

トラス橋の腐食による継手部の補修方法と確認実験

湾岸管理部 保全課 横山 健 司
 大阪建設局 建設企画部 調査課 松本 茂
 湾岸管理部 保全課 田畑 晶子

要 約

本稿は、橋梁継手部の添接板・高力ボルトに発見された腐食による損傷に対する補修方法および確認実験について報告するものである。この損傷は、水抜き孔が設置されていない箱断面の下フランジ部に集中し、一部は早急な補修が必要との結論を得た。損傷部分の補修方法は、既設添接板に短冊状の鋼板を重ね合わせ、再度高力ボルトで締め付ける補強添接板工法を提案した。既設添接板と補強鋼板の接触面には接着剤を塗布し、添接板として一体化を図るとともに、接触面に生じる隙間の充填も兼ねることとした。継手部モデルによる静的引張実験では、各部材の発生応力について検証した。疲労実験では、接着面の耐久性および母材への影響の有無について確認した。さらに、ボルトの抜取りおよび再締め付けに伴う継手部の応力変動等についても検証した。また、接触面に塗布する接着剤については、物性値試験によって、せん断強度を満足することを確認した。

キーワード：継手部、腐食、添接板、補強鋼板、重ね板、高力ボルト、接着剤、応力伝達、応力変動

まえがき

損傷の発見された橋梁は、供用開始から約25年を経過したトラス橋である。鋼床版桁支承部の補修のため、横梁の内部に入った際、横梁継手において、高力ボルトおよび添接板の一部に腐食が確認された。このため、橋梁全体に対して点検を実施した結果、88箇所について、点検標準¹⁾によるところの「損傷が著しく早急に補修を要する場合」のAランクとして判定された。本稿では、損傷部の調査点検結果、補修方法の検討および補修前後の応力変動に関する一連の確認実験について報告する。

1 損傷点検調査

表-1には、トラス部材のうち、箱形断面の継

表-1 点検結果

(単位：継手箇所)

	点検数	Aランク	Bランク	Cランク	OKランク	未点検	備考
〔本橋部〕							
主弦材継手部	228	16	67	88	57	0	
横梁継手部	88	57	7	15	9	0	上・下弦材
橋柱・端横門構	28	0	5	0	19	4	上・下路、塔下部本梁架合
鉛直材・斜材継手部	552	0	5	0	538	9	
小計	896	73	84	103	623	13	
〔アプローチ部〕							
主弦材継手部	156	0	4	58	94	0	
横梁継手部	48	7	10	19	6	6	上・下弦材
鉛直材継手部	40	0	0	0	40	0	上・下路
ダイヤフラム	40	8	9	17	6	0	
小計	284	15	23	94	146	6	
合計	1,180	88	107	197	769	19	

手部の点検結果を示す。損傷状況は以下のとおりである。

1-1 高力ボルトの損傷

ボルト頭部は、図-1に示すとおり、山形に減肉し、座金も台形状に減肉している。また、ボル

トの軸力調査結果より、軸力低下は、平均して20%程度であった。

なお、抜取りボルトを観察したところ、ボルト軸部および座金と添接板との接触面については、錆が確認されず健全であった。したがって、母材と添接板との接触面（摩擦面）についても、健全であると推定される。

1-2 添接板の損傷

添接板の最大減肉量は7~8mm程度であった。また、添接板の縁端部においては、母材の局部損傷（ノッチ状の減肉）が確認された。つぎに、錆の特徴は、塩分によると見られるフレーク状を呈していた。さらに、損傷箇所には、発錆の要因と考えられる雨水の浸入痕、および滞水の痕跡が

確認された。

なお、写真-1には、Aランクにおける添接板の腐食状況を示す。

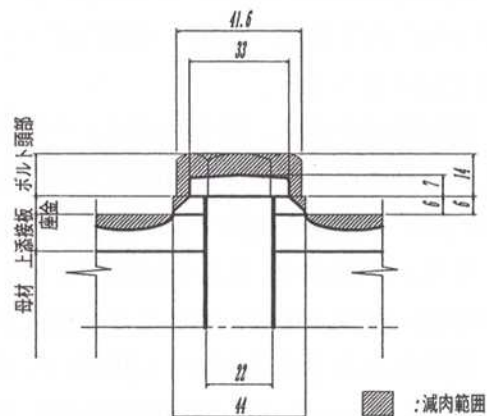


図-1 添接部の腐食状況図



写真-1 Aランクにおける発生錆の状況

2 補修方法の検討

2-1 補修工法の比較

一般に、腐食の生じた部材の補修方法は、以下のとおりである。

- ・腐食部分に当て板を添接する
- ・腐食部分の切断・撤去後、同材料・同厚の新規部材を挿入する
- ・腐食部材そのものを新規部材へ交換する
- ・構造系を変更（腐食部分の断面力を低減）する

本工事では、補修対象が添接板であることに鑑み、表-2に示すとおり、添接部における補修工法の比較検討を行った。評価にあたっては、以下

表-2 補修工法の比較検討

工法名	工法の概要	問題点	評価
バイパス部材補強工法	添接板に代わるバイパス部材で断面力を迂回	・ダイヤフラムと干渉し設置不可能な箇所あり ・高張力鋼に対して現場溶接が必要 ・現場溶接が母材の突合わせ部と重なるケースあり	△
PC鋼線補強工法	PC鋼線に初期張力を導入し添接板に働く引張力を緩和	・ダイヤフラムと干渉し設置不可能な箇所あり ・センターホールジャッキおよびラムチェアが必要 ・高張力鋼に対して現場溶接が必要 ・現場溶接が母材の突合わせ部と重なるケースあり	△
コンクリート巻立て補強工法	添接板にスタッドを設置しコンクリートを巻立て、添接板に働く圧縮力を緩和	・コンクリート材料の搬入が困難 ・高張力鋼に対してスタッドの溶接が必要	△
補強添接板工法	既設添接板に補強添接板を樹脂接着または注入により重ね合わせ添接板そのものを増厚	・既設ボルトの撤去にあたり応力方向1行撤去が可能が条件 ・樹脂注入の場合ボルト孔に流入する恐れあり	○
添接板分割工法	既設添接板を応力方向に切断し新規のものと取り替え	・箱断面内でのガス切断を要するため母材への熱影響大 ・母材に傷をつける危険性あり	×
断面力コントロール工法	①偏載荷重載荷工法 カウンターウェイトなど偏載荷重によって現断面力を低減 ②構造系を変更し現断面力を低減	・工事規模が拡大 ・詳細な応力解析が必要 ・構造系の変更に伴う他部材の補強が必要	×

に留意することとした。

- ① ボルトの取替えに伴う応力伝達が円滑に行われること
- ② 対象橋梁には、HT70、HT80等の高張力鋼が多用されており、溶接・切断に伴う入熱を極力避けること
- ③ 補修箇所が多く、供用中路線上であるとともに、箱断面トラス部材の内部で狭隘な場所のため、大規模な補修工事が困難であること
- ④ Aランク箇所は、早急な対策を要すること

その結果、既設添接板に短冊状の鋼板を重ね合わせ、腐食による不足分を補う工法(以下、「補強添接板工法」という)が、当面の現実的な対策工法と判断し、当工法を前提とした各種検討を行うこととした。なお、文献2)によると、接触面における部分的な隙間が、腐食錆を防止するうえで好ましくないとされ、既設添接板と重ね板との間には、接着剤を塗布し、隙間の充填を行うこととした。

2-2 ボルト抜取り可能本数の算定

図-2には、補強添接板工法の概要図を示す。

当工法では、応力方向に沿ったボルトの1行単位での抜取りを要する。そこで、表-3に示す算定フローのとおり、ボルトの抜取り可能本数を算定した。

同表に示すとおり、供用下におけるボルトの撤去可能本数は、ボルトの設計値に対する耐力の割合(式①)に、施工時断面力(式②)に対する設計値の割合(式③)を乗じた合計余裕率(式④)から算定した(式⑤)。その結果、当該工法の前提条件である1行単位の抜取りは可能であると判断した。

2-3 ボルト取替えに係る施工順序

補強添接板工法により補修する箇所においては、補修要領³⁾に準拠し、以下のとおりボルトの抜取り、および再締付けを行う。

- ① 応力方向に沿った1行単位で順次取り替える
- ② 箱断面の中心から順次取り替える
- ③ 行単位のうちの抜取り順序は任意とする

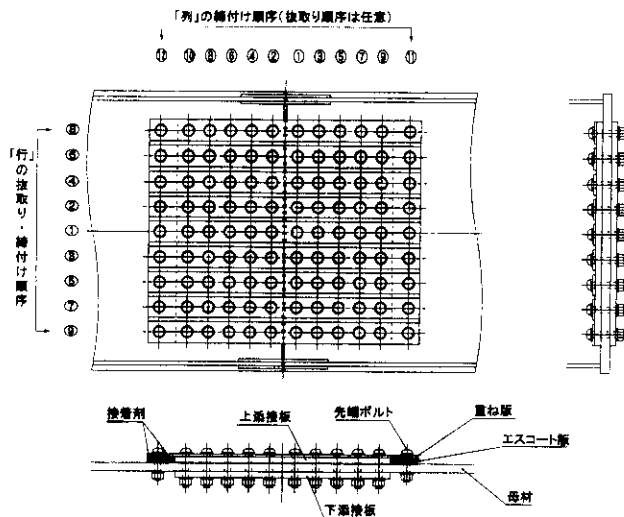


図-2 補強添接板工法概略図

表-3 ボルト取替えに係る算定フロー

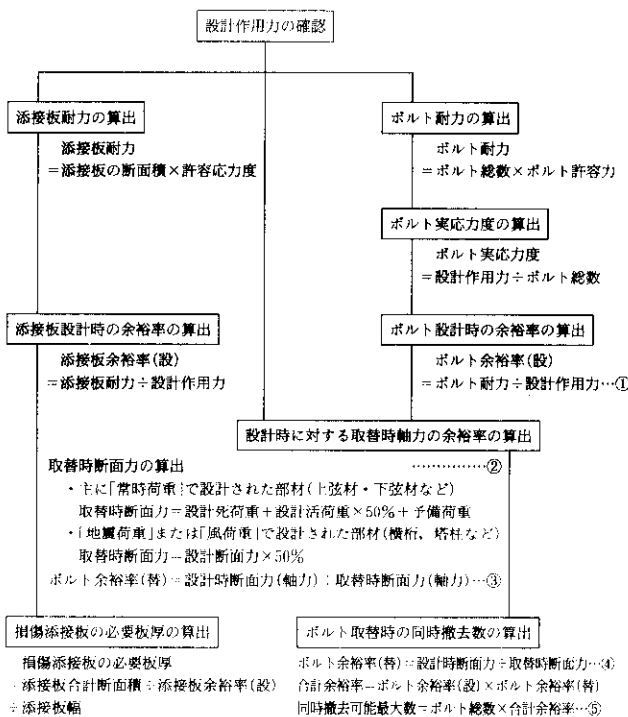


表-4 高力ボルトの許容力(kgf)

	F11T	S10T(F10T)	ρ 比
M22	4,942	4,800	0.971
M24	5,881	5,600	0.952
M30	9,189	8,900	0.969

なお、図-2には、ボルトの抜取り、および締付けの施工順序を示した。

2-4 ボルト材質変更に関する検討

対象橋梁に使用されている高力ボルト (F11T)

は、補修要領³⁾に基づき、F10Tに取り替えられるため、高力ボルトの材質を変更した場合の本数変更の要否について検討した。まず、表-4には、F11TおよびF10Tの許容引張力および許容力比 pa を示す。同表より、材質によるボルト許容力の低減率は、M24が最大となり、約5%低減することになる。つぎに、摩擦面については、先述のとおり、既設添接部から抜き取った腐食ボルトの調査結果より、健全であると推定されるため、すべり係数については、新設部材と同等の $\mu=0.4$ と評価した。さらに、道路橋示方書⁴⁾（以下道示という）では、トルク法における施工時のボルト締付け軸力は、設計軸力の10%増を標準としているが、これは、トルク係数値のばらつき、クリープやリラクゼーション、すべり係数のばらつきなどの影響を考慮して設定されたものであることから、ボルト軸力の経年的な減少に対する評価は ± 0 とした。なお、樹脂のクリープについては、後述する確認実験によって軸力低下に影響しないことを確認している。そして、図-2に示したとおり、補強添接板工法によって、既設のボルト群の先端に追加されるボルトは、一面摩擦として評価できる。そこで、図-3に示す実構造物の継手部に対して、補修前後の耐力比較を行ったところ、表-5のとおり、先端ボルトを1本追加することにより、約5%増加すると評価した。

表-6には、上記の検討結果を示すが、ボルトの材質変更に伴う安全率は、先端ボルトの効果によって、新設部材と同等の安全率を有するものと判断した。

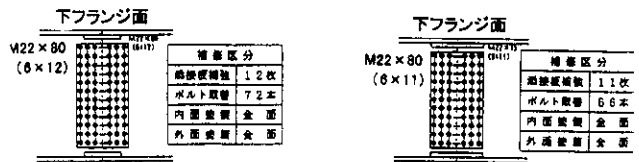


図-3 実構造物の継手形状

表-5 継手モデルによる耐力比較

	施工前耐力①			施工後耐力②						耐力比 ②/①				
	ボルト本数		耐力 (tf)	既成部分(2面摩擦)			先端ボルト(1面摩擦)				合計 (tf)			
	行	列		本数	耐力	行	列	本数	耐力					
Type 1	12	3	36	345.6	11	3	33	316.8	10	1	10	48.0	364.8	1.06
Type 2	11	3	33	316.8	10	3	30	288.0	9	1	9	43.2	331.2	1.05

表-6 ボルト材質変更に関する総合評価

評価項目		S10T・F10T
①	材質によるボルト許容力低下の評価	-5%
②	すべり係数・軸力減少の評価	±0
③	先端ボルトの評価	+5%
合計		±0
継手のすべりに対する安全率		1.7

3 確認実験

3-1 実験内容

表-7には、補強添接板工法の安全性・妥当性を確認するための各種実験を示す。

3-2 静的引張実験

3-2-1 供試体の設計

図-4および図-5には、静的引張実験に使用する供試体を示す。供試体の上添接板には、約50年暴露された鍍鋼板を、2種ケレン程度に処理して使用した。各供試体の仕様は、以下のとおりとする。

表-7 確認実験一覧

	項目	内容	供試体	備考
構造	静的引張実験	各継手部補修モデルによる応力伝達検証、接着剤・先端ボルトの効果の確認	A, B	
	再配分確認実験	ボルト抜き取りおよび再締付けに伴う応力変動の確認	C	
	再配分確認実験(実橋)	実構造物によるボルト抜き取りおよび再締付けに伴う応力変動の確認		
	疲労実験	本補修工法における疲労強度特性(接着部の耐久性・亀裂損傷等)の確認	F	
	クリープ試験	接着剤のクリープによるボルト軸力変動の確認	N	
樹脂	物性値確認試験	既設添接板と重ね板との接着材としてせん断強度を満足する樹脂の検証		JIS規格
	引張せん断試験			JIS, JSSC規格

- ① Aタイプ供試体：エスコート板なし
 A-1タイプ 重ね板と上添接板との接着なし
 A-2タイプ " 接着あり
 ② Bタイプ供試体：エスコート板あり、および

- 実構造物の腐食状態を想定した切欠き
 (ノッチ)を設定
 B-1タイプ 重ね板と上添接板との接着なし
 B-2タイプ " 接着あり

なお、引張実験は、供試体製作後、一週間の室内養生を行った後に実施し、アムスラー能力300tfの万能試験機により、供試体が破断するまで実施した。

3-2-2 実験結果および考察

図-6には、各供試体の $P=40\text{tf}$ 引張载荷時における供試体各部の発生応力度から算定される分担荷重を示す。ここに、引張载荷重は、ボルトのすべり耐力程度とした。同図より、A-1タイプにおける分担荷重は、下添接板に偏っている(A点：下添接板22.4tf、補強側17.6tf)のに対し、A-2タイプでは、下添接板の負担荷重が減少した(A点：下添接板18.4tf、補強側17.6tf)。これは、Bタイプでも同様の傾向で、接着剤の使用による効果と考えられる。また、図-7には、各供試体の応力伝達比率を示す。これは、母材の分担荷重をベースに、補強側、および下添接側の分担荷重をそれぞれ引張载荷重で除している。同図より、AおよびBタイプともに、伝達比率は、接着材の使用によって、補修側へ移行することがわかる。さらに、表-

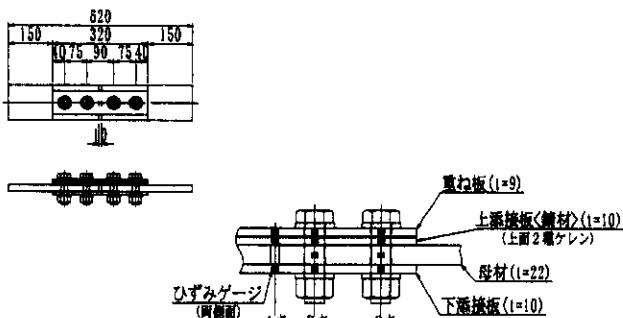


図-4 実験供試体(Aタイプ)

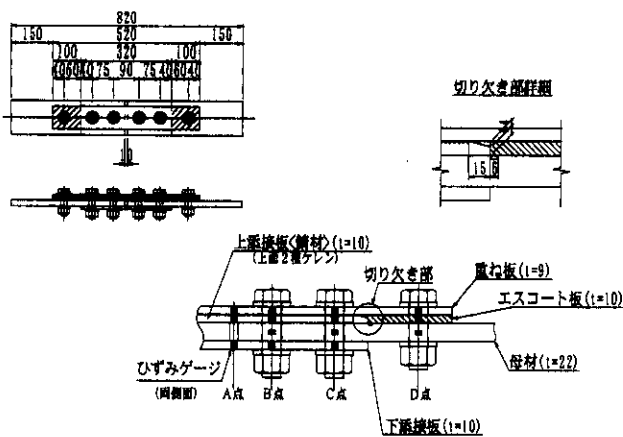
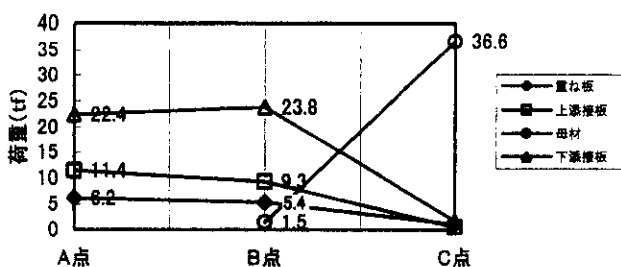
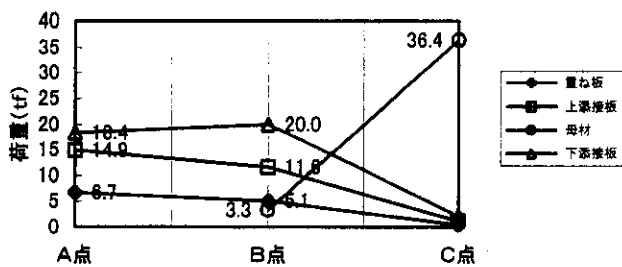


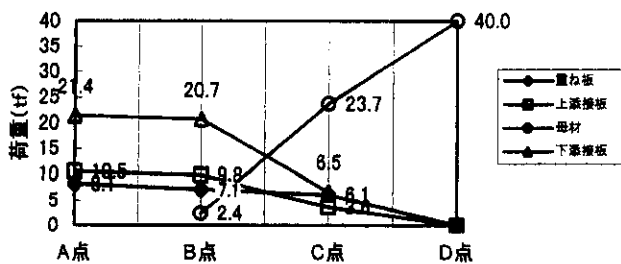
図-5 実験供試体(Bタイプ)



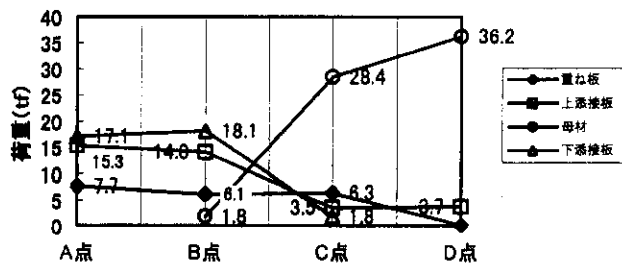
(a) A-1タイプ



(b) A-2タイプ

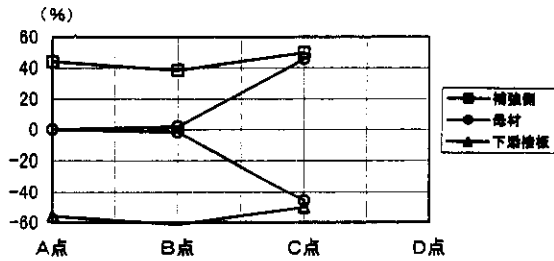


(c) B-1タイプ

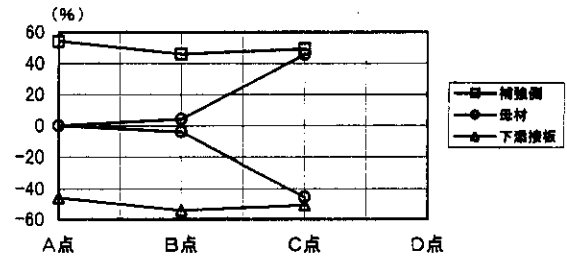


(d) B-2タイプ

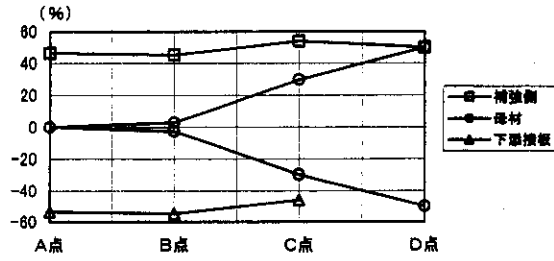
図-6 各供試体の分担荷重



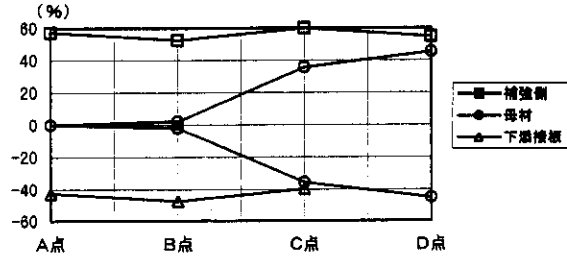
(a) A-1タイプ



(b) A-2タイプ



(c) B-1タイプ



(d) B-2タイプ

図-7 応力伝達比率

8には、各供試体のすべり荷重、破壊強度、およびすべり係数を示す。同表より、いずれの供試体においても、道示で規定されるすべり係数 $\mu=0.4$ を上回ることがわかった。なお、Bタイプで使用した先端ボルトは、1面摩擦として算定した。

3-3 再配分確認実験

3-3-1 供試体の設計

図-8には、再配分の確認実験に使用する供試体を示す。ボルトの抜取りおよび再締付けは、以下の手順とした。

ステップ1：1および5行目撤去後、再締め

ステップ2：2および4行目撤去後、再締め

ステップ3：3行目撤去後、再締め

3-3-2 実験結果および考察

図-9には、供試体の $P=50\text{tf}$ 引張载荷状態での、ボルト抜取りおよび再締付け時の荷重分担率を、各ステップ毎に示す。ここに、引張载荷重は、ボルトの抜取りによる負担荷重が等分に隣接ボルトへ配分される仮定のもと、最大負担力(7.5tf)が、ボルトの許容力以下となるように設定した。また、荷重分担率は、各行の平均値を用いた。

同図より、抜き取ったボルト行の負担荷重は、各ステップにおいて、残りのボルト行にほぼ均等に配分される結果となった。これは、添接板の剛

表-8 各供試体のすべり係数

供試体タイプ	すべり荷重 (tf)	破壊強度 (tf)	すべり係数
A-1	56.3	90.2	0.62
A-2	48.7	86.7	0.54
B-1	54.0	87.7	0.60
B-2	59.7	89.6	0.53
B-3	64.8	93.5	0.57

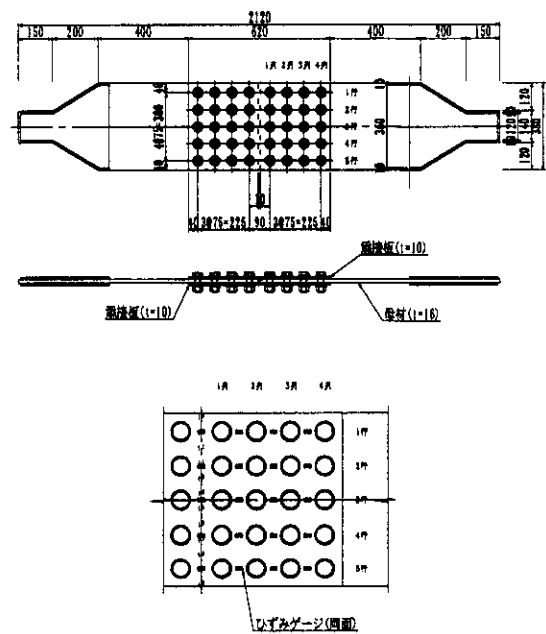
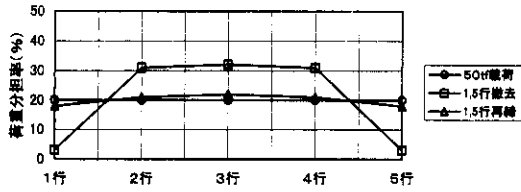
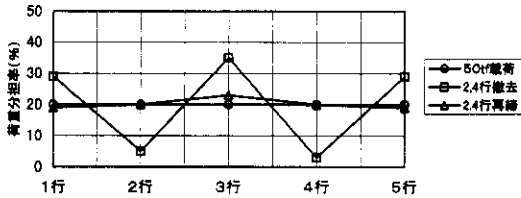


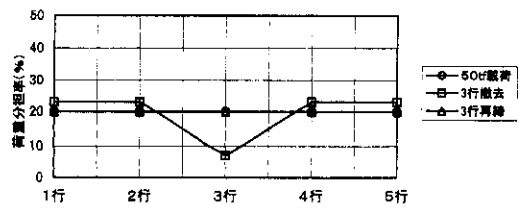
図-8 実験供試体(Cタイプ)



(a) ステップ1



(b) ステップ2



(c) ステップ3

図-9 各ステップ毎の応力分担率

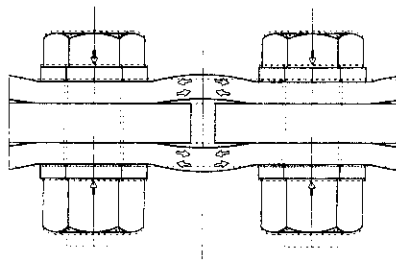


図-10 添接板の挙動

性が高いため、添接板内部で応力が伝達されたものと考えられる。また、再締付けによって、各行の負担荷重は、抜き取り前まで回復しているが、これは、ボルト締付けに伴い、添接板が図-10のように変形し、ひずみとして測定されたものと考えられる。

3-4 実橋における応力変動の確認実験

3-4-1 計測タイプ

図-11には、実橋の横桁継手部の概略構造図を示す。計測位置は、下添接板の応力方向に沿ったボルトの中間点とし、ボルト1行あたり5カ所(計45カ所)を対象とした。

3-4-2 計測結果

図-12は、ボルトを1行から9行まで順次抜き取ったときの、応力状況を示す。なお、発生応力は、ひずみゲージ5列の測定結果の平均値とした。

同図より、着目ボルトの抜き取りに伴う発生応力は、再締付け後、隣接するボルトが抜き取られた時点でほぼ抜き取り前の応力まで回復し、室内実験と同様の挙動を示した。

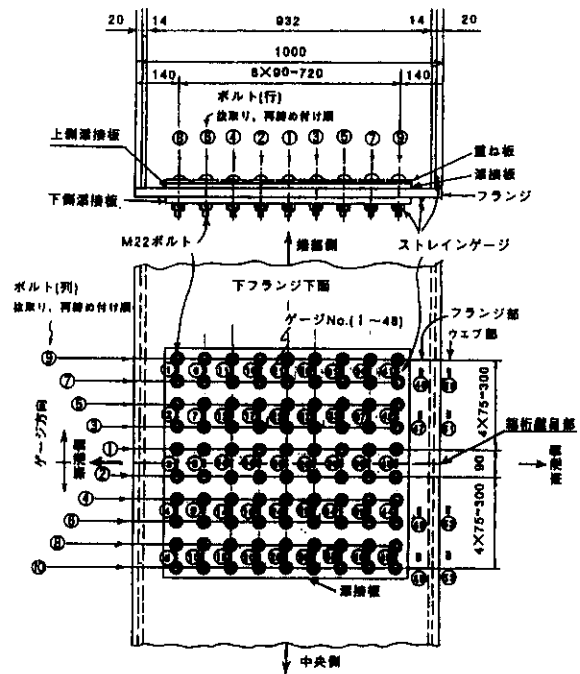


図-11 横桁継手部の概略構造図および計測位置

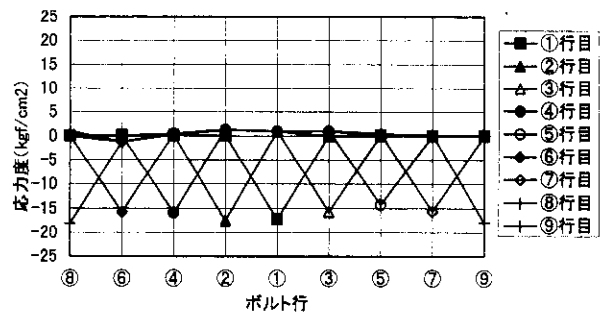


図-12 横桁継手部の応力状況

3-5 疲労試験

3-5-1 供試体の設計および試験条件

図-13には、疲労実験に使用する供試体を示す。製作にあたっては、実構造物の腐食状況に鑑み、切欠き(ノッチ)の有無を設け、亀裂損傷等に着

目した。

- ① F-1タイプ：接触面の接着あり，母材
ノッチなし
- ② F-2タイプ：接触面の接着あり，母材
ノッチあり

なお，実験の条件は以下に示す。

- ・ 載 荷 荷 重：0~23tf
- ・ 作用応力範囲：0~8.71kgf/mm²
- ・ 周 波 数：2 Hz (F-1)，4 Hz (F-2)

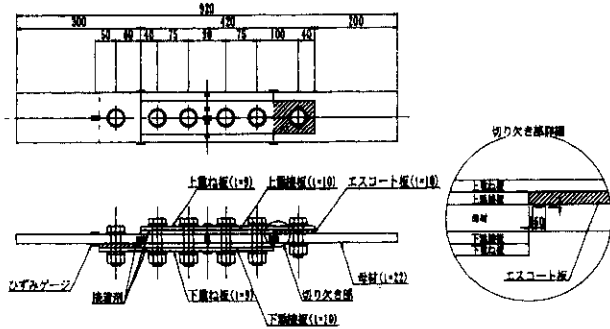


図-13 実験供試体(Fタイプ)

3-5-2 試験結果

表-9には，疲労試験結果を示す。接着面の亀裂，剥離およびノッチ部からの亀裂損傷等は確認されなかった。

表-9 疲労実験結果

供試体	応力全振幅 (kgf/mm ²)	周波数 (Hz)	繰り返し 回数	疲労試験結果
F-1	0~8.71	2	200万回	破断せず 接着剤の亀裂・剥離等 なし
F-2	0~8.71	2	200万回	破断せず 接着剤の亀裂・剥離， ノッチ部亀裂発生なし

3-6 クリープ試験

3-6-1 試験条件

接着剤の介在によるボルト軸力低下に対する影響の有無については，クリープ試験によってボルト軸力の経時変化を確認することとした。図-14には，実験供試体を示す。

N-1タイプ：実構造物の腐食状況から推定さ

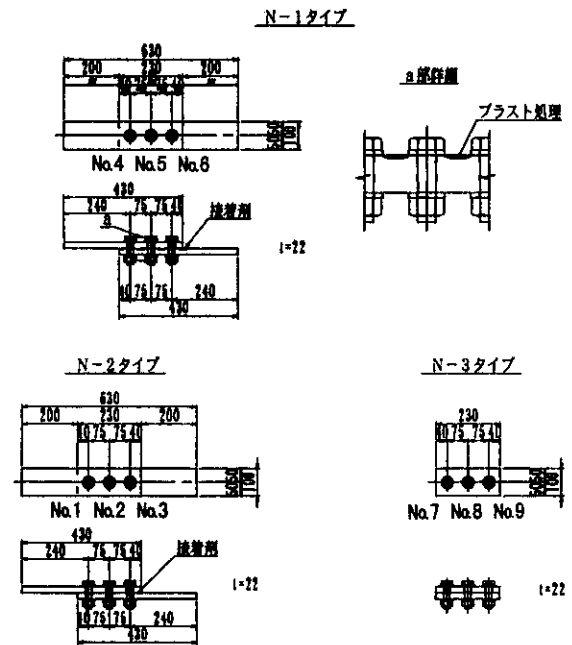
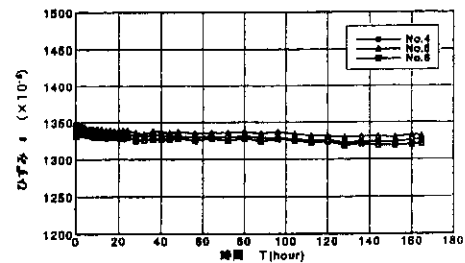
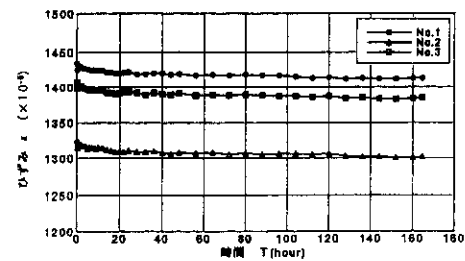


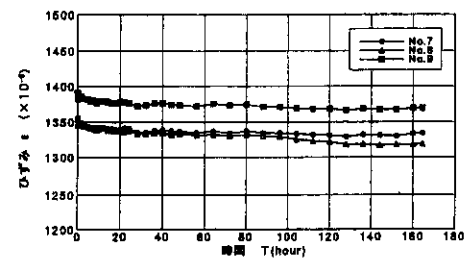
図-14 クリープ試験用供試体(Nタイプ)



(a) N-1タイプ



(b) N-2タイプ

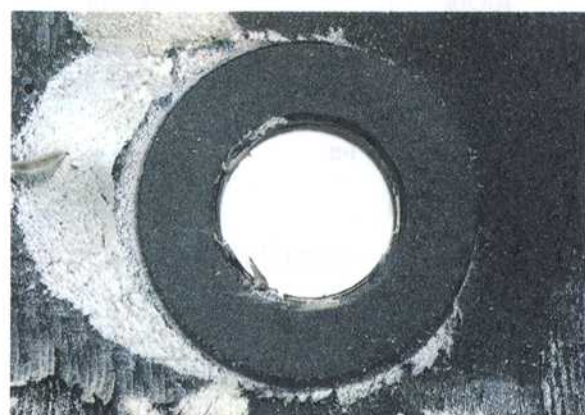


(c) N-3タイプ

図-15 ボルト軸力の経時変化



(a) 供試体全景(N-1タイプ)



(b) 穴部拡大(N-1タイプ)



(b) 供試体全景(N-2タイプ)



(d) 穴部拡大(N-2タイプ)

写真-2 剝離後の供試体表面状況

れる凹凸状態を再現

N-2タイプ：平滑な健全材

N-3タイプ：摩擦接合のみ（接着剤無塗布）

3-6-2 試験結果

図-15には、ボルト軸力の経時変化を示す。同図より、ボルト軸力の低下率は、いずれの供試体においても、2~3%程度であり、接着剤による影響は見受けられなかった。

また、写真-2は、クリープ試験終了後、供試体を剝離したときの摩擦面の状態を示す。同写真より、健全材を用いたN-2タイプは、全面にわたって、接着剤が薄く残っていたが、実物を再現したN-1タイプのボルト座金の範囲において、接着剤の付着はほとんど見受けられなかった。この結果から、ボルト軸力の導入により支圧を受ける範囲の接着剤は、ほとんど排除されることが確認された。

3-7 接着剤の物性試験結果

3-7-1 試験条件

接着剤の物性試験は、以下について実施した。

- ① 硬化物性状試験：接着剤別引張せん断強度の検証
- ② 水分吸湿性添加剤によるせん断試験：錆に含む水分を吸湿する添加剤について、配合比別の検証
- ③ 温度別せん断試験：低温（0℃）、常温（20℃）、高温（60℃）における引張せん断強度の検証

3-7-2 試験結果および考察

硬化物性状測定は、JISZ8703に基づき、鋳鋼板に対して、数種類の樹脂系接着剤について実施したが、いずれの引張せん断強度も、180kgf/cm²程度が確認された。つぎに、水分吸湿性添加剤の配合量は、60/40（添加剤配合比）の硬化剤が、最も大きいせん断強度を示すことを確認した。さらに、温度別の引張せん断強度は、0℃および20℃では高い値を示したが、60℃では、強度が急激に低下することを確認した。また、錆に対する強度特性を確認するため、静的引張試験用供試体に用いた鋳鋼板（厚板）を使用して、JSSC規格による

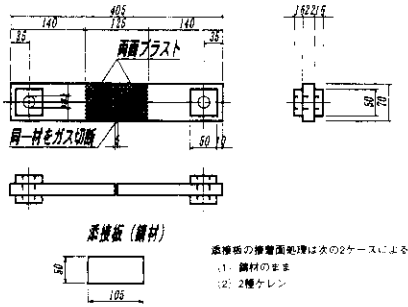


図-16 実験供試体(Dタイプ)

引張せん断試験⁹⁾を実施した。図-16には、実験供試体を示す。

この結果から、引張せん断強度は、硬化条件20℃、7日養生で、JIS規格によるせん断強度の6割程度(約100kgf/cm²)となった。これは、接着剤の引張せん断強度が、図-17に示すように、接着長Lおよび接着幅Wの比L/Wによって異なり¹⁰⁾、JIS試験片(L/W=0.5)に対して、JSSC試験片(L/W=1.0)では、7割程度(130÷170=0.76)に低下するためである。ただし、JSSC試験片による引張せん断試験でも、当公団で規定するグラウト用エポキシ樹脂の規格値(10N/mm²≒102kgf/cm²)⁷⁾を満足したことを追記する。

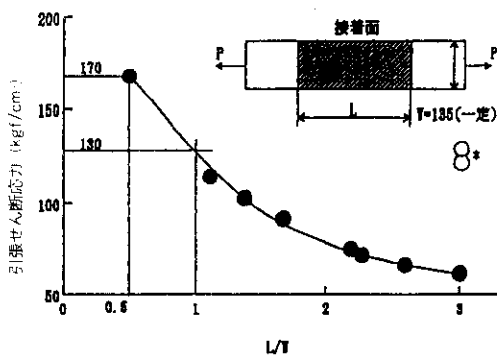


図-17 L/Wおよび引張せん断強度の関係

4 まとめ

本稿は、橋梁継手部の腐食による添接板の損傷に対する補修方法を提案し、その安全性・妥当性を確認実験により検証したものであるが、得られた成果を要約すると次のようである。

- ① 継手部の補修方法は既設添接板に短冊状の

鋼板を重ね合わせる補強添接板工法を提案した。

- ② 本工法的前提になるボルト1行の抜取りは可能であると判断した。
- ③ ボルトの材質変更(F11T→S10T)は、先端ボルトの効果によって所要の安全率を保持すると判断した。
- ④ 母材と添接板との摩擦面は、現地調査から、健全であると推定される
- ⑤ 静的引張実験により、下添接板の分担荷重は、接着剤の使用により低減される傾向にある。なお、接着剤は、腐食鋼板と補強鋼板との間に生じる隙間の防錆対策としても有効と考えられる。
- ⑥ 再配分の確認実験より、抜き取ったボルト行の分担荷重は、残りのボルト行でほぼ均等に分担されたが、これは、添接板内部での応力伝達によると考えられる。また、実橋での再配分の確認実験も同様の傾向であった。
- ⑦ 疲労実験により、接着剤の剝離および母材ノッチ部からの亀裂等の損傷は確認されなかった。
- ⑧ クリープ試験の結果、ボルトの軸力変動は3%程度であったが、ボルト軸力の導入によって、支圧を受ける範囲の接着剤は、ほとんど排除され、ボルト軸力の低減に対する接着剤の影響はないことを確認した。
- ⑨ 硬化物性状測定は、JIS規格に基づき、数種類の樹脂系接着剤について実施したが、いずれの引張せん断強度も、当公団で規定する規格値(100kg/cm²)を満足することを確認した。また、温度別の引張せん断強度は、0および20℃では高い値を示したが、高温領域(60℃)では、強度が急激に低下することを確認した。

なお、接着材については、長期耐久性に関するデータが不足しているため、施工箇所と同様の環境下における暴露供試体による追跡調査を予定している。

最後に、本実験にあたり、ご指導頂いた広島工

業大学の皆田教授および研究室の方々ならびに各種実験を実施して頂いた三菱重工工事㈱技術本部の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 道路構造物の点検標準(土木構造物編)：阪神高速道路公団，平成8年5月
- 2) 名取暢・寺尾圭史：接着材を併用した腐食剤のあて板補強について，土木学会第46回年次学術講演会，I，p848-849，1991.
- 3) 道路構造物の補修要領：阪神高速道路公団，平成2年6月
- 4) 道路橋示方書・同解説II鋼橋編：日本道路協会，平成8年12月
- 5) 土木工事共通仕様書IV，関係基準編：阪神高速道路公団，平成8年4月
- 6) 鋼構造物への接着接合の適用：(社)日本鋼構造協会
- 7) 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，I，pp.594-595，1991.