	84.5	77.1	71.8	68.4	65.1	63.9	62.0	62.0	60.7	58.7	58.4
	BL-4	82.1	73.6	67.8	63.5	60.2	58.6	56.6	56.6	55.2	53.1	52.8
	平均	84.3	76.3	71.0	67.1	63.8	62.3	60.4	60.4	59.2	57.0	56.7
12	BL-1	87.2	82.5	79.3	76.4	74.1	71.7	70.6	69.4	67.4	67.1	65.6
	BL-2	91.5	87.6	83.7	79.8	77.2	74.9	74.0	72.3	70.4	70.0	68.7
	BL-3	80.3	71.3	65.1	59.9	57.1	54.7	53.3	51.6	48.8	49.1	47.8
	BL-4	79.1	71.5	66.1	62.1	59.1	57.9	57.3	55.8	54.3	54.3	53.3
	平均	84.5	78.2	73.6	69.6	66.9	64.8	63.8	62.3	60.2	60.1	58.9
13	BL-1	78.1	71.5	67.8	64.7	62.4	61.7	60.3	60.0	59.0	57.6	57.4
	BL-2	81.6	75.5	72.1	69.2	66.9	66.0	64.8	64.5	63.5	62.1	62.0
	BL-3	76.7	69.7	65.9	62.7	60.3	59.2	58.0	57.7	56.6	55.2	55.0
	BL-4	76.4	68.7	64.5	61.1	58.5	57.4	56.2	55.8	54.6	53.1	53.0
	平均	78.2	71.4	67.6	64.4	62.0	61.1	59.8	59.5	58.4	57.0	56.9
14	BL-1	72.1	61.7	55.0	51.1	48.1	46.9	46.2	43.8	41.9	41.4	40.8
	BL-2	80.3	71.8	66.0	63.1	60.5	59.4	58.9	57.2	55.1	54.9	54.0
	BL-3	75.7	65.7	59.1	55.5	52.7	51.4	50.9	49.0	47.2	46.9	46.3
	BL-4	77.0	66.8	60.1	56.4	53.5	52.1	51.6	49.4	47.5	47.1	46.4
	平均	76.3	66.5	60.1	56.5	53.7	52.5	51.9	49.9	47.9	47.6	46.9
15	BL-1	79.9	70.5	67.5	60.5	55.3	52.9	51.4	48.0	45.6	42.0	41.7
	BL-2	76.9	65.8	62.3	54.1	48.4	45.9	44.5	40.2	38.1	34.5	33.8
	BL-3	80.6	69.9	65.4	57.5	51.6	49.3	48.2	44.0	42.0	38.6	38.0
	BL-4	83.6	74.3	70.9	63.9	57.9	55.6	54.6	49.9	47.8	43.9	43.4
	平均	80.3	70.1	66.5	59.0	53.3	50.9	49.7	45.5	43.4	39.8	39.2



(a) 供試体 No.4(樹脂厚 1.4mm, 目標導入軸力 225kN)



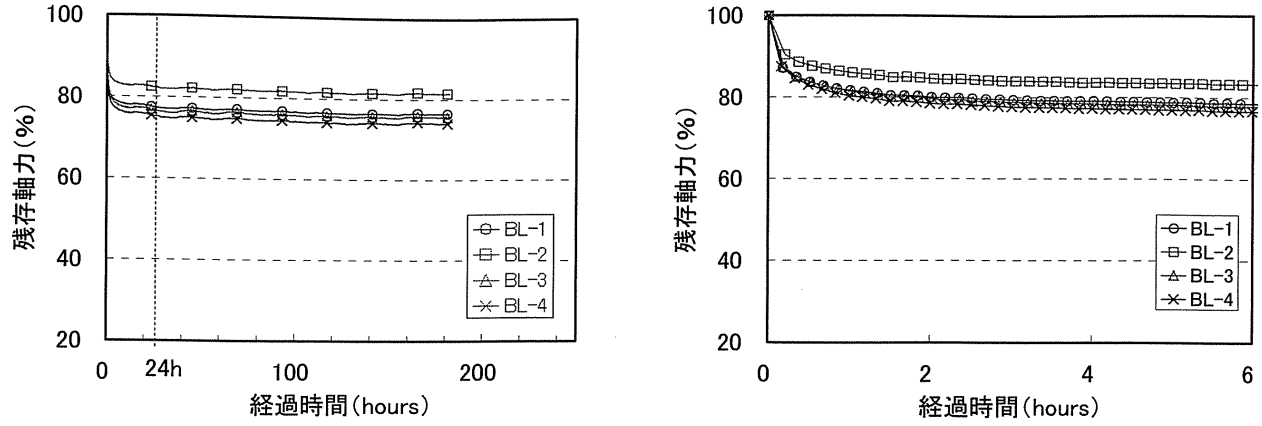
(b) 供試体 No.5(樹脂厚 1.3mm, 目標導入軸力 112kN)



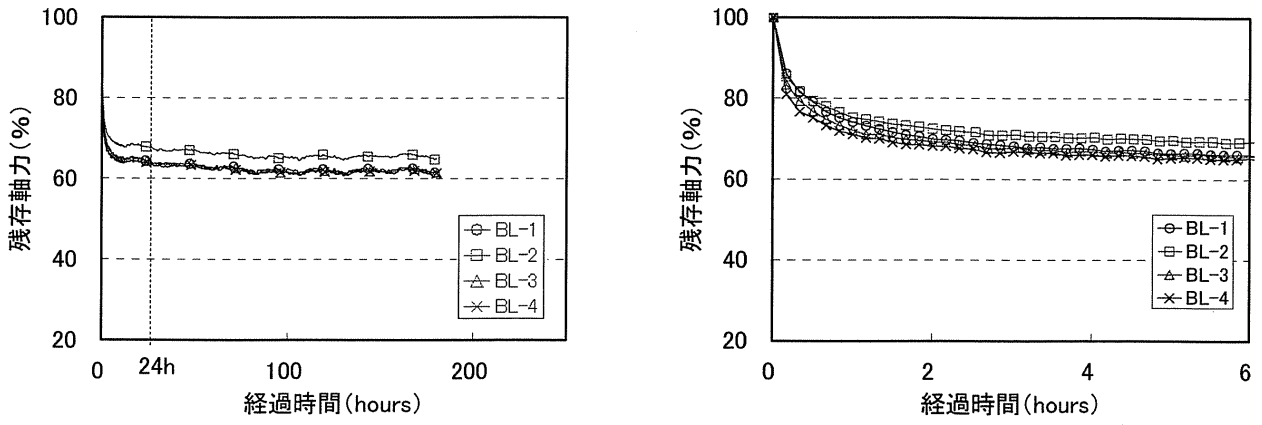
(c) 供試体 No.6(樹脂厚 1.3mm, 目標導入軸力 45kN)

図-5.2.1 各ボルト軸力の経時変化（目標樹脂厚 1mm 供試体）

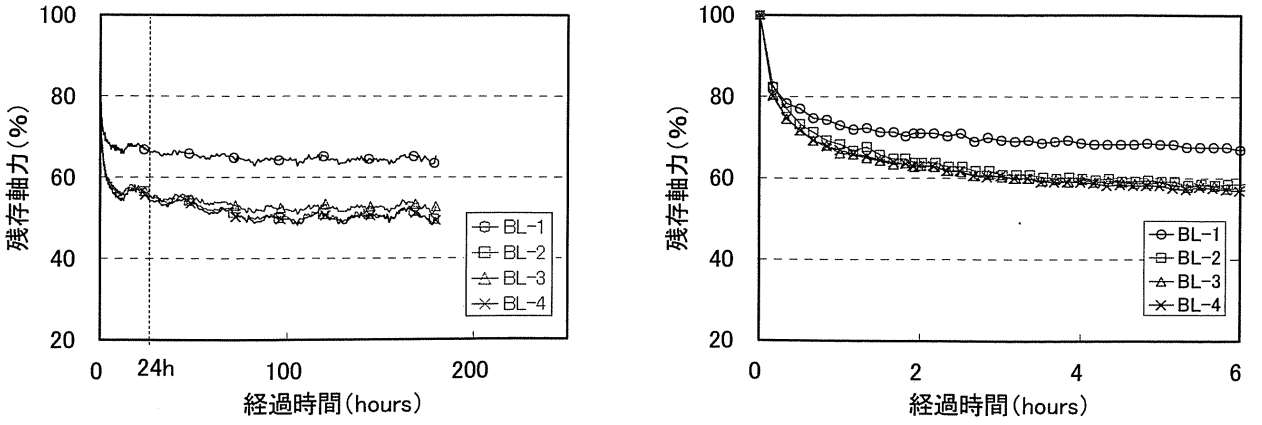
左図:0～250 時間, 右図:0～6 時間



(a) 供試体 No.7(樹脂厚 2.1mm, 目標導入軸力 225kN)



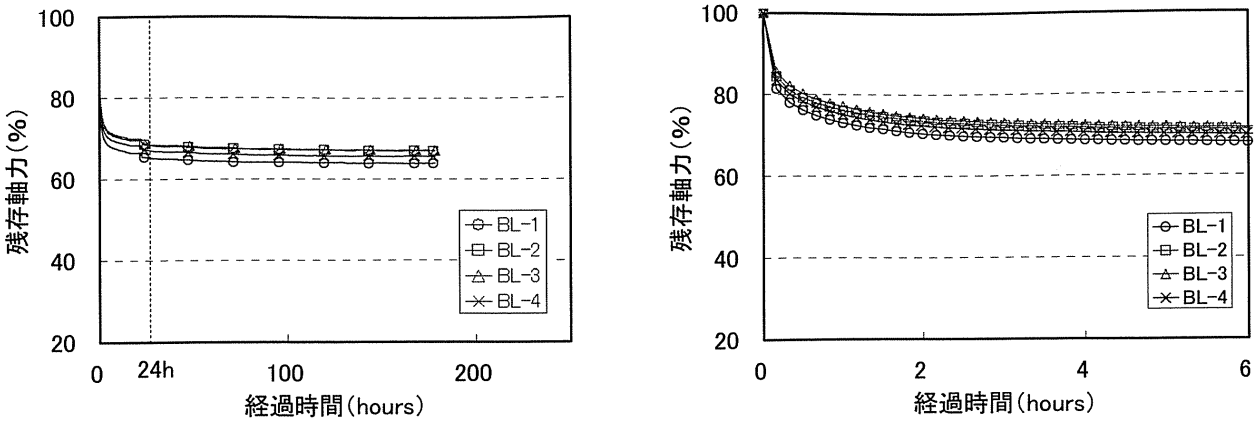
(b) 供試体 No.8(樹脂厚 2.7mm, 目標導入軸力 112kN)



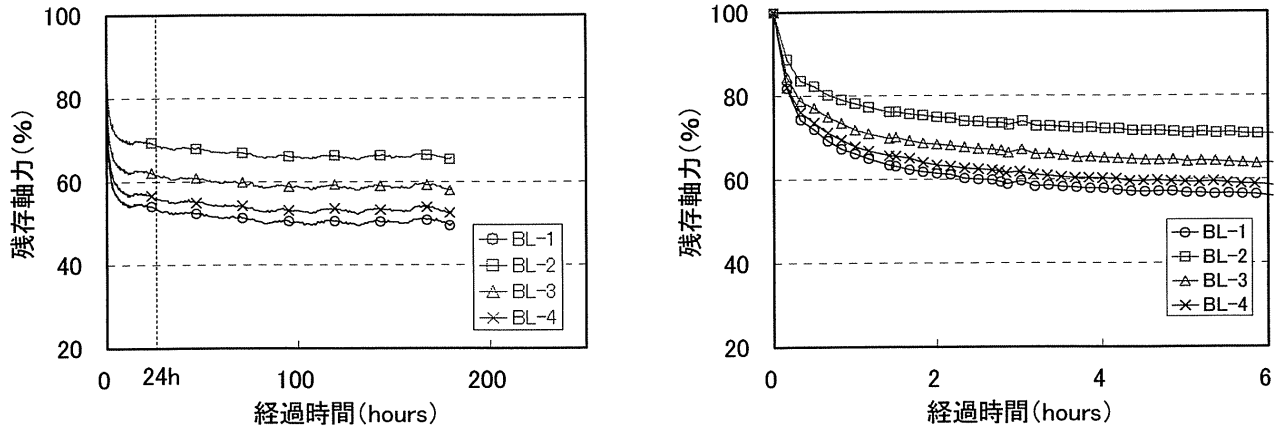
(c) 供試体 No.9(樹脂厚 2.6mm, 目標導入軸力 45kN)

図-5.2.2 各ボルト軸力の経時変化 (目標樹脂厚 2mm 供試体)

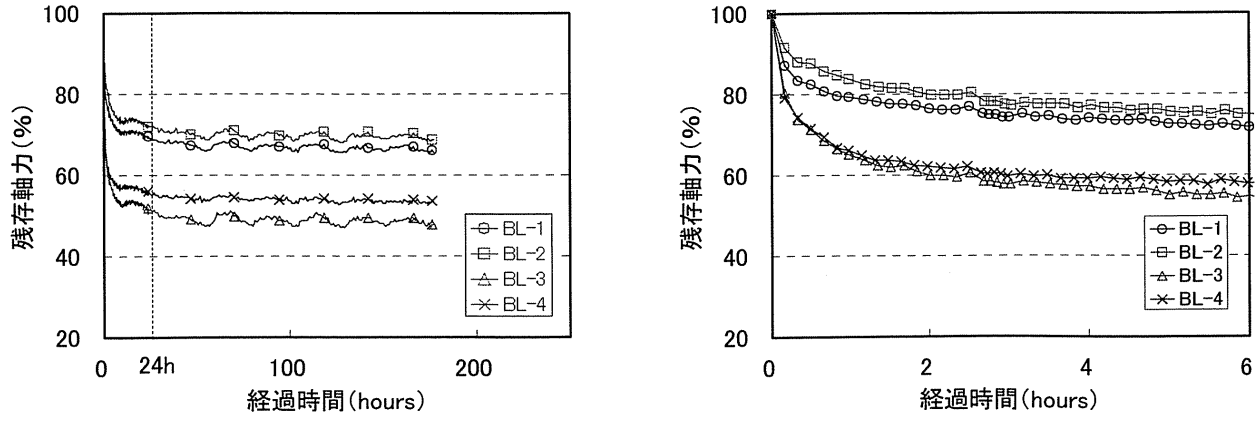
左図:0～250 時間, 右図:0～6 時間



(a) 供試体 No.10(樹脂厚 3.6mm, 目標導入軸力 225kN)



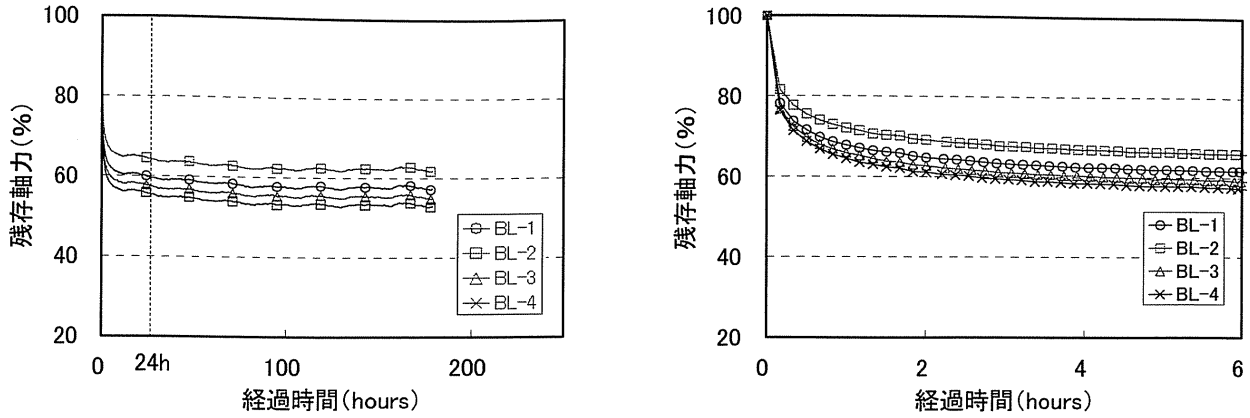
(b) 供試体 No.11(樹脂厚 3.7mm, 目標導入軸力 112kN)



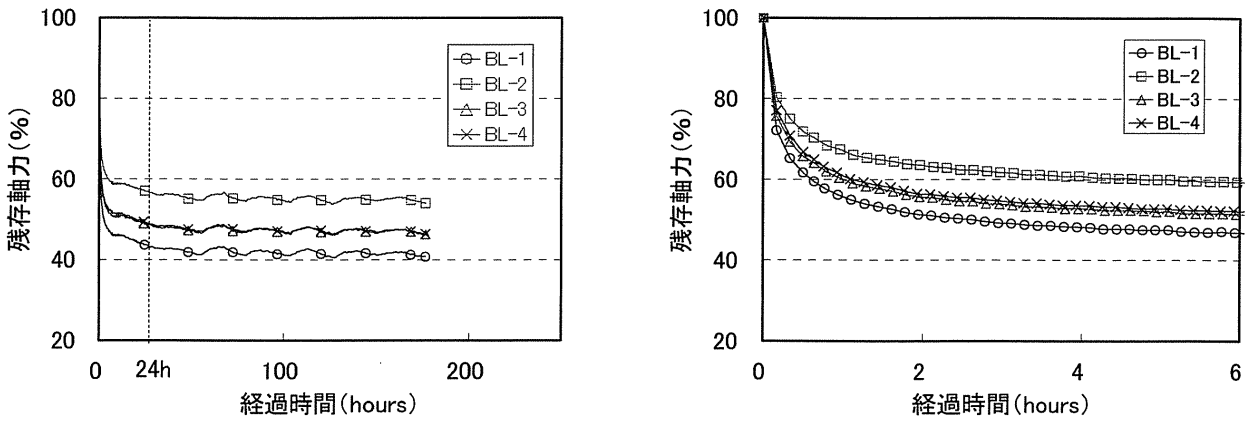
(c) 供試体 No.12(樹脂厚 3.4mm, 目標導入軸力 45kN)

図-5.2.3 各ボルト軸力の経時変化（目標樹脂厚 3mm 供試体）

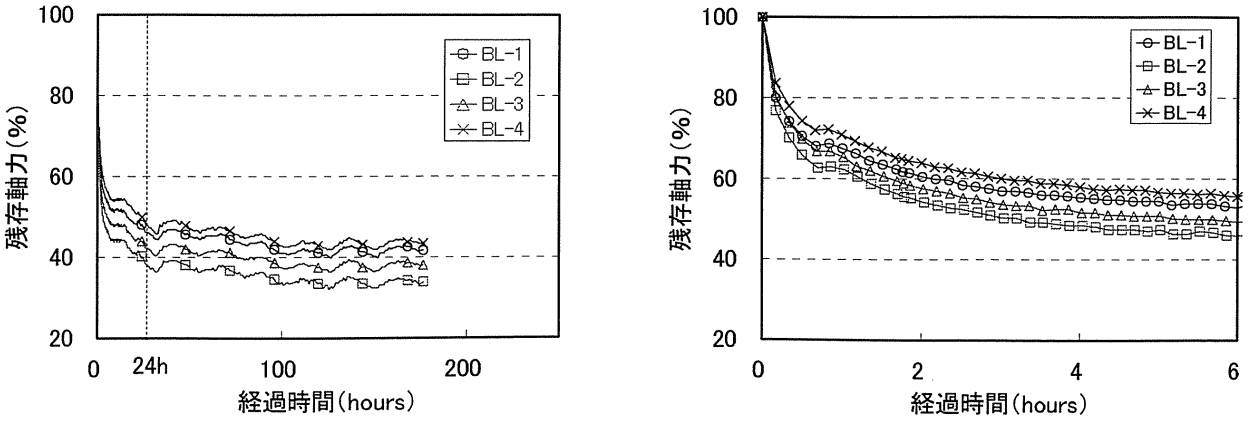
左図:0～250 時間, 右図:0～6 時間



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



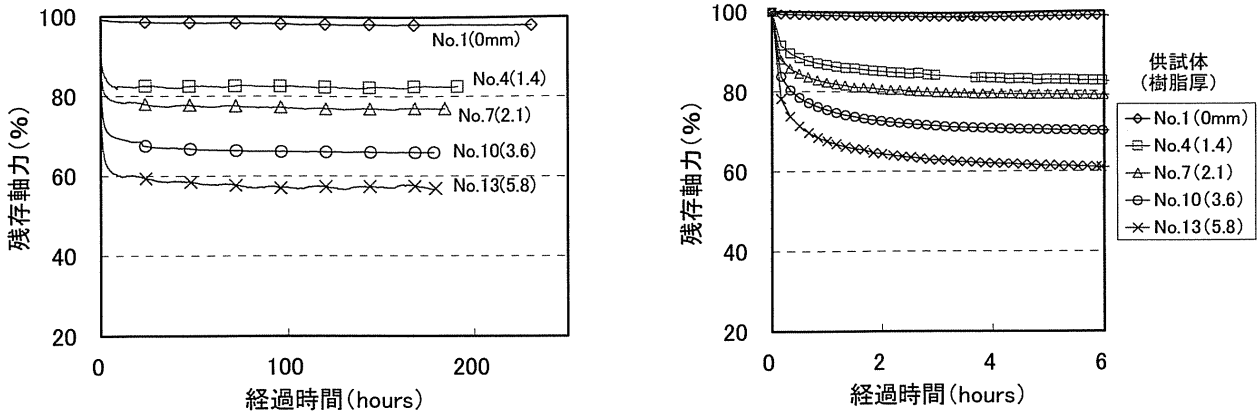
(b) 供試体 No.14(樹脂厚 5.5mm, 目標導入軸力 112kN)



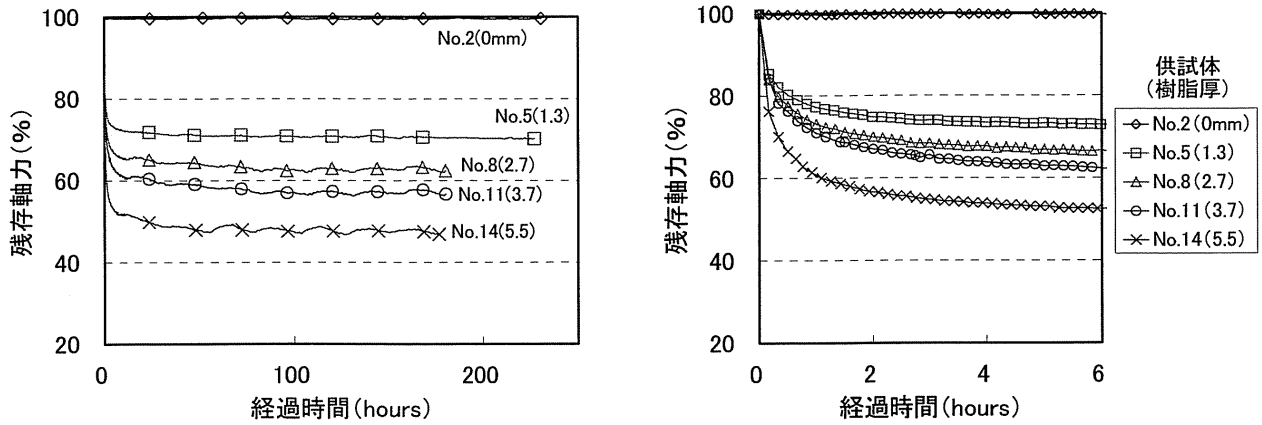
(c) 供試体 No.15(樹脂厚 5.8mm, 目標導入軸力 45kN)

図-5.2.4 各ボルト軸力の経時変化（目標樹脂厚 5mm 供試体)

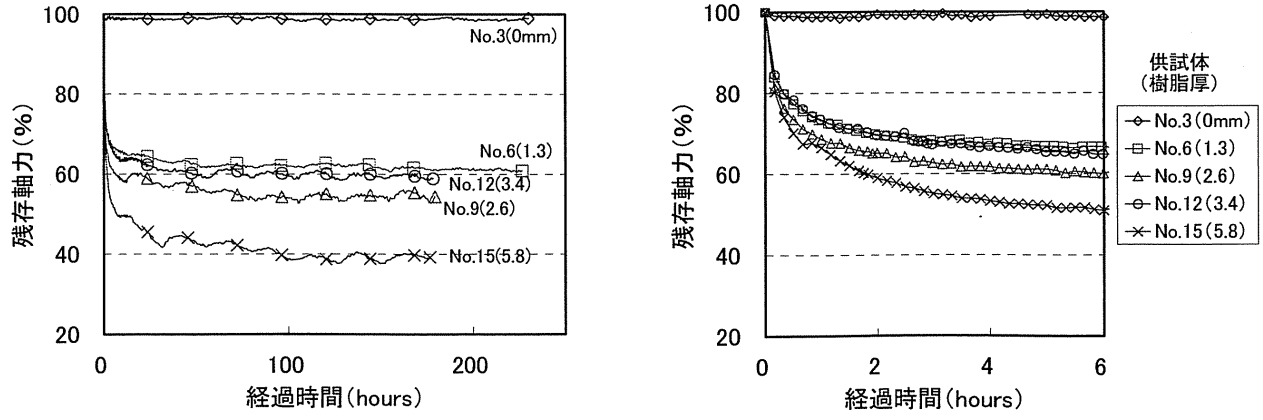
左図:0～250 時間, 右図:0～6 時間



(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-5.2.5　各供試体におけるボルトの平均軸力の経時変化

左図:0～250 時間，右図:0～6 時間

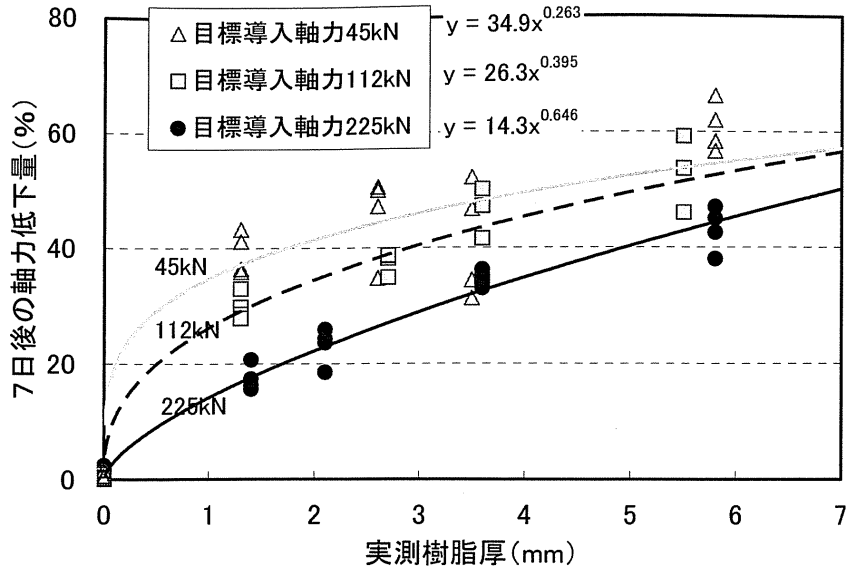


図-5.2.6　ボルト締付けから 7 日後の軸力低下量と実測樹脂厚，目標導入軸力の関係

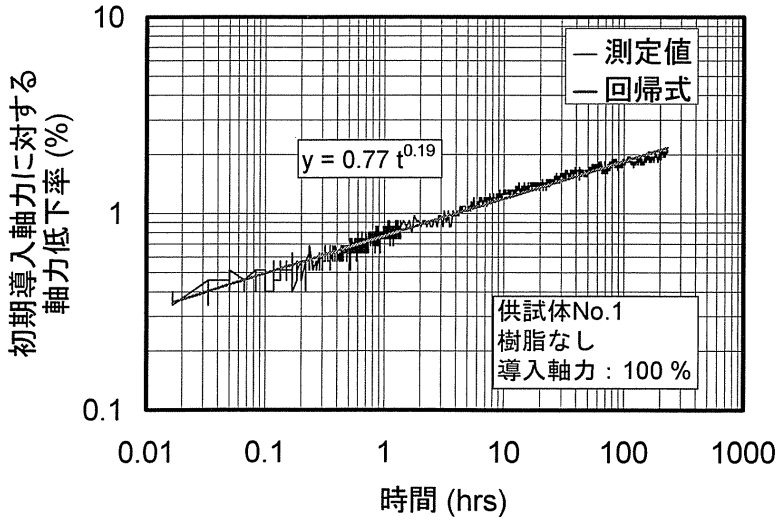


図-5.2.7　樹脂無しにおける高力ボルトのリラクセーション(供試体 No.1)

(供試体 No.2～3 は，リラクセーションがほとんど生じていなかった)

5.3　ボルト締付けに伴う当て板のひずみ

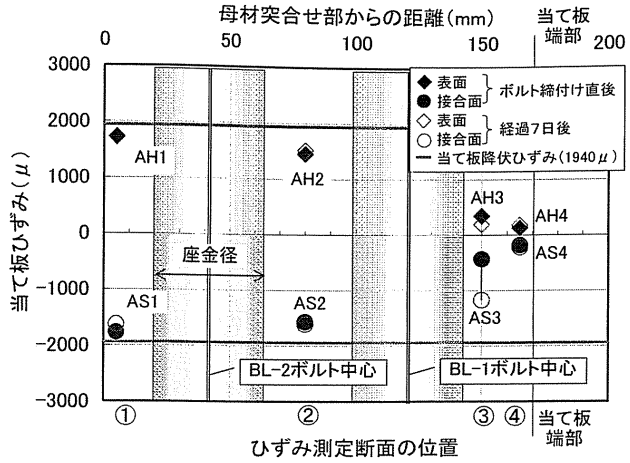
図-5.3.1 に，ボルト締付けに伴う当て板の表面及び接合面におけるひずみ測定結果を示す。図中の数値は，正が引張側，負が圧縮側を表す。また，当て板の降伏ひずみを併記した。なお，一部のひずみゲージは，組立て後において絶縁していたことを確認しており，その部分のデータが欠けている(図-5.3.1(b),(c),(e),(f))。

いずれの図においても，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でのひずみは樹脂が厚い供試体 No.13 の方が供試体 No.7 よりも大きかった。供試体 No.13(同 5.8mm)の場合，締付け直後で 2500 μ 程度であり，降伏ひずみ 1940 μ を超えていた。供試体 No.13 における測定断面②のひずみは，経過 7 日後において約 20%の低下が見られた。一方，供試体 No.7 では，経過時間に伴うひずみの明確な変化が見られなかった。

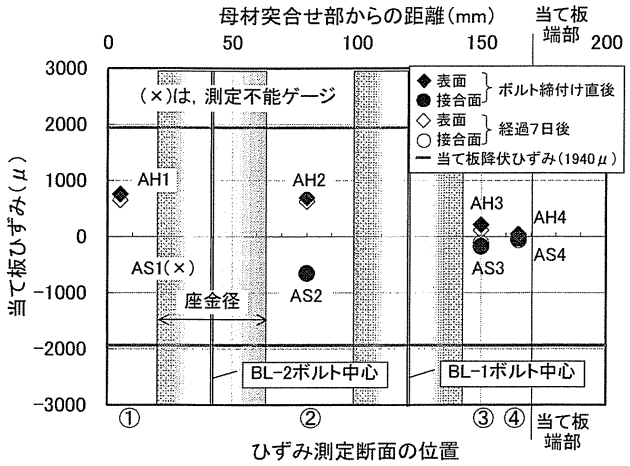
供試体 No.13 の測定断面③では，表面及び接合面ともに引張ひずみが生じていた。ひずみゲージが座金に近いことから，樹脂が厚くかつ軸力が高い場合に，座金付近における当て板の局部的な変形の影響が出た可能性もあるが明確ではない。

図-5.3.2 に，当て板側面でのひずみの測定結果を，図-5.3.1 と同様に示す。図-5.3.1 に示した供試体の中心線上(平面図で見た場合)で測定した場合に比べて，側面のひずみ変化は 1/5 以下とごく軽微であり，降伏ひずみを超える箇所も見られなかった。

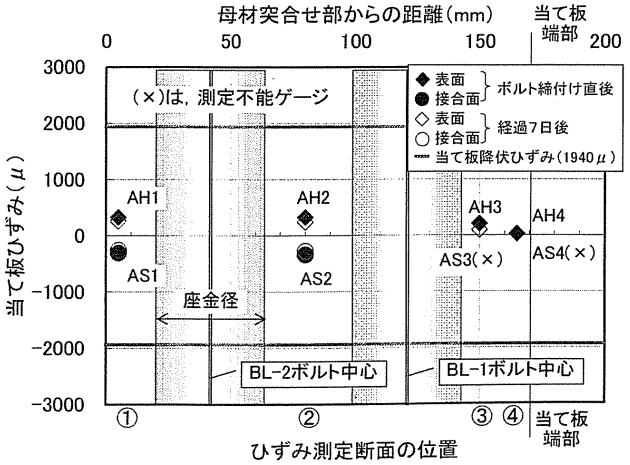
参考として，図-5.3.3 に，ボルト締付けに伴う当て板の局部的な曲げ変形のイメージを示す。本試験では，接合面の樹脂が厚くなるほど，その変形が大きくなる傾向が確認できた。



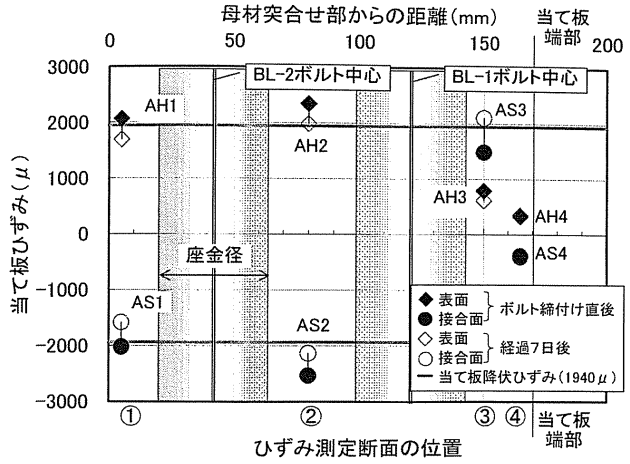
(a) 供試体 No.7
(樹脂厚 2.1mm, 目標導入軸力 225kN)



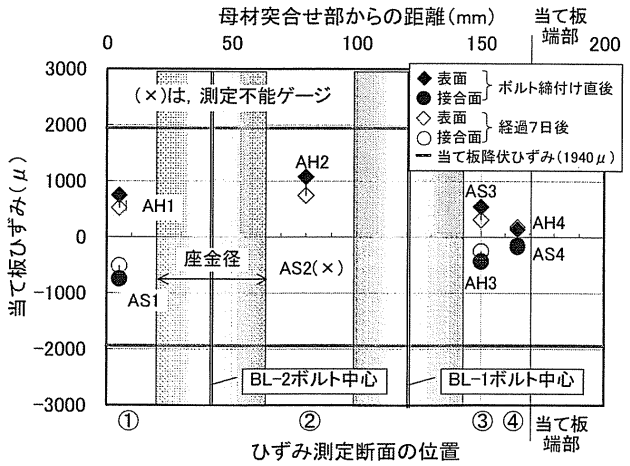
(b) 供試体 No.8
(樹脂厚 2.7mm, 目標導入軸力 112kN)



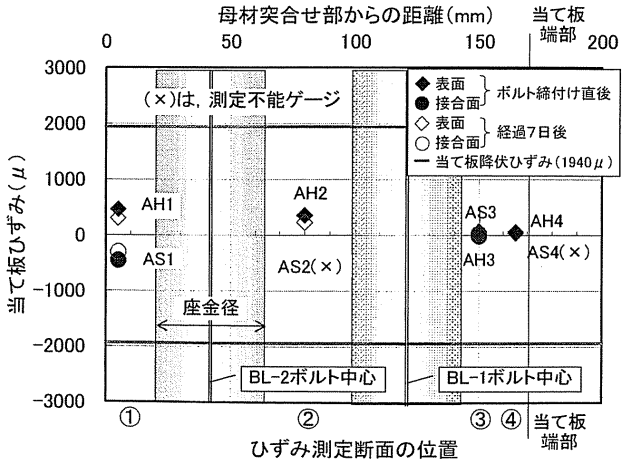
(c) 供試体 No.9
(樹脂厚 2.6mm, 目標導入軸力 45kN)



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

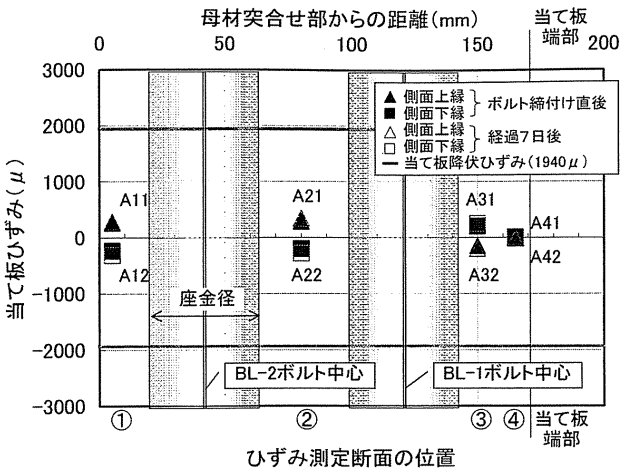


(e) 供試体 No.14
(樹脂厚 5.5mm, 目標導入軸力 112kN)

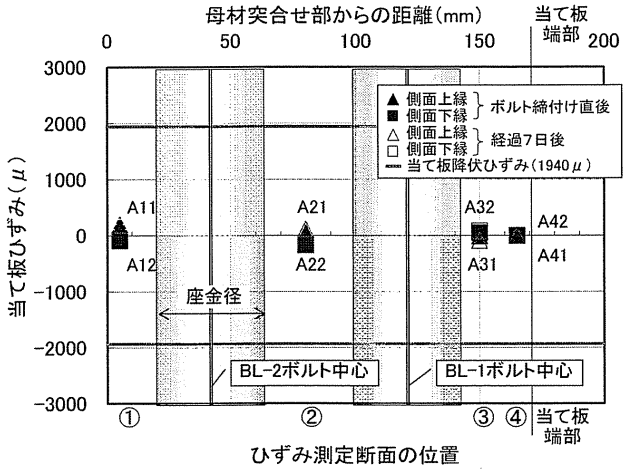


(f) 供試体 No.15
(樹脂厚 5.8mm, 目標導入軸力 45kN)

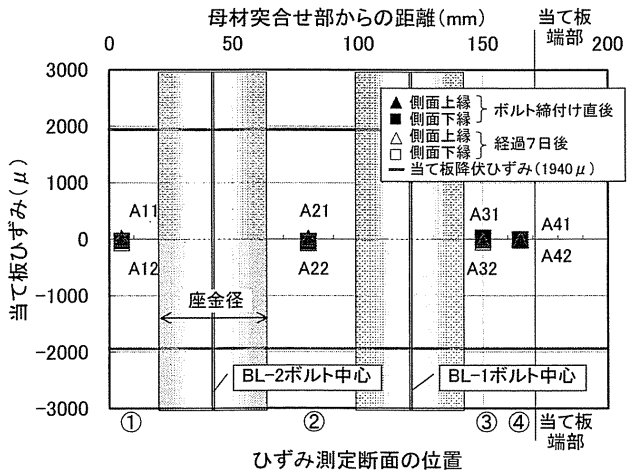
図-5.3.1 ボルト締付けに伴う当て板のひずみ (当て板の表面及び接合面)



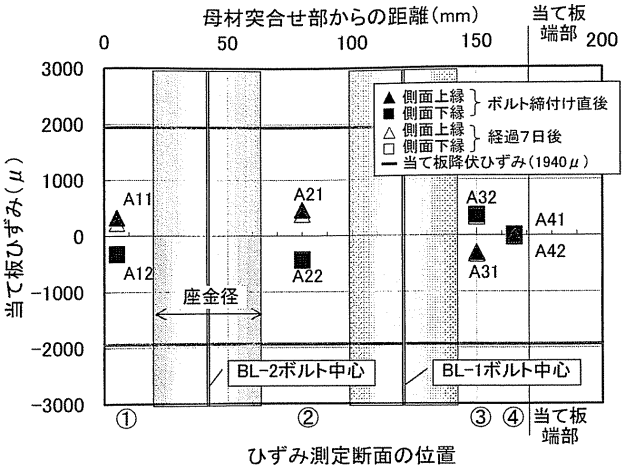
(a) 供試体 No.7
(樹脂厚 2.1mm, 目標導入軸力 225kN)



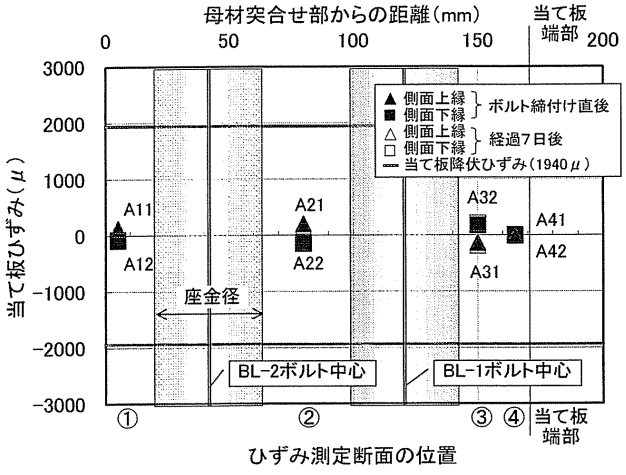
(b) 供試体 No.8
(樹脂厚 2.7mm, 目標導入軸力 112kN)



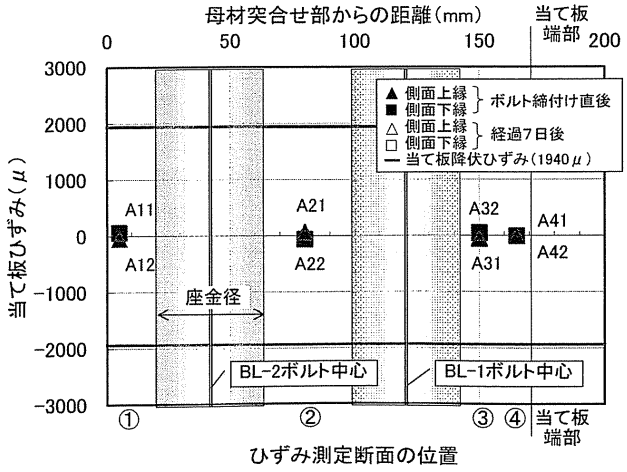
(c) 供試体 No.9
(樹脂厚 2.6mm, 目標導入軸力 45kN)



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



(e) 供試体 No.14
(樹脂厚 5.5mm, 目標導入軸力 112kN)



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

図-5.3.2 ボルト締付けに伴う当て板のひずみ (当て板の側面)

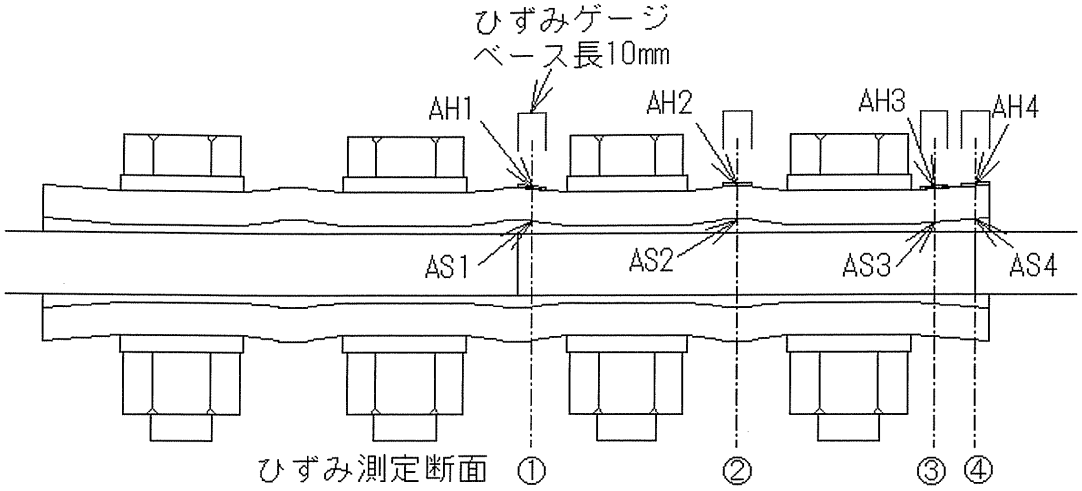


図-5.3.3　当て板の変形の模式図

6. 静的引張試験結果

6.1 すべりの発生状況

表-6.1.1 に，各供試体のすべり発生状況を示す。また，図-6.1.1～5 に，各供試体における荷重－ずれ変位(左図：パイゲージ，右図：クリップゲージ，図-4.4.2～3 を参照)の関係を示す。

パイゲージで測定した母材突合せ部における母材間の変位や，クリップゲージで測定した当て板の両端部における母材と当て板間のずれ変位は，いずれもすべり音の発生とともに急激に増加した場合がほとんどであった。なお，樹脂有りの供試体では，初回すべり時に，パイゲージやクリップゲージが外れる場合もあった。

表-6.1.1 には，各供試体のすべり面の位置も示した。

樹脂無しの供試体 No.1 及び No.2 では，すべりの発生音と同時にすべりが生じた。供試体 No.3 では，すべり音無しに上側の接合面 2 面(B 側及び N 側)ですべりが生じた。なお，樹脂無しの供試体 3 体のすべり面は上側の接合面 2 面(B 側及び N 側)であった(図-6.1.6(a))。

樹脂有りの供試体 No.13 では，すべりの発生音とともに上側の接合面 B 側と下側の接合面 N 側で同時にすべりが生じた。樹脂有りの場合では，初回のすべり音の発生と同時に，図-6.1.6(b)に示した供試体 No.13 の例のように，すべり面が同一母材の両面でなく，かぎ状となる場合が多く見られた。

初回のすべり後，さらに載荷を続けて残り部分のすべり(2 回目のすべり)も確認した。すべりの発生時点については，図-6.1.1～5 において初回のすべりを○，2 回目のすべりを□で表す。初回のすべりの発生から 2 回目のすべり発生までの挙動については，樹脂無しの供試体では，荷重が一旦横ばいの状態で変位が増加していたが，樹脂有りの供試体では，No.10 を除き，すべり発生後に荷重の急激な低下，変位の急激な増加が見られた。

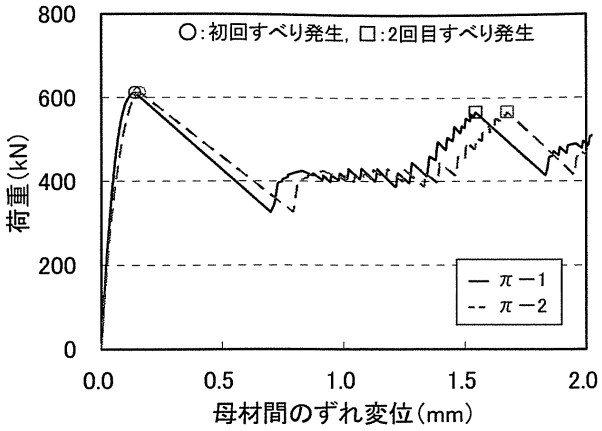
表-6.1.1　各供試体のすべり発生状況

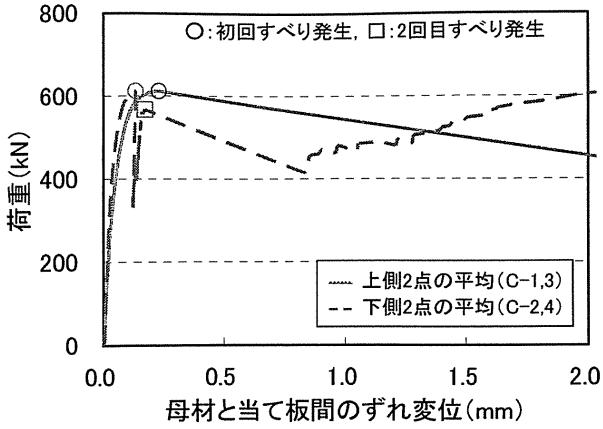
供試体No.	樹脂厚(mm) 目標値	樹脂厚(mm) 実測値	目標導入軸力(kN)	引張試験前軸力*(kN) 上側	引張試験前軸力*(kN) 下側	接合面ゲージの有無	すべり（初回） すべり荷重(kN)	すべり面	すべり音の有無	樹脂のひび割れの有無	すべり（２回目） すべり荷重(kN)	すべり面	すべり音の有無	樹脂のひび割れの有無	備　考
1	0（樹脂なし）		225	221	220		612	(上側)：両側 (下側)：－	○		566	(上側)：　－ (下側)：両側	○		破断まで載荷 破断荷重931kN
2			112	111	112		412	(上側)：両側 (下側)：－	○		407	(上側)：　－ (下側)：両側	○		破断まで載荷 破断荷重933kN
3			45	44	45		135	(上側)：両側 (下側)：B側			139	(上側)：　－ (下側)：N側			破断まで載荷 破断荷重919kN
4	1	1.4	225	183	188		700	(上側)：両面 (下側)：－	○	○	655	(上側)：　－ (下側)：両面			
5		1.3	112	79	78		655	(上側)：N側 (下側)：B側	○	○	621	(上側)：B側 (下側)：N側	○	○	
6		1.3	45	26	29		596	(上側)：B側 (下側)：両側	○	○	317	(上側)：N側 (下側)：－	○		
7	2	2.1	225	178	169	○	676	(上側)：両側 (下側)：－	○	○	689	(上側)：－ (下側)：両側	○	○	
8		2.7	112	71	69	○	530	(上側)：B側 (下側)：N側	○	○	418	(上側)：B側 (下側)：－	○	○	2回目直後，下側ボルト面ですべり（403kN）
9		2.6	45	26	23	○	420	(上側)：B側 (下側)：N側	○	○	255	(上側)：N側 (下側)：B側	○		
10	3	3.6	225	147	149		668	(上側)：N側 (下側)：B側		○	593	(上側)：B側 (下側)：N側			
11		3.7	112	65	62		628	(上側)：両側 (下側)：B側	○	○	421	(上側)：－ (下側)：N側	○		
12		3.4	45	30	23		512	(上側)：－ (下側)：両側	○	○	465	(上側)：両側 (下側)：－	○	○	
13	5	5.8	225	134	122	○	654	(上側)：B側 (下側)：N側	○	○	485	(上側)：N側 (下側)：B側	○		
14		5.5	112	53	52	○	485	(上側)：N側 (下側)：B側	○	○	271	(上側)：B側 (下側)：N側	○		
15		5.8	45	17	18	○	370	(上側)：両側 (下側)：B側	○	○	289	(上側)：－ (下側)：N側	○		

注１）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)

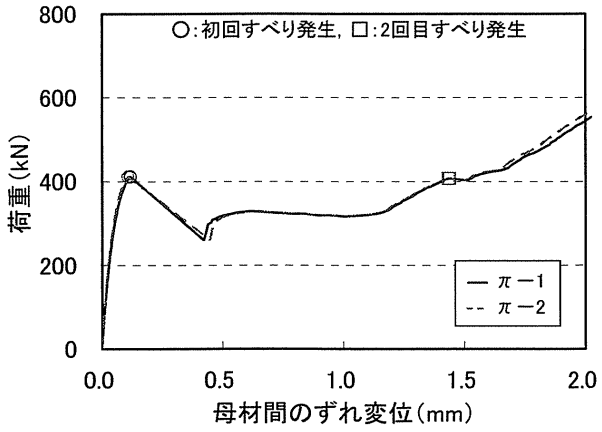
注２）接合面ゲージ，すべり音，樹脂のひび割れについては，有りの場合を○で示す

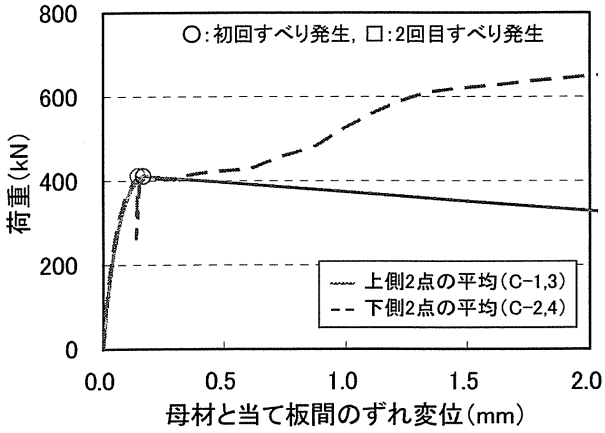
注３）樹脂のひび割れの有無は，引張試験中の供試体側面からの観察結果として示す（側面の詳細なひび割れの確認は，試験後の観察によった）



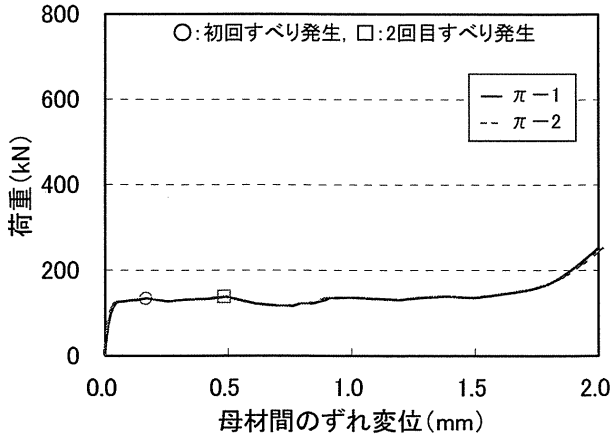


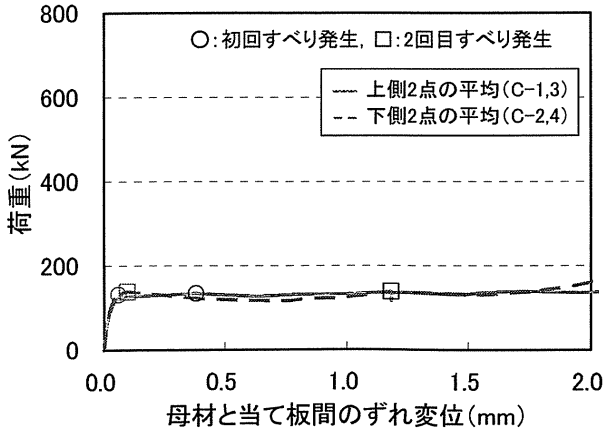
(a) 供試体 No.1 (樹脂無し, 目標導入軸力 225kN)





(b) 供試体 No.2 (樹脂無し, 目標導入軸力 112kN)

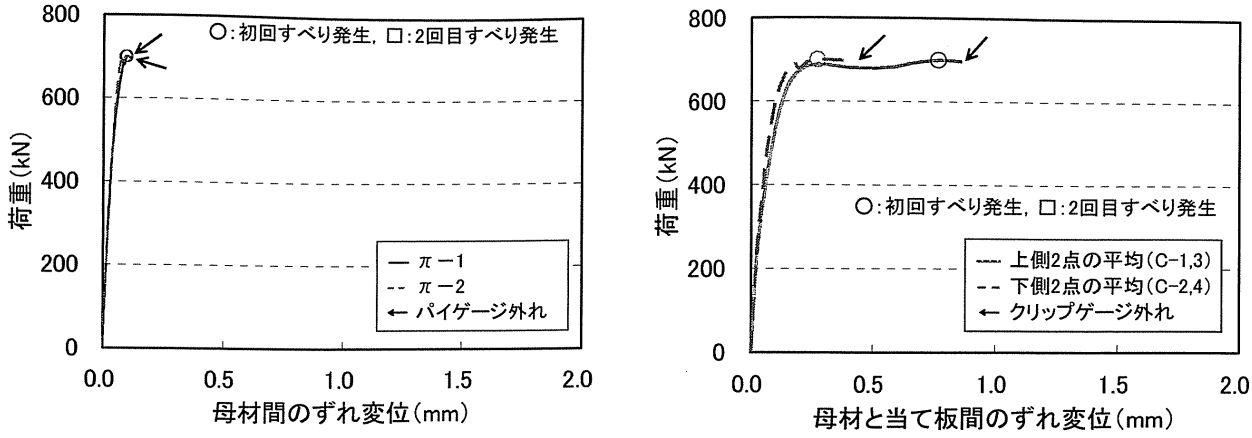




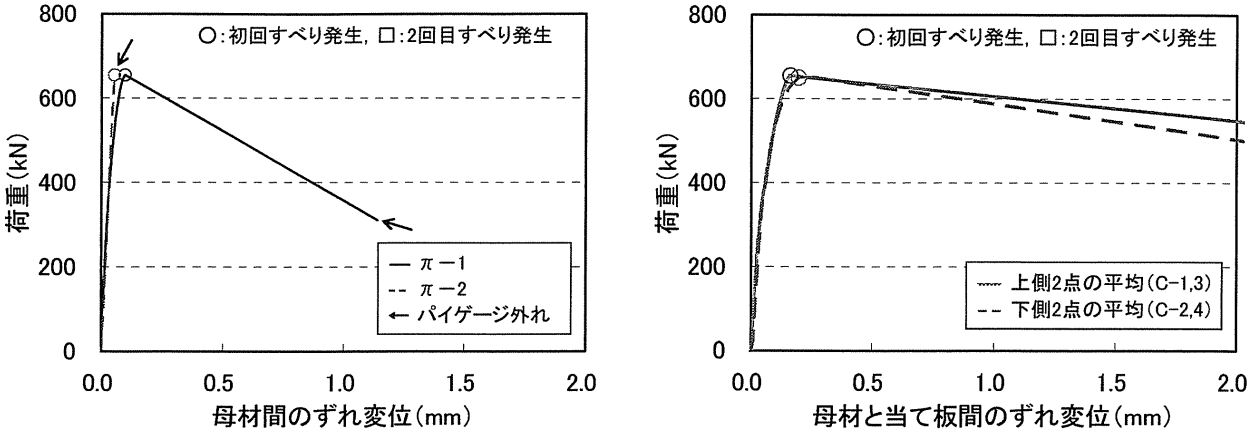
(c) 供試体 No.3 (樹脂無し, 目標導入軸力 45kN)

図-6.1.1 荷重－ずれ変位 (樹脂無しの供試体)

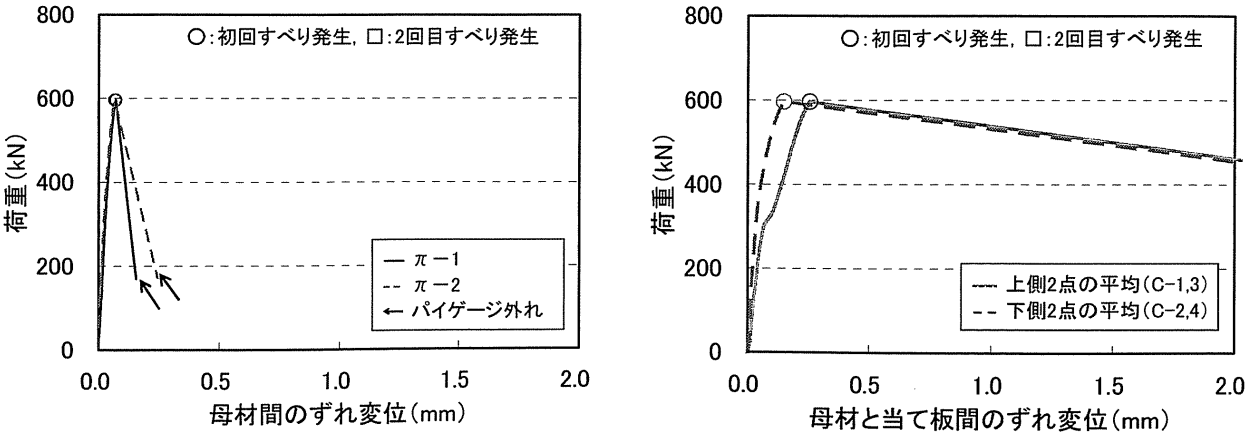
左図：パイゲージ, 右図：クリップゲージ



(a) 供試体 No.4（樹脂厚 1.4mm, 目標導入軸力 225kN)



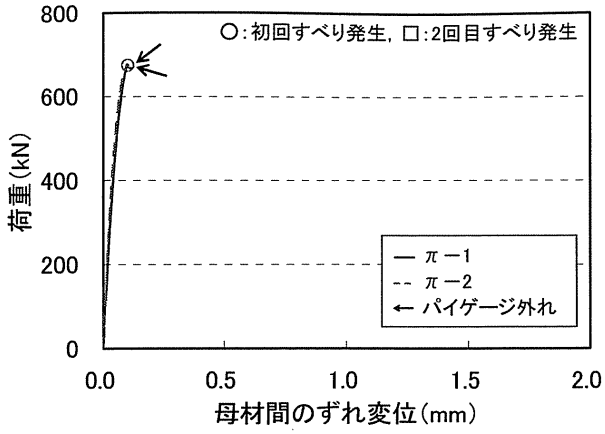
(b) 供試体 No.5（樹脂厚 1.3mm, 目標導入軸力 112kN)

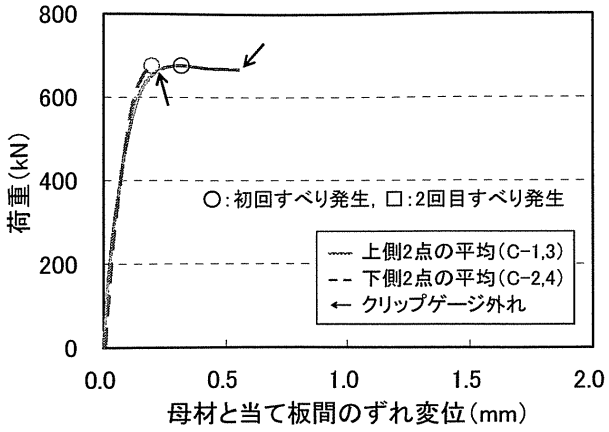


(c) 供試体 No.6（樹脂厚 1.3mm, 目標導入軸力 45kN)

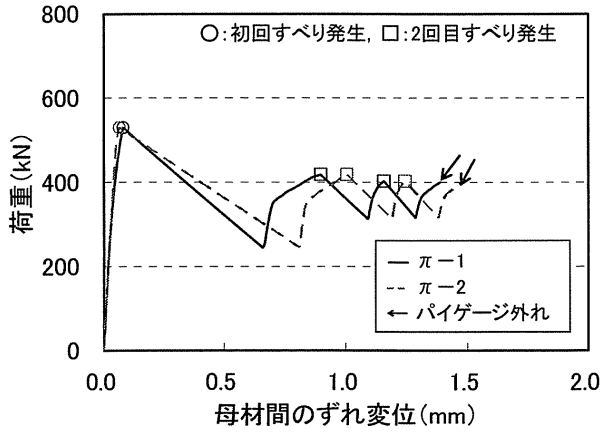
図-6.1.2 荷重－ずれ変位（目標樹脂厚 1mm 供試体)

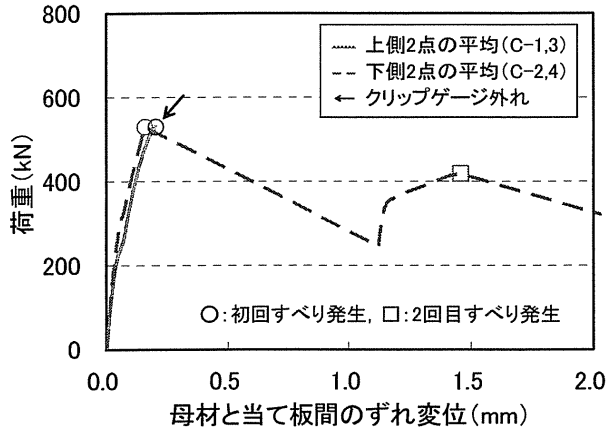
左図：パイゲージ, 右図：クリップゲージ



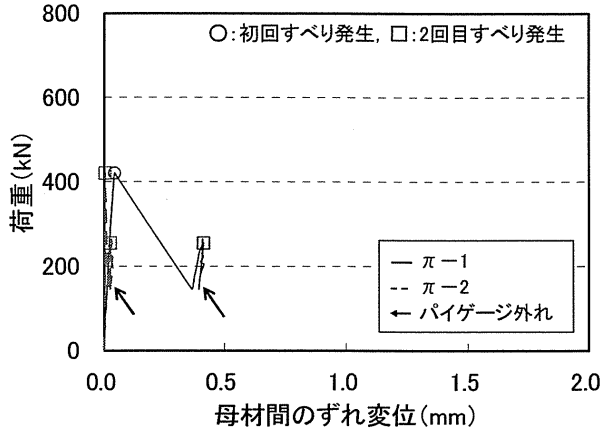


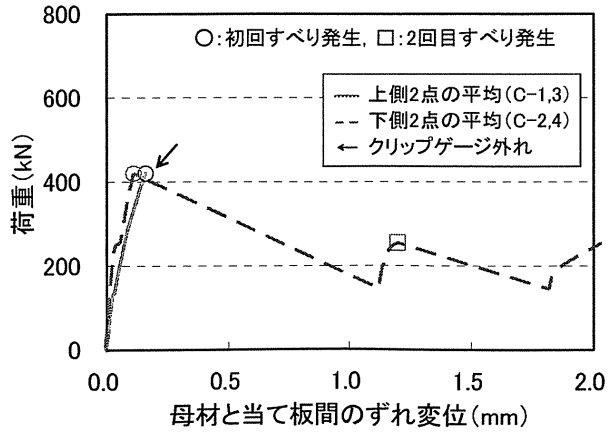
(a) 供試体 No.7（樹脂厚 2.1mm，目標導入軸力 225kN）





(b) 供試体 No.8（樹脂厚 2.7mm，目標導入軸力 112kN）

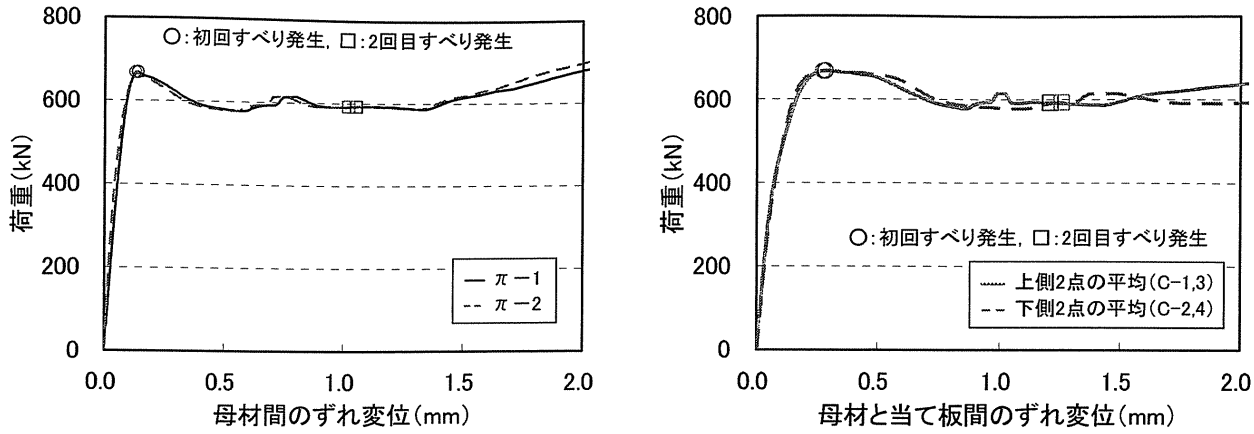




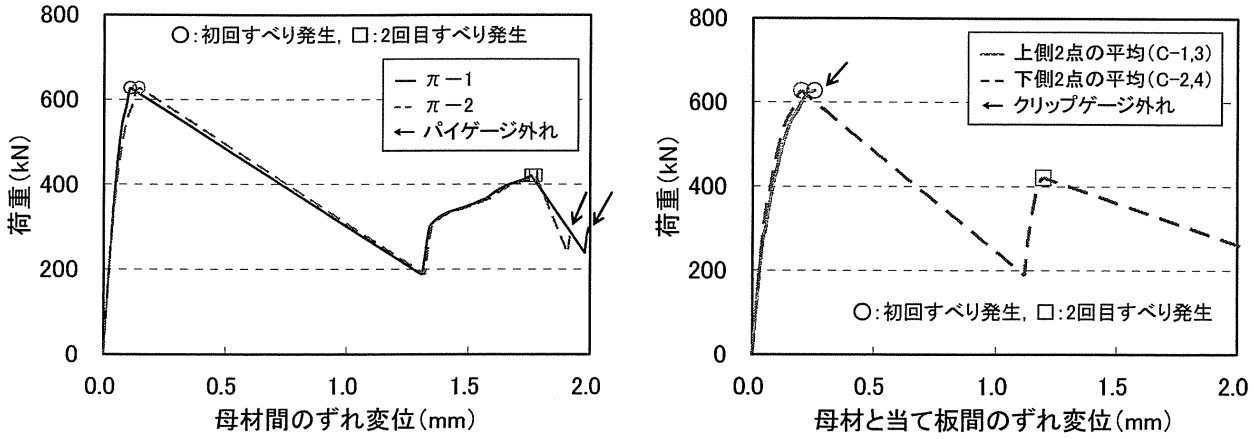
(c) 供試体 No.9（樹脂厚 2.6mm，目標導入軸力 45kN）

図-6.1.3　荷重－ずれ変位（目標樹脂厚 2mm 供試体）

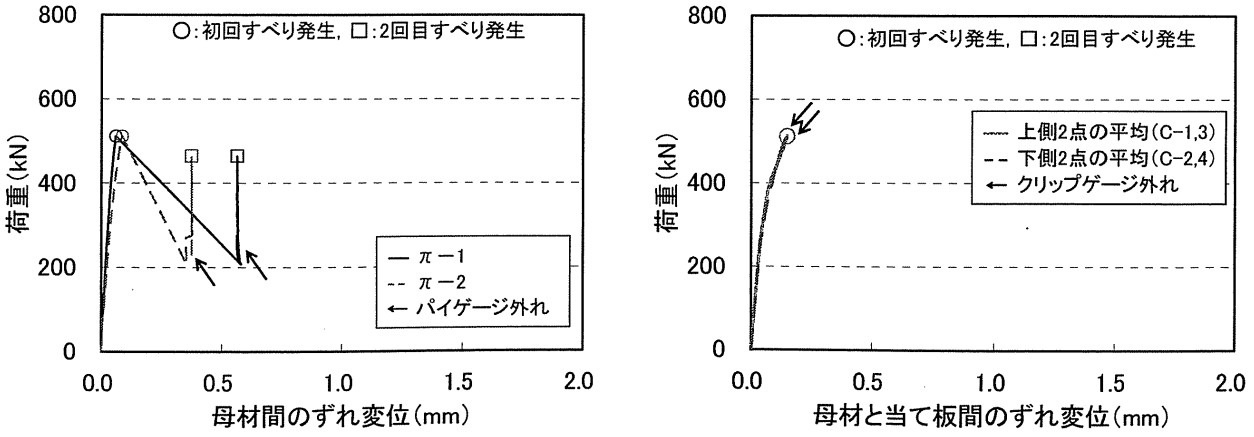
左図：パイゲージ，右図：クリップゲージ



(a) 供試体 No.10（樹脂厚 3.6mm，目標導入軸力 225kN）



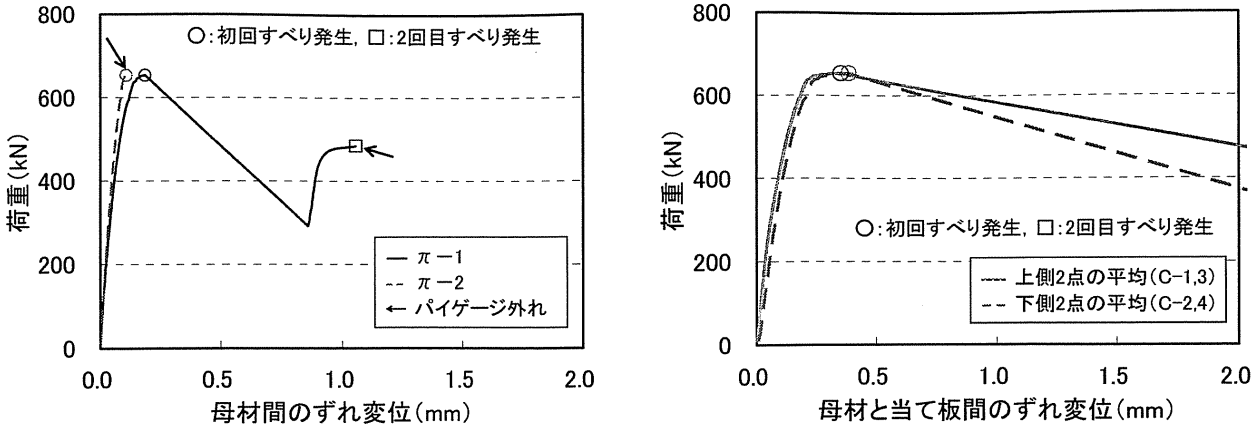
(b) 供試体 No.11（樹脂厚 3.7mm，目標導入軸力 115kN）



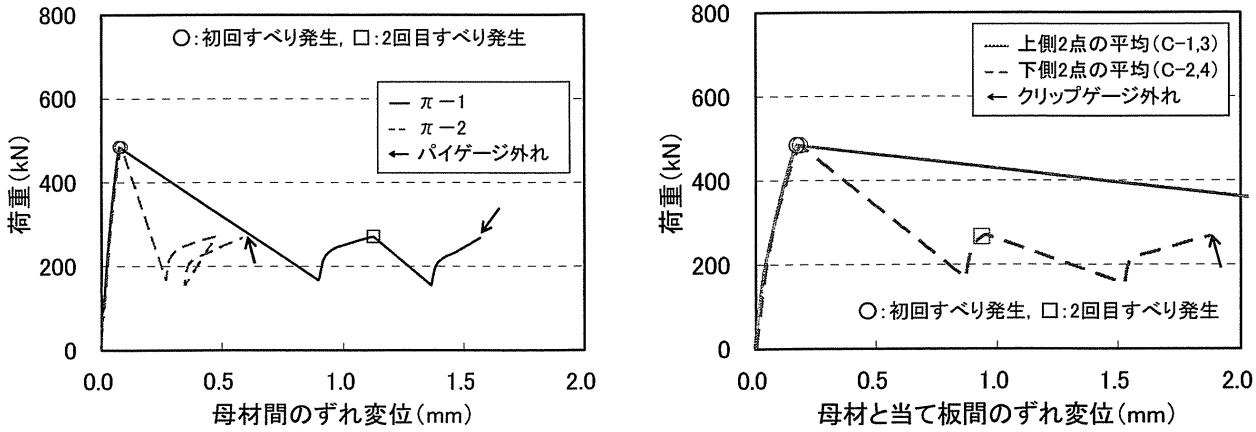
(c) 供試体 No.12（樹脂厚 3.4mm，目標導入軸力 45kN）

図-6.1.4　荷重－ずれ変位（目標樹脂厚 3mm 供試体）

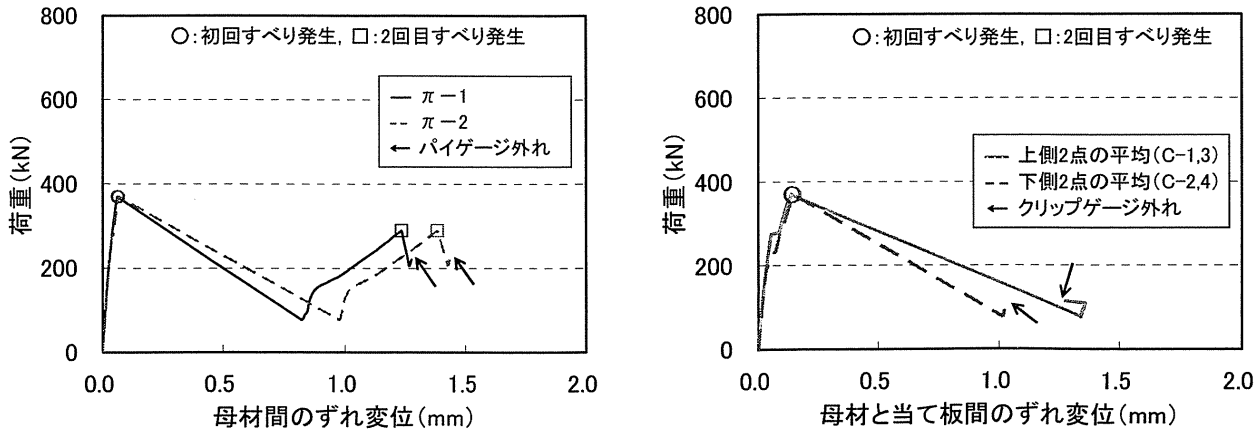
左図：パイゲージ，右図：クリップゲージ



(a) 供試体 No.13（樹脂厚 5.8mm，目標導入軸力 225kN）



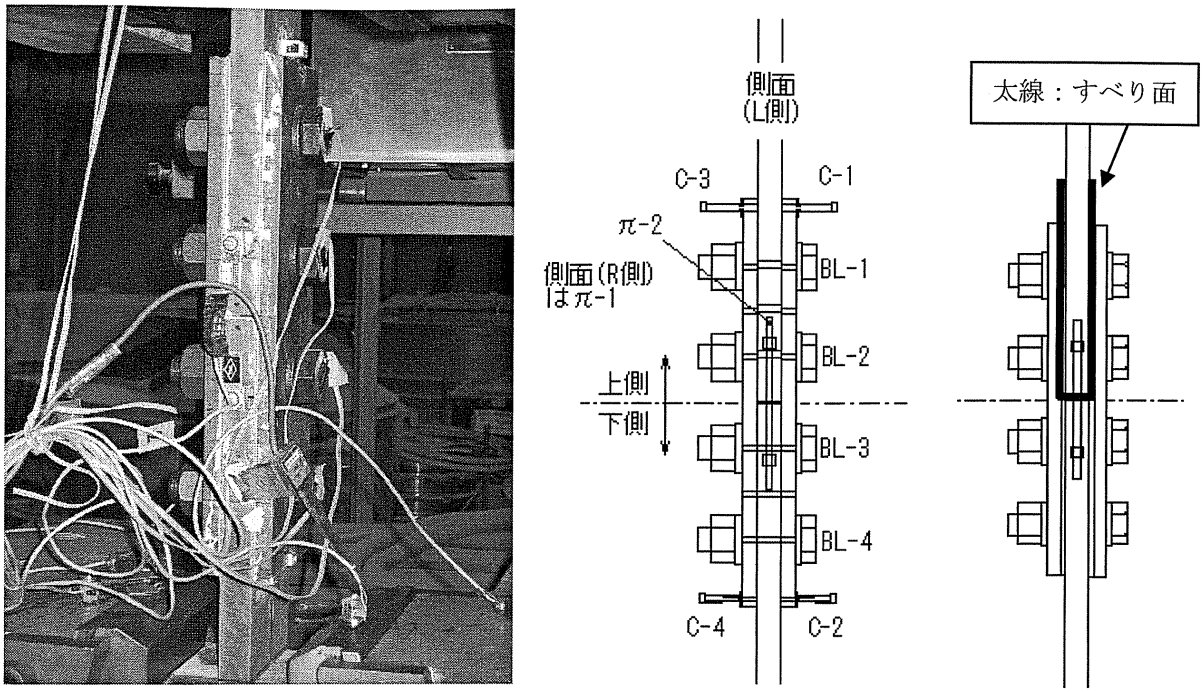
(b) 供試体 No.14（樹脂厚 5.5mm，目標導入軸力 112kN）



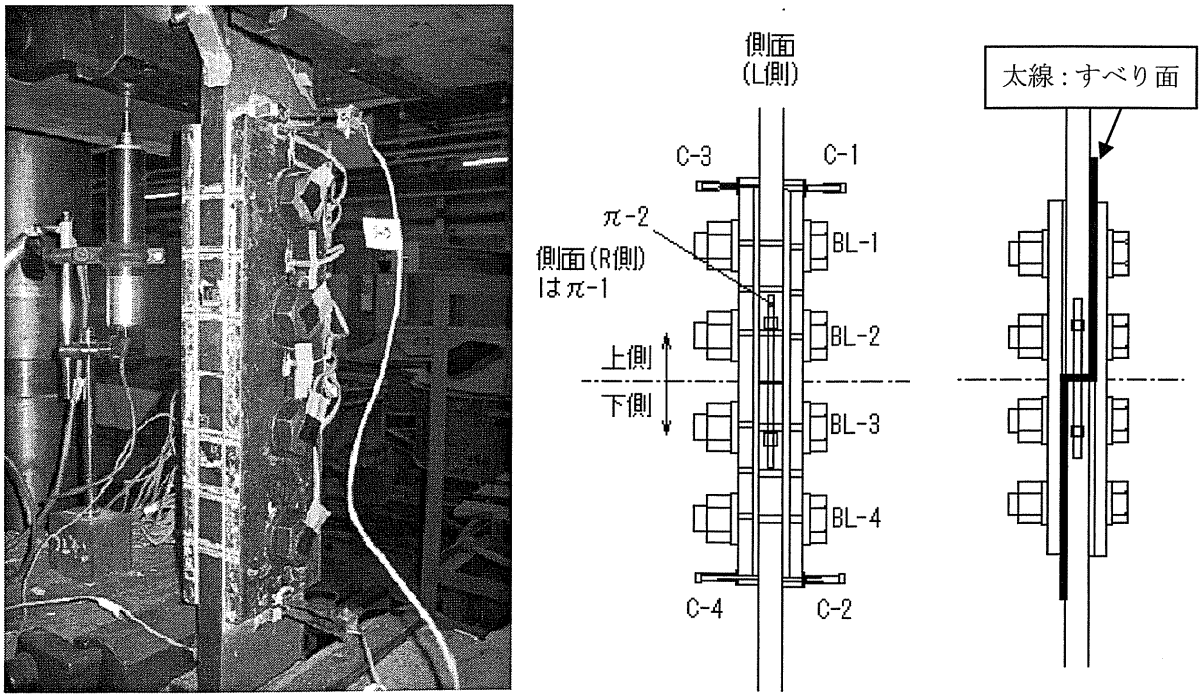
(c) 供試体 No.15（樹脂厚 5.8mm，目標導入軸力 45kN）

図-6.1.5　荷重－ずれ変位（目標樹脂厚 5mm 供試体）

左図：パイゲージ，右図：クリップゲージ



(a) 供試体 No.1（樹脂無し）



(b) 供試体 No.13（樹脂厚 5.8mm）

図-6.1.6　初回のすべり発生直後の状況
(供試体 No.3，No.13 の例)

6.2　樹脂の破壊状況

(1) 載荷中の観察

載荷中に供試体を側面から観察したところ，いずれの樹脂厚の場合も，初回のすべり発生と同時に樹脂のひび割れが認められた。本文では，図-6.2.1 のとおり，樹脂有りの供試体における主な樹脂のひび割れを，その発生位置に応じて(Ⅰ)～(Ⅲ)に分類する。図-6.2.2～7 に，樹脂のひび割れの例を示す。ひび割れ(Ⅰ)は，　目標樹脂厚 1mm の供試体を除いた樹脂有りの供試体 No.7～15 で見られた。ひび割れ(Ⅱ)は，供試体 No.13，14(同 5mm)で見られた。ひび割れ(Ⅲ)は，供試体 No.7～9(同 2mm)及び No.13～15(同 5mm)のほか，供試体 No.4～6(同 1mm)で見られた。

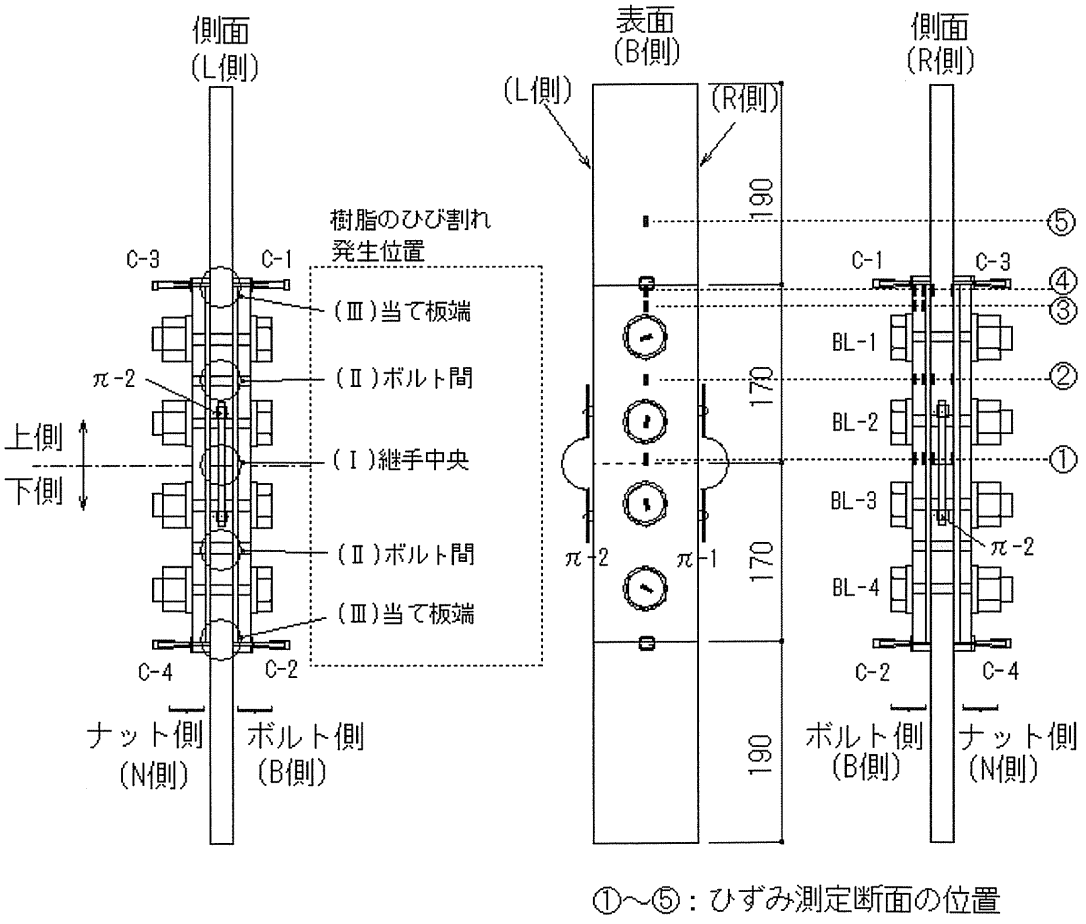
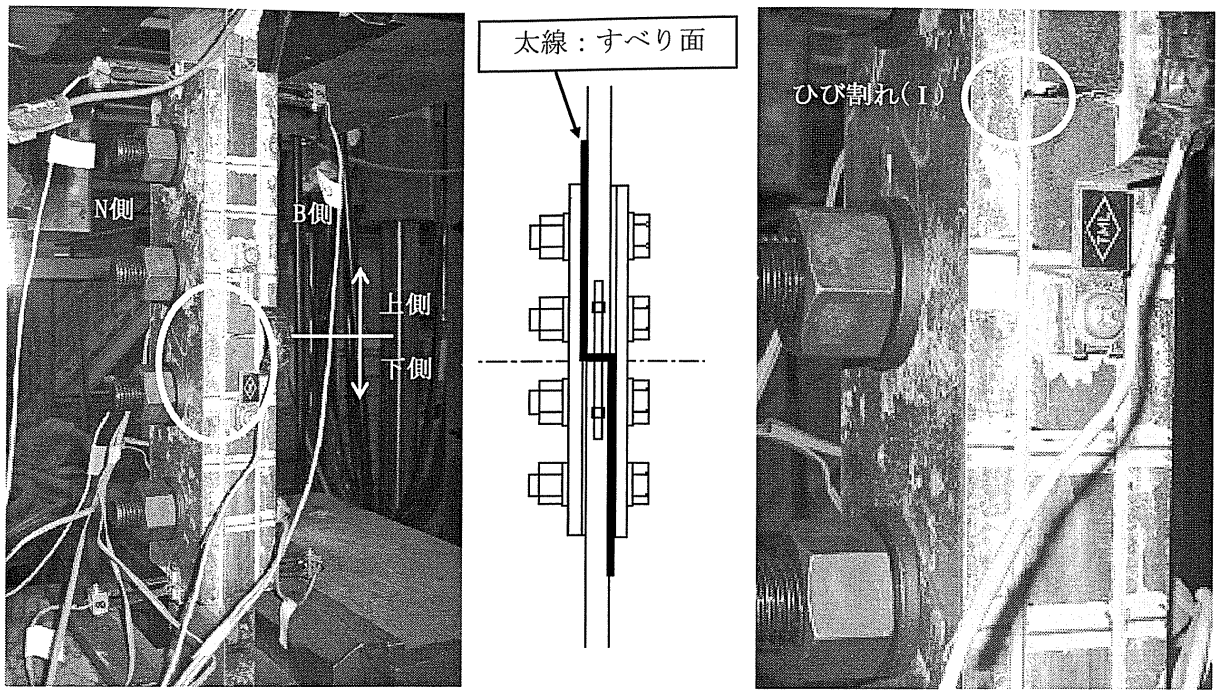


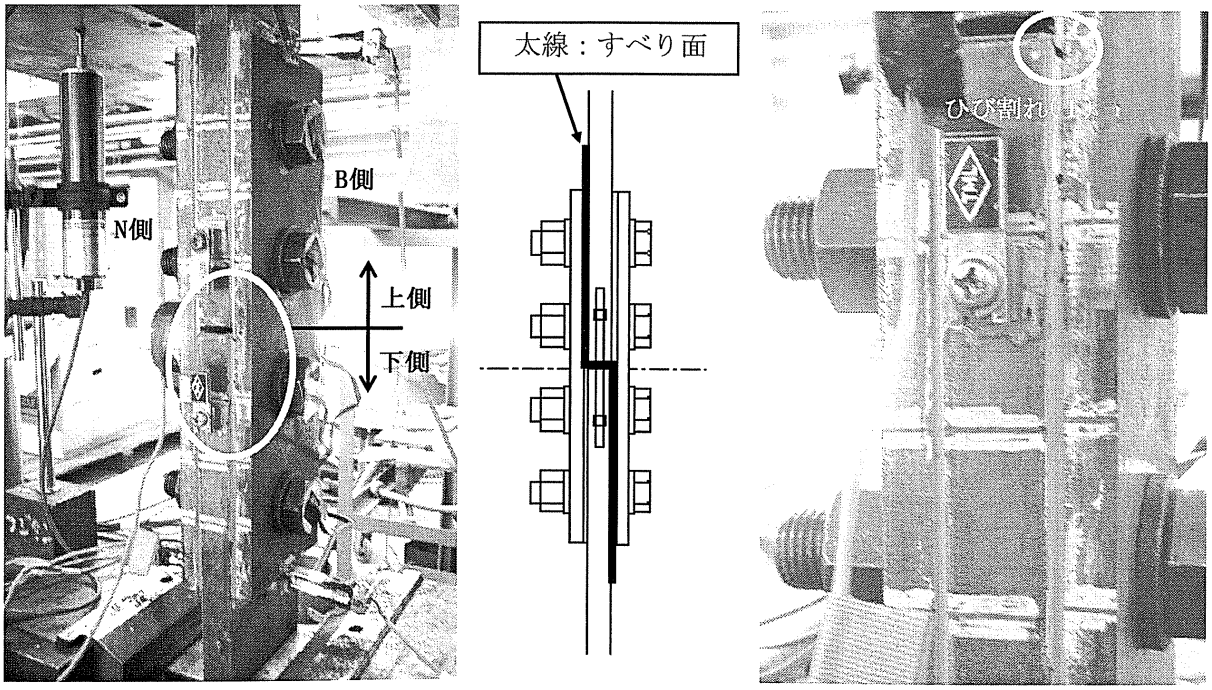
図-6.2.1　載荷に伴う樹脂のひび割れ発生位置



(a) すべり発生時
すべり位置；上側接合面(N 側),下側接合面(B 側)

(b) 樹脂のひび割れ
(左図の○囲い部の拡大)

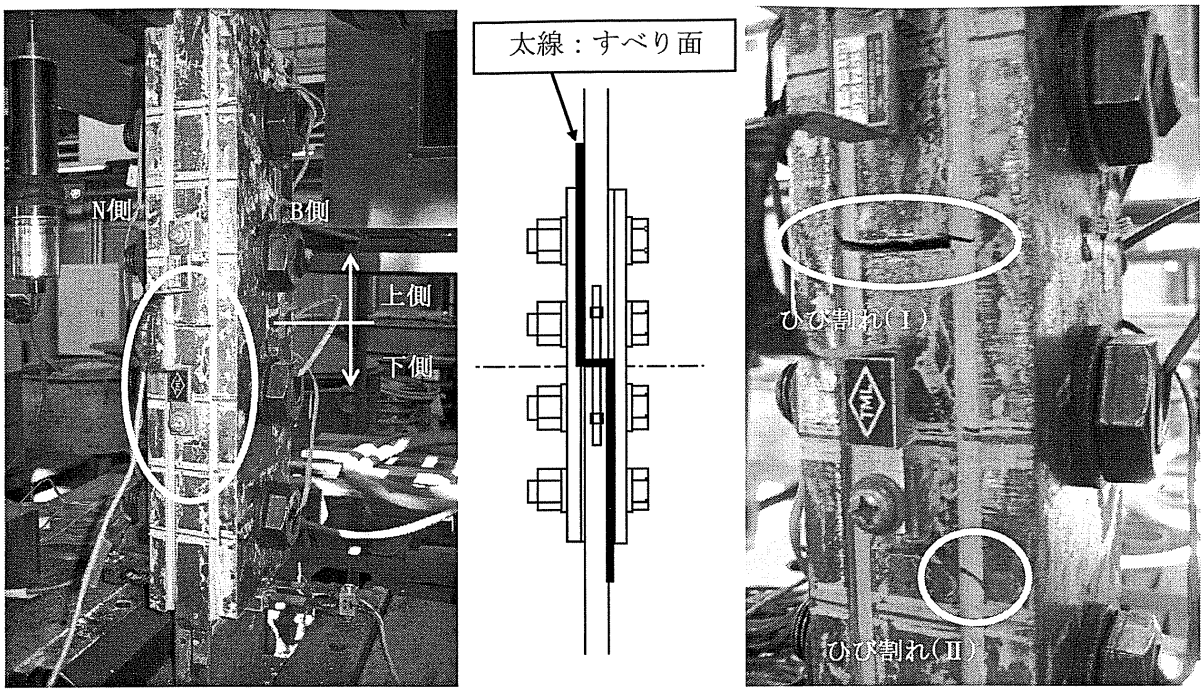
図-6.2.2　すべりと同時に発生した樹脂のひび割れ(Ⅰ)
(供試体 No.10：樹脂厚 3.6mm，目標導入軸力 225kN)



(a) すべり発生時
すべり位置；上側接合面(N 側),下側接合面(B 側)

(b) 樹脂のひび割れ
(左図の○囲い部の拡大)

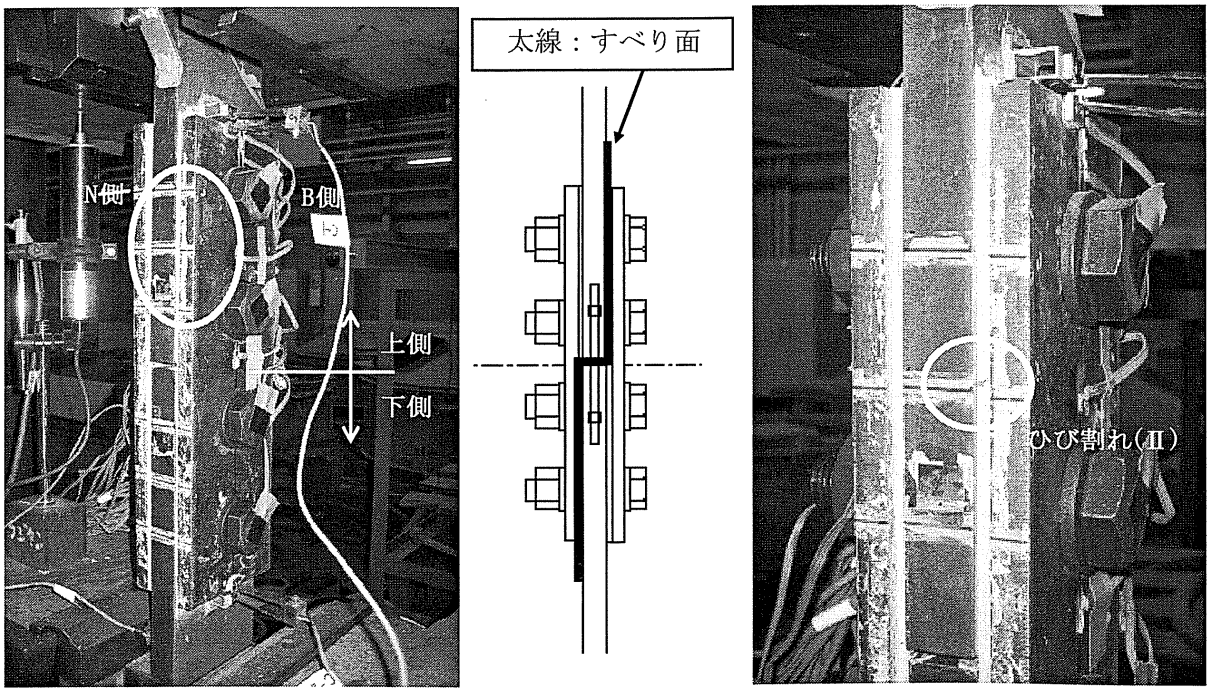
図-6.2.3　すべりと同時に発生した樹脂のひび割れ(Ⅰ)
(供試体 No.11：樹脂厚 3.7mm，目標導入軸力 112kN)



(a) すべり発生時
すべり位置；上側接合面(N 側),下側接合面(B 側)

(b) 樹脂のひび割れ
(左図の○囲い部の拡大)

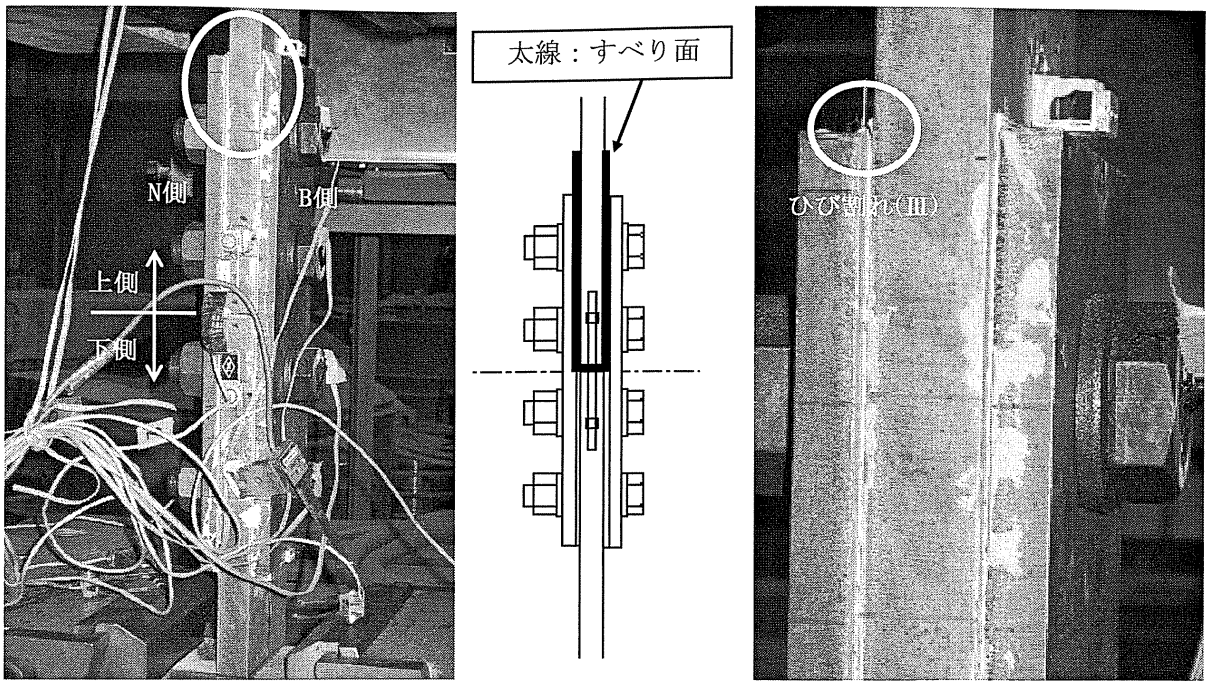
図-6.2.4　すべりと同時に発生した樹脂のひび割れ(Ⅰ),(Ⅱ)
(供試体 No.14：樹脂厚 5.5mm，目標導入軸力 112kN)



(a) すべり発生時
すべり位置：上側接合面(B 側),下側接合面(N 側)

(b) 樹脂のひび割れ
(左図の○囲い部の拡大)

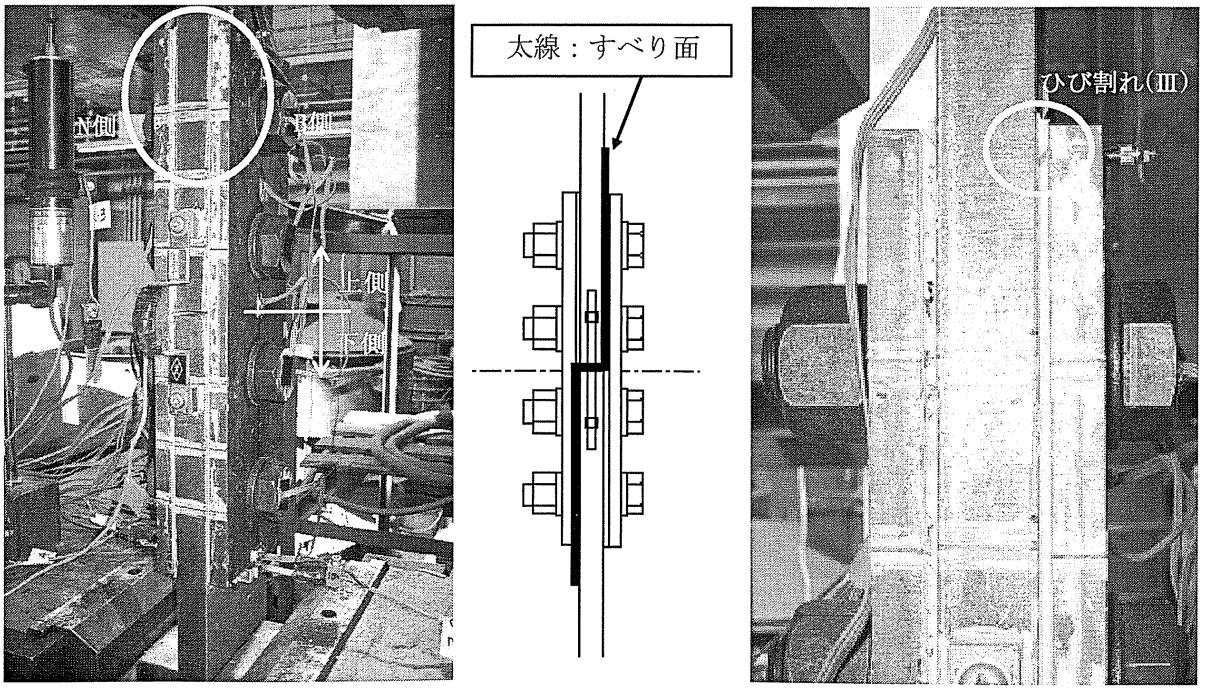
図-6.2.5　すべりと同時に発生した樹脂のひび割れ(Ⅱ)
(供試体 No.13：樹脂厚 5.8mm，目標導入軸力 225kN)



(a) すべり発生時
すべり位置：上側接合面(B,N 側)

(b) 樹脂のひび割れ
(左図の○囲い部の拡大)

図-6.2.6　すべりと同時に発生した樹脂のひび割れ(III)
(供試体 No.4：樹脂厚 1.4mm，目標導入軸力 225kN)



(a) すべり発生時
すべり位置：上側接合面(B 側),下側接合面(N 側)

(b) 樹脂のひび割れ
(左図の○囲い部の拡大)

図-6.2.7　すべりと同時に発生した樹脂のひび割れ(III)
(供試体 No.9：樹脂厚 2.6mm，目標導入軸力 45kN)

(2) 載荷後の観察

a) 解体前の外観

表-6.2.1 に，解体前の外観から樹脂のひび割れを確認した結果を示す。載荷中の観察で認められず，解体前の外観で確認したひび割れについては，表中，2 回目のすべり発生時の欄に(○)で示した。ただし，2 回目のすべり発生と同時に生じたひび割れかは明らかでない。

すべての供試体の樹脂においてひび割れ(Ⅰ)，あるいはひび割れ(Ⅲ)を確認した。接合面にひずみゲージを貼付けた供試体 No.7～9(目標樹脂厚 2mm)の樹脂のひび割れ(Ⅲ)については，ひずみ測定断面③と④の間で見られた。同じくゲージのある供試体 No.13, 14(目標樹脂厚 5mm)では，樹脂のひび割れ(Ⅱ)が認められた。供試体 No.13 の場合は，測定断面②付近の側面で見られたが(図-6.2.5 参照)，供試体 No.14 の場合は，ゲージを貼付けていない方の側面で見られた(図-6.2.4 参照)。

表-6.2.1 樹脂のひび割れ状況（解体前の外観から確認した結果）

供試体 No.	樹脂厚(mm)		目標導入軸力 (kN)	接合面ゲージの有無	初回のすべり発生時				2 回目のすべり発生時			
	目標値	実測値			すべり荷重 (kN)	樹脂のひび割れ			すべり荷重 (kN)	樹脂のひび割れ		
						(Ⅰ)	(Ⅱ)	(Ⅲ)		(Ⅰ)	(Ⅱ)	(Ⅲ)
4	1	1.4	225		700	○		○	655	●		●
5		1.3	112		655			○	621	○		●
6		1.3	45		596			○	317	(○)		●
7	2	2.1	225	○	676	○			689	●		○
8		2.7	112	○	530	○			418	●		○
9		2.6	45	○	420	○		○	255	●		●
10	3	3.6	225		668	○			593	●		(○)
11		3.6	112		628	○			421	●		(○)
12		3.5	45		512	○			465	●		○
13	5	5.8	225	○	654	○	○	○	485	●	●	●
14		5.5	112	○	485	○	○	○	271	●	●	●
15		5.8	45	○	370	○			289	●		○

注 1) ひび割れ有りの場合を○で示す

注 2) ●は，初回のすべり発生時における樹脂のひび割れでの○を反映

注 3) (○)は，載荷中の観察で確認できず，解体前の外観で確認したひび割れ
ただし，2 回目のすべり発生と同時にひび割れが生じたかは不明

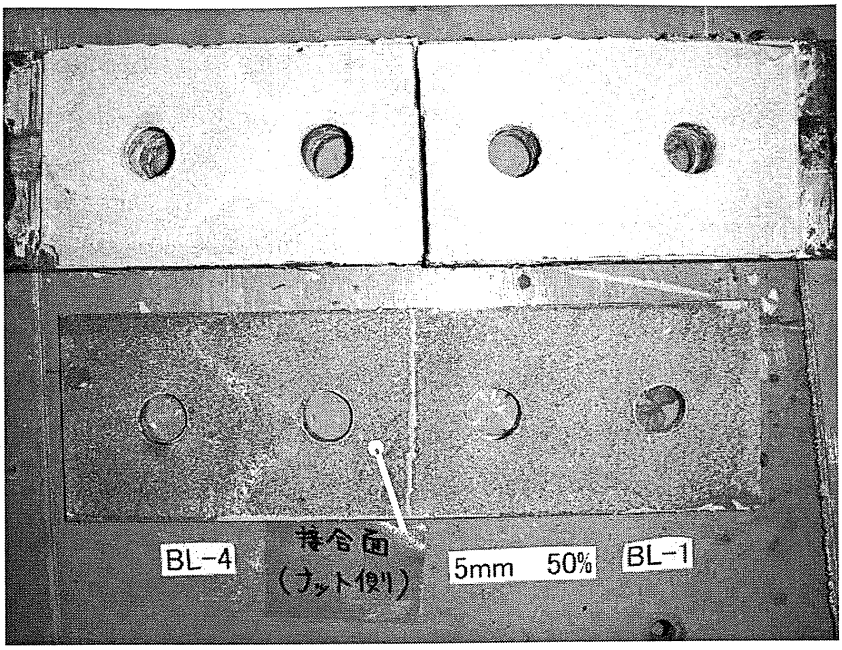
b) 解体後の接合面

図-6.2.8 に，供試体解体後の接合面における樹脂の破壊形態の例を示す。本試験では，3 章で示したように「界面破壊」，「凝集破壊」及びそれらの両者が混合した状態(以下，混合破壊)が認められた。界面破壊については，樹脂が板からはく離し，その接合面に樹脂の付着がほとんど無い状態であった。凝集破壊については，同一の接合面における板の両面に樹脂が付着している状態で，両面への樹脂の付着程度が強い場合(一般的な凝集破壊)と界面付近で凝集破壊する場合が認められた。また，引張試験では，目視観察により各供試体のすべての接合面で罫書き線のずれを確認したが，解体によりボルトを緩めても，同一の接合面における母材と当て板が樹脂により部分的に接着して繋がっていた供試体が数体あった(当て板端部では樹脂が母材からはく離していたが，当て板とは接着しており，一方では樹脂が当て板からはく離していたが，母材とは接着していた)。その一例として，図-6.2.9 に供試体 No.5 の状況を示す。図中，破線で囲んだ部分は，樹脂が母材，当て板の両面から完全に剥がれているが，樹脂そのものは破壊していない箇所を表す。以下，このような状態を「一部接着」という。解体では，一旦観察した後，手で引き剥がして接合面を確認した。

表-6.2.2 に，各供試体の解体後の接合面における樹脂の破壊形態一覧を示す。また，図-6.2.10～21 に，樹脂有りの供試体の破壊状況について，載荷後に観察した結果を示す。ここでは，初回のすべり発生位置に着目し，解体前の外観(図(a)～(e))と解体後の接合面(図(f), (g))について整理した。図中，樹脂のひび割れ発生位置，樹脂の破壊形態を併記している。

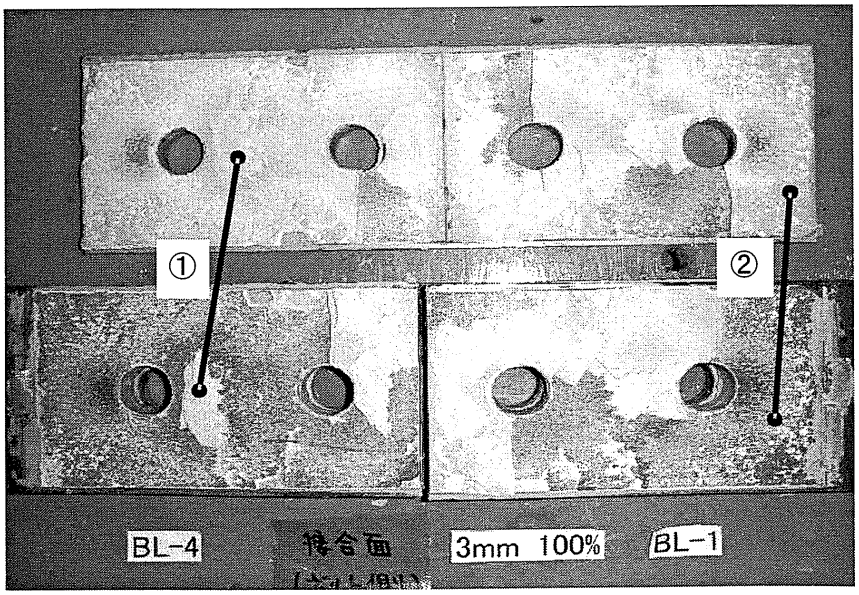
樹脂の破壊形態は，樹脂の厚さにかかわらず，導入軸力が低い供試体において界面破壊となる傾向にあった。導入軸力 225kN の場合では，いずれの供試体も凝集破壊，あるいは混合破壊が見られた。樹脂の凝集破壊は，ボルト孔近傍でよく見られたことから，高い軸力でのボルト締付けの影響が認められる。樹脂が厚くなるほど，界面付近の凝集破壊(図中では程度が弱い凝集破壊と記している)が多く見られる傾向があった。

供試体 No.7～9(目標樹脂厚 2mm)及び No.13～15(同 5mm)では，ひずみゲージを貼り付けた当て板の接合面において樹脂の界面破壊，あるいは界面付近の凝集破壊が見られた。破壊が生じた当て板の接合面には，ひずみゲージが接着したままの状態であり，樹脂とともに剥がれるようなことは無かった。



〔界面破壊〕: 鋼板と樹脂が剥離
接合面に樹脂の付着が無い状態

(a) 界面破壊（供試体 No.14 の例）



〔凝集破壊〕: 同一の接合面における板の両面
に樹脂が付着している状態
① : 凝集破壊
② : 界面付近の凝集破壊

(b) 凝集破壊（供試体 No.10 の例）

図-6.2.8　解体後の接合面より判断した樹脂の破壊形態の例

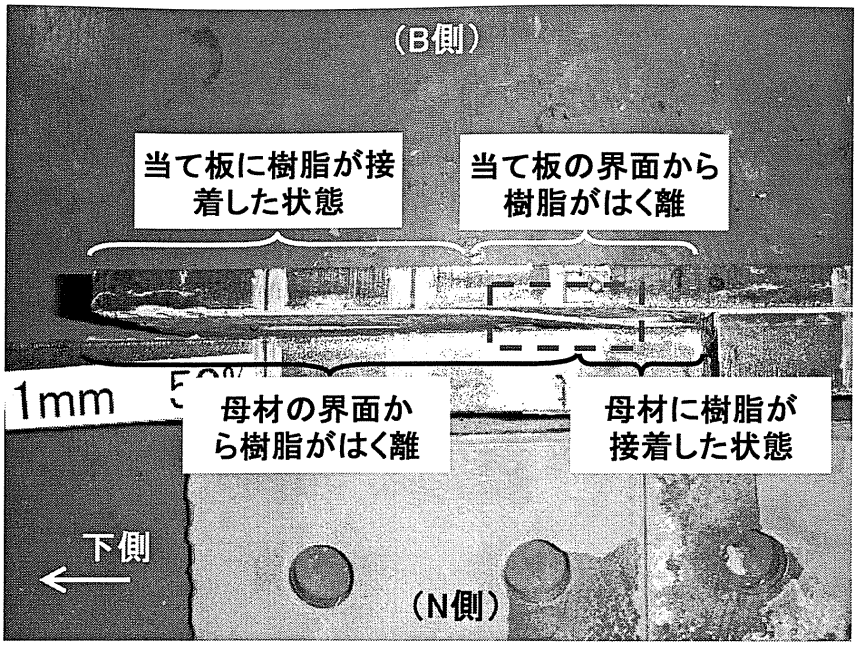


図-6.2.9　一部接着の例

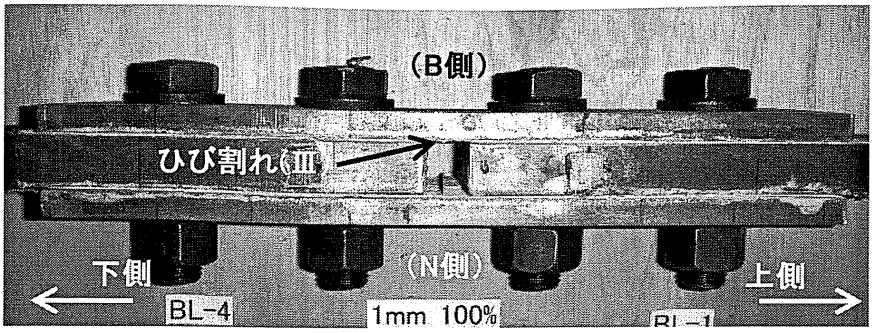
供試体 No.5：樹脂厚 1.3mm，目標導入軸力 112kN

（一部接着：すべり発生後も樹脂により板が局部的に接着していた状態をいう）

表-6.2.2　各供試体の解体後の接合面における樹脂の破壊形態

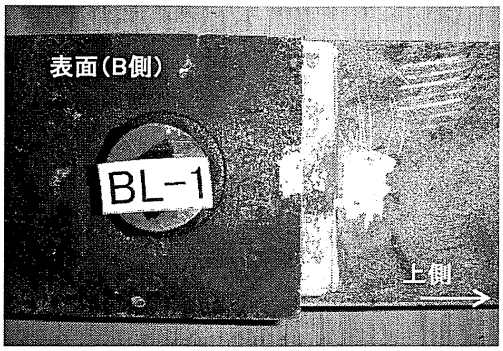
供試体No	樹脂厚(mm) 目標値	樹脂厚(mm) 実測値	目標導入軸力(kN)	接合面ゲージの有無	すべり荷重(kN) 初回すべり時	すべり荷重(kN) 2回目すべり時	樹脂の破壊形態 母材位置	接合面(B側) 界面	接合面(B側) 凝集	接合面(B側) 一部接着	母材位置	接合面(N側) 界面	接合面(N側) 凝集	接合面(N側) 一部接着
4	1	1.4	225		700	655	**上側**		○		**上側**		○	
							下側		○		下側		○	
5		1.3	112		655	621	上側	○	○	○	**上側**		○	
							下側		○	○	下側	○	○	○
6		1.3	45		596	317	**上側**	○			上側	○	○	
							下側	○		○	**下側**	○	○	
7	2	2.1	225	○	676	689	**上側**		○		**上側**		○	○
							下側		○	○	下側		○	○
8		2.7	112	○	530	418	**上側**	○	○		上側	○		○
							下側		○		**下側**	○		
9		2.6	45	○	420	255	**上側**	○	○		上側	○		○
							下側		○		**下側**	○		
10	3	3.6	225		668	593	上側		○	○	**上側**		○	
							下側		○		下側		○	○
11		3.6	112		628	421	**上側**	○			**上側**		○	
							下側	○			下側	○		○
12		3.5	45		512	465	上側	○	○		上側	○		
							下側	○			**下側**		○	
13	5	5.8	225	○	654	485	**上側**		○		上側	○	○	
							下側	○	○		**下側**	○	○	
14		5.5	112	○	485	271	上側	○			**上側**	○		
							下側	○			下側	○		
15		5.8	45	○	370	289	**上側**	○			**上側**	○	○	
							下側	○			下側	○	○	

注）　母材位置の太字，下線，網掛け：初回すべり側を表す。

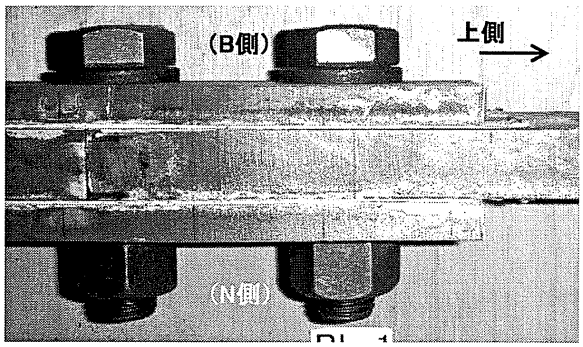


(a) 側面(R 側)

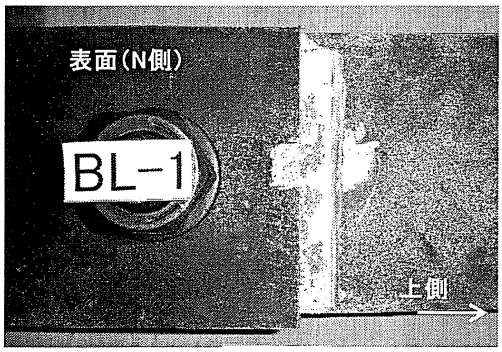
〔載荷試験結果〕
すべり発生位置：
上側接合面(B,N 両側)
すべり荷重：700kN
〔凡例〕
R,L側：側面方向
B側：側面から見てボルト側
N側：〃 ナット側
上側：引張試験中の上側
下側：〃 の下側



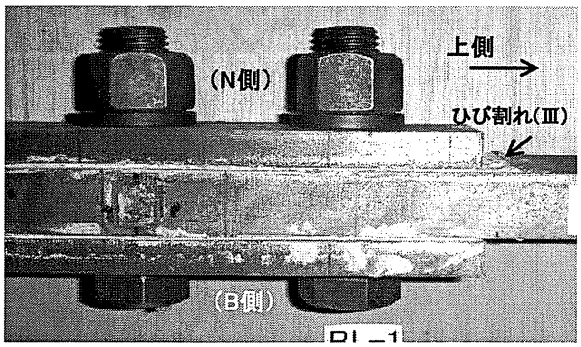
(b) 上側表面(B 側)



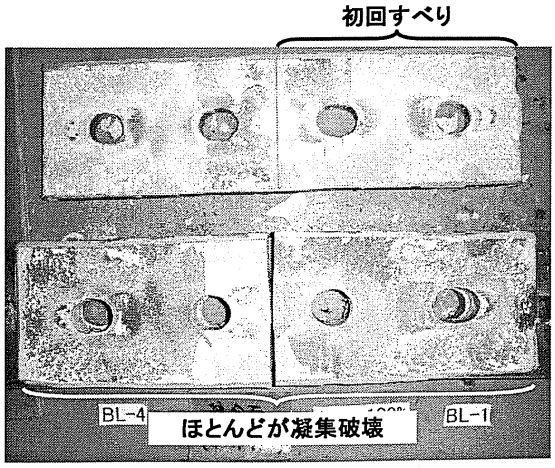
(d) 上側側面(R 側)



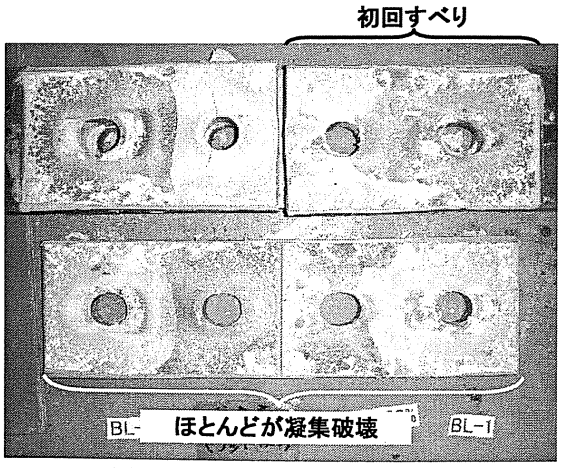
(c) 上側表面(N 面)



(e) 上側側面(L 側)



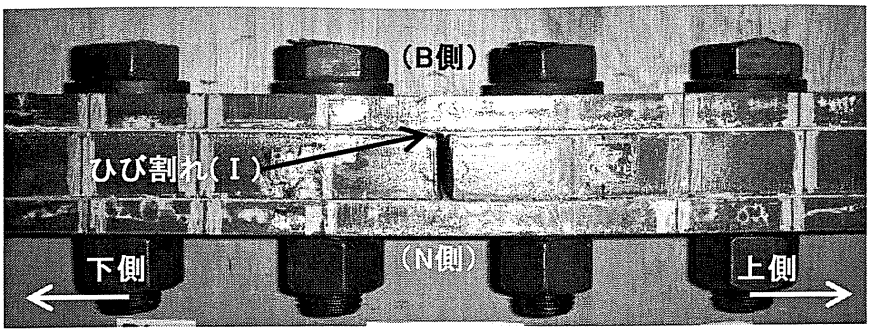
(f) 解体後の接合面(B 側)



(g) 解体後の接合面(N 側)

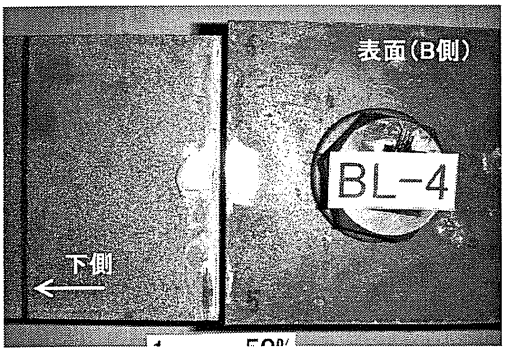
図-6.2.10 試験後の破壊状況

供試体 No.4（樹脂厚 1.4mm，目標導入軸力 225kN）

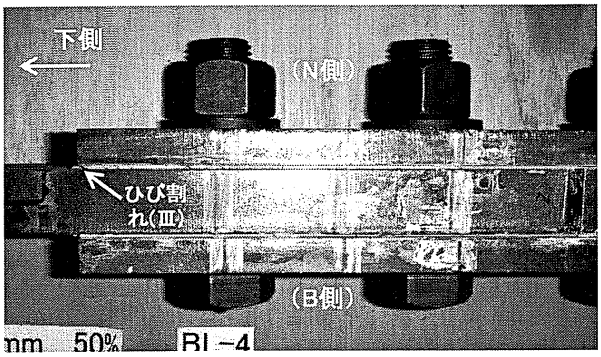


〔載荷試験結果〕
すべり発生位置：
上側接合面(B,N 両側)
すべり荷重：412kN
〔凡例〕
R,L側：側面方向
B側：側面から見てボルト側
N側：〃 ナット側
上側：引張試験中の上側
下側：〃 の下側

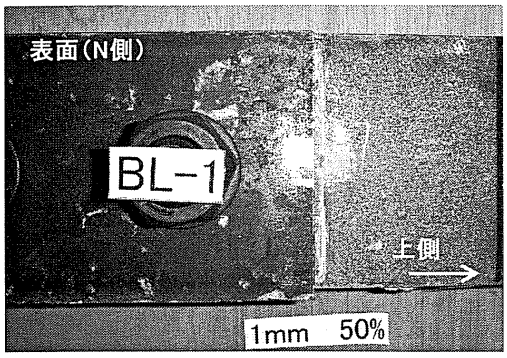
(a) 側面(R 側)



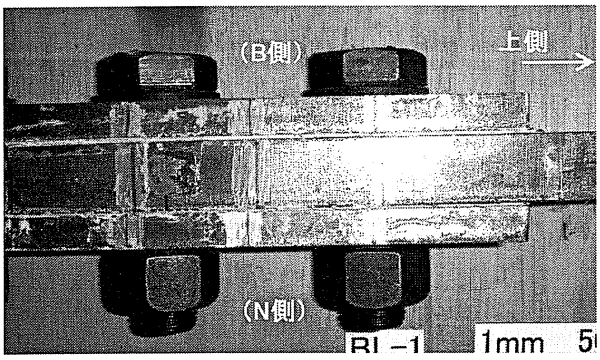
(b) 下側表面(B 側)



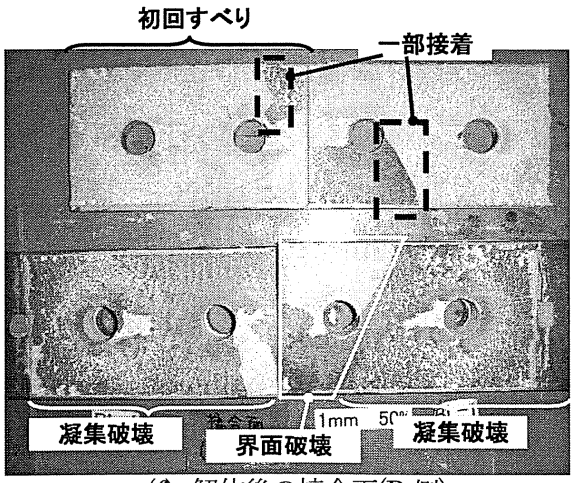
(d) 下側側面(R 側)



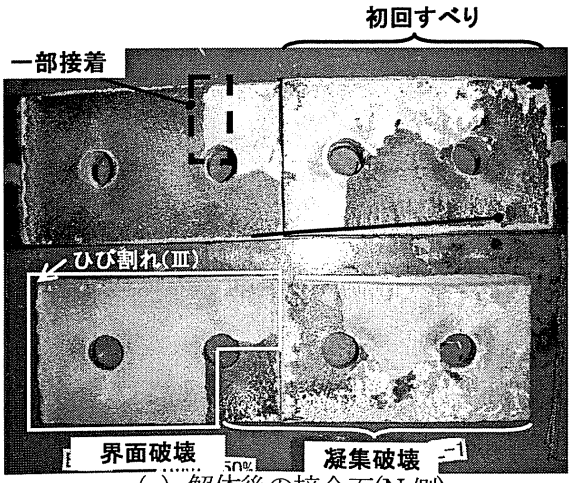
(c) 上側表面(N 側)



(e) 上側側面(R 側)



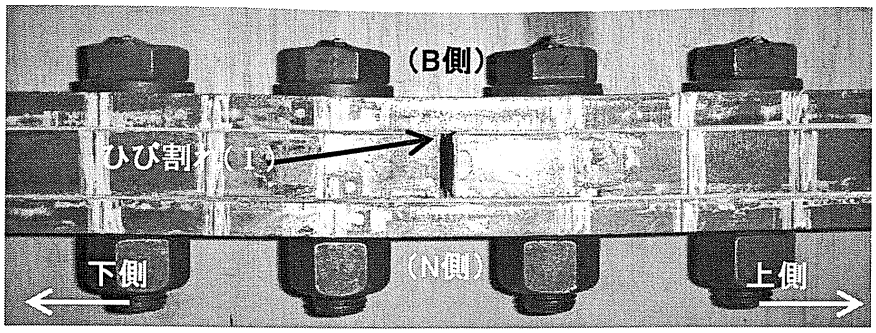
(f) 解体後の接合面(B 側)



(g) 解体後の接合面(N 側)

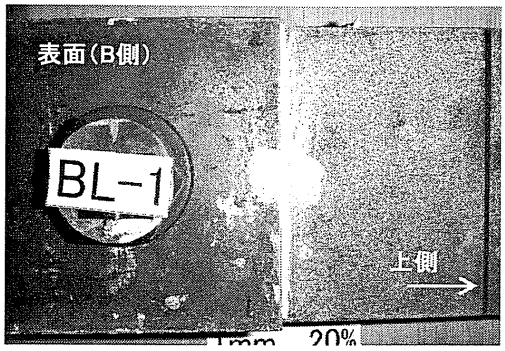
図-6.2.11 試験後の破壊状況

供試体 No.5（樹脂厚 1.3mm，目標導入軸力 112kN）

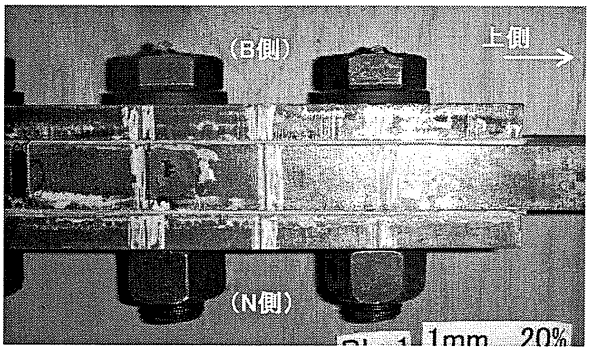


(a) 側面(R 側)

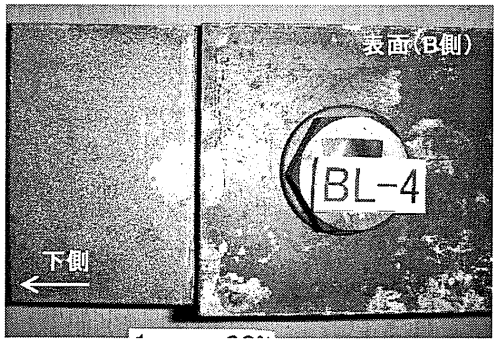
〔載荷試験結果〕
すべり発生位置：
上側接合面(B,N 両側)
下側接合面(B 側)
すべり荷重：135kN
〔凡例〕
R,L側：側面方向
B側：側面から見てボルト側
N側：〃 ナット側
上側：引張試験中の上側
下側：〃 の下側



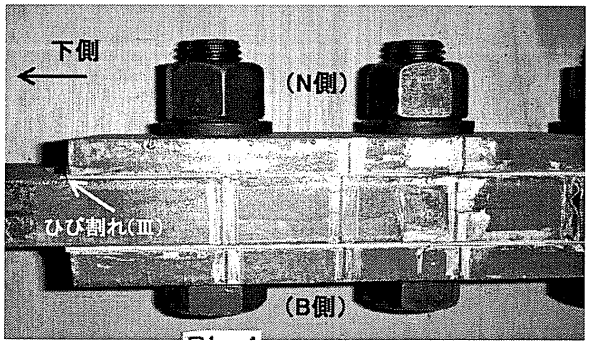
(b) 上側表面(B 側)



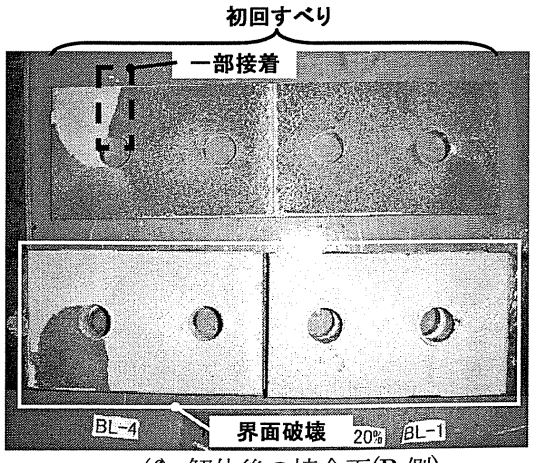
(d) 上側側面(L 側)



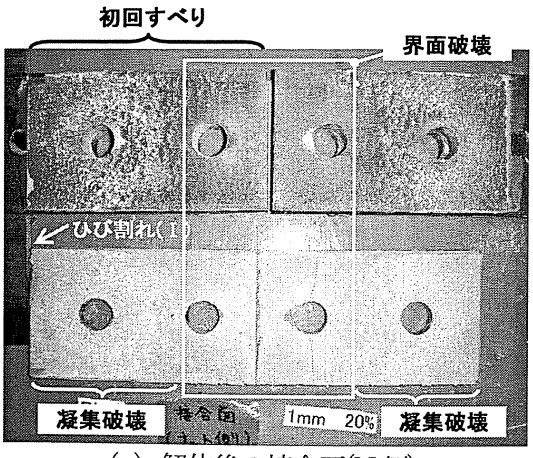
(c) 下側表面(B 側)



(e) 下側側面(L 側)



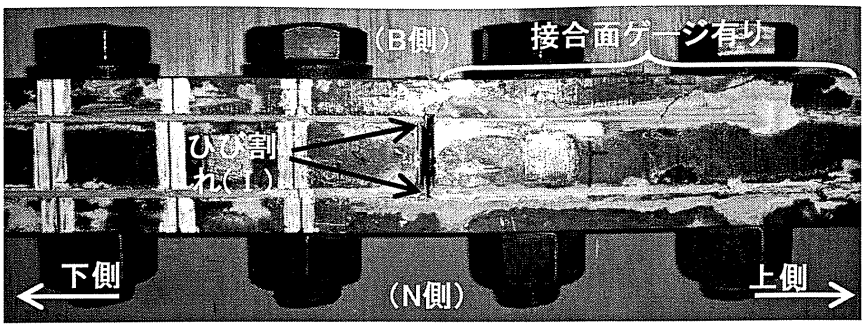
(f) 解体後の接合面(B 側)



(g) 解体後の接合面(N 側)

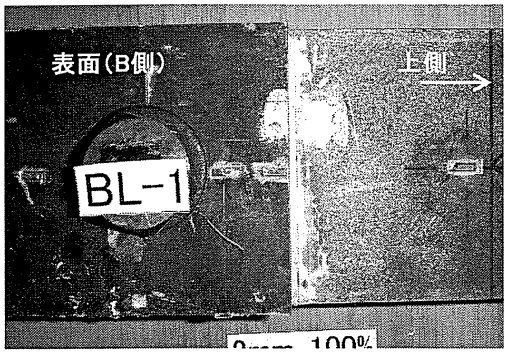
図-6.2.12 試験後の破壊状況

供試体 No.6（樹脂厚 1.3mm，目標導入軸力 45kN）

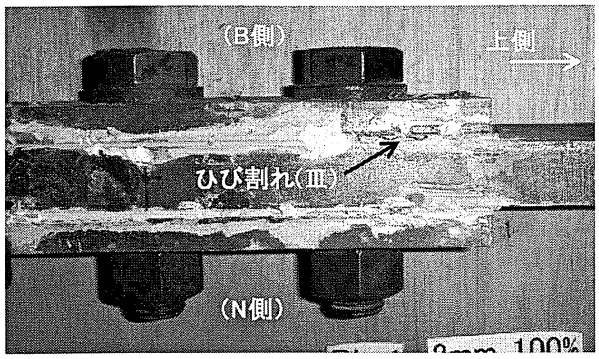


(a) 側面(R 側)

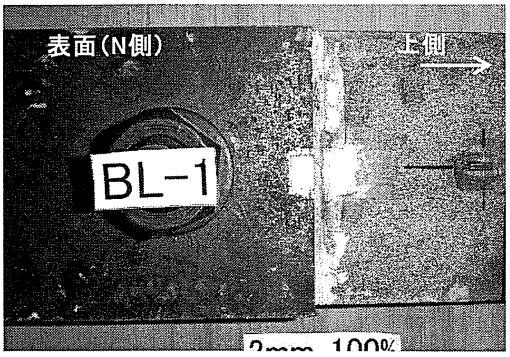
〔載荷試験結果〕
すべり発生位置：
上側接合面(B,N 両側)
すべり荷重：676kN
〔凡例〕
R,L側：側面方向
B側：側面から見てボルト側
N側：〃 ナット側
上側：引張試験中の上側
下側：〃 の下側



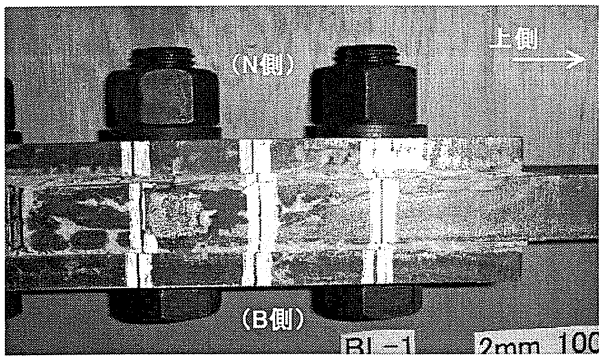
(b) 上側表面(B 側)



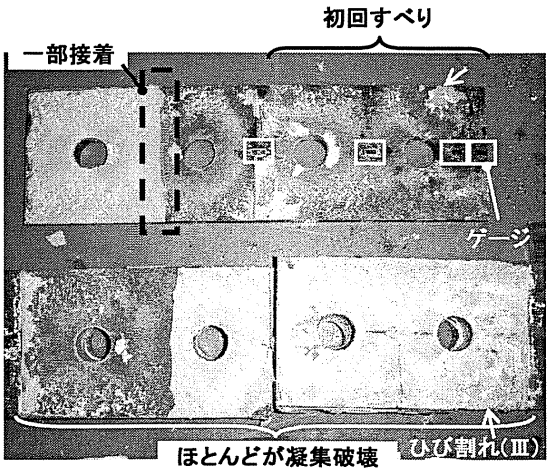
(d) 上側側面(R 側)



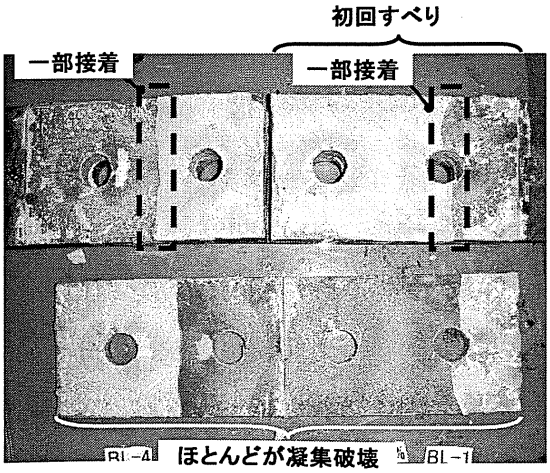
(c) 上側表面(N 側)



(e) 上側側面(L 側)



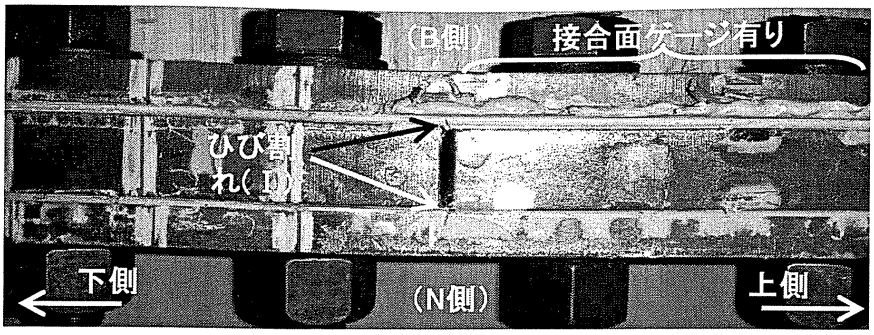
(f) 解体後の接合面(B 側)



(g) 解体後の接合面(N 側)

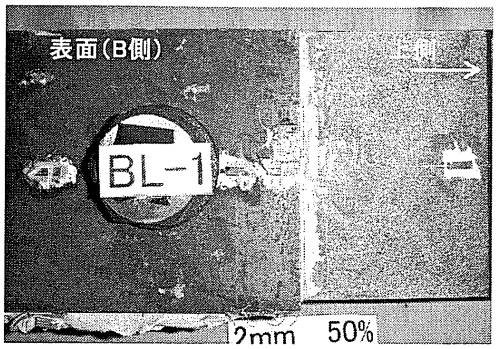
図-6.2.13 試験後の破壊状況

供試体 No.7（樹脂厚 2.1mm，目標導入軸力 225kN）

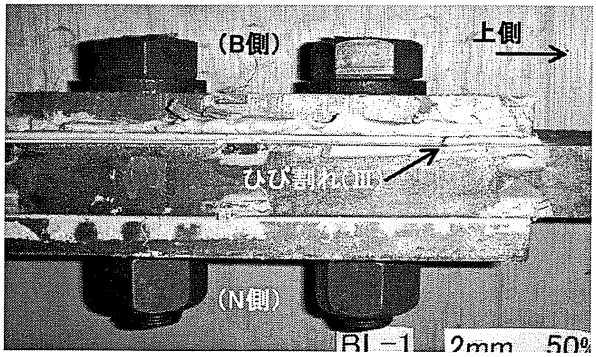


(a) 側面(R 側)

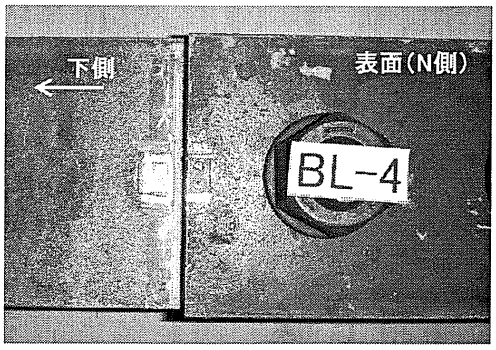
〔載荷試験結果〕
すべり発生位置：
上側接合面(B 側)
下側接合面(N 側)
すべり荷重：530kN
〔凡例〕
R,L側：側面方向
B側：側面から見てボルト側
N側：〃　ナット側
上側：引張試験中の上側
下側：〃　の下側



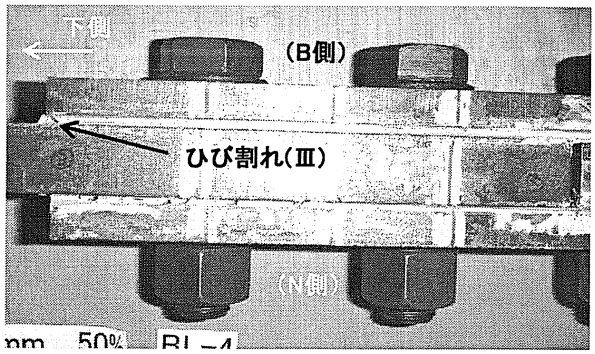
(b) 上側表面(B 側)



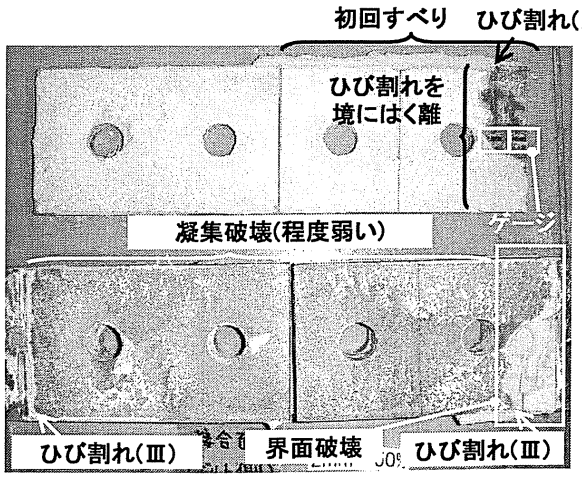
(d) 上側側面(R 側)



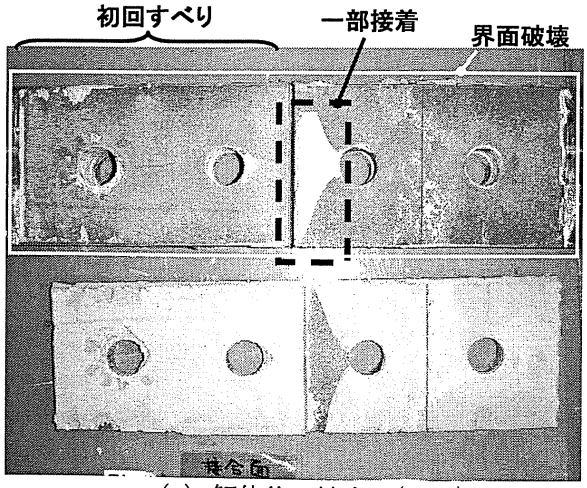
(c) 下側表面(N 側)



(e) 下側側面(R 側)



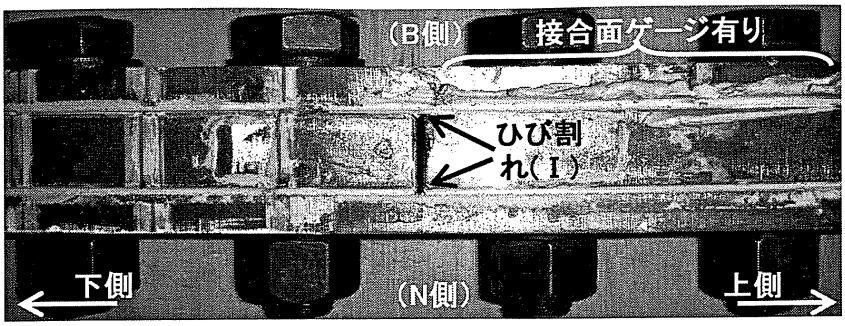
(f) 解体後の接合面(B 面)



(g) 解体後の接合面(N 面)

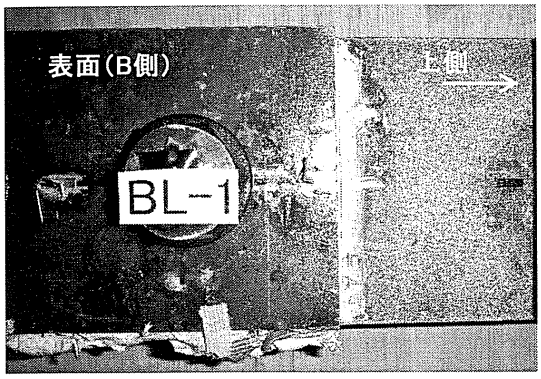
図-6.2.14　試験後の破壊状況

供試体 No.8（樹脂厚 2.7mm，目標導入軸力 112kN）

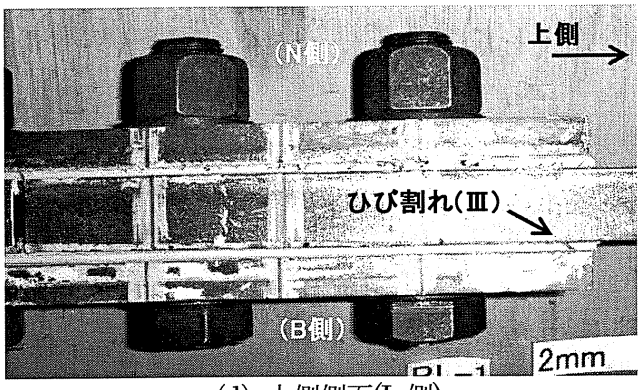


(a) 側面(R 側)

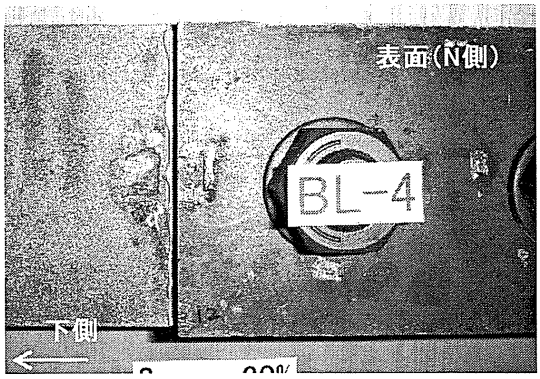
〔載荷試験結果〕
すべり発生位置：
上側接合面(B 側)
下側接合面(N 側)
すべり荷重：420kN
〔凡例〕
R,L側：側面方向
B側：側面から見てボルト側
N側：〃 ナット側
上側：引張試験中の上側
下側：〃 の下側



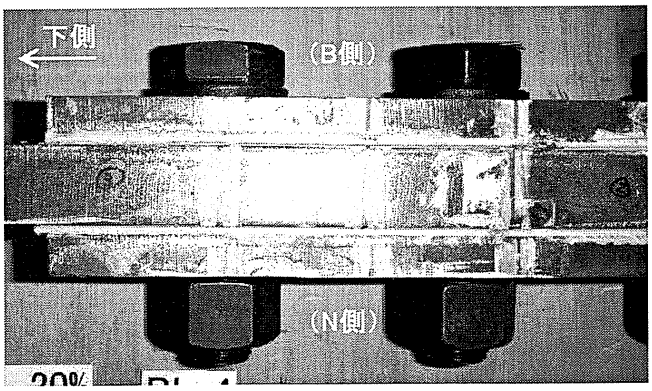
(b) 上側表面(B 側)



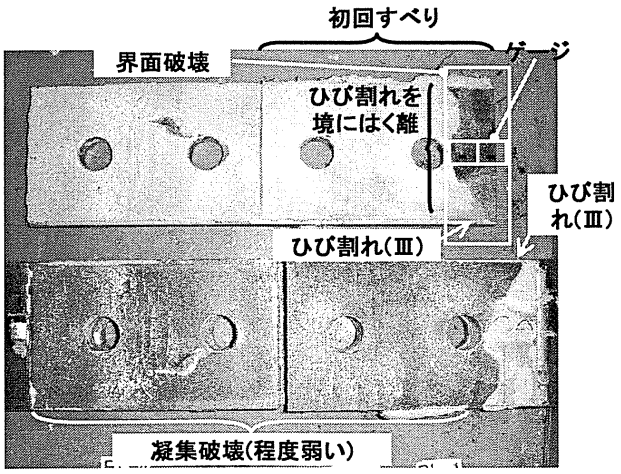
(d) 上側側面(L 側)



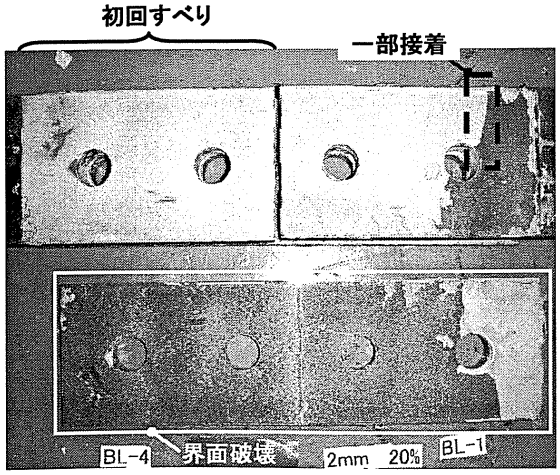
(c) 下側表面(N 側)



(e) 下側側面(R 側)



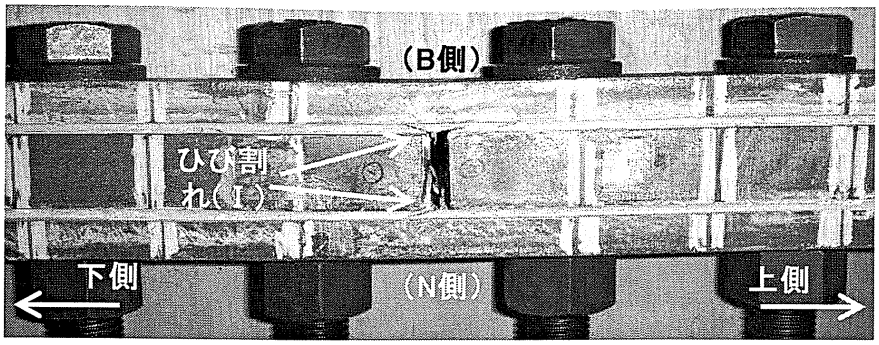
(f) 解体後の接合面(B 側)



(g) 解体後の接合面(N 側)

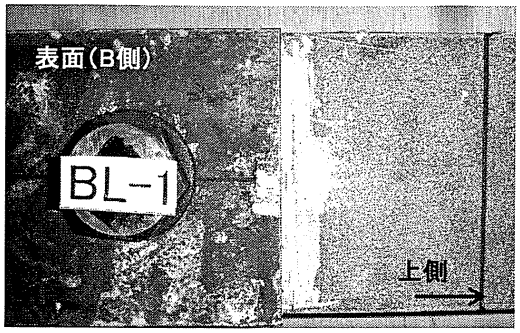
図-6.2.15 試験後の破壊状況

供試体 No.9（樹脂厚 2.6mm，目標導入軸力 45kN）

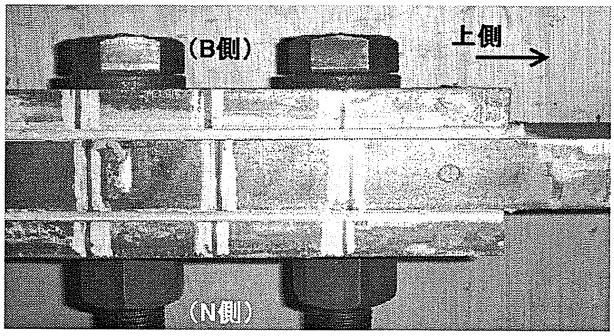


(a) 側面(R 側)

〔載荷試験結果〕
すべり発生位置：
上側接合面(N 側)
下側接合面(B 側)
すべり荷重：668kN
〔凡例〕
R,L側：側面方向
B側：側面から見てボルト側
N側：　〃　ナット側
上側：引張試験中の上側
下側：　〃　の下側



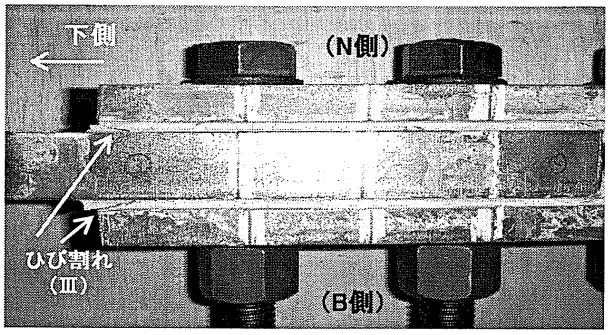
(b) 上側表面(B 側)



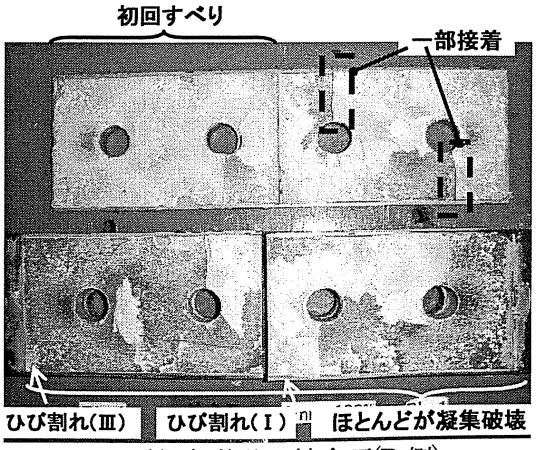
(d) 上側側面(L 側)



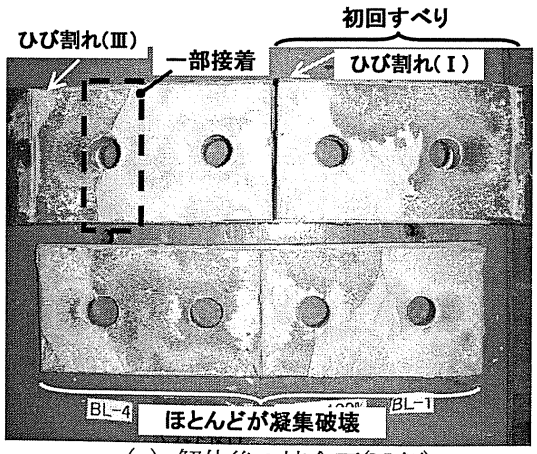
(c) 上側表面(N 側)



(e) 上側側面(R 側)



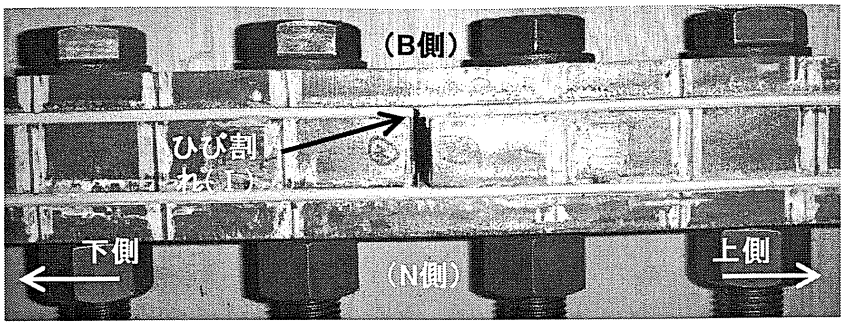
(f) 解体後の接合面(B 側)



(g) 解体後の接合面(N 側)

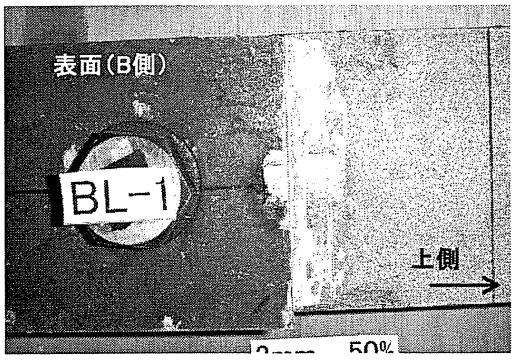
図-6.2.16　試験後の破壊状況

供試体 No.10（樹脂厚 3.6mm，目標導入軸力 225kN）

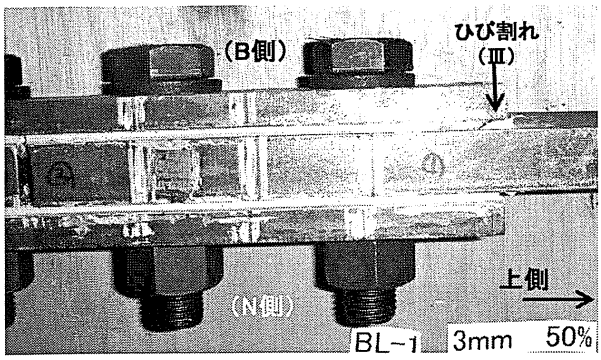


(a) 側面(R 側)

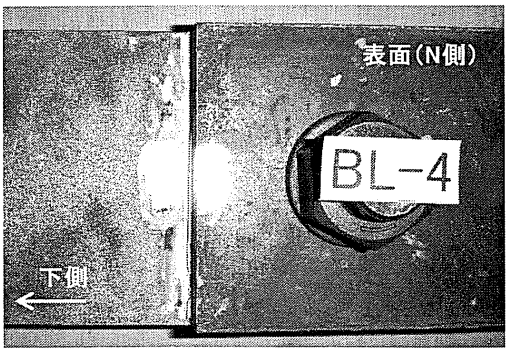
〔載荷試験結果〕
すべり発生位置：
上側接合面(B,N 両側)
下側接合面(B 側)
すべり荷重：628kN
〔凡例〕
R,L側：側面方向
B側：側面から見てボルト側
N側：〃 ナット側
上側：引張試験中の上側
下側：〃 の下側



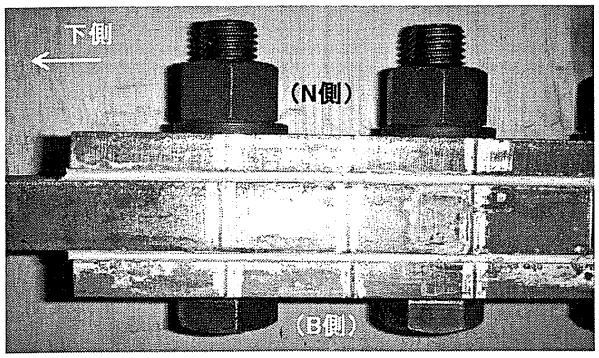
(b) 上側表面(B 側)



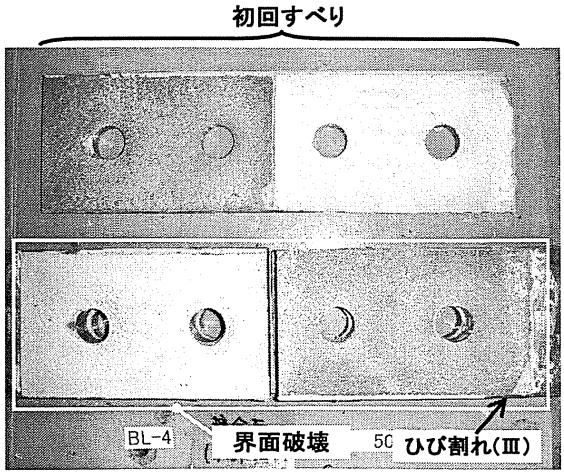
(d) 上側側面(R 側)



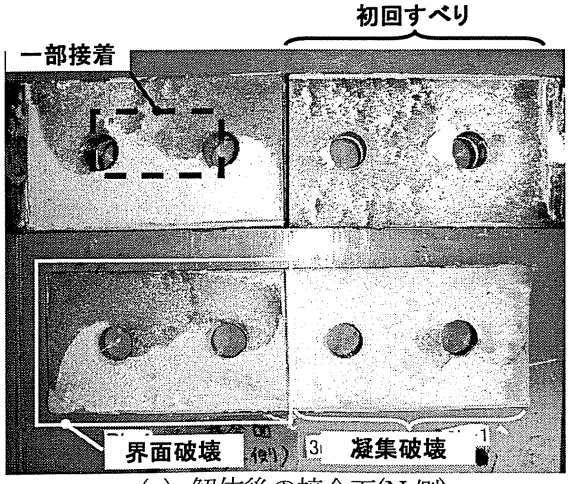
(c) 下側表面(N 側)



(e) 下側側面(L 側)



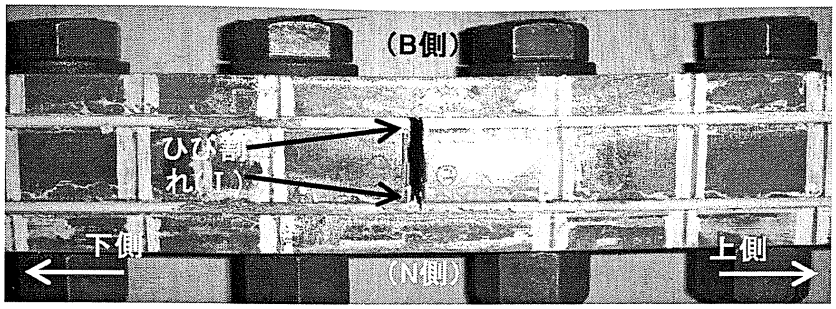
(f) 解体後の接合面(B 側)



(g) 解体後の接合面(N 側)

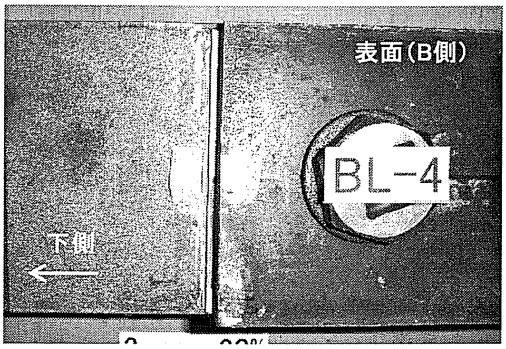
図-6.2.17 試験後の破壊状況

供試体 No.11（樹脂厚 3.7mm, 目標導入軸力 112kN）

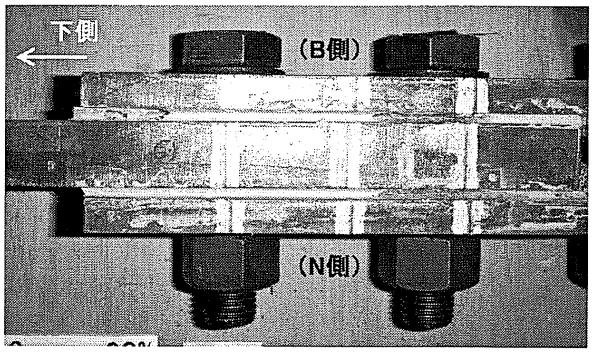


(a) 側面(R 側)

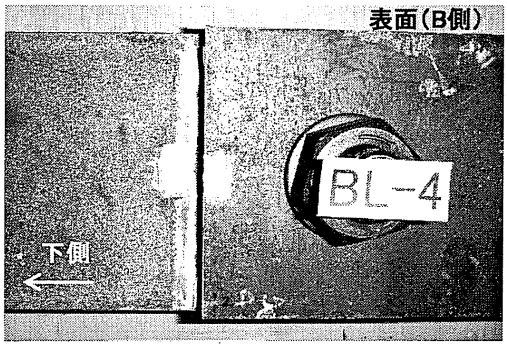
〔載荷試験結果〕
すべり発生位置：
下側接合面(B,N 両側)
すべり荷重：512kN
〔凡例〕
R,L 側：側面方向
B側：側面から見てボルト側
N側：〃 ナット側
上側：引張試験中の上側
下側：〃 の下側



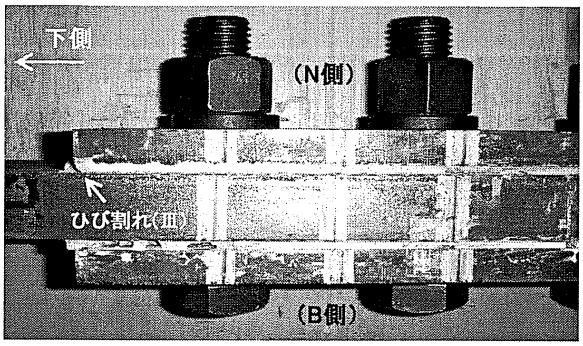
(b) 下側表面(B 側)



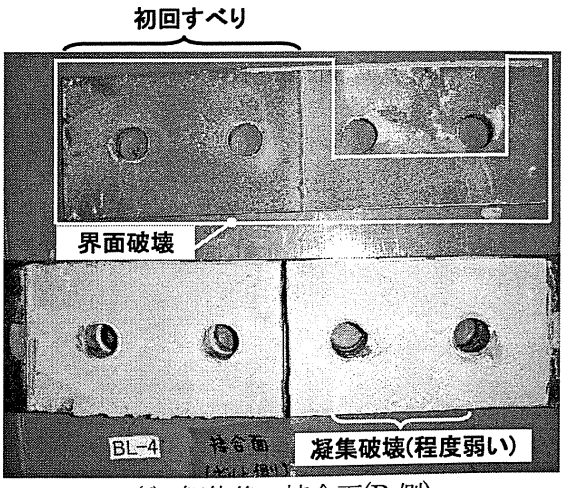
(d) 下側側面(R 側)



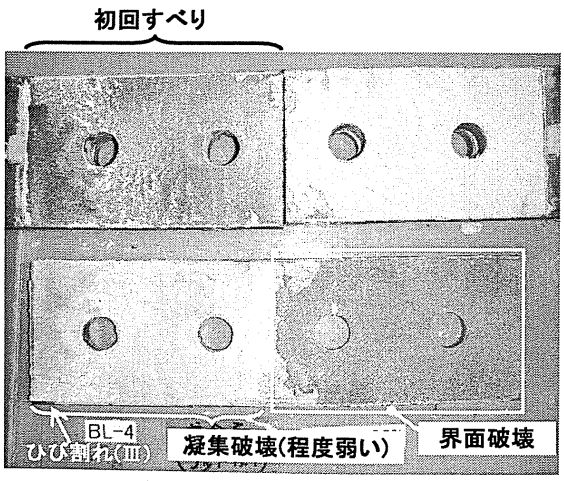
(c) 下側表面(N 側)



(e) 下側側面(L 側)



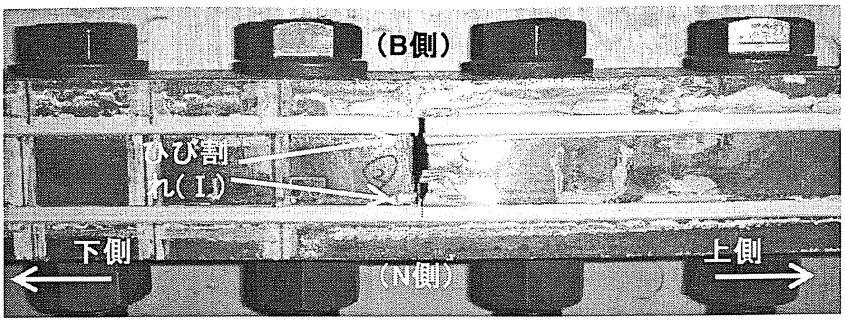
(f) 解体後の接合面(B 側)



(g) 解体後の接合面(N 側)

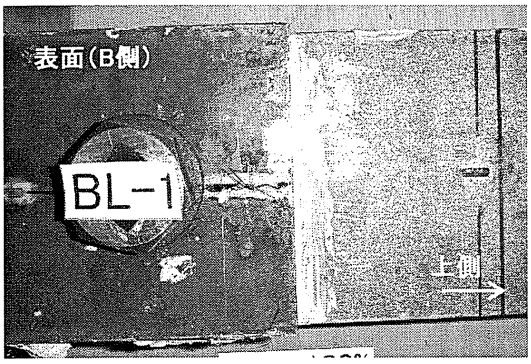
図-6.2.18 試験後の破壊状況

供試体 No.12（樹脂厚 3.4mm，目標導入軸力 45kN）

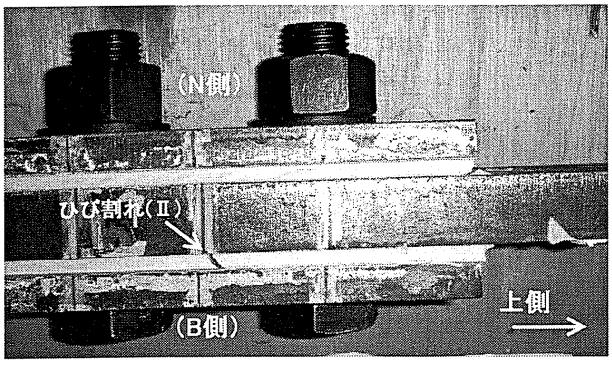


(a) 側面(R 側)

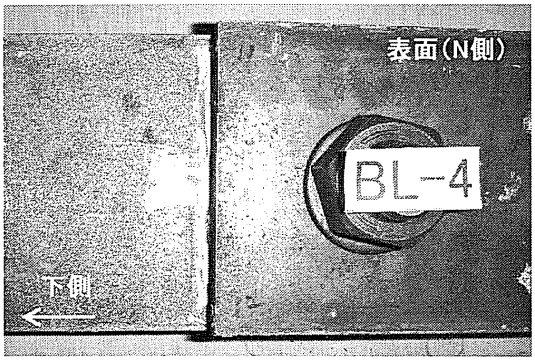
〔載荷試験結果〕
すべり発生位置：
上側接合面(B 側)
下側接合面(N 側)
すべり荷重：654kN
〔凡例〕
R,L側：側面方向
B側：側面から見てボルト側
N側：　〃　ナット側
上側：引張試験中の上側
下側：　〃　の下側



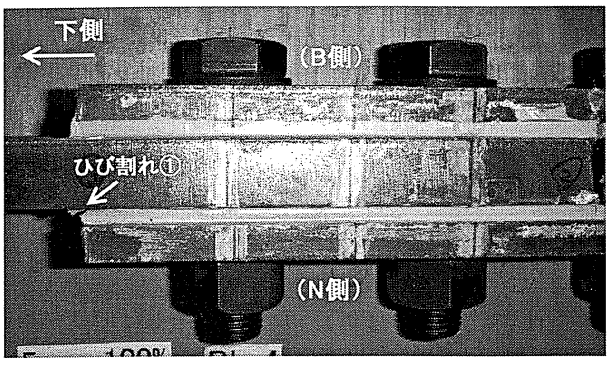
(b) 上側表面(B 側)



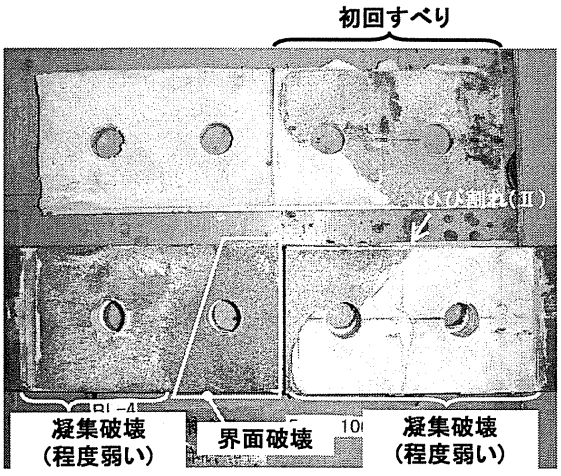
(d) 上側側面(L 側)



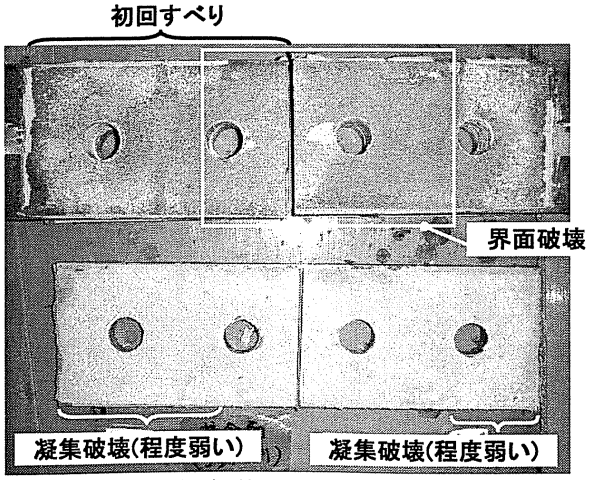
(c) 上側表面(N 側)



(e) 下側側面(R 側)



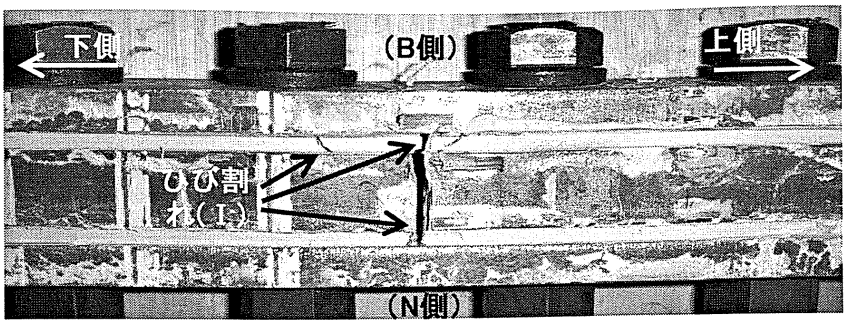
(f) 解体後の接合面(B 側)



(g) 解体後の接合面(N 側)

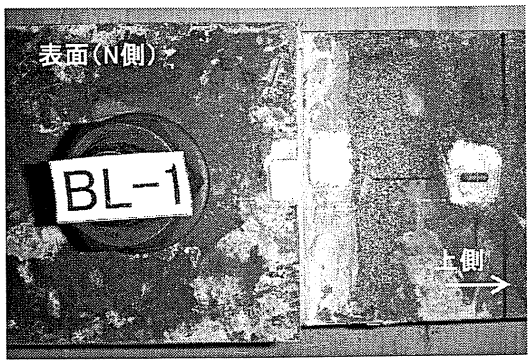
図-6.2.19　試験後の破壊状況

供試体 No.13（樹脂厚 5.8mm，目標導入軸力 225kN）

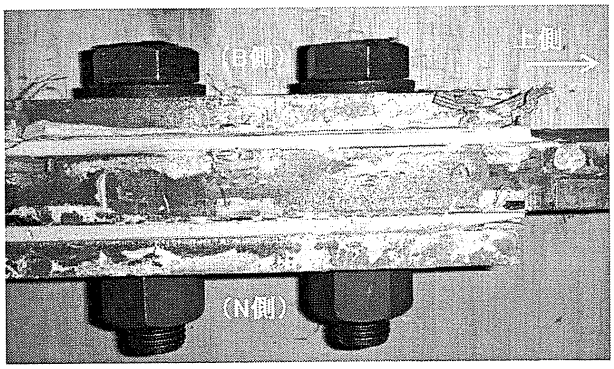


(a) 側面(R 側)

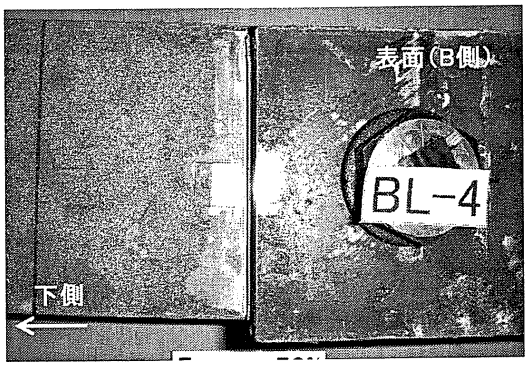
〔載荷試験結果〕
すべり発生位置：
上側接合面(N 側)
下側接合面(B 側)
すべり荷重：485kN
〔凡例〕
R,L側：側面方向
B側：側面から見てボルト側
N側：〃 ナット側
上側：引張試験中の上側
下側：〃 の下側



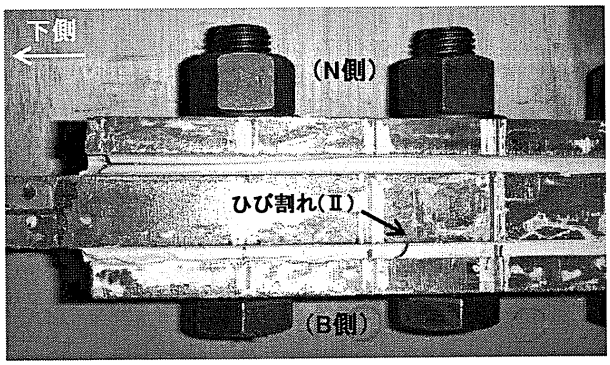
(b) 上側表面(N 側)



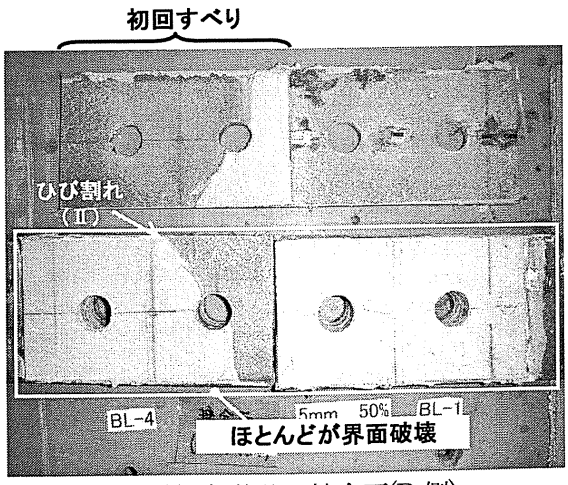
(d) 上側側面(R 側)



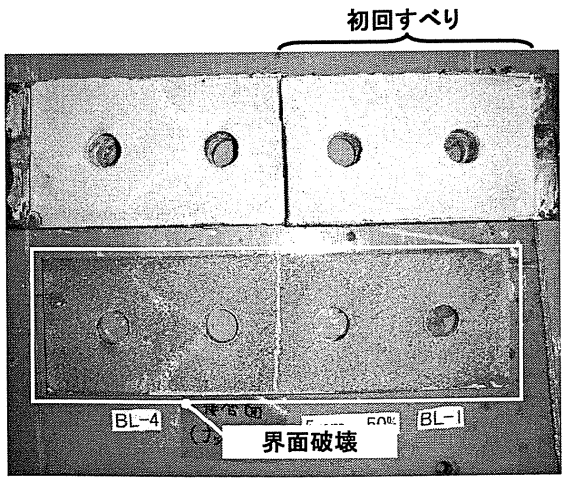
(c) 下側表面(B 側)



(e) 上側側面(L 側)



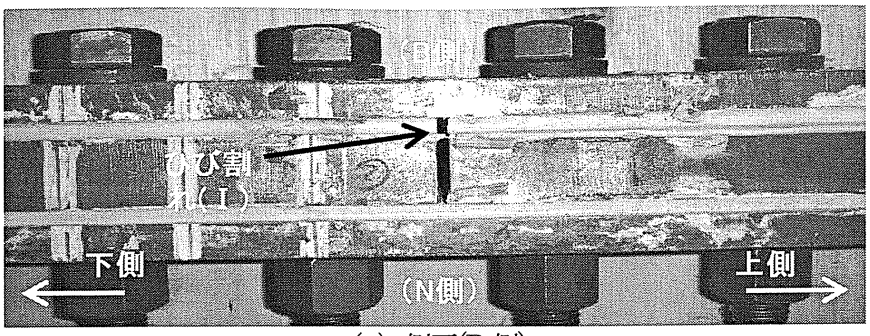
(f) 解体後の接合面(B 側)



(g) 解体後の接合面(N 側)

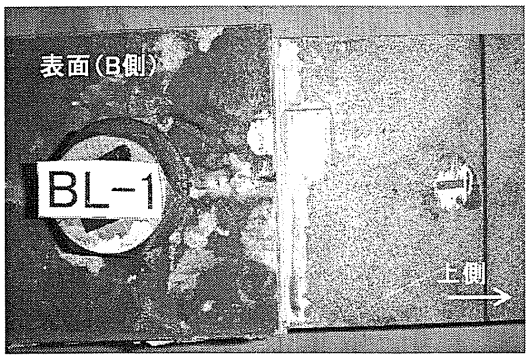
図-6.2.20 試験後の破壊状況

供試体 No.14（樹脂厚 5.5mm, 目標導入軸力 112kN）

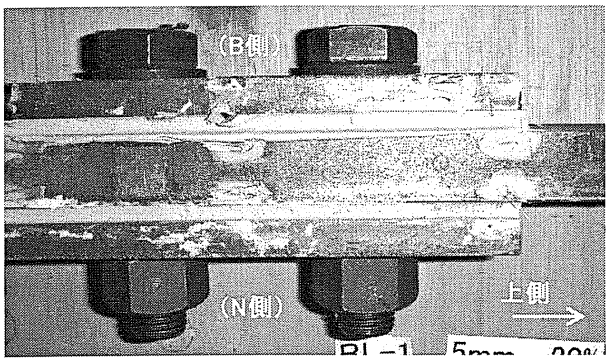


(a) 側面(R 側)

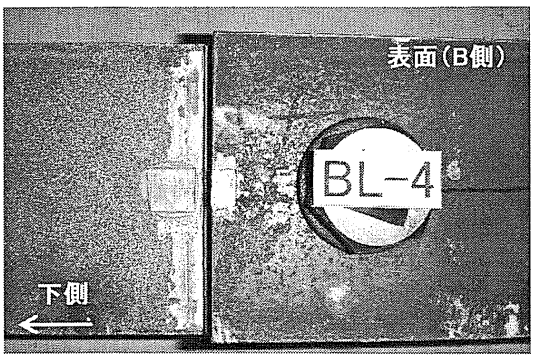
〔載荷試験結果〕
すべり発生位置：
上側接合面(B,N 両側)
下側接合面(B 側)
すべり荷重：370kN
〔凡例〕
R,L側：側面方向
B側：側面から見てボルト側
N側：〃 ナット側
上側：引張試験中の上側
下側：〃 の下側



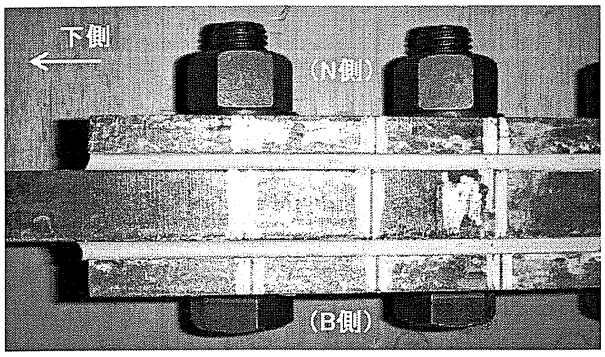
(b) 上側表面(B 側)



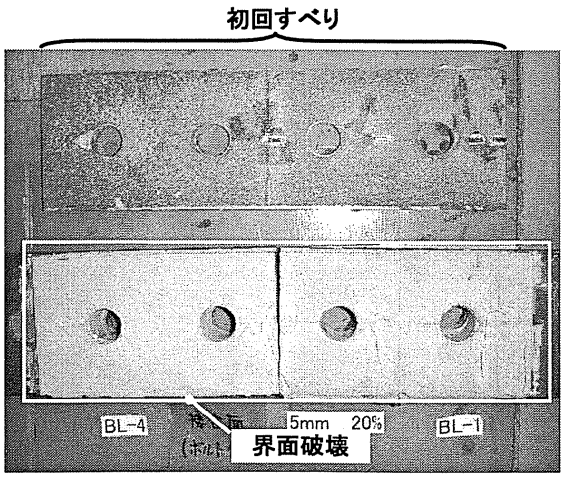
(d) 上側側面(R 側)



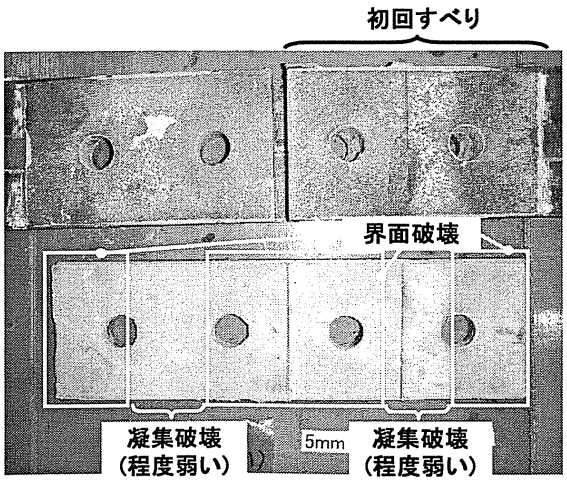
(c) 下側表面(B 側)



(e) 下側側面(L 側)



(f) 解体後の接合面(B 側)



(g) 解体後の接合面(N 側)

図-6.2.21 試験後の破壊状況

供試体 No.15（樹脂厚 5.8mm, 目標導入軸力 45kN）

6.3 すべり荷重

図-6.3.1 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-6.3.2 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-6.3.1～2 のいずれの図においても，当て板の接合面にひずみゲージを貼付けた供試体のすべり荷重(点線で囲んだデータのうち特に No.8, 9, 14, 15)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。前項 6.2 で示したように，ひずみゲージを貼付けた供試体では，すべり発生に伴う樹脂のひび割れがひずみゲージ貼付け位置で生じていたことや，破壊が生じた当て板の接合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，接合面のひずみ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。

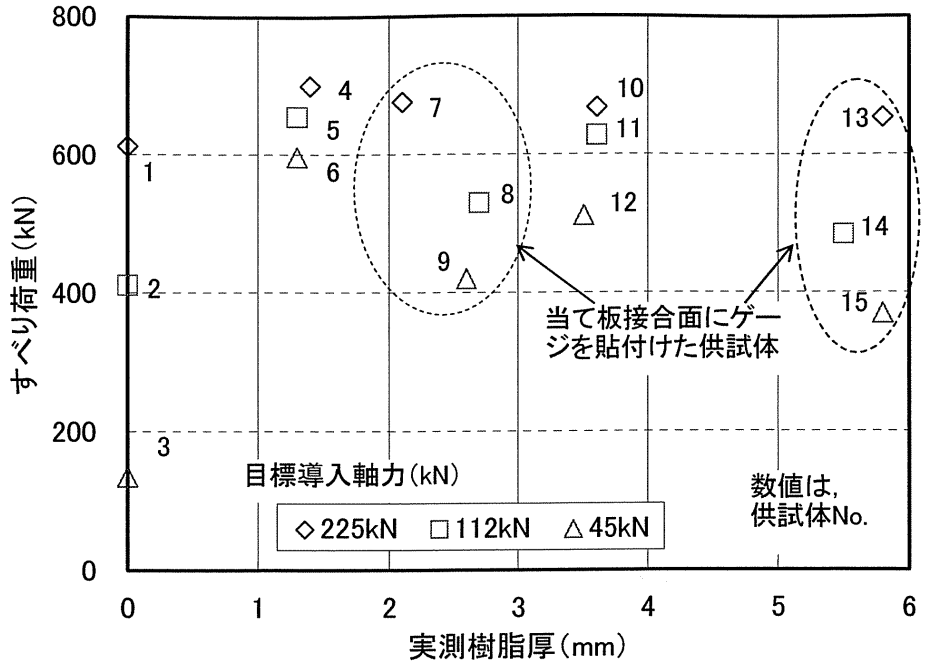


図-6.3.1　すべり荷重と実測樹脂厚の関係

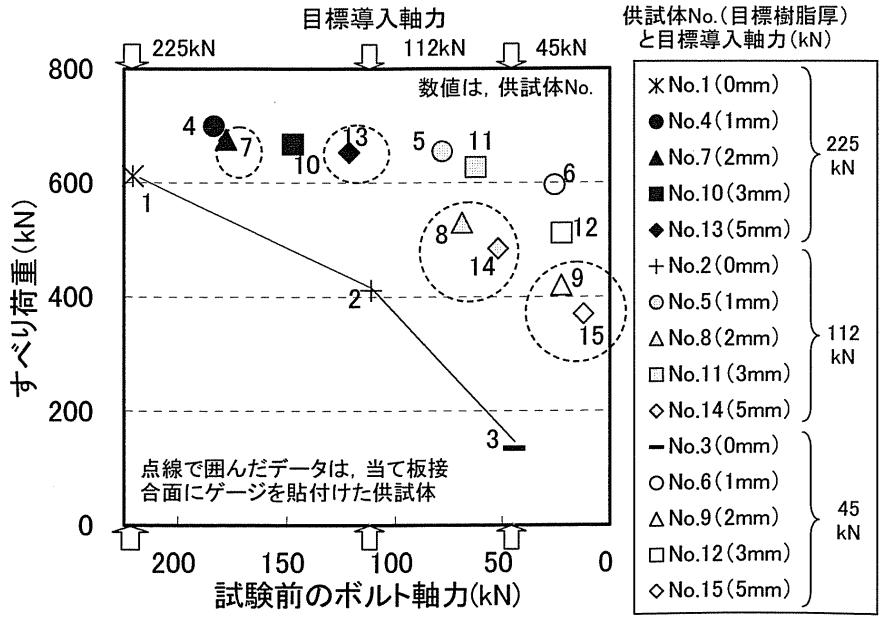


図-6.3.2　すべり荷重と試験前のボルト軸力の関係

6.4 荷重－母材間の変位

図-6.4.1 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，樹脂厚は無視)とした。それぞれ式(6.1)により計算を行った。

$$P_{yi} = (A_{ni} \times f_{yi}) / k / 1{,}000 \qquad (6.1)$$

ここに，

P_{yi}：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

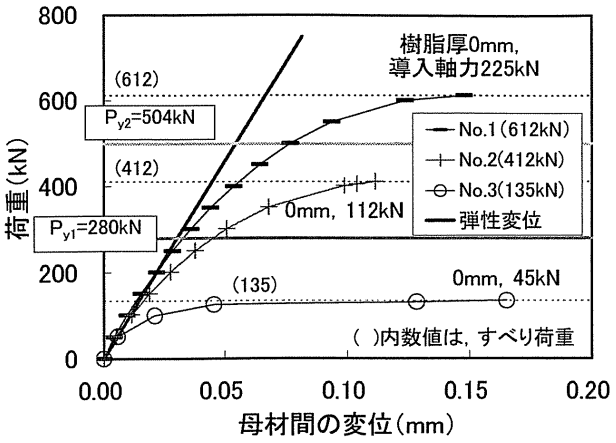
A_{ni}：純断面積　(A_{n1}= 24mm×75.5mm，A_{n2}= 46mm×75.5mm)

f_{yi}：降伏点　(f_{y1} = 371MPa，f_{y2} = 348MPa)

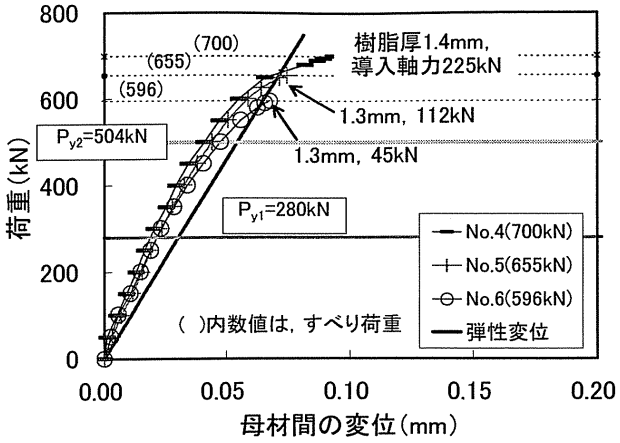
k：帯板の円孔縁における応力集中係数 (= 2.4) [6.1)]

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-6.4.1(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供試体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。

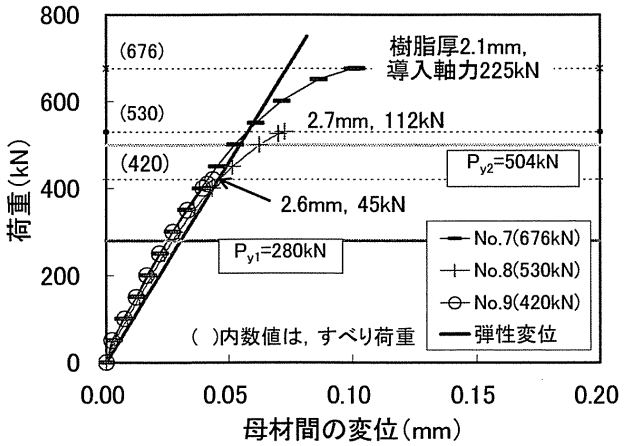
ボルト孔の応力集中の影響を考慮した降伏荷重 P_{y1} 及び P_{y2} に着目して，各供試体の載荷に伴うずれ変位挙動を比較した場合，樹脂無しの供試体 No.1 の挙動は P_{y1} まで直線的であったのに対し，樹脂を塗布した供試体 No.4～6 及び No.7 の挙動は P_{y2} まで概ね直線的であった。これは供試体 No.4～6 及び No.7 のパイゲージによるずれ変位の測定対象区間において(少なくともその区間のうちのボルト孔周辺において)，樹脂の接着効果により母材と当て板の一体化の範囲が樹脂無しの場合に比べて広くなっていたと考えられる。



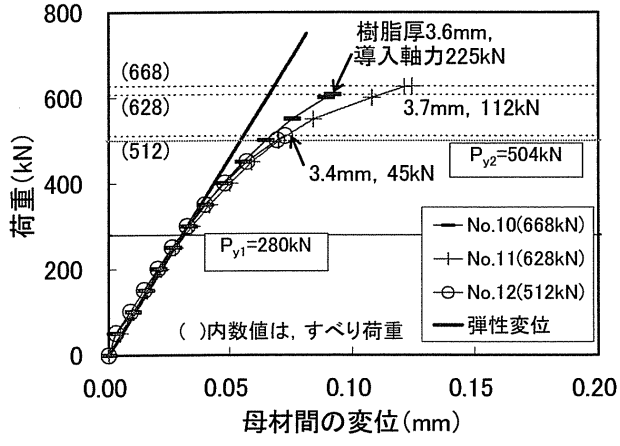
(a) 供試体 No.1～3（樹脂無し）



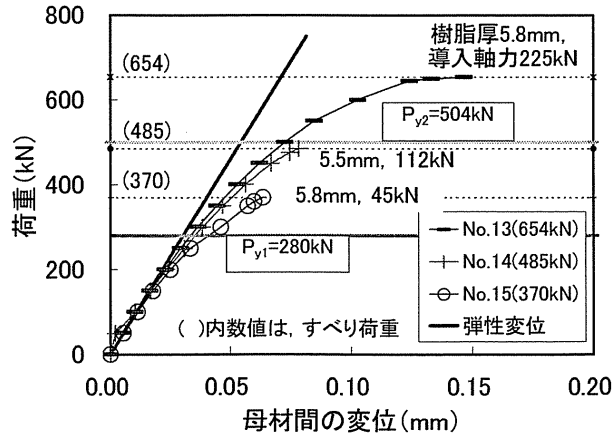
(b) 供試体 No.4～6（目標樹脂厚 1mm）



(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-6.4.1　初回のすべりまでの荷重と母材間の変位の関係

6.5　載荷中の母材及び当て板のひずみ

図-6.5.1～3 に，樹脂有りの供試体 No.7～9(目標樹脂厚 2mm)及び No.13～15(同 5mm)における荷重 P とひずみ ε の関係を示す。図中の直線(a)～(c)は，図-6.5.4 に示すひずみ測定断面①～④を対象とし，以下の式(6.2)により P－ ε の関係を算出した。

$$\varepsilon = P / (E \times A_i) \qquad (6.2)$$

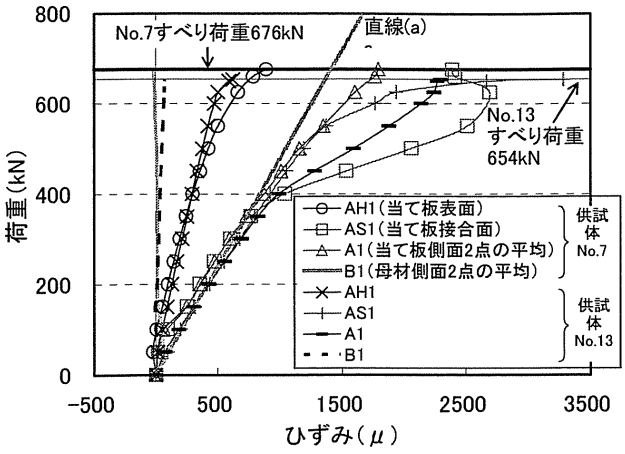
ここに，P：荷重

E：弾性係数（215GPa）

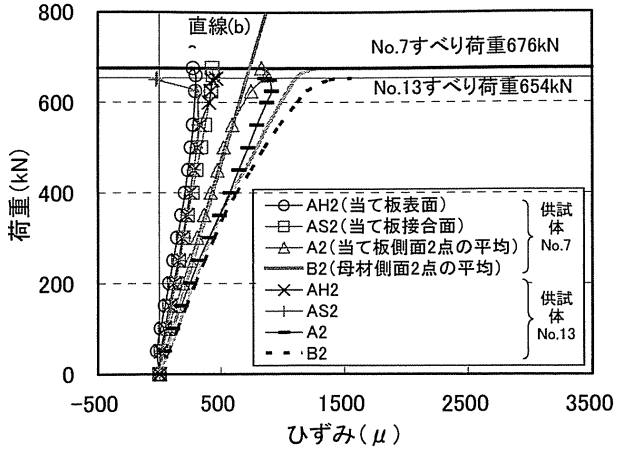
A_i：図-6.5.4 に示した測定断面①～④それぞれの断面積 (i = 1～3)

目標導入軸力 225kN とした供試体 No.7 及び No.13 は，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。これらの傾向は，目標導入軸力が 112kN，45kN の場合も概ね同じであった。

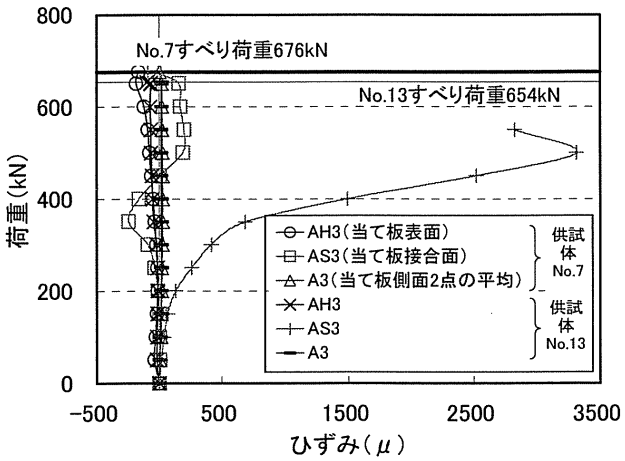
これらの図から，図-6.5.4 に示すように，①，②，④の各測定断面における，母材と当て板それぞれの荷重分担の程度をある程度把握できるが，樹脂の接着効果は明確に現れなかった。測定断面①の結果より，約 400kN 以降，この断面付近の当て板の負担が急激に増加していたことがわかった。なお，供試体 No.7 における AS1，A1 のひずみが 100kN 程度まで小さかったのは，組立ての際に母材の突合せ部に入り込んだ樹脂の影響によると考えられる(図-6.5.5)。



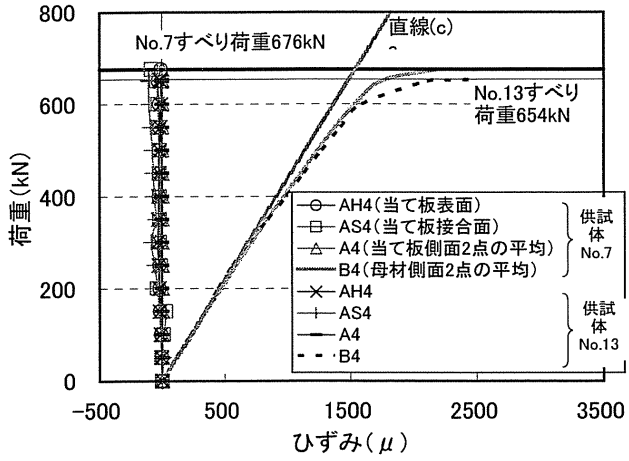
(a) 測定断面①



(b) 測定断面②



(c) 測定断面③



(b) 測定断面④

図-6.5.1 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, 目標導入軸力 225kN)

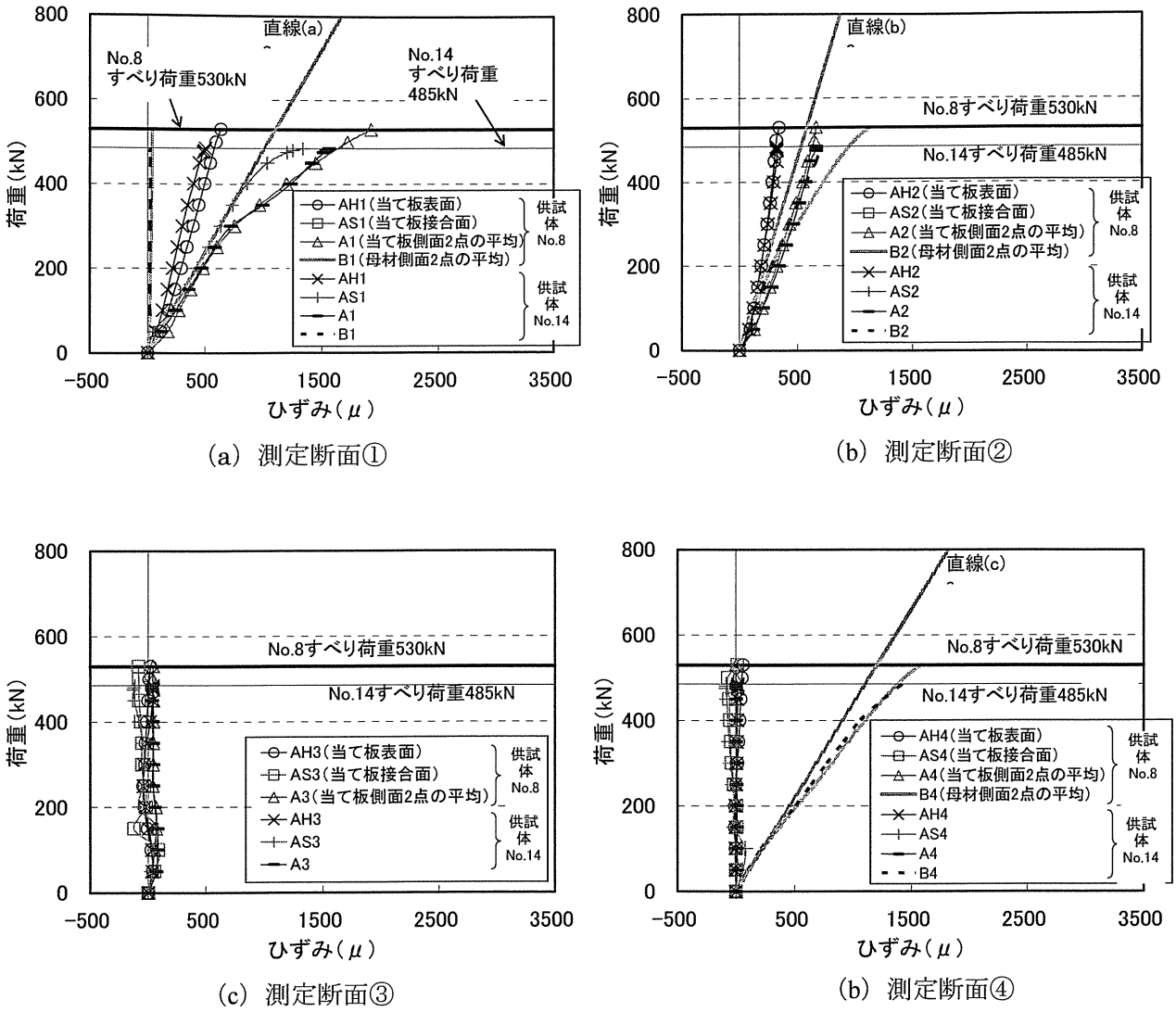
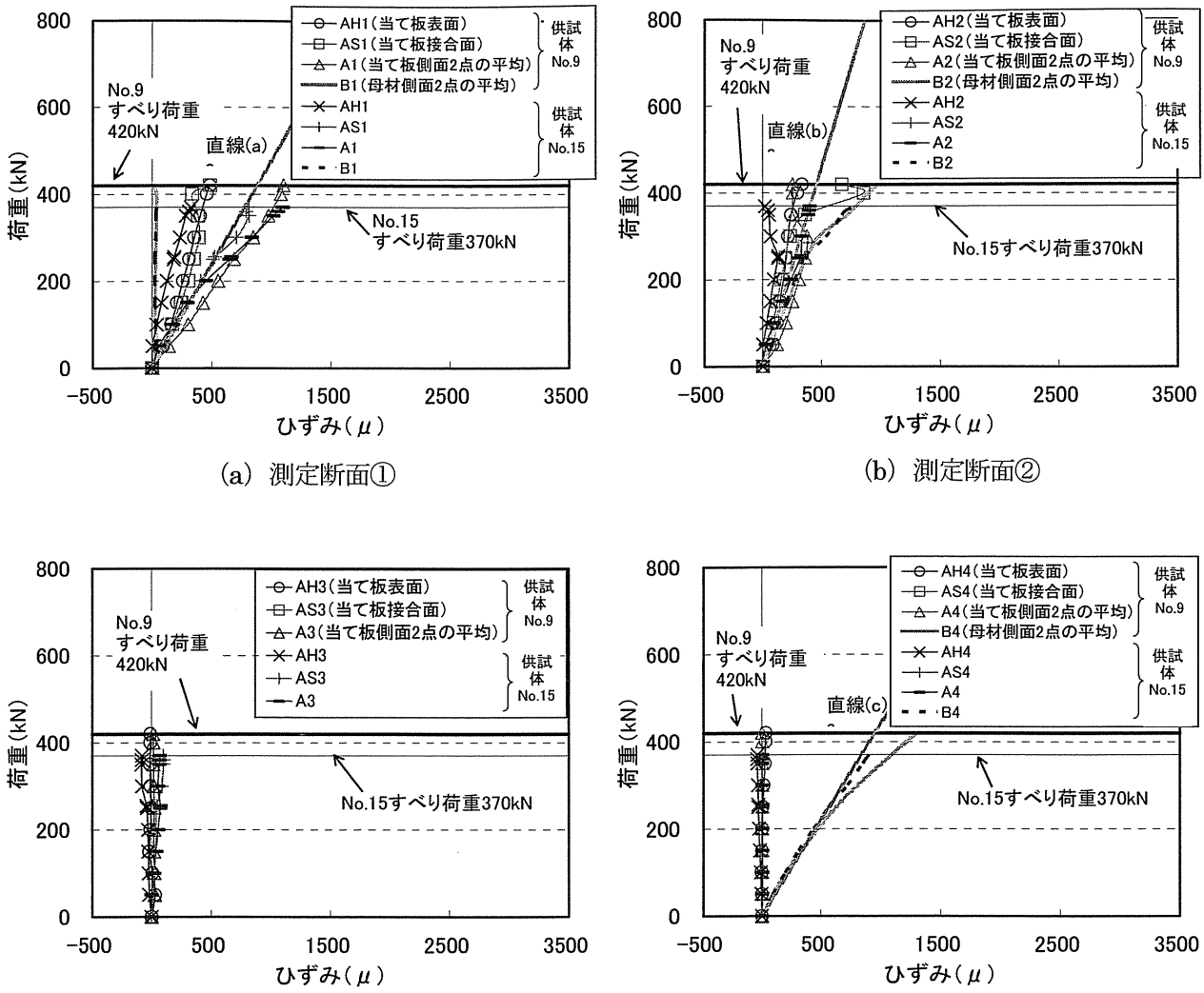


図-6.5.2　樹脂有りの供試体における荷重－ひずみの関係

(供試体 No.8 及び No.14, 目標導入軸力 112kN)



(a) 測定断面①

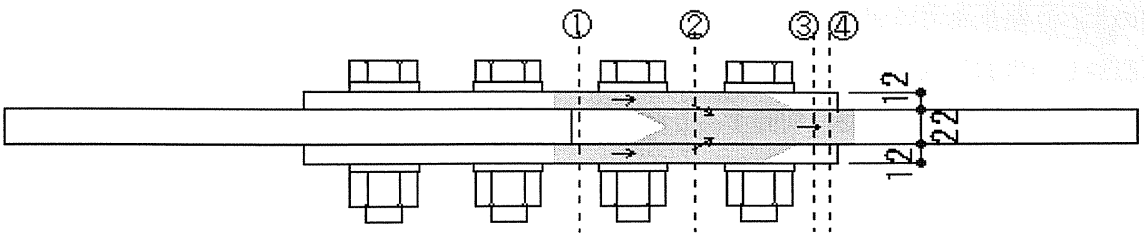
(b) 測定断面②

(c) 測定断面③

(b) 測定断面④

図-6.5.3 樹脂有りの供試体における荷重－ひずみの関係

(供試体 No.9 及び No.15, 目標導入軸力 45kN)



断面(a)　当て板 2 枚，24mm×100mm　　$A_1 = 2{,}400mm^2$

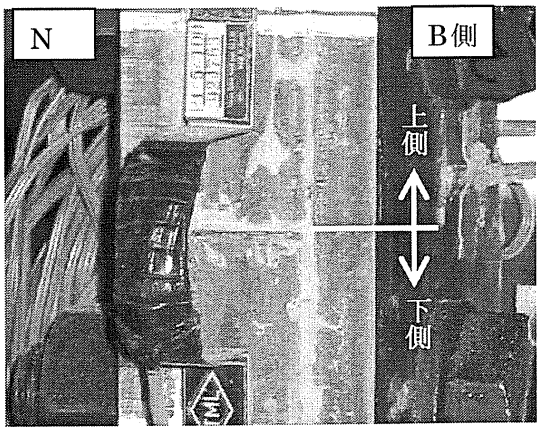
断面(b)　母材＋当て板 2 枚，46mm×100mm $A_2 = 4{,}600mm^2$

断面(c)　母材，22mm×100mm　　$A_3 = 2{,}200mm^2$

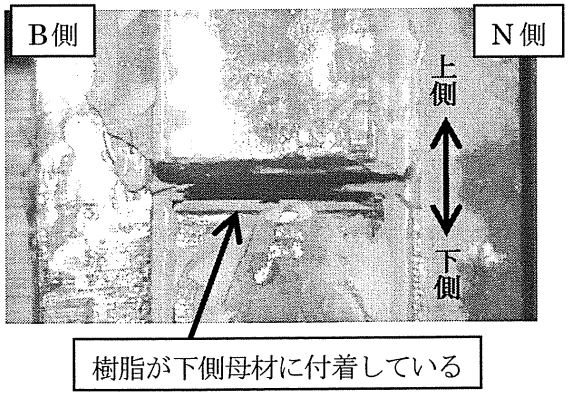
注）網掛け部は，荷重を分担している断面(図-6.5.1 より推定)

矢印は，応力の流れのイメージ図

図-6.5.4　板ひずみ(計算値)の算出断面



(a) 載荷前



(b) 載荷後

図-6.5.5　組立て時に母材突合せ部に入り込んだ樹脂
の載荷前後の状況（供試体 No.7 の例）

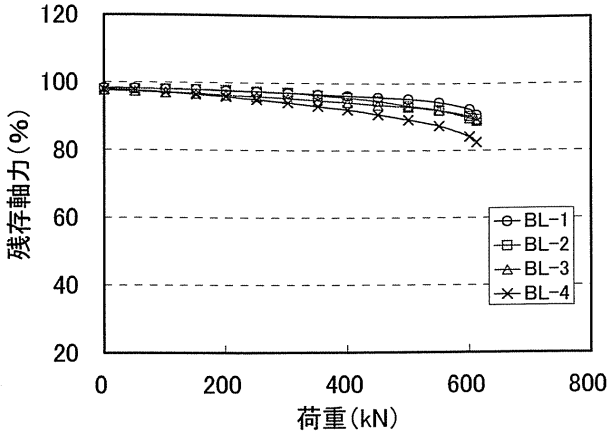
6.6　載荷中のボルト軸力

図-6.6.1～5 に，荷重と載荷中における各ボルト軸力の関係を示す。また，図-6.6.6 では，ボルト 4 本の平均軸力について同様の関係を示す。ボルト軸力は，目標導入軸力に対する残存軸力の割合で表し，初回のすべり発生までの挙動を示した。

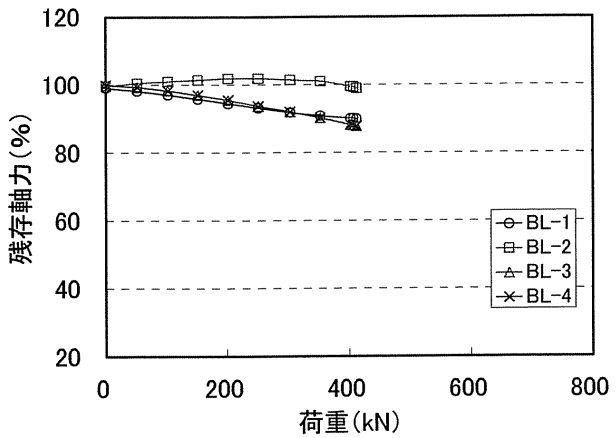
樹脂無しの供試体 No.1～3 では，目標導入軸力が低いほど，荷重の増加に対するボルトの軸力低下の割合が大きい傾向が見られた。初回すべり時に 10～20%の軸力低下が見られた。

樹脂有りの供試体 No.4～15 の場合，ボルト BL-2 及び BL-3 は，載荷とともに軸力が低下するか，もしくはほぼ横ばい状態で推移していたが，ボルト BL-1 及び BL-4 では，樹脂が厚く，目標導入軸力が低い場合において，荷重 200～400kN の範囲で軸力が増加する傾向が見られた。

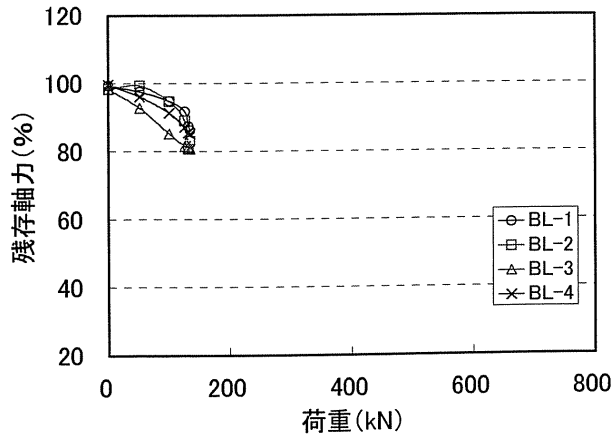
本試験では，載荷軸方向とボルト頭に貼付けたひずみゲージの方向を合わせなかったことから，載荷中におけるボルト頭部の曲げの影響について確認できていないものの，載荷中のボルト軸力の挙動について樹脂無し(高力ボルト摩擦接合継手)と樹脂有りの場合で違いが見られた。



(a) 供試体 No.1
(樹脂無し，目標導入軸力 225kN)

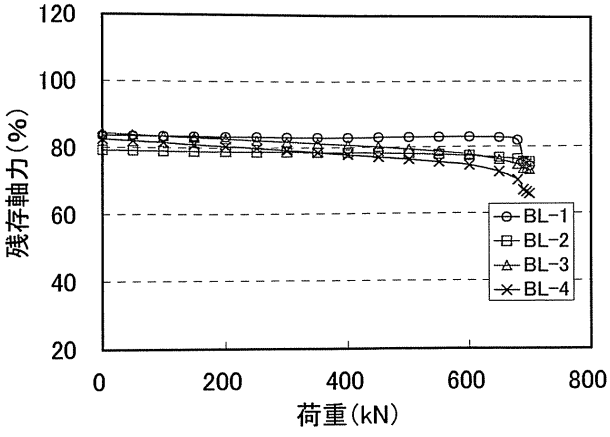


(b) 供試体 No.2
(樹脂無し，目標導入軸力 112kN)

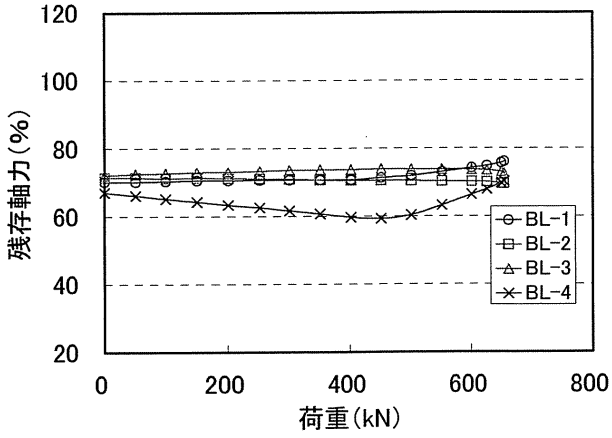


(c) 供試体 No.3
(樹脂無し，目標導入軸力 45kN)

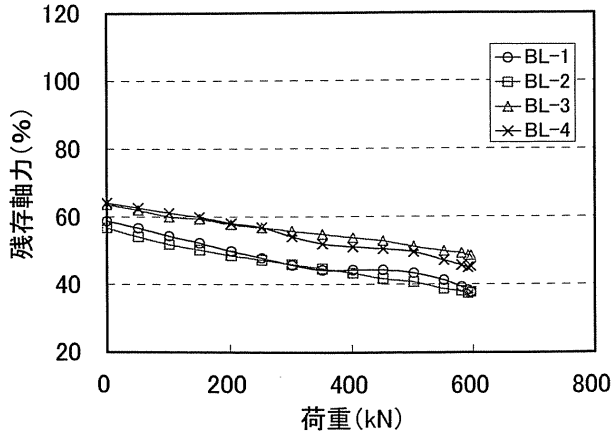
図-6.6.1 載荷中のボルト軸力
(樹脂無し)



(a) 供試体 No.4
(樹脂厚 1.4mm，目標導入軸力 225kN)

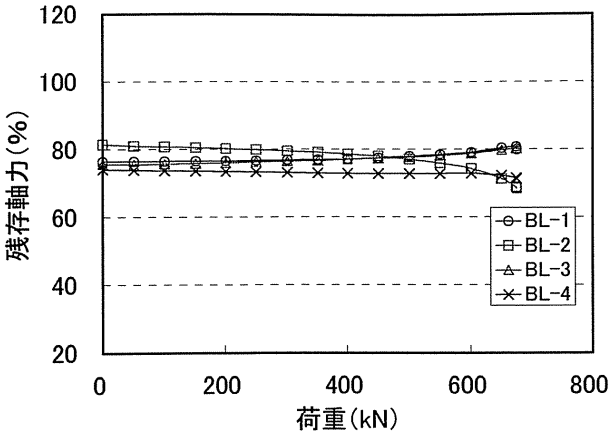


(b) 供試体 No.5
(樹脂厚 1.3mm，目標導入軸力 112kN)

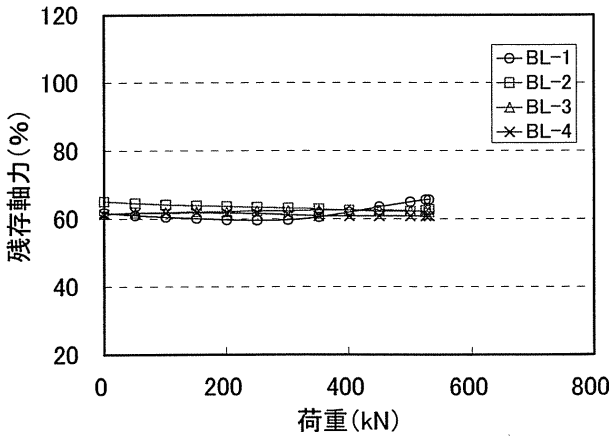


(c) 供試体 No.6
(樹脂厚 1.3mm，目標導入軸力 45kN)

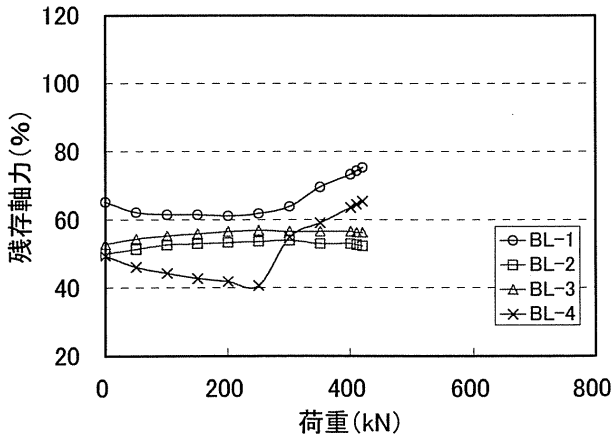
図-6.6.2 載荷中のボルト軸力
(目標樹脂厚 1mm)



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

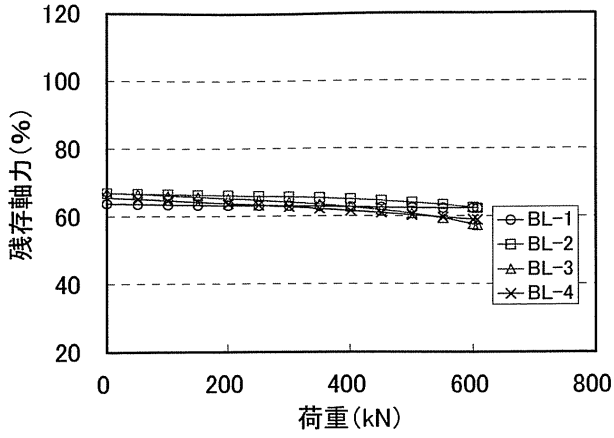


(b) 供試体 No.8
(樹脂厚 2.7mm, 目標導入軸力 112kN)

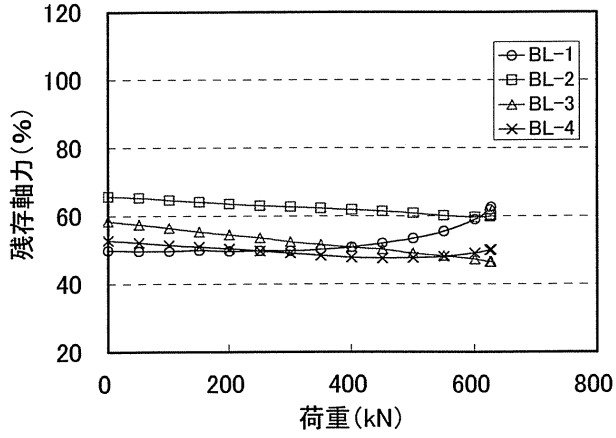


(c) 供試体 No.9
(樹脂厚 2.6mm, 目標導入軸力 45kN)

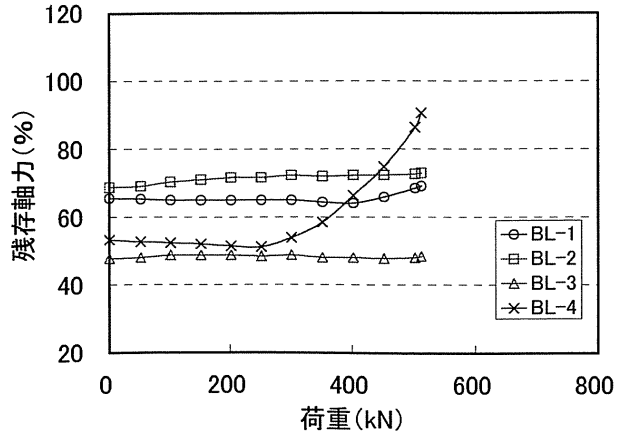
図-6.6.3 載荷中のボルト軸力
(目標樹脂厚 2mm)



(a) 供試体 No.10
(樹脂厚 3.6mm, 目標導入軸力 225kN)

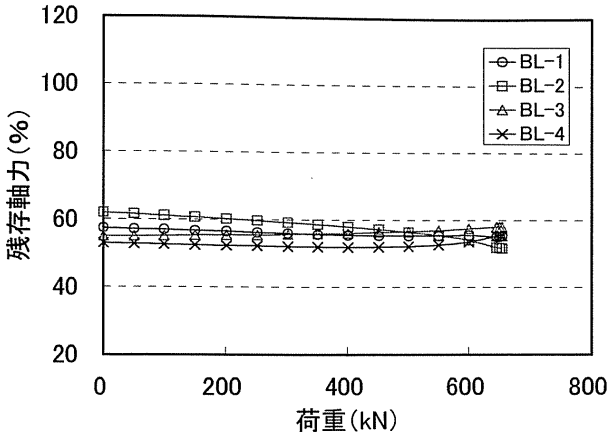


(b) 供試体 No.11
(樹脂厚 3.7mm, 目標導入軸力 112kN)

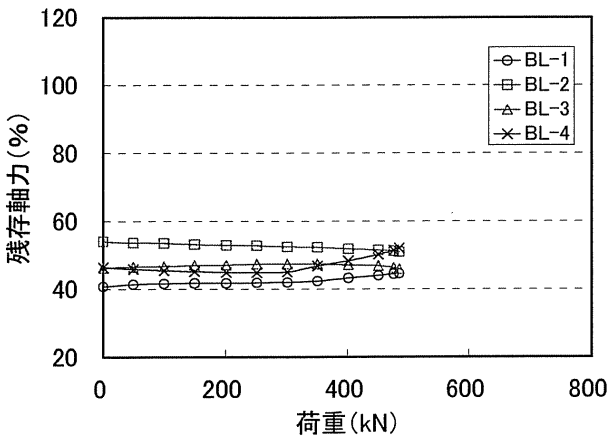


(c) 供試体 No.12
(樹脂厚 3.4mm, 目標導入軸力 45kN)

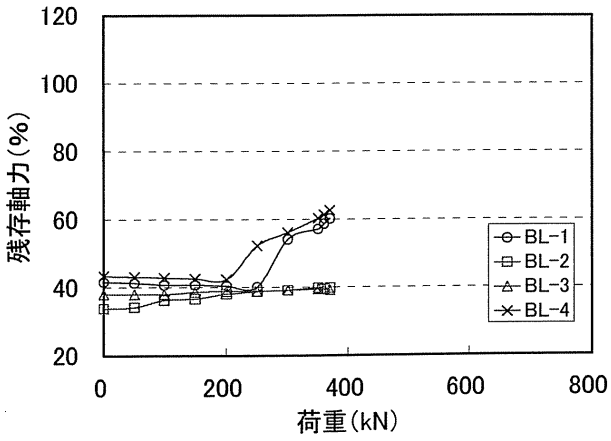
図-6.6.4 載荷中のボルト軸力
(目標樹脂厚 3mm)



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

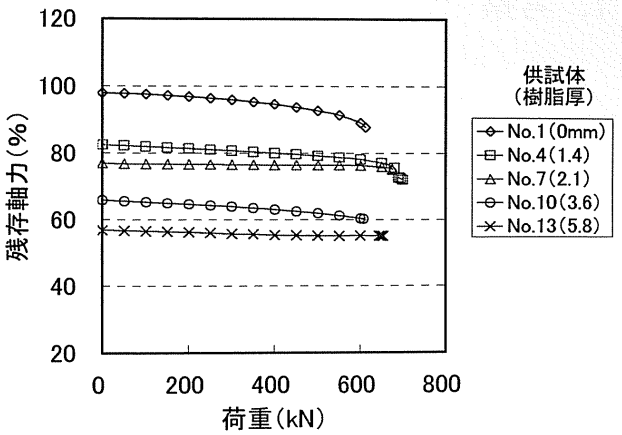


(b) 供試体 No.14
(樹脂厚 5.5mm, 目標導入軸力 112kN)

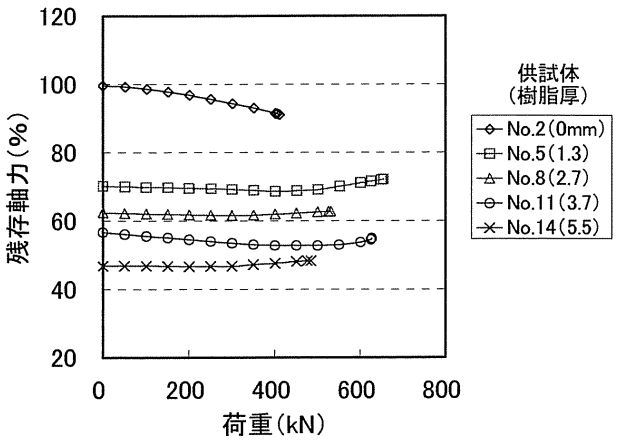


(c) 供試体 No.15
(樹脂厚 5.8mm, 目標導入軸力 45kN)

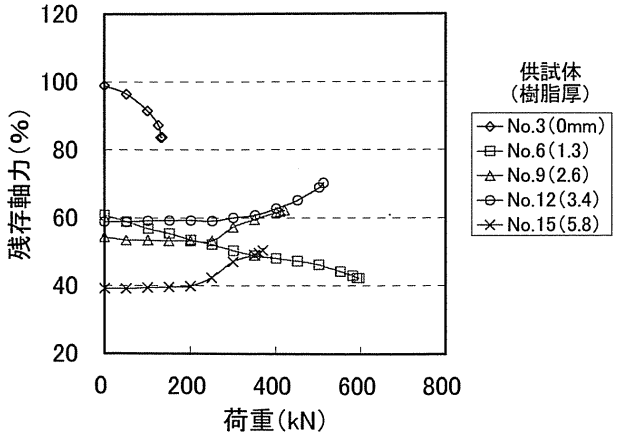
図-6.6.5 載荷中のボルト軸力
(目標樹脂厚 5mm)



(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-6.6.6 載荷中のボルト軸力
(各供試体のボルト 4 本の平均)

7. 考察

7.1 すべり耐力に及ぼす樹脂厚の影響

接着継手[7.1]や接合面に樹脂を塗布した高力ボルト継手[7.2](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(7.1)に示すせん断強度 v_s で表されることがある。図-7.1.1 に，式(7.1)で計算した各供試体のせん断強度 v_s と，式(7.2)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 σ_o の関係を示す。

$$v_s = (P_s / 2) / A_c \qquad (7.1)$$

$$\sigma_o = (m \times N_r) / A_c \qquad (7.2)$$

ここに，$P_s/2$：接合面 1 面当たりのすべり荷重

N_r：試験前のボルト軸力（表-6.1.1 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－$2A_h$，樹脂無し：幅 100mm×160mm－$2A_h$）

A_h：ボルト孔面積（孔径 ϕ 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 σ_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，6.3 節で述べたように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 σ_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。

同様の図において，樹脂ありの破壊形態(表-6.2.2)に応じて記号を変えた図を図-7.1.2 に示す。σ_o，v_s が大きいほど，凝集破壊する傾向が見られた。

なお，図-7.1.1 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。

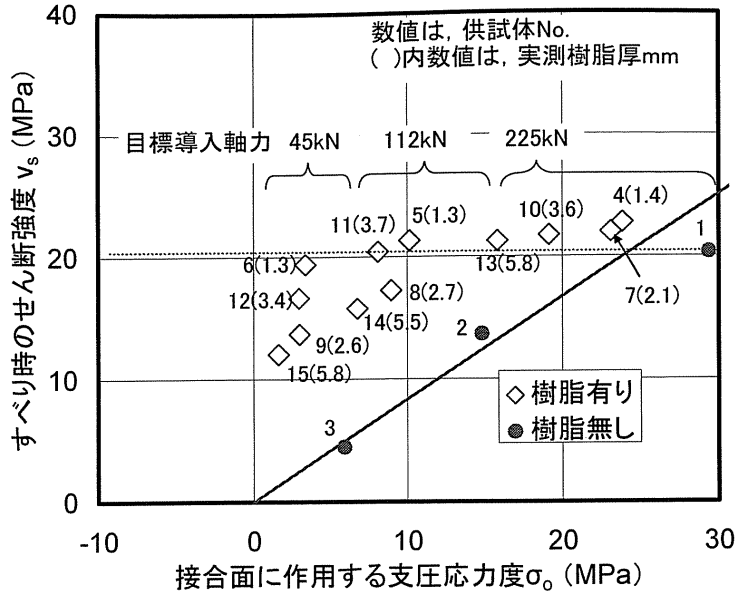


図-7.1.1　継手のせん断強度 v_s とボルトの締付けによる支圧応力度 σ_o の関係

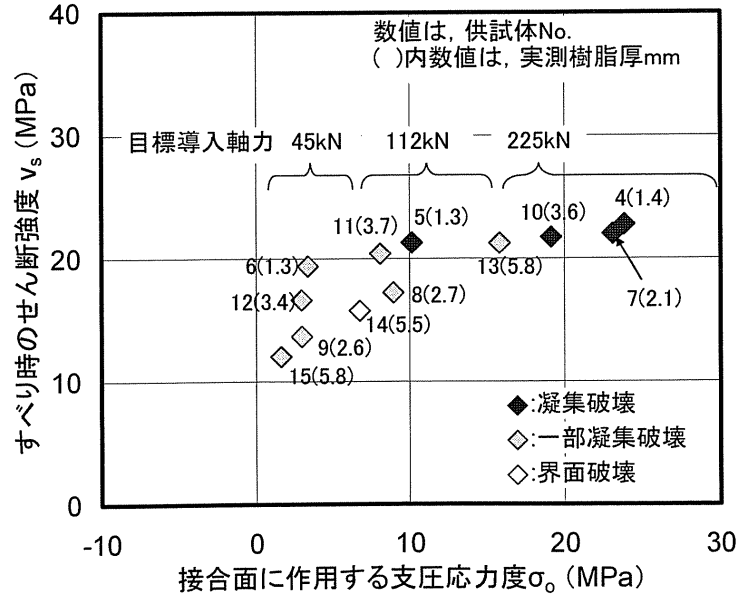


図-7.1.2　破壊形態と継手の $v_s-\sigma_o$ の関係

7.2　ボルト軸力に及ぼす樹脂のクリープの影響

前掲図-5.2.1～5 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，及びクリープによる収縮が考えられる。ここでは，次に示す式(7.3)，式(7.4)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(7.3)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。

$$\varepsilon_{bolt} = \varepsilon_{resin} \cdot t_{resin} \cdot n / L_{bolt} \qquad (7.3)$$

ここに，

ε_{bolt} ：樹脂の膨張・収縮に伴うボルトの軸ひずみ

ε_{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(7.4)は，実測したボルト軸力の経時変化から，次に述べる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の軸ひずみ減少量 ε_{cr} を算出するものである。

$$\varepsilon_{cr}(t) = \varepsilon_o - \varepsilon(t) - \varepsilon_{relax}(t) - \varepsilon_{sh}(t) - \varepsilon_T(t) \qquad (7.4)$$

ここに，

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

t：ボルト締付け後の経過時間(時間)

ε_o：初期導入軸力によるボルトの軸ひずみ

$\varepsilon(t) = N(t) / (A_{bolt} \cdot E_o)$

$\varepsilon(t)$：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 22 mm)

E_o：高力ボルトの弾性係数（=200 GPa）

$\varepsilon_{relax}(t) = N_i(t) / (A_{bolt} \cdot E_o)$

$\varepsilon_{relax}(t)$：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

目標導入軸力 100 %の場合は図-5.2.7 の式によった。

目標導入軸力 50, 20 %の場合は 0 とした。

$\varepsilon_{sh}(t) = t \cdot \varepsilon_s \cdot t_{resin} \cdot n / L_{bolt}$

$\varepsilon_{sh}(t)$：樹脂硬化時の収縮によるボルトの軸ひずみ

ε_s：樹脂硬化時の収縮率

($t < 24$ の場合，$\varepsilon_s = 200 \times 10^{-6} / 24h$，$t \geqq 24$ の場合，$t \cdot \varepsilon_s = 200 \times 10^{-6}$ 一定)

$\varepsilon_T(t) = \Delta T(t) \cdot \alpha \cdot t_{resin} \cdot n / L_{bolt}$

$\varepsilon_T(t)$：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

α ：樹脂の熱膨張係数 $(= 32.2 \times 10^{-6} / ℃)$

式(7.4)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

図-7.2.1 に，本試験で用いた樹脂のメーカー技術資料[7.3)]を参考とした，樹脂の硬化収縮量の経時変化に関する模式図を示す。文献 7.3)によれば，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。

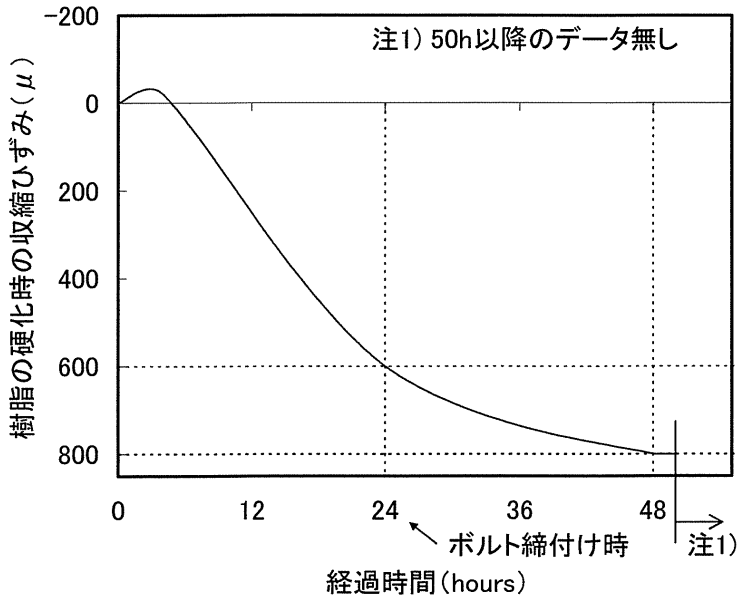


図-7.2.1　樹脂の硬化時における収縮量の経時変化（模式図）

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，前掲図-5.2.1～5 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-4.2.3 に示した熱膨張係数を用いて計算する。

図-7.2.2 に，樹脂のクリープ量によるボルト軸ひずみ減少量の計算結果の例を示す。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($\varepsilon_o - \varepsilon(t)$)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 $\varepsilon_{cr}(t)$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(7.4)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 ε_{cr}^*として算定した。図-7.2.3 に，目標導入軸力別に ε_{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 ε_{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，$\varepsilon_{cr}(t)$をクリープのモデルの一つである式(7.5)[7.4] に当てはめ，パラメータ τ を算定する。

$$\varepsilon_{cr}(t) = \varepsilon_{cr}^* (1-e^{-t/\tau}) \qquad (7.5)$$

ここに，

ε_{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 $\varepsilon_{cr}(t)$の平均値)

ただし，本試験の結果では，τ は一定値とならないことから，次に示す式(7.6)または単純化した式(7.7)のとおり表わすこととした。

$$\tau = a \cdot t^{b} \qquad (7.6)$$

$$\tau = a' \cdot t^{0.5} \qquad (7.7)$$

ここに，a，b，a'：定数

図-7.2.4～16 に，定数 a，b，a'を求めるための回帰分析結果を示す。左図が式(7.6)，右図が式(7.7)の結果である。回帰に用いた τ は，いずれも測定した実データを用いて式(7.8)により算定した。

$$\tau = -t / \ln(1-\varepsilon_{cr}(t)/\varepsilon_{cr}^*) \qquad (7.8)$$

図-7.2.2 に供試体 No.7 のあてはめ結果の一例を示す(a=0.60，b=0.69)。あてはめ結果は式(7.4)とよく一致することが確認できる。

表-7.2.1 に各供試体の ε_{cr} の測定結果に対する式(7.5)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(7.6)，(7.7)ともに 0.90 以上)。式(7.5)と単純化した式(7.7)，及び a'の平均値(表-7.2.1)から次式(7.9)が得られる。

$$\varepsilon_{cr}(t) = \varepsilon_{cr}^* (1-\exp(-t^{0.5}/0.75)) \qquad (7.9)$$

図-7.2.1 に，式(7.9)による計算結果を示す。式(7.9)は，$\varepsilon_{cr}(t)$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。

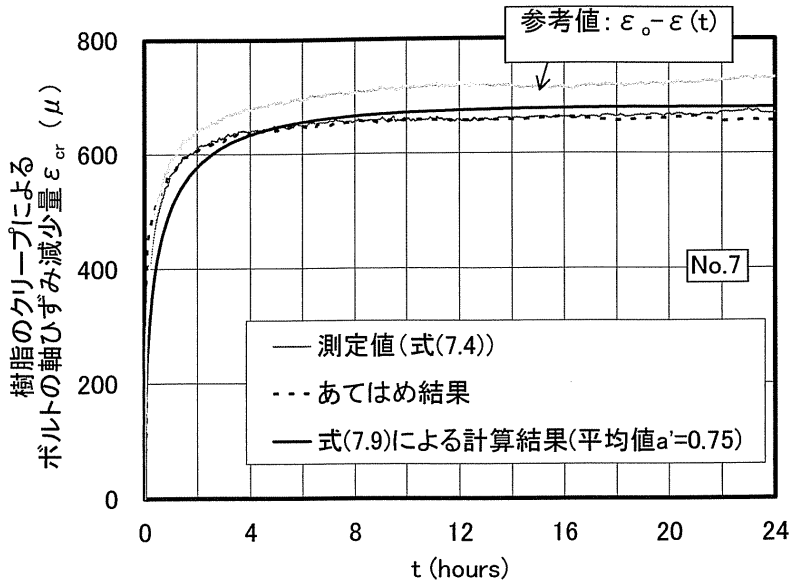


図-7.2.2　樹脂のクリープによるボルト軸ひずみの計算例(供試体 No.7)

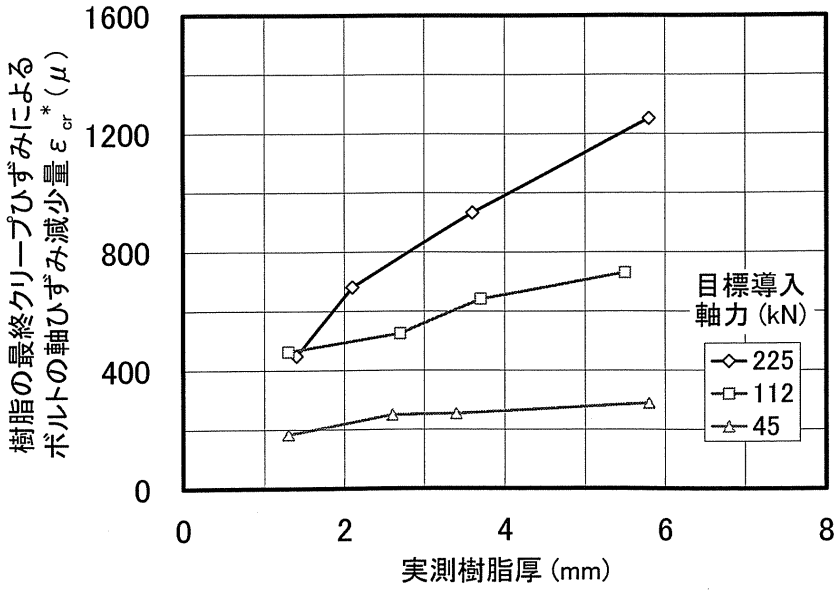


図-7.2.3　ε_{cr}*と実測樹脂厚の関係

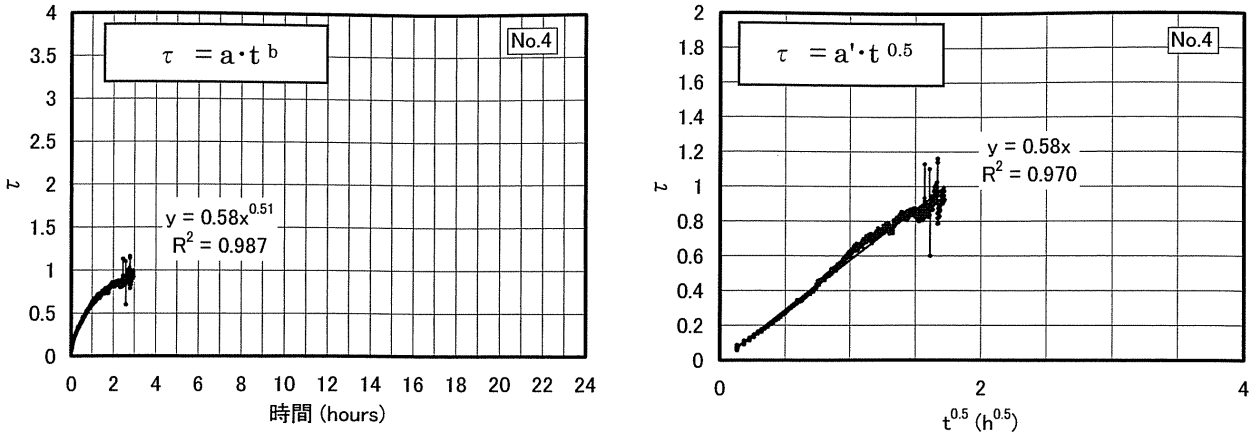


図-7.2.4　回帰分析結果

（供試体 No.4：樹脂厚 1.4mm，目標導入軸力 225kN）

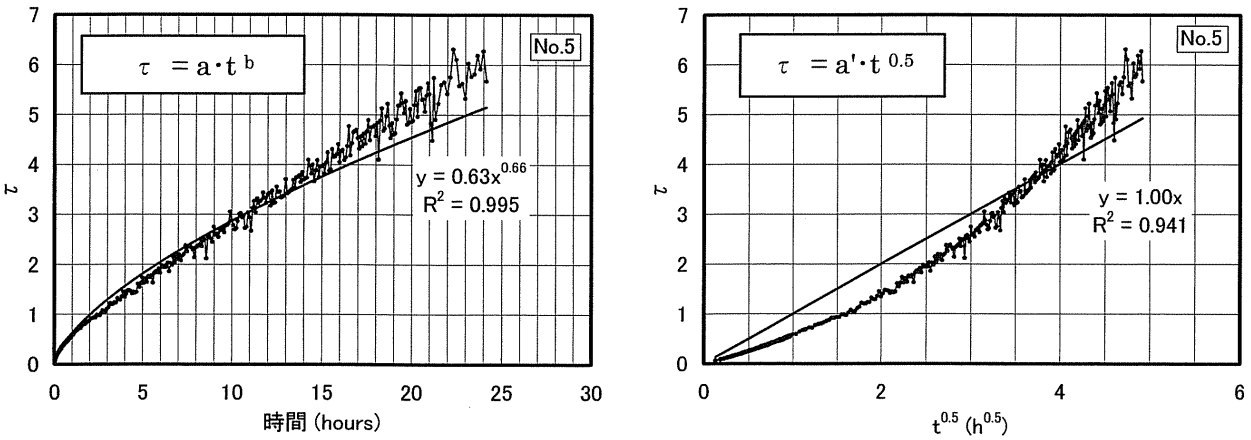


図-7.2.5　回帰分析結果

（供試体 No.5：樹脂厚 1.3mm，目標導入軸力 112kN）

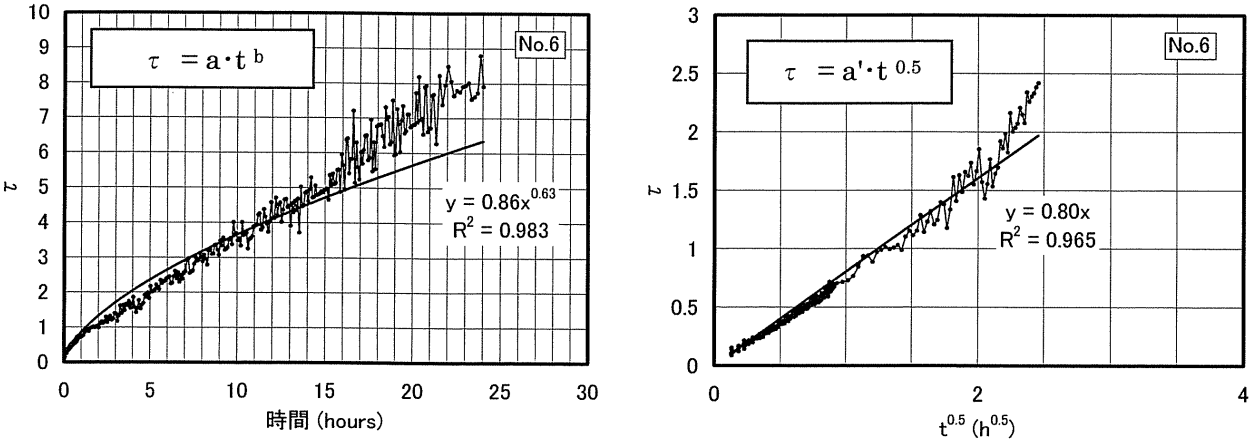


図-7.2.6　回帰分析結果

（供試体 No.6：樹脂厚 1.3mm，目標導入軸力 45kN）

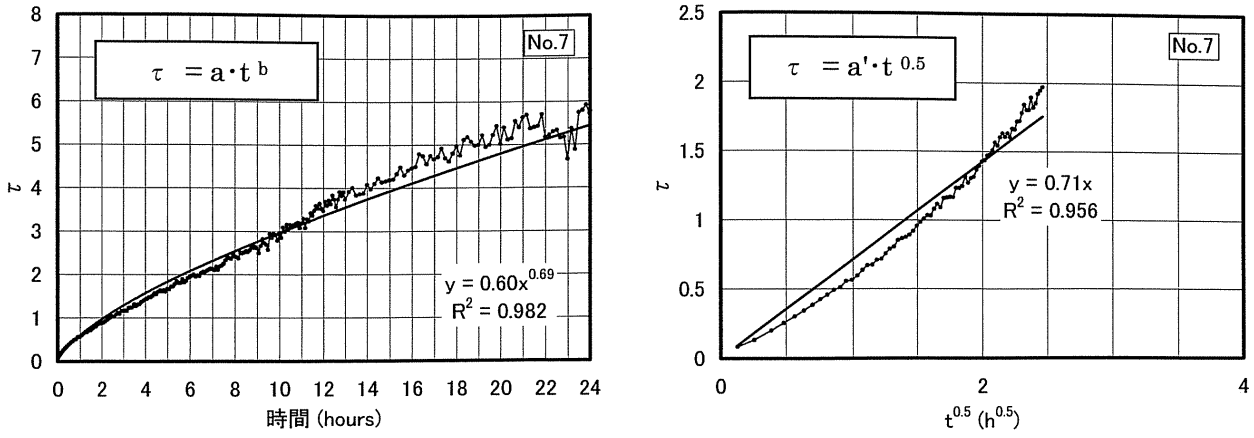


図-7.2.7　回帰分析結果

（供試体 No.7：樹脂厚 2.1mm，目標導入軸力 225kN）

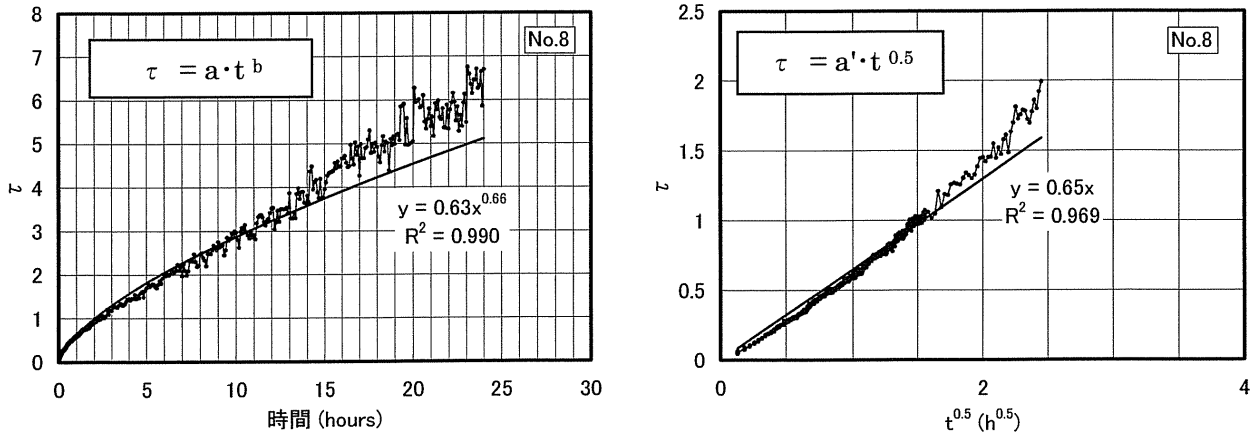


図-7.2.8　回帰分析結果

（供試体 No.8：樹脂厚 2.7mm，目標導入軸力 112kN）

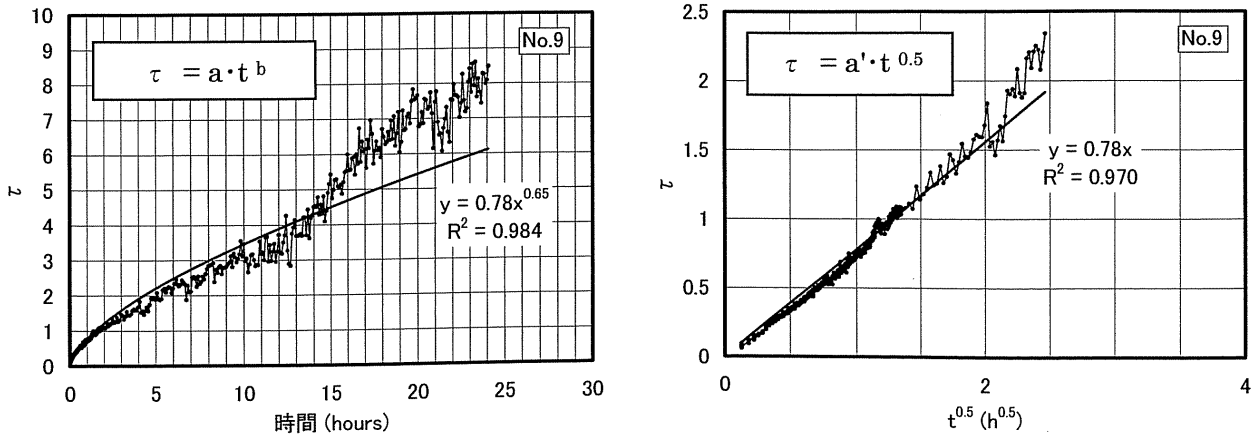
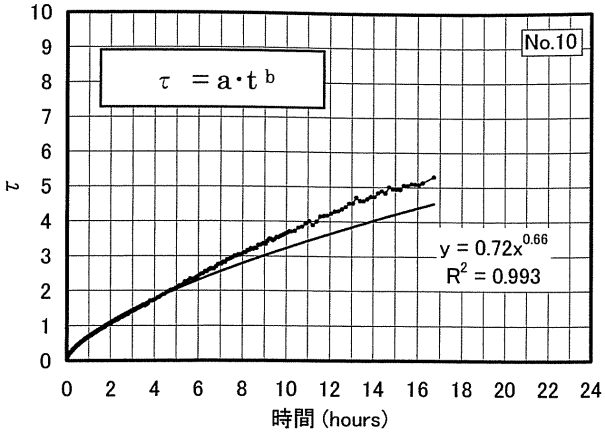


図-7.2.9　回帰分析結果

（供試体 No.9：樹脂厚 2.6mm，目標導入軸力 45kN）



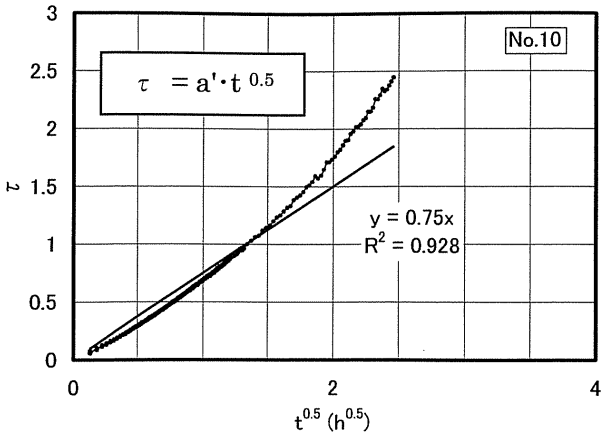
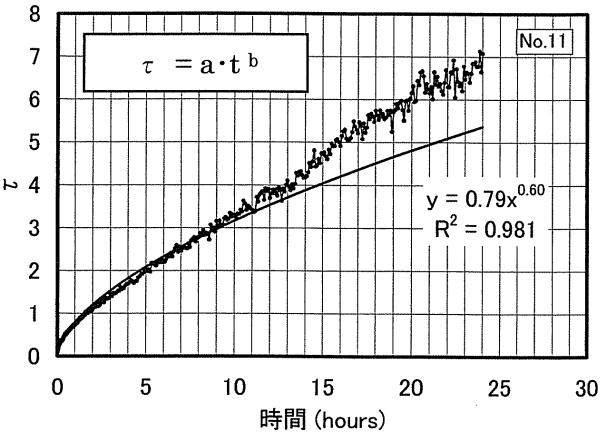


図-7.2.10　回帰分析結果

（供試体 No.10：樹脂厚 3.6mm，目標導入軸力 225kN）



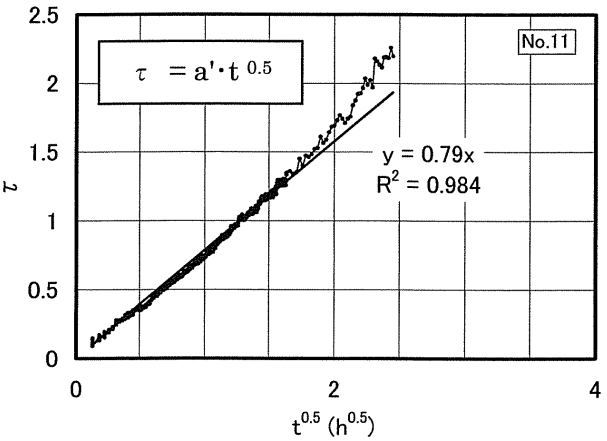
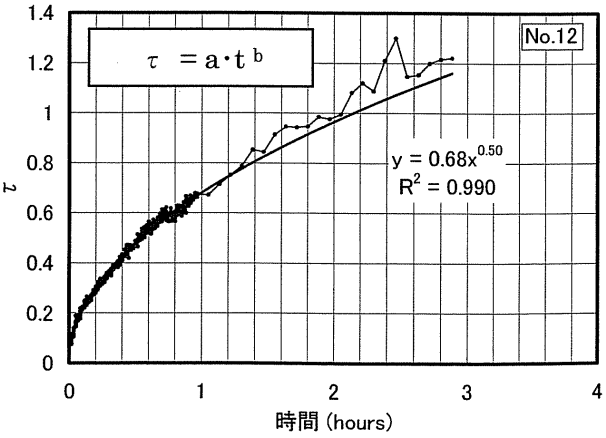


図-7.2.11　回帰分析結果

（供試体 No.11：樹脂厚 3.7mm，目標導入軸力 112kN）



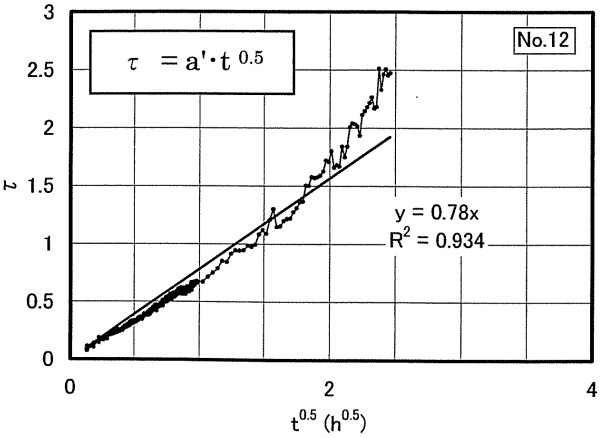


図-7.2.12　回帰分析結果

（供試体 No.12：樹脂厚 3.4mm，目標導入軸力 45kN）

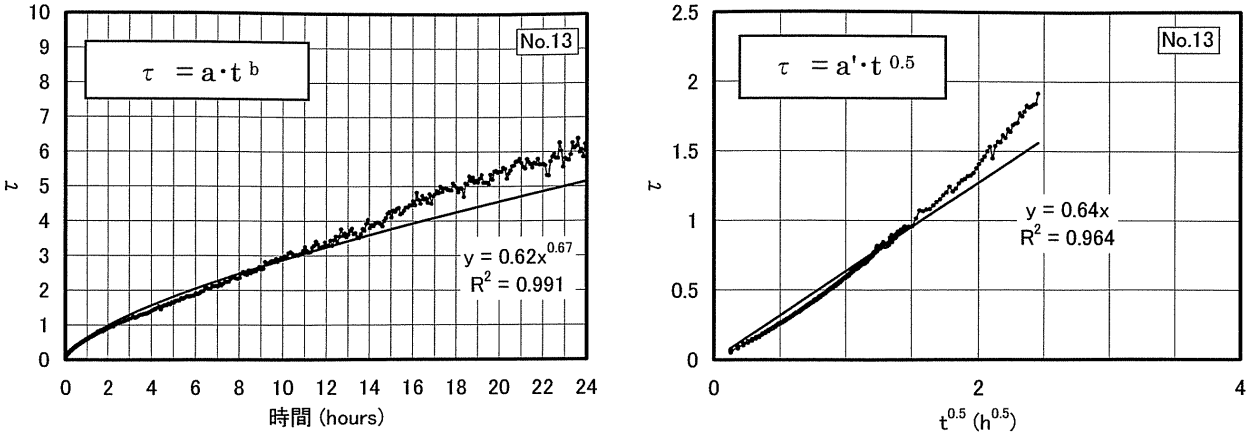


図-7.2.13　回帰分析結果

（供試体 No.13：樹脂厚 5.8mm，目標導入軸力 225kN）

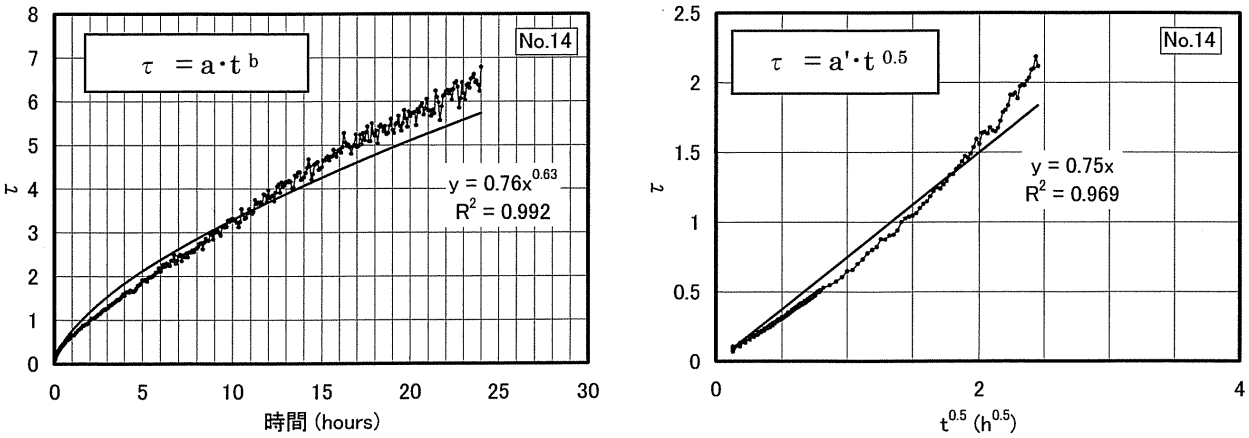


図-7.2.14　回帰分析結果

（供試体 No.14：樹脂厚 5.5mm，目標導入軸力 112kN）

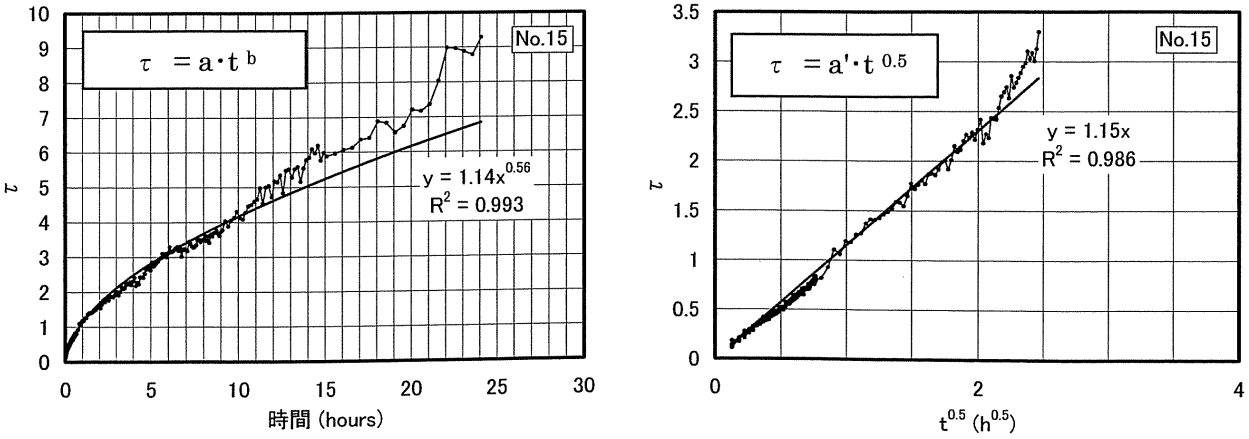


図-7.2.15　回帰分析結果

（供試体 No.15：樹脂厚 5.8mm，目標導入軸力 45kN）

表-7.2.1　ε_{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)	ε_{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

8. 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) ボルト軸力の目標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 σ_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 σ_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の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 ε_{cr}^*は，目標導入軸力が 225 kN 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，目標導入軸力が 45 kN 及び 112 kN の場合は，樹脂厚が ε_{cr}^*に及ぼす影響は小さかった。

参考文献

[第 1 章]

1.1) 篠原洋司ほか：既設橋梁の耐久性評価・向上技術に関する調査研究，土木研究所資料第 2420 号，1986.11.

1.2) 西川和廣，村越潤，上仙靖，福地友博，中嶋浩之：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.

1.3) 名取暢，西川和廣，村越潤，大野崇：鋼橋の腐食事例調査とその分析，土木学会論文集 No.668／I-54，pp.299-311，2001.1.

1.4) コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究－コンクリート橋の損傷状況と維持管理費の実態調査－，土木研究所資料第 3811 号，2001.3.

[第 2 章]

2.1) 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.

2.2) 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.

2.3) 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.

2.4) 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.

[第 3 章]

3.1) Goland, M. and Reissner, E., The stresses in cemented joints，Journal of Applied Mechanics, pp.17-27，1944.

3.2) 大沼康二：金属外板接着部の応力分布と強さ特性について，航空学会誌，第 7 巻第 60 号，PP.1-6，1958.

3.3) 松居國夫：接着継手の静荷重設計と疲労設計，日本接着学会誌 Vol.29，No.4，pp.153-165，1993.

3.4) 日本接着協会：接着ハンドブック（第 2 版），日刊工業新聞社，1980.11.

3.5) 有原隆雄，田中一實：接着剤の鋼構造物への適用に関する実験的研究，横河橋梁技報 No.10，1980.11.

3.6) 井本稔，黄慶雲：接着の科学，岩波新書，1966.

3.7) 杉崎守：ボルト・接着剤併用せん断継手の実験的研究，石川島播磨技報 Vol.38，No.1，pp.37-42，1998.

3.8) 接着接合研究小委員会：鋼構造物への接着接合の適用，(社)日本鋼構造協会，JSSC テクニカルレ

ポート No.26, 1993.11.

3.9) 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.

3.10) 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.

3.11) 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.

3.12) 前掲 2.4)と同じ

3.13) (社)日本鋼構造協会, (社)鋼材倶楽部：鋼構造接合資料集成－リベット接合・高力ボルト接合－, 技報堂, 1977.3.

3.14) 山本善行, 久保操：接合面にジンクリッチペイントを塗装した摩擦接合継手の滑り試験, 橋梁と基礎, 12-3, pp.14-18, 1978.3.

3.15) 佐伯彰一, 宮田年耕：接合面にジンクリッチペイントを塗布した高力ボルト摩擦接合継手に関する研究の動向, 土木技術資料, 25-8, pp.49-53, 1983.8.

3.16) 佐伯彰一, 宮田年耕, 佐藤和徳, 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１)－, 土木研究所資料第2095号, 1984.3.

3.17) 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.

[第4章]

4.1) 佐伯彰一, 西川和廣, 滝沢晃：高力ボルト摩擦接合継手に関する試験調査(Ⅰ)引張荷重を受ける継手のすべり耐力, 土木研究所資料第1971号, 1982.9.

[第6章]

6.1) 西田正孝：応力集中, 森北出版, 1967.9.

[第7章]

7.1) 前掲 3.5)と同じ

7.2) 前掲 3.9)と同じ

7.3) ショーボンド技術資料 R-TKE060712, 硬化収縮率測定

7.4) 日本複合材料学会：複合材料ハンドブック, 1989.11.