

## 高力ボルト接着接合継手を用いた補強技術に関する研究

研究予算：運営交付金

研究期間：平 21～平 23

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：村越 潤，田中 良樹，  
吉田 英二

### 【要旨】

本研究は、接着剤の材料物性値の影響を含め、接合面に接着剤を塗布したボルト継手の力学的特性を明らかにして、鋼部材を用いた道路橋の補強技術としての同継手の適用方法を示すことを目的とする。本文では、本課題の中で実施した、ガラス転移点が高い接着剤のせん断試験及び継手のラップ長やボルト本数が異なるボルト接着継手供試体の静的引張試験について報告する。これらの結果より、既往の評価式が概ね妥当であることが確認されたが、鋼板のボルト孔周囲の降伏が継手耐力に及ぼす点に関して、ラップ長やボルト配置によっては母材と添接板の合計断面が有効となる場合と、母材のみの断面が有効となる場合があり、両者の違いが継手耐力に及ぼす影響が顕著であることがわかった。それらの結果を踏まえて、ボルト接着継手の設計・施工の骨子案を提示した。  
キーワード：補強，ボルト，付着，接着剤，エポキシ樹脂，ガラス転移点

### 1. まえがき

既設道路橋における鋼部材の補強に際して、補強部材の接合には一般に高力ボルト接合と溶接接合が考えられる。しかしながら、既設橋の鋼部材の溶接接合は施工品質確保の観点で、その適用が大きく制限されることから、高力ボルト接合に限定される。また、高力ボルト接合についても、腐食等による接合面の不陸等すべり係数確保の不確実性の観点から、支圧接合継手を用いられることがある。しかし、支圧接合継手は孔加工に高い精度が必要であるとともに、工数がかかることから、接合面に接着剤を塗布して、接合面の平坦性を確保した上で、高力ボルト摩擦接合継手とみなして設計・施工される事例が見られる(図-1)<sup>1)2)</sup>。これによって、補修・補強工法の合理化、信頼性向上につながる可能性が高いのであるが、接合面に接着剤を塗布した場合(以下、ボルト接着継手)、接着剤の特性からその破壊機構が一般の摩擦接合継手と異なる<sup>3)</sup>。既往の研究から、ボルト接着継手は、接着剤を用いた鋼部材間の接着継手に、ボルトで軸力を導入することによって接着剤の接着効率を改善することによる継手構造であると考えられる(図-2)。しかし、接着剤の材料物性値がボルト接着継手のせん断強度等の力学的特性に及ぼす影響や、ボルトの配置の影響など、その力学的性状は必ずしも明確でない。本研究では、ボルト接着継手を鋼部材の一補強ツールとして確立するため、これらの点について実験的検討を行った。



図-1 腐食した鋼部材のボルト接着による補強事例

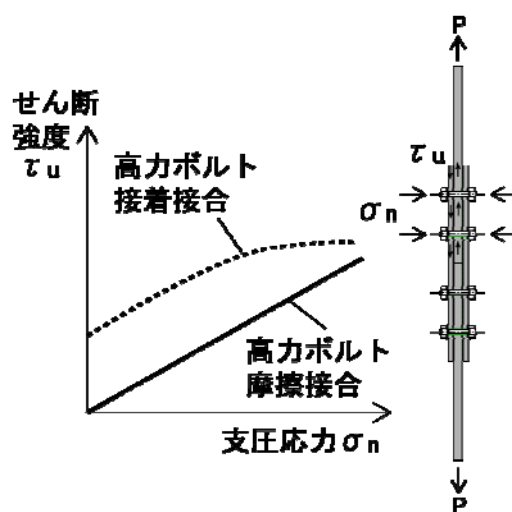


図-2 ボルト接着継手の耐荷機構イメージ

## 2. 既往の調査研究

Albrecht ら<sup>3)</sup>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 体の引張荷試験(樹脂あり 11 体、樹脂なし 11 体)及びびり供試体 6 体の曲げ試験を実施した。また、接着剤のせん断強度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従する接着剤のひずみが終局限界ひずみに達した場合に最大荷重に達すると想定して、式(1)及び式(2)による照査を提案し、その計算値と試験結果が比較された。

$$P_{wa} = m A_c f_{wa} \quad (1)$$

$$P_{yn} = A_n f_y \quad (2)$$

ここに、 $P_{wa}$ ：接着剤の引張破壊荷重、 $m$ ：接合面数、 $A_c$ ：ボルト孔を控除した接合面積、 $f_{wa}$ ：接着剤のせん断強度、 $P_{yn}$ ：純断面降伏荷重、 $A_n$ ：純断面積、 $f_y$ ：板の降伏点

その結果、a) 樹脂ありの引張荷試験の結果は、式(1)または式(2)とよく一致したこと、b) 樹脂ありの供試体の破壊は脆性的であったこと(すべった後は支圧接合に移行したが、すべり荷重には至らなかった)、c) 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ことがわかった<sup>3)</sup>。

腐食した鋼部材の補強の際にボルト接着継手が使用され、その際、部分的に接着剤層が厚い箇所(5mm 程度)にボルトが配置されることも想定されることから、「鋼橋桁端部の腐食に対する補強設計法に関する研究」(戦略、平成 18～20 年度)では、接着剤厚をパラメータとしたボルト接着継手の引張試験を実施した<sup>1),2)</sup>。その結果、a) Albrecht らの式(1)、(2)による照査方法は、接合面積 170mm×100mm、ボルト本数 2 本(1 行配置)の供試体において概ね妥当であったが、接着剤のせん断強度の評価方法は必ずしも明確でなく、少なくとも、ボルト軸力による直応力の影響を考慮する必要があること、b) 接着剤層が厚いほど、接着剤のクリープ変形に伴う軸力低下が大きいこと、c) その影響はクリープによる低下を考慮した直応力で評価できることがわかった<sup>1),2)</sup>。また、試験結果に基づき、接着剤のクリープによるボルト軸力低下量の推定方法を提示した<sup>1),2)</sup>。

## 3. 接着剤のせん断強度に及ぼす温度の影響

「鋼橋桁端部の腐食に対する補強設計法に関する研究」の中では、ガラス転移点  $T_g$  が 65°C の接着剤(101)について、JIS 試験と直応力を変えた二面せん断試験を実施した<sup>4)</sup>。これと対比して、ガラス転移点が低い

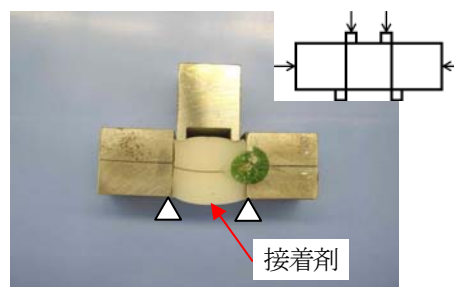
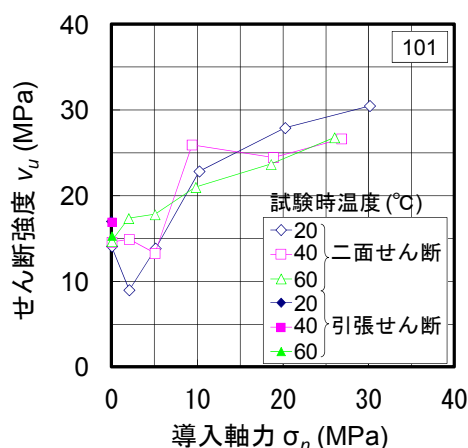
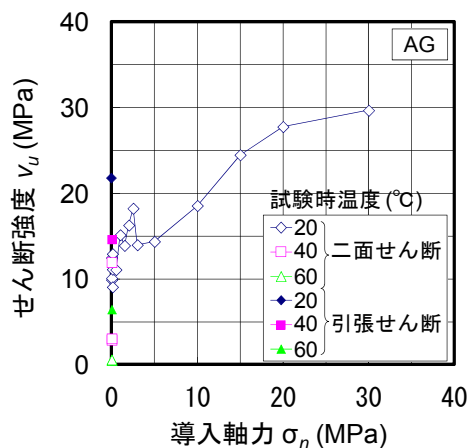


図-3 二面せん断試験における、ガラス転移点付近の温度下での接着剤の破壊事例



(a) 接着剤 101,  $T_g = 65^\circ\text{C}$  (既往のデータ<sup>4)</sup>より)



(b) 接着剤 AG,  $T_g = 44^\circ\text{C}$

図-4 二面せん断試験における接着剤のせん断強度に及ぼす試験時温度の影響

場合の性状を把握するため、ガラス転移点の低い接着剤(AG,  $T_g = 44^\circ\text{C}$ )について、同様の試験を実施した(図-3)。二面せん断試験は、小型供試体(20mm×20mm×64mm、厚さ 20mm の樹脂を厚さ 22mm、SS400 の鋼材ではさんだ供試体)を用いて、試験時温度 20、40、60°C の下でそれぞれ行った。直応力は、せん断試験の際に接

合面に直角に軸力を導入することによった。図-4 に、接着剤101(既往のデータ)とAGの二面せん断試験の結果を示す。プロットしたデータはそれぞれ1体の結果である。接着剤101の場合、接着剤と鋼材の境界面のせん断強度 $v_u$ は、温度60°Cの中でも急激な低下は見られなかったが、接着剤AGの場合、20°Cでの結果は101と概ね同様の強度特性を示すものの、温度40°C以上では、軸力の導入時点で変形が著しくせん断試験ができない状態であった。また、温度40°Cで、軸力なしの場合の二面せん断試験の結果は、20°Cの結果に比べて著しく低下した。なお、図-3では、温度40°Cで、軸力なしの場合の二面せん断試験の破壊状況を示した。

#### 4. ボルト配置の影響に関するボルト接着継手の引張試験

##### 4.1 目的

Albrecht らは、ボルト1本または2本で、比較的コンパクトなボルト配置の場合(接合面積 64mm×64mm 当たり軸径 16mm のボルト1本)に関して試験を行い、一定の成果を得たが、ボルト配置の影響は今後の課題としている<sup>3)</sup>。既設構造物の補強においては、上記の試験事例に比べて接合面積当りのボルト本数が少ない配置事例が見られることから(図-1)、その影響を把握する必要がある。また、ボルト接着継手は、接着継手と同様の破壊挙動を示す傾向があり、Albrecht らの評価式(1)はそれに応じた評価式となっている。したがって、ボルト接着継手においても、接着継手と同様にラップ長の影響<sup>3)</sup>が著しい可能性があることから、この点について確認しておく必要がある。

#### 4.2 試験方法

図-5及び表-1に供試体の形状寸法と主な諸元を示す。供試体数は継手の諸元がそれぞれ異なる13体である。供試体No.1~4は、比較用のボルトのない接着継手で、ラップ長がそれぞれ異なる。供試体No.5~13は、ボルト接着継手で、ラップ長やボルトの配置が異なる。いずれも二面接合とした。鋼板の材質はSM570Qで、板厚22mm(実測値21.7mm)の母材の降伏点が552MPa、板厚12mm(実測値12.1mm)の添接板の降伏点が566MPaであった。表-1に示す降伏荷重 $P_{y1}$ 、 $P_{y2}$ は、それぞれ母材のみ有効とした場合と母材及び添接板の合計断面が有効とした場合における母材降伏時の荷重である<sup>1), 2)</sup>。円孔を有するボルト接着継手は、円孔周囲に応力集中(応力集中係数2.68)が生じると仮定した値を示す。

接着は、二液性エポキシ樹脂系接着剤(FC#02S)を用いて、接合面全体に塗布した後、継手を組立てた。クランプで仮固定して、側面からの接着剤の漏れが落ち着く程度まで手締めし、その後24時間放置して、接着剤を硬化させた。表-1に示した接着剤厚は、荷重直前にノギスにより測定した値である。

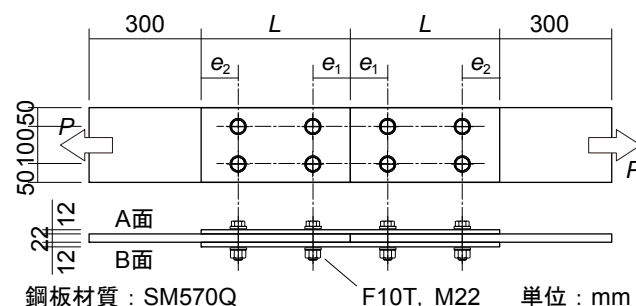


図-5 供試体の形状寸法

表-1 供試体の諸元

継手形式	No.	ボルト数	ボルト配置		ラップ長 L mm	縁端距離 (mm)		接着剤厚 mm	試験前直応力 $\sigma_n$ MPa	最大荷重 $P_u$ kN	平均せん断強度 $v_u$ MPa	降伏荷重*1 kN		破壊時の全面剥離*2			
						$e_1$	$e_2$					$P_{y1}$	$P_{y2}$	上側		下側	
														A	B	A	B
接着継手	1	—	—	—	100	—	—	0.58	0	630	15.7	2400	5060	×	×	×	—
	2	—	—	—	200	—	—	0.40	0	815	10.2	2400	5060	—	×	×	×
	3	—	—	—	300	—	—	0.56	0	840	7.0	2400	5060	×	—	—	×
	4	—	—	—	400	—	—	0.62	0	849	5.3	2400	5060	×	×	×	×
ボルト接着継手	5	2	中央	1 2	400	100	100	0.77	1.03	1260	7.8	784	1660	×	×	×	×
	6	2	中央	2 1	400	200	200	0.44	1.08	1300	8.1	675	1420	×	—	—	×
	7	2	端部	2 1	400	—	35	0.58	1.12	1320	8.3	675	1420	—	×	×	—
	8	2	中央	2 1	100	50	50	0.77	4.40	638	16.0	675	1420	×	×	×	—
	9	4	両端	2 2	200	35	35	0.41	4.39	1320	16.5	675	1420	×	×	×	×
	10	4	両端	2 2	300	35	35	0.63	2.93	1450	12.1	675	1420	×	×	×	×
	11	4	両端	2 2	400	35	35	0.60	2.11	1270	7.9	675	1420	—	—	×	×
	12	1	中央	1 1	200	100	100	0.61	1.03	916	11.5	784	1660	×	×	×	×
	13	4	均等	2 2	400	100	100	0.60	2.15	1400	8.8	675	1420	×	—	—	×

\*1)  $P_{y1}$ : 母材断面のみ有効,  $P_{y2}$ : 母材と添接板の合計断面有効, \*2) ×: 全面剥離あり, —: 全面剥離なし

ボルト締め付けは接着剤塗布から 24 時間後に行った。ボルトは F10T, M22 を用いて、孔径は 24.5mm とした。ひずみの詳細な測定は継手の下半分で行うこととして、供試体の下半分の導入ボルト軸力は、ボルト頭部のひずみ値による管理の下で、設計軸力 205kN の 1.1×20% とした。各ボルトの較正值を予め軸力計により測定した上で、ボルトの目標ひずみ値を設定した。上半分のボルト軸力は、トルク法により設計軸力の 1.1×32% とした。軸力導入はすべて二度締めとした。ボルト締め付け後 7 日目に引張試験を実施した。その間のボルト軸力の低下はボルト頭部のひずみにより測定した。表-1 に示した直応力は、荷重試験直前に測定したボルト軸力の合計を接合面積で除した値である。

引張試験は、2000kN 万能試験機を用いて、単調荷重で行った。荷重中の継手の挙動を把握するため、母材間の変位、添接板端部における母材と添接板間の変位、母材と添接板の側面のひずみ(下側のみ)、添接板外面のひずみ(下側のみ)を測定した。ラップ長が 400mm で、ボルトなしの供試体 No.4 及びボルトを 2 行配置した供試体 No.6, 7, 11, 13 については、添接板外面の軸方向中心線に沿った軸方向ひずみを詳細なピッチで測定した。試験は、明確な破壊音とともに、荷重が急激に低下するまで行った。

### 4.3 結果

#### (a) 部分剥離

表-1 に、最大荷重とその値を接合面積で除した平均せん断応力度を示す。また、同表には、最大荷重時における全面破壊が見られた箇所を示す。なお、母材と添接板間の変位と荷重の関係において、線形限界が見られた荷重は、いずれも 300kN から 500kN 程度であり、少なくとも 300kN までは、概ね弾性挙動の範囲にあったと考えられる。また、荷重中における目視による部分的な剥離の観察では、少なくとも 700kN を超えてから部分剥離が認められ、ボルト配置によっては 1200kN を超えてから部分剥離が発生する場合もあった。

図-6 に、側面のひずみ測定結果の例(供試体 No.6)を示す。部分剥離は、添接板端部から生じる傾向があり、剥離した箇所の添接板ひずみは開放されてほとんどゼロに近い状況となる。比較的ラップ長が長い供試体では、部分剥離の範囲が荷重の増加とともに広がる傾向が確認された。供試体 No.13 の場合を除き、母材突合せ部側からの剥離は最大荷重時まで確認されなかった。供試体 No.13 では、添接板端部から剥離が生じた後、最大荷重に達する前に、母材突合せ部側からも部分剥

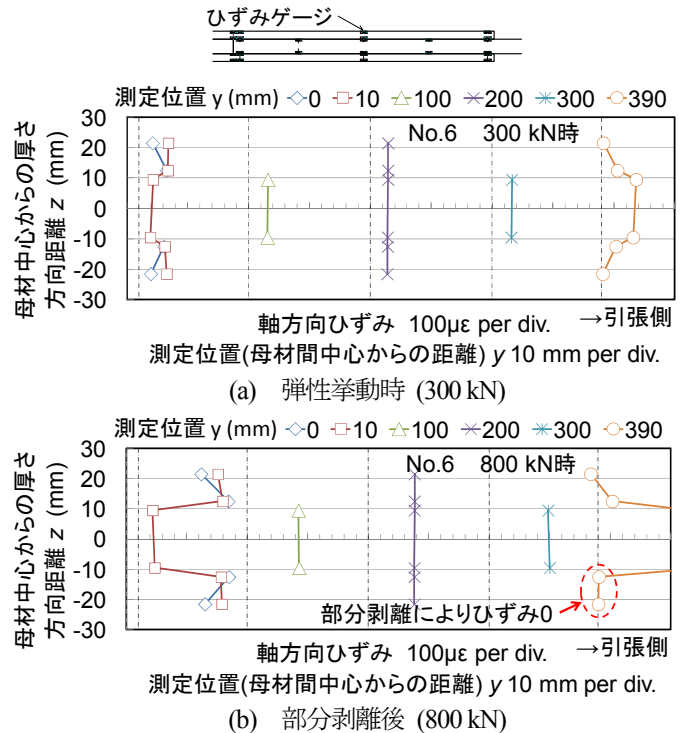


図-6 側面のひずみ測定結果の例 (供試体 No.6)

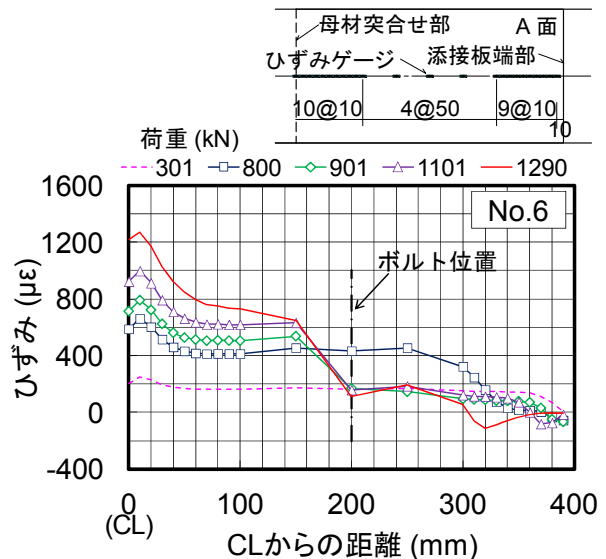


図-7 添接板外面のひずみ測定結果の例 (供試体 No.6)

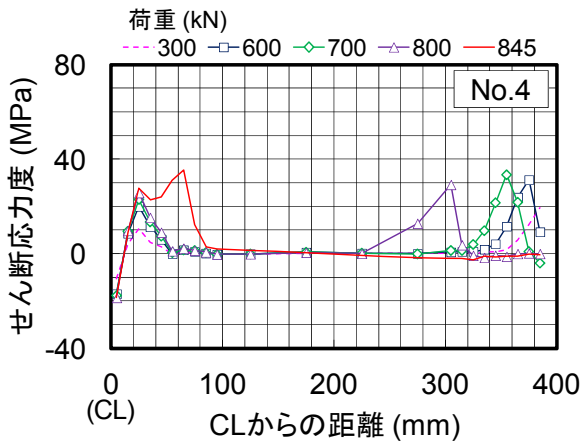
離が生じた。

#### (b) せん断応力度分布

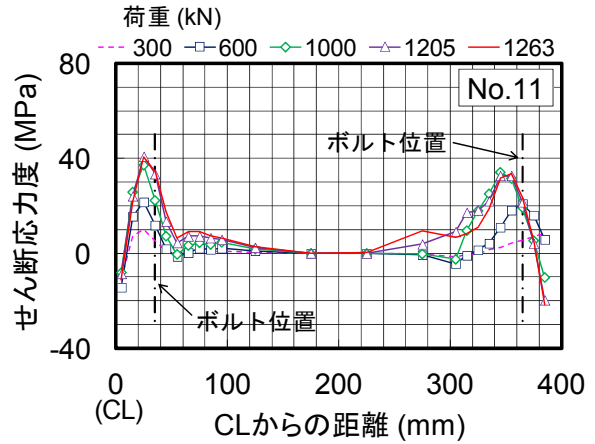
図-7 に、供試体 No.6 を例に添接板外面で測定したひずみ分布を示す。また、その結果に基づき、次式<sup>6)</sup>により算出したせん断応力度分布を図-8 に示す。

$$\tau_i = (T_{i-1} - T_i) / (\Delta L_i \cdot b) \quad (3)$$

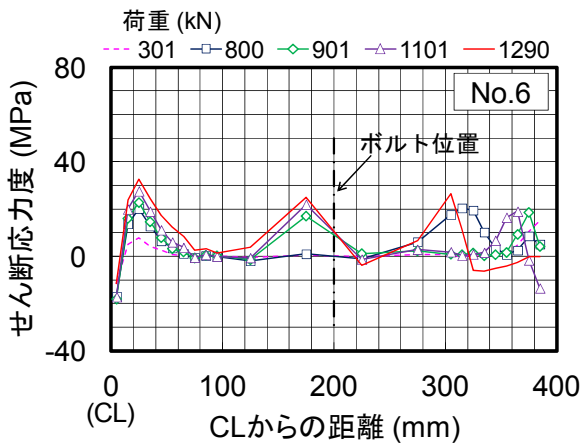
ここに、 $\tau_i$ : 測定点  $i-1$  から  $i$  までの区間におけるせん



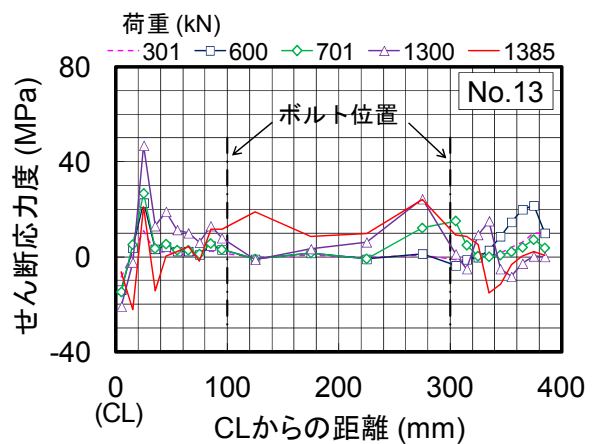
(a) 供試体 No.4 (ボルトなし)



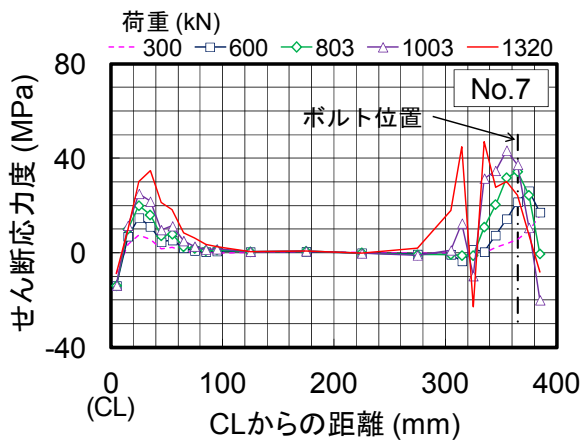
(d) 供試体 No.11 (ボルト 4 本)



(b) 供試体 No.6 (ボルト 2 本)



(e) 供試体 No.13 (ボルト 4 本)



(c) 供試体 No.7 (ボルト 2 本)

図-8 添接板外面での測定ひずみによる  
せん断応力度分布

図-8 添接板外面での測定ひずみによる  
せん断応力度分布 (続き)

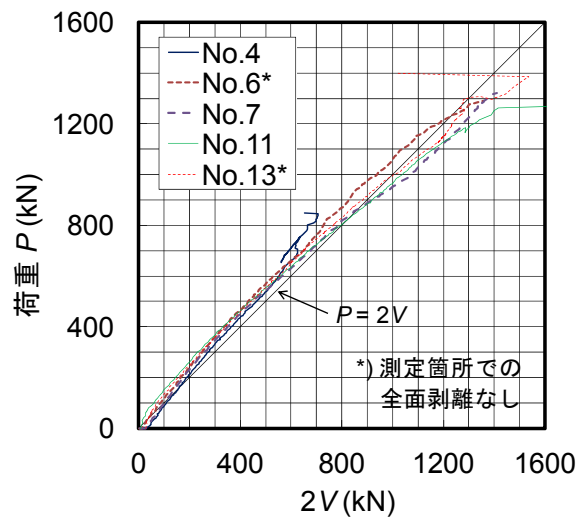


図-9 添接板外面のひずみ分布から算出した  
せん断抵抗力  $V$  と荷重  $P$  の関係

断応力度,  $T_i$ : 測定点  $i$  における張力 ( $= E \cdot A \cdot \varepsilon_i$ ),  $\Delta l_i$ : 測定点  $i-1$  から  $i$  までの距離,  $b$ : 供試体幅,  $E$ : 鋼材の弾性係数,  $A$ : 添接板の断面積,  $\varepsilon_i$ : 測定点  $i$  における実測ひずみ,  $i=1, 2, 3 \dots$

図-8 のうち, 正の部分 を長さ方向に積分して, 幅  $b$  を乗じた値  $V$  を算出して, 図-9 に荷重  $P$  と  $2V$  の関係を

示す。いずれの供試体においても,  $P=2V$  の関係に近い傾向が見られる。このことから, 算定値  $V$  は, 1 接合面が負担するせん断力に相当すると考えられる。文

献6)では、式(3)の値を接合面の接着剤層に作用するせん断応力度と見なしたが、図-9の結果は、このことが概ね妥当であることを示すものと考えられる。

この点を踏まえて、図-8(a)に示す供試体 No.4 の接着継手の結果を見ると、荷重が 300kN 程度の段階では、せん断応力度の分布は、弾性計算から予測されるように、母材突合せ部(図中 CL)と添接板端部(図中 CL+400mm)の両端付近において、せん断応力度が大きく、これらの箇所の接着剤層が、せん断抵抗に大きく寄与していたと考えられる。ラップ長が長い供試体 No.4 では、添接板端部から部分的な剥離が発生した後、せん断応力度のピーク位置が荷重とともに徐々に移動していた。目視では剥離の進展を詳細に把握することができていないが、これらの結果より、部分剥離が発生しても直ちに全面破壊することなく、剥離していない範囲で応力再分配して、せん断に抵抗していたことがわかる。剥離の範囲は、荷重とともに、徐々に拡がり、最大荷重に至る直前は、母材突合せ部からわずかに 100 mm 程度の範囲で抵抗していたと考えられる。

図-8(b)に示す、ボルト接着継手の供試体 No.6 のせん断応力度分布は、荷重 800kN までは、ボルトのない供試体 No.4 と同様に、母材突合せ部と添接板端部(または剥離後の端部)の両端における接着剤層がせん断抵抗に寄与しており、ボルト付近の接着剤層はほとんど寄与していなかった。添接板端部から発生した剥離の範囲がボルト位置に達すると(同図では荷重 900kN 以降)、ボルト位置の母材突合せ部側におけるせん断応力度分布が大きく変化して、供試体 No.4 のような剥離範囲の拡大が抑制された。それとともに、添接板端部に摩擦によると考えられるせん断抵抗が見られた。これらの変化を経て、供試体 No.6 は、最大荷重時に3個のピークを有するせん断応力度分布により抵抗していたことがわかる。なお、ボルト軸力は初期の段階で荷重の増加とともに低下する傾向が見られたが、ボルト位置まで剥離が達した後は増加に転じた。

図-8(c)に示す供試体 No.7 は、ボルト本数が同 No.6 と同じであるが、ボルトの配置が添接板端部に近い事例である。この場合も、荷重 300kN 程度までは、ボルトのない供試体 No.4 と同様のせん断応力度分布であった。また、添接板端部から剥離が発生し始めるのも同 No.4 と同様であるが、ボルトが添接板端部に近いことから、剥離の進展はボルトに抑制されて、ボルト周辺のせん断応力度分布のピーク位置は、最大荷重時までボルトの位置(やや母材突合せ部側)から大きく移動することはなかった。このことによって、母材突合せ

部から 300mm の範囲におけるせん断応力度分布の形状は、破壊直前までほとんど変化しなかった。

図-8(d)に示す供試体 No.11 は、同 No.7 の母材突合せ部付近にもボルト 2 本を配置した事例である。しかし、せん断応力度分布は、供試体 No.7 と大きくは変わらず、母材突合せ部付近に配置したボルト 2 本の効果は明確でないことがわかる。

図-8(e)に示す供試体 No.13 は、ボルト本数が同 No.11 と同じであるが、ボルトを接合面の中央側にやや寄せて配置した事例である。前述のとおり、供試体 No.13 では、最大荷重の直前に、母材突合せ部側からも剥離が見られ、ボルト間 200mm の範囲でせん断応力度が大きくなった。

### (c) 破壊の要因

以上のせん断応力度分布において、最大荷重時におけるせん断応力度はいずれも 30MPa を超える大きい値となっており、二面せん断試験から得られる接着剤のせん断強度から見ても大きい値が生じていた。一方、図-7に例示したひずみの測定結果のうち、最大荷重時に発生していた最大ひずみは、いずれも母材突合せ部付近で発生していた。この点での測定を行っていない供試体があることから、この値と同程度の値を示していた、添接板側面の接合面付近の最大ひずみについて、図-10 に直応力との関係を示す。直応力が高かった供試体 No.8, 9 の結果を除くと、概ね線形に近い傾向があることがわかった。

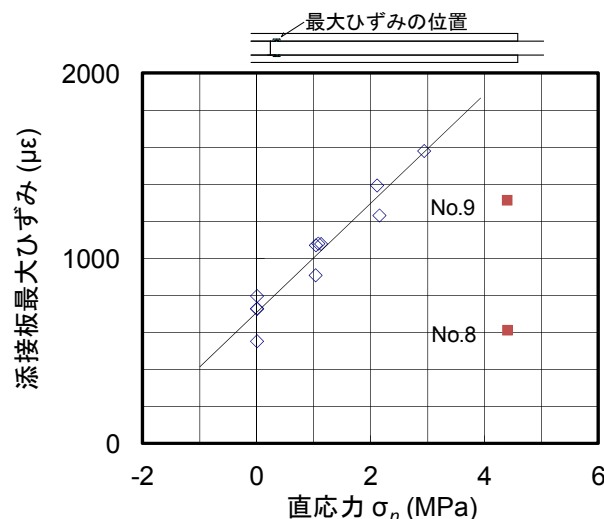


図-10 破壊時の添接板最大ひずみと直応力の関係  
注) 添接板外面の測定は、供試体が限定されるため、この図では添接板側面の接合面に近い位置での最大ひずみを示す。なお、両測定結果がある供試体(No.8, 9 を含まない)について比較すると、この図と概ね同様の傾向が見られた。

図-11 に、せん断強度と直応力の関係を示す。ラップ長ごとに記号を変えて示す。参考として、既往の試験データ(ラップ長 170mm)を示す。ラップ長が 100mm の結果を除くと、ラップ長ごとに、直応力が増加するほどせん断強度が増加する傾向が見られる。接着継手(直応力がゼロのとき)のせん断強度と類似して、ボルト接着継手の場合も直応力が同じであれば、ラップ長の増加とともにせん断強度が低下する傾向が見られる。接着継手のラップ長の影響は、供試体 No.4 のせん断応力分布の変化に見られるように、全面破壊時直前にせん断に抵抗できる範囲はラップ長がある程度以上になるとほとんど変化しないことによると推察される。なお、ラップ長 200mm の結果は、ラップ長 170mm の既往のデータと同程度の結果であった。

図-11 の結果を踏まえて、この試験のディテール(主として母材、添接板の板厚)の場合、ラップ長 250mm を超える場合は、有効なラップ長を 250mm として、せん断強度を算定してみた結果を図-12 に示す。また、図-13 に、継手の試験に用いた接着剤の二面せん断試験の結果を示す。図-12 の結果は、直応力との関係に関して、図-13 に示した同一接着剤の二面せん断試験の結果や図-4(a)に示した類似の接着剤を用いた二面せん断試験の結果と概ね同様の傾向を示している。このことから、有効ラップ長の概念を導入することにより、ボルト接着継手のより簡明な設計法を提示できる可能性があると考えられる。有効ラップ長の決定方法は、試験のディテールが限定されていたため一般化に至らず、さらに検討が必要な点の一つである。

図-14 に、最大荷重と直応力の関係を示す。Albrecht ら<sup>3)</sup>が述べたように、ボルト接着継手は、鋼材が降伏に至ると全面破壊する傾向がある。同図に示すように、供試体のいくつかはボルト接着継手の全断面を対象とした降伏荷重  $P_{y2}$  に達していた。供試体 No.9 の最大荷重は  $P_{y2}$  よりもやや小さいものの、概ねこれに近い傾向にあり、同様の影響を受けていた可能性がある。これらは、母材を対象とした降伏荷重  $P_{y1}$  を十分に超えていたことから、最大荷重に寄与した接着範囲では、接着の効果によって、全面破壊直前まで 3 枚の鋼板が一体となって抵抗していたと考えられる。一方、ラップ長が 100mm と短かった供試体 No.8 は、直応力が高かったにもかかわらず、 $P_{y1}$  で全面破壊しており、剥離とともにボルト孔周辺の母材の応力集中による降伏により破壊が生じた可能性があると考えられる。

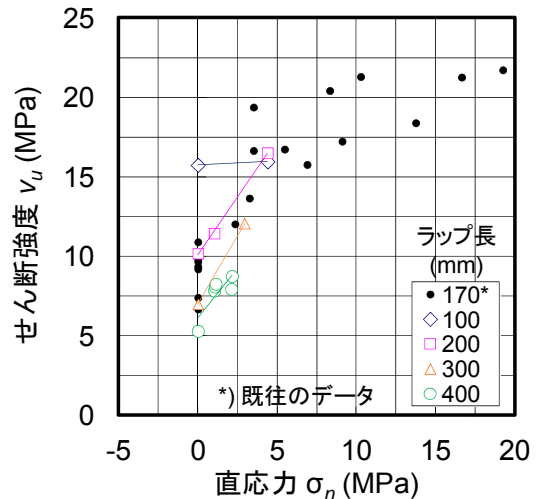


図-11 せん断強度と直応力の関係  
注) 既往のデータは文献 1), 2), 7)による

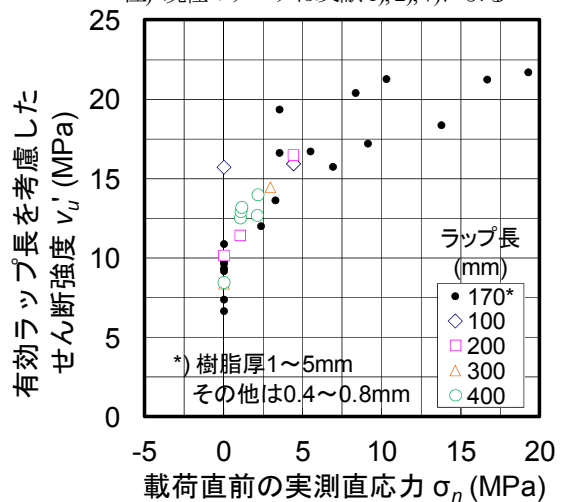


図-12 有効ラップ長を考慮したせん断強度  $v_u'$  と直応力の関係

注) 既往のデータは図-11 と同じ。ラップ長 250mm 以上の場合に有効ラップ長を 250mm とした。

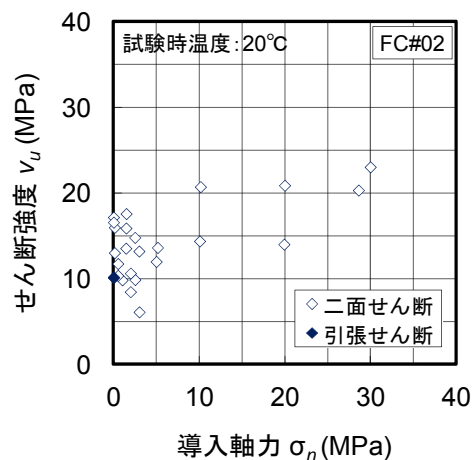


図-13 継手供試体に用いた接着剤(FC#02,  $T_g = 64^\circ\text{C}$ )の二面せん断試験におけるせん断強度

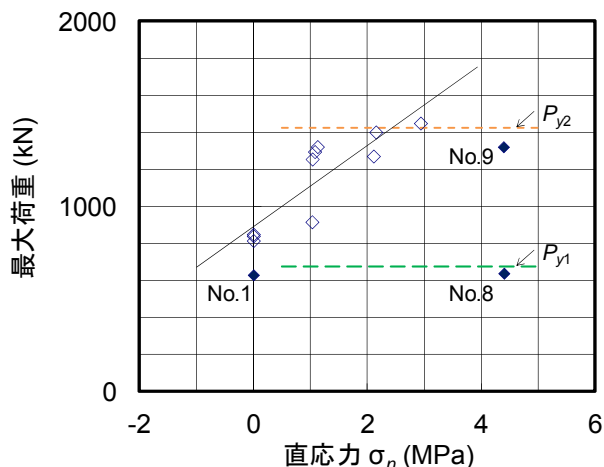


図-14 最大荷重と直応力の関係

### 5. ボルト接着継手の設計・施工の骨子案

#### (1) 材料

- 1) 使用する接着剤は、所要の強度特性としてせん断強度と直応力の関係が明確であるものを用いる。
- 2) 使用する接着剤は、ガラス転移点が 60℃以上のものとする。
- 3) 導入する直応力によっては、低強度のボルトで対応できる可能性もあるが、機械的性質や軸力管理が明確である点から、摩擦接着継手に使用される一般的な高力ボルトを用いて、軸力を調整するのがよい。
- 4) 添接板は、母材と同程度の降伏点を有する鋼材とする。

#### (2) 設計

- 1) ボルト接着継手の引張強度は、次式により算定する。

$$P_{w,a} = m A_{ce} f_{w,a}(\sigma_n) \quad (4)$$

$$P_{y,n} = \Sigma A_n f_y / K \quad (5)$$

ここに、 $m$ ：接合面数、 $A_{ce}$ ：有効定着面積(=有効ラップ長×幅)、 $f_{w,a}(\sigma_n)$ ：直応力を関数とした接着剤のせん断強度、 $K$ ：板のボルト円孔周辺の応力集中係数、 $\Sigma A_n$ ：母材と添接板の合計断面積、ただし、ラップ長が短い場合または片面接合の場合は、母材のみの断面積とする。有効ラップ長は、本試験の範囲に限り 200mm と考えられる。

- 2) 接着剤のせん断強度  $f_{w,a}(\sigma_n)$  は、二面接合の場合に二面せん断試験の結果を用いる。なお、片面接合は、偏心の影響により継手の強度が著しく低下することから<sup>9)</sup>、やむを得ず片面接合とする場合には、その影響を考慮して定める必要がある。

- 3) 上記 1) の照査において、式(5)の影響が小さくない

ことから、まず式(5)により、ボルト本数の上限を把握した上で、所要のボルト本数を算定するのがよい。

- 4) ボルト接着継手におけるボルト配置によっては、ボルトの効果がほとんど得られない場合や、継手強度が母材のみの降伏点に依存する可能性があることに留意する必要がある。なお、母材突合せ部付近や添接板端部付近に配置することは、継手の強度向上には必ずしも寄与しない場合が見られるが、接着面端部の部分剥離を抑制する効果が認められたことから、部分剥離後の鋼材の防食の観点で有効であると考えられる。

- 5) 添接板の純断面積(2枚の合計)は、母材の純断面積と同等以上とする。

- 6) ボルトの設計軸力は、接着剤のクリープの影響を考慮して、一般の高力ボルトの導入軸力の 50% を目安とする。なお、実際に予定しているボルト導入軸力を設計に考慮する場合は、クリープによる軸力の低下や軸力の施工管理の程度を考慮して、ボルトの設計軸力を適切に設定する必要がある。

#### (3) 施工

- 1) 接合面は、接着剤の付着効率が上がるように、適切に管理する必要がある。なお、接合面に著しい腐食が見られる場合は、グリットブラスト処理を行う必要がある。また、やむを得ず、接合面に塗膜が残る場合は、塗膜が継手強度に及ぼす影響を予め確認しておく。

- 2) 接着剤は、所要の塗布量を予め計量した上で、母材と添接板の両方の接合面を覆うように塗布する。

- 3) 継手の組み立てに際しては、接着剤厚を管理するため、所要の支圧が与えられる適切な治具を用意する。また、固定ボルト孔を利用して、仮止め用のボルトで仮止めする場合は、接着剤の硬化後に、本締め用のボルトで施工できるように配慮しておく。仮固定に、本締め用のボルトを用いると、硬化した接着剤によって、所要の軸力を導入できない可能性があることから、仮固定には、別途ボルトを用意するのがよい。

- 4) ボルト接着継手のボルト締め付けは、接着剤硬化後 24 時間以降に実施することを目安とする。

- 5) ボルトの締め付け軸力及び軸力管理は、摩擦接着継手と同様とする。ただし、接合面に腐食による著しい凹凸がある場合は、局部的に鋼板の変形を抑制するため、ボルトの締め付け軸力を通常の 50% とする<sup>4)</sup>。なお、トルシア形高力ボルトやワンサイドボルトのように、シャレンチによる締め付けを行う場合、クリープによる軸力低下によって、一般に想定している所要の導入軸力は導入できない可能性が高いが<sup>9)</sup>、設計



において、軸力の低下を考慮していることから、通常と同様に施工してよい。ただし、ボルト孔周囲における腐食による局所的な断面欠損深さが 5mm を超える場合は、軸力の低下量と継手の強度に及ぼす影響について別途検討を行う必要がある。

6) ボルト締め付け前に、接着剤が剥離したときは、再度、同種の接着剤を用いて、再接着してよい<sup>9)</sup>。ただし、剥離面に、塵埃や油脂などの接着効率を低下させる物質が付着している場合は、これらを適切に除去する必要がある。剥離した接着剤を除去する必要は必ずしもないが、剥離面の汚れが著しい場合や剥離面が複数ある場合など再接着すべき箇所が不明確な場合は、接着剤を除去した後に再接着するのがよい。

## 6. あとがき

本文では、ガラス転移点が高い接着剤のせん断試験、及びボルト配置の影響に着目した高力ボルト接着継手の引張試験の結果について報告した。主な結果を以下に示す。

- 1) 既往の評価式が概ね妥当であることが確認されたが、鋼板のボルト孔周囲の降伏が継手耐力に及ぼす点に関して、ラップ長やボルト配置によっては母材と添接板の合計断面が有効となる場合と、母材のみの断面が有効となる場合があり、両者の違いが継手耐力に及ぼす影響が顕著であることがわかった。
- 2) 添接板の外面で測定したひずみ分布から算出した作用せん断応力度分布を、正值に限って長さ方向に積分して、幅を乗じたせん断力  $V$  は、荷重  $P$  の 1/2 とよく一致した。しかし、接着継手やボルト接着継手の破壊基準は、せん断応力度のピークとは限らず、母材突合せ部近傍の鋼材の最大ひずみに関係する諸量について、さらに詳細な検討が必要である。
- 3) ガラス転移点  $T_g$  が低い接着剤の二面せん断試験より、試験時温度が  $T_g$  よりも十分に低い場合は、他の接着剤と同程度のせん断強度が得られるが、 $T_g$  と同等以上の試験時温度では、変形が著しく、軸力の導入が適

切に行えず、また軸力なしの下でのせん断強度は著しく低下することがわかった。

以上の結果を踏まえて、ボルト接着継手の設計・施工の骨子案を示した。

本研究課題では、これらの検討の他に、下面に鋼板接着補強された鉄筋コンクリート主桁(撤去部材)を用いて曲げ試験を行い、鋼板間の接着継手の破壊によって、同主桁の曲げ補強効果がほとんど得られない場合があることがわかった<sup>8)</sup>。また、それに対する対応策として、ワンサイドボルトを付加することにより、接着継手をボルト接着継手にすることで、その継手の強度を十分に改善できることを実験により明らかにした<sup>9)</sup>。

## 参考文献

- 1) 村越潤, 田中良樹, 船木孝仁: 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, 土木研究所資料, 4091号, 2008.3.
- 2) 村越潤, 田中良樹, 船木孝仁: 接合面にエポキシ樹脂を塗布したボルト継手の力学的挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, No.54A, pp.563-574, 2008.3.
- 3) 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.
- 4) 村越潤, 田中良樹, 船木孝仁: 鋼橋桁端部の腐食対策に関する研究, 土木研究所資料, 4142号, 2010.3.
- 5) 有原隆雄, 田中一實: 接着剤の構造物への適用に関する実験的研究, 横河橋梁技報 No.10, pp.33-40, 1980.11.
- 6) Ladner, M. and Weder, Ch., Concrete Structures with Bonded External Reinforcement, EMPA Report No. 206, 61p., 1981.
- 7) 村越潤, 田中良樹, 船木孝仁, 飯塚拓英: 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II, 土木研究所資料, 印刷準備中.
- 8) 吉田英二, 村越潤, 木村嘉富, 田中良樹: 劣化した鋼板接着補強 RC 桁の耐荷力試験, 第 66 回土木学会年次講演会概要集, V, pp.377-378, 2011.
- 9) 飯塚拓英, 村越潤, 田中良樹: ボルト接着継手による RC 桁鋼板接着補強継手部の改善方法に関する検討, 第 67 回土木学会年次学術講演会概要集, I, 投稿中.

## RESEARCH ON RETROFITTING USING BOLTED AND ADHESIVELY BONDED STEEL JOINTS

### **Abstract :**

The research was conducted in order to identify the structural mechanisms of bolted and adhesively bonded steel joints and the influence of material property of the adhesives, aiming at the application of the joints to the retrofitting of the steel elements in existing highway bridges. This report presents the results of the double shear tests of the adhesive having a low glass transition point, and the results of the static tensile tests for the joints with different details concerning the arrangement of the bolts and lap lengths. The results to some extent justified the basic concept of previous dual equations consisting of the shear strength of the adhesives and the yield point of steel plates for estimating the tensile strength of the joints. However, it was found that the critical point due to the yielding around the bolt holes was dependent with either the total areas of a main plate and splice plates, or only the main plate. It appeared that the phenomenon depended on the lap lengths and the arrangement of the bolts, significantly influencing on the joint strength. Based on the results, the essential points of the design and construction of the joints have been summarized.

**Key words :** *retrofitting, bolt, bond, adhesive, epoxy resin, glass transition point*