

腐食部材の添接板補強に関する研究

名取 暢¹・西川和廣²・村越 潤³・大野 崇⁴

¹正会員 (株)横河ブリッジ 橋梁本部 (〒550-0003 大阪府西区京町堀 1-6-2)

²正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 企画部 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)

³正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 危機管理研究センター (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)

⁴正会員 (株)横河ブリッジ 建築本部 構造技術開発室 (〒299-02 千葉県袖ヶ浦市南袖 11)

既設橋梁を健全な状態に保持していくためには、腐食に関して、その点検から補修補強に至る一連の維持管理手法を確立しておくことが重要である。本研究では、腐食により損傷を受けた鋼部材の補強方法として、比較的简单易で、かつ補強効果が高いと考えられる当板添接補強を取り上げ、その効果について実験的検討を行った。実験では、補強添接板の接合方法として、高力ボルトによる摩擦接合を取り上げ、腐食面を摩擦面とした場合の基本的なすべり性状について検討し、腐食表面の凹凸が著しい場合には、十分な荷重伝達がなされない場合のあることを確認した。また、そのような場合の対処方法として、接着剤を接合面に塗布して高力ボルトを締付ける併用接合について提案し、その場合の補強効果について、実腐食材を用いた引張試験および曲げ試験により確認した。

Key Words: corrosion damage, existing steel highway bridge, restrengthening, cover plate, high-strength bolts, adhesive

1. はじめに

腐食は鋼橋の変状の中でも最も一般的のものであり、部材の安全性や耐久性を左右する重要な損傷である¹⁾。鋼橋においては一般的に塗装により防錆が行われており、塗膜が健全に保たれている間は錆および腐食は発生しない。このため、一定周期に塗装の塗り替えが実施されるが、桁端における伸縮装置近傍や支承付近、あるいは床組、箱断面部材内部などの水分やごみが堆積しやすい部位、床版損傷部からの雨水の漏水部位などでは早期に塗膜が劣化し、錆の進行に伴い部材が腐食し、板厚の減少や断面欠損が生じているような場合もある^{2)~4)}。腐食の進行が著しく、すでに相当の断面減少をきたしているような場合には、部材の耐力は低下し、安全性を損なう危険性があることから腐食の生じた部材の耐荷力や残存強度の評価に関する検討もなされている^{5)~8)}。

腐食により耐荷性能の低下が確認された場合には、補修補強対策を実施する必要が生じるが、その方法として、補強板の当板添接補強、腐食部の部分的な取り替え、腐食のさらなる進行を防止するための防錆強化などの各種の対策が用いられている^{9)~12)}。対策工法の選定に際しては極力簡易な施工で、かつ補修補強効果のある対策を選定することが望ましく、腐食部分を対象として補強板を当板添接することが実施されることが多い。

添接板の接合方法としては、高力ボルト接合による方法と溶接による方法とがある。これらを腐食材の補強に適用する場合、それぞれに問題点が考えられる。溶接の場合には、凹凸を有する面への補強板の溶接においては、部材間での密着性を確保することが困難となり、溶接部に新たな応力集中点が生じ疲労上の配慮が必要となる。また、供用下の既設橋梁に対する現場溶接となり、その施工性および品質を確保することが困難な場合がある。一方、高力ボルト接合では、腐食による板表面の凹凸が著しい場合、腐食材と補強板間における十分な接触が確保できず、力の伝達が期待どおりなされないことが危惧される。また、補強板と腐食材間には局所的な隙間が生じることとなり、防錆上の配慮も必要となる。これら方法以外に、高力ボルト接合と接着接合とを併用する方法が考えられる。この方法は腐食材と添接板間に接着剤を塗布することにより、接触面の確保を図り確実な力の伝達を期待するものであり、さらに腐食材と補強板間には接着剤が充填されることとなり、隙間部の防錆も確保することが可能である。

接着剤を鋼部材の接合に用いることの検討に関しては、これまでに種々の検討がなされているものの腐食材の補強への適用についての検討事例は少ない^{13)~20)}。そこで、本研究では、腐食材への当板の添接方法として高力ボルト接合と接着接合とを併用した接合方法を取り上げ、そ

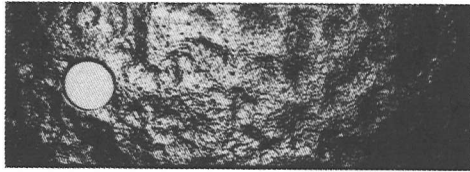


写真-1 腐食材の表面状況

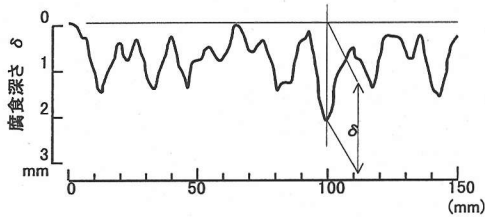


図-1 腐食材表面の形状計測例

の効果について実験的な検討を行った。実験では、最初に、腐食材を用いた継手のすべり試験を実施し、高力ボルト接合および高力ボルト接合と接着接合の併用接合のそれぞれについて基本的なすべり性状を確認した。次に、実腐食材に補強板を当板添接補強した試験体の引張試験を実施して併用接合における力の伝達性状、引張強度特性および疲労強度特性について検討した。さらに、フランジ部に腐食による断面欠損の生じた縦桁部材を用いて曲げ試験を行い併用接合による補強効果を確認した。

2. 腐食材のすべり特性に関する検討

腐食材に当板をボルト接合した場合のすべり特性について検討するため、実際に腐食した部材の材片を用いた添接試験体を製作しすべり試験を行った。また、接合面に接着剤を塗布した場合の効果について塗布しない場合と比較検討した。

(1) 腐食材の腐食状況および機械的性質

試験体を用いた腐食材の表面状況について調査した。使用した腐食材は、日本海沿岸に8年間暴露した箱断面部材(無塗装)から採取した耐候性鋼材(SMA50W, 公呼板厚10mm)である。写真-1に代表的な腐食状況を示す。腐食は板全面にわたり発生しており、板表面は著しい凹凸状態となっている。暴露した環境が海岸に面した腐食に対して厳しい環境であり、塩分の付着が腐食を促進し

表-1 レーザー式変位計の特性

レーザーセンサー	ANL3330C1(松下電工社製)
使用光源	レーザーダイオード 波長780nm
表示単位	0.01mm(分解能±0.03mm)
測定精度	0.1mm(孔径2mmφ、深さ2mmの場合)
測定板厚範囲	6mm~20mm
測定間隔	0.2mm~2mm

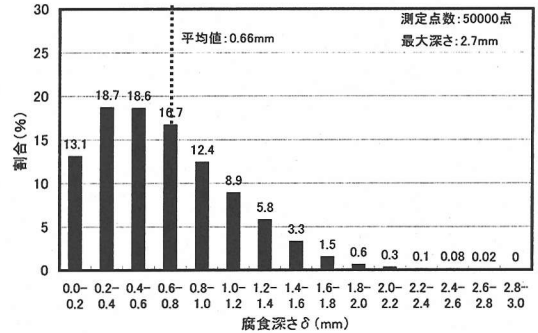


図-2 腐食深さの分布

たものと考えられる。

図-1はレーザー式変位計を用いて腐食材の表面形状を計測した一例である。使用したレーザー式変位計の性能を表-1に示す。腐食材をはさんで一定間隔に保持した2台のレーザーセンサーを同一線上に対峙させ、それぞれのレーザーセンサーと腐食材表面との距離を計測することにより、腐食材の表面形状および板厚を計測した。なお、腐食材の表面についてはスチールグリッドプラス処理し錆を除去している。図-1に示す表面形状は0.2mm間隔で計測した値を1mm間隔毎に平均して示したものであるが、板表面では、10mm~30mm程度の間隔で大きな凹部が生じている。また、隣り合う大きな凹部間には小さな凹凸の生じた腐食状況であり、塩分の付着が原因の一般鋼材における代表的な腐食状況と良く一致したものである。図-2は表面形状の測定結果から凹部における腐食深さについてその頻度分布を整理したものである。ここで、腐食深さについては、一測定線内における凸部の高さの上位2点を抽出し、それを結ぶ基準線から凹底部までの距離を腐食深さと定義した。腐食深さの最大は2.6mmであり、0.2mm~0.8mmの腐食深さの部位が全体の半分以上を占めている。また、平均深さは0.7mm程度となっている。

腐食材の板厚計測結果を図-3に示す。使用材料の公呼板厚10mmに対して、平均板厚は9.65mm、最小板厚は7.9mm、最大板厚10.3mmとなっており、その分布性状は図-2に示した腐食深さの分布性状と近似したものである。表-2は、腐食材の引張試験結果を示したも

のである。試験片は JIS 1A 号であり、腐食による凹凸を有する試験片の表面を平滑に仕上げ、腐食表面および凹凸の影響をなくした場合（平滑材と呼ぶ）と腐食材のままの場合（腐食材と呼ぶ）について試験を実施した。ここで、降伏点および引張強さの算出に際して腐食材の板厚については、図-3に示す平均板厚を用いた。平滑材の試験結果との対比から、平均板厚を用いた腐食材の降伏点および引張強度は、平滑に仕上げた場合と比較して多少低めの強度を与える結果となっているが、その強度差は数%であり、平均板厚を用いて腐食材の引張特性の評価は可能なものとする。

(2) すべり試験体

すべり試験体の形状寸法を図-4に示す。片側1列の両面添接試験体である。主材に腐食材を用い、添接材には補強当板材を想定して新規材 (SM490 材, $t=9\text{mm}$) を使用した。使用した高力ボルトは M22, F10T である。

試験ケースを表-3に示す。試験でのパラメータは、接合面の表面処理状況、高力ボルトの締付け軸力、接合面への接着剤塗布の有無である。接合面の表面処理については、当板材側の接合面についてはスチールグリッドプラスト処理（使用グリッド：#30, #50の混合）を行い、腐食材である主材側については、2種ケレン（使用工具：ワイヤホイールブラシ）により表面錆層を除去した場合とスチールグリッドプラスト処理を行った場合の2つの方法について検討した。高力ボルトの締付け軸力については、道路橋示方書・同解説で規定されている M22, F10T の標準ボルト軸力 (221kN)²⁰⁾ を導入した場合と接着剤のせん断強度を期待して導入軸力を約半分低減した場合 (118kN) の2ケースを設定した。また、表面処理方法および締付け軸力の組み合わせに対して、接着剤を塗布した場合としない場合について試験を行った。使用した接着剤の物性を表-4に示す。2液混合型の常温硬化タイプのエポキシ樹脂接着剤である。施工性を考慮して可使用時間が1時間程度で、また、供用下での補修工事における使用に配慮して、強度の発揮するまでの養生期間が比較的短い接着剤を選定した。表-5は板厚 9mm の両面添接試験体（接着面積：50mm×50mm、接合面の処理：プラスト処理）を用いて接着接合継手のせん断強度試験を行った結果である。養生期間については、接着剤塗布から6時間経過した場合と、後述する種々の試験での養生期間を想定して7日とした場合の2ケースとしている。接着接合継手のせん断強度は 26~27MPa 程度であり、また、養生期間が6時間の場合と7日の場合とでその強度に大きな違いがないことから、接着剤塗布後、6時間程度で十分な強度を発揮しているといえる。なお、破断形態については、すべての場合とも接着剤層内での凝集破断となっている。

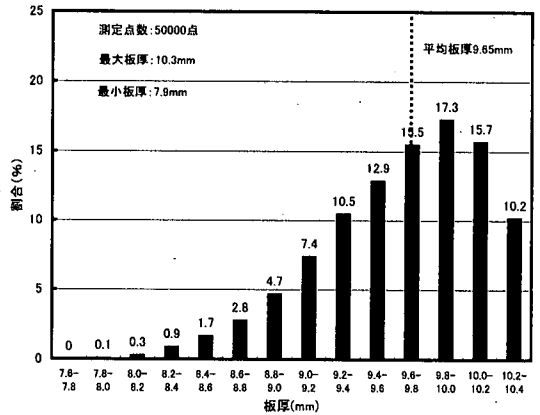


図-3 腐食材の板厚計測結果

表-2 腐食材の引張試験結果

板表面の状況	使用材質	板厚 (mm)	降伏荷重 P_y (kN)	降伏点 σ_y (MPa)	最大荷重 P_u (kN)	引張強度 σ_u (MPa)
平滑材	SMA50W	7.30	113	387	141	483
腐食材	SMA50W	9.65	143	370	183	475

引張試験片：JIS 1A号試験片
平滑材、腐食材とも3本の平均値

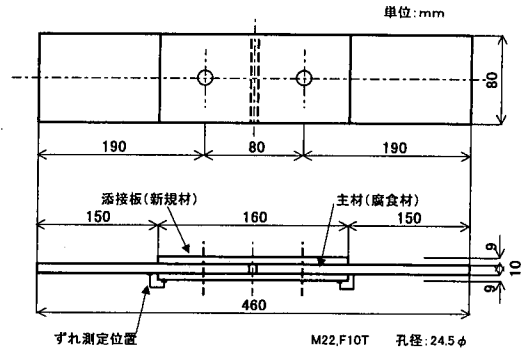


図-4 すべり試験体の形状寸法

表-3 すべり試験ケース

試験体 No.	接合面の表面処理		接着剤の有無	締付け軸力 (kN)
	主材 (腐食材) 側	添接板側		
A1-1, 2	2種ケレン処理	スチールグリッド	有り	221
A1-3, 4		プラスト処理	有り	118
A2-1, 2			無し	118
B1-1~4	スチールグリッド	スチールグリッド	有り	221
B2-1, 2		プラスト処理	無し	118

すべり試験体の組立は、主材および添接板接合部について表面処理を行った後に接着剤を常温で塗布し、引き続き高力ボルトを所定軸力まで締め付けた。また、すべり試験は、後述する各種試験の工程上の制約から、全て

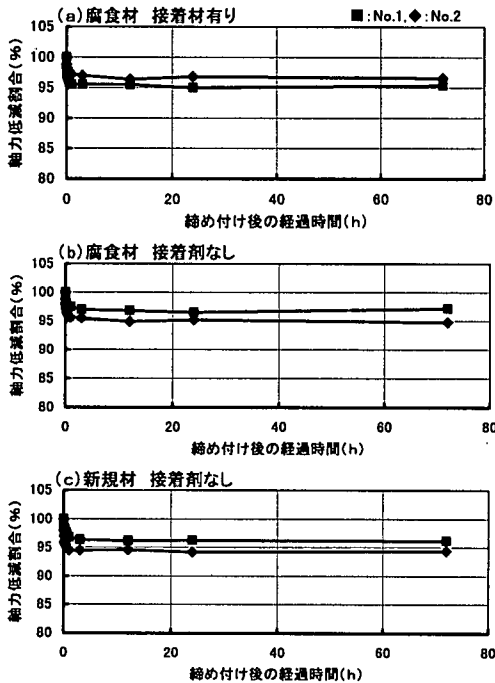


図-5 ボルト軸力の経時変化

の試験において接着剤塗布して約1週間の養生を行いその後実施した。

試験では引張試験機を用いて、荷重を一定速度で増加させ継手のすべり荷重を計測した。すべり荷重の確認は図-4に示す各位置において、主材と添接板間とのずれを計測することによりおこなった。

(3) ボルト締め付け軸力の変化

すべり試験に先立ち、接着剤を併用した場合のボルト軸力の経時変化について図-4の試験体を用いて測定した。試験では比較検討用として接着剤を塗布しない場合、および主材、添接板とも新規材を用い接着剤を塗布しない場合についても軸力の変化を計測した。軸力の計測はボルト軸部に貼り付けたひずみゲージのひずみ値を計測することにより行った。なお、いずれのケースとも2体 (No. 1, No. 2) づつ計測を実施した。

図-5はボルト軸部のひずみ値の経時変化を締め付け直後を100として示したものである。腐食材において接着剤を塗布した場合および高力ボルトのみとした場合、また、新規材を用いた場合ともひずみの変化性状に大きな差異はなく、ひずみの低下量は初期締め付け値に対して4~6%程度となっている。また、その低下のほとんどは締め付け後30分程度で生じ、その後は安定した性状を示しており、接着剤を塗布したことによるボルト軸力のリラクゼーションへの影響は認められない。なお、いずれの場合においても締め付け後3日を経過した時点におい

表-4 使用接着剤の物性

主材	エポキシ樹脂
硬化剤	変性脂肪族ポリアミンポリチオール
混合比	主材：硬化剤=2：1
混合粘度	600±150mPa・s (25℃)
可使用時間	55±10分 (50.0g, 20℃)
強度性能	引張強度：30MPa 引張せん断強度：10MPa
備考	JIS A 6024 (建築補修用注入エポキシ樹脂) 適合品

表-5 接着継手のせん断試験結果

試験片 No.	最大荷重 (kN)		せん断強度 (MPa)		破壊形状
	6h養生	7日養生	6h養生	7日養生	
1	132	124	26	25	凝集破壊
2	126	146	25	29	凝集破壊
3	134	129	27	26	凝集破壊
平均	131	133	26.0	26.6	—

養生温度：15℃~20℃

表-6 すべり試験結果

試験体 No.	接合面の表面処理		接着剤の有無	給付軸力 (kN)	すべり荷重 (kN)
	主材側	添接板側			
A1-1	2種ケレン (腐食材)	プラスト (新規材)	有り	221	(218)
A1-2				221	(212)
A1-3				118	139
A1-4			無し	118	167
A2-1				118	100
A2-2			118	74	
B1-1	プラスト (腐食材)	プラスト (新規材)	有り	221	(278)
B1-2				221	(269)
B1-3				118	(253)
B1-4			無し	118	(258)
B2-1				118	62
B2-2			118	65	
備考	主材の降伏荷重		純断面積を用いた場合	196kN	
			総断面積を用いた場合	282kN	
	接着接合継手としてのせん断耐力				309kN

() 内数値は すべりに先行して主材に降伏が発生

てひずみは安定したものであったことから、その時点で計測を終了した。

(4) すべり試験結果

すべり荷重を表-6にまとめて示す。表中の()内値は、接着剤を塗布した場合において、明瞭なすべり現象が確認されなかったケースについての結果である。他のケースにおいては、すべりの発生は音をとめない急激にずれが増加する明瞭なものであった。図-6に両者の場合の代表的な荷重-ずれ線図を示す。すべり音が確認されたA2-1の場合には、ピーク荷重到達後に荷重の低下とともにずれ量が急激に増加している。これに対して、明瞭なすべり現象が確認できなかったA1-1の場合にはピ

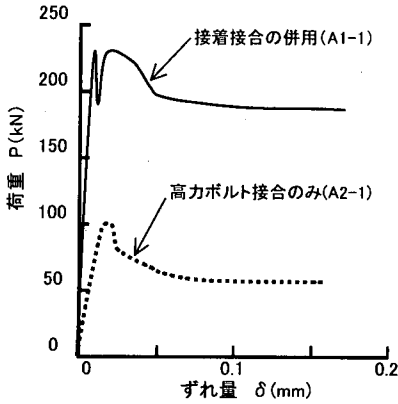


図-6 代表的な荷重-ずれ線図

ーク荷重到達後に荷重の低下は認められるもののずれ量がほとんど増加しておらず、その後の荷重の増加過程においてすべりが生じずれが増加している。表-6中の()内のすべり荷重については、図-6中のピーク荷重を示したものであるが、これらのケースについてはすべりに先行して主材の降伏が生じたものと考えられる。ここで、前述した腐食材の引張試験結果および接着接合継手のせん断試験結果を用いて主材の降伏荷重および継手のせん断耐力を計算した結果を表中に併記したが、主材および添接板ともブラスト処理して接着剤を塗布したケース(B1-1~4)については、締付け軸力の大小にかかわらず、主材の総断面積で評価した場合の降伏荷重にほぼ等しい強度まですべりは生じておらず、接着剤を塗布しなかったケース(B2-1,2)と比較して高いすべり強度を有しているといえる。添接板を2種ケレン処理したケースについても接着剤を塗布した場合は塗布しない場合と比較して高いすべり強度が得られているが、ブラスト処理の場合と比較して、その効果は小さい。これは、接合面の表面処理の程度により接着接合継手のせん断強度が異なるためと考えられる。図-7は、各試験ケースについて、継手のすべり強度からすべり係数を算出した結果を整理したものである。すべり係数の算出においては、接着剤のせん断抵抗を無視しており、また、図中の()で示したすべり係数は、表-6中の()内で示した降伏荷重からすべり係数を便宜的に算出したものである。2種ケレン処理、ブラスト処理の双方とも高力ボルト接合のみの場合において低いすべり係数となっており、道路橋示方書・同解説で規定されている²⁾設計値0.4を満足しない場合も認められる。図-8は高力ボルト接合のみの場合について接合面に感圧紙をはさみボルトを所定軸力(221kN)に締付け面圧分布を計測した結果である。図中の黒い部分が主材と添接板との接触部である。新規材の

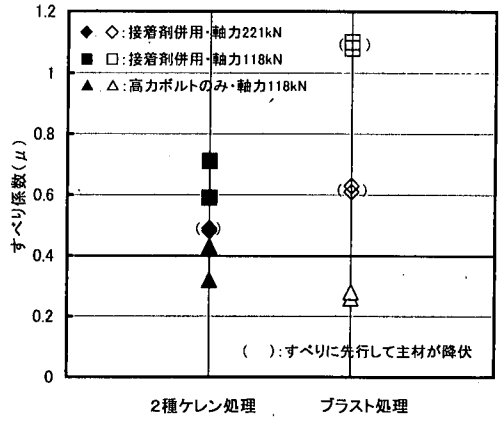
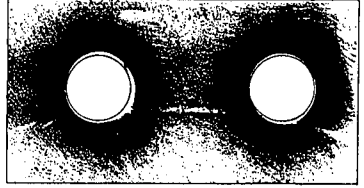


図-7 すべり係数の比較



(a)腐食材の場合



(b)新規材の場合

図-8 接合面における接触状況

場合と比較して、腐食材の接合面では、接触部が局所的で、かつ孔周辺に散在している。このような不均一な面圧分布が継手のすべり挙動に影響を及ぼしているものと考えられ、板表面に極端な凹凸を有するような腐食材においては、添接板への十分な荷重伝達が期待できない場合がある。これに対して接着剤を塗布したケースについては、いずれのケースにおいても0.4以上のすべり係数が得られており、接着接合を併用することにより高いすべり係数を確保することが可能であるといえる。また、接合面の表面処理の程度に関しては、ブラスト処理した場合の方が、より高い効果が期待できるといえる。

3. 添接補強試験体の引張試験

腐食材に当板を添接補強した場合の荷重伝達性能、引張強度特性および疲労特性を検討するため、実際に腐食した部材の材片を用いた当板添接補強試験体を製作し、

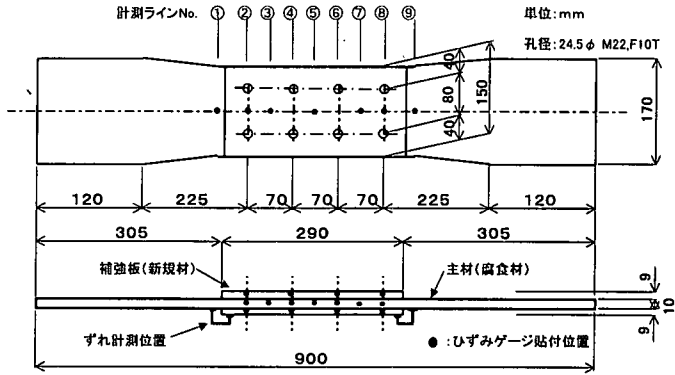


図-9 当板添接補強試験体の形状寸法

表-7 当板添接補強の静的試験ケース

試験体 No.	接合面の表面処理		接着剤の有無	締付軸力 (kN)
	主材(腐食材)側	補強板側		
A1-1, 2, 3	2種ケレン処理	スチールグリッド プラスト処理	有り	221
A1-4, 5			有り	98
A2-1			無し	221
A2-2, 3	スチールグリッド	スチールグリッド プラスト処理	無し	98
B1-1, 2, 3			有り	221
B1-4, 5			有り	98
B2-1, 2	プラスト処理	プラスト処理	無し	221
B2-3, 4			無し	98

静的引張試験および疲労試験を行った。

(1) 当板添接補強試験体

a) 静的引張試験体

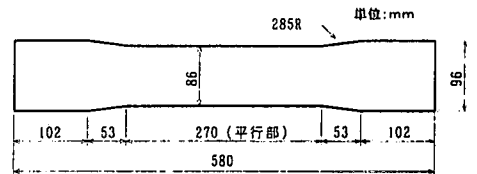
当板添接補強試験体の形状寸法を図-9に示す。主材に前述したすべり試験で用いた腐食材と同一の材料を使用し、当板補強材(新規材 SM490材, $t=9\text{mm}$)を主材の両側から高力ボルト(M22, F10T)、あるいは高力ボルトと接着剤で接合した試験体である。

試験ケースを表-7に示す。すべり試験と同様に接合面の処理方法、接着剤の塗布の有無およびボルトの締付け軸力を試験におけるパラメータとした。使用した接着剤はすべり試験で用いた材料と同じであり、主材および補強板接合部について表面処理を行った後に接着剤を常温で塗布し、引き続き高力ボルトを所定軸力まで締付けた。また、引張試験は、試験体の組立て完了後、約1週間の養生を行った後に実施した。また、図-9に示す位置において主材および補強板のひずみ、ずれを計測した。

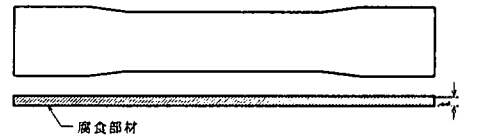
b) 疲労試験体

疲労試験体の形状寸法を図-10に示す。主材、補強板とも静的引張試験で使用した材料と同様である。

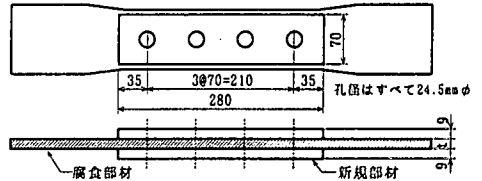
F1試験体は、補強を施さないものであり、実腐食材単



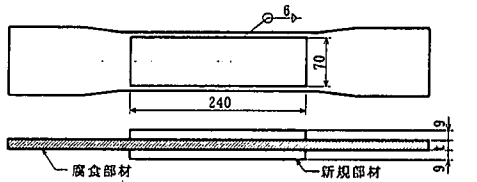
(a) 主材詳細



(b) 腐食材単体(F1)



(c) 高力ボルトおよび接着材併用(F2, F3)



(d) すみ肉溶接(F4, F5)

図-10 当板添接補強の疲労試験体の形状寸法

体の試験体とした。F2試験体は、主材に実腐食材を、当板補強板に新規部材を用い、高力ボルトを用いて接合したものである。主材と補強板の接合面についてはプラスト処理し、M22, F10T高力ボルトを用いて、221kNの締付け軸力を導入した。F3試験体は、主材と補強板の接合面

に接着剤を塗布し、高力ボルトと接着剤の併用接合としたものである。使用接着剤はすべり試験において用いた材料と同一である。F4, F5 は比較検討用として、主材と補強板の接合をすみ肉溶接で行った試験体であり、F4 試験体については、主材に実腐食材を用い、F5 試験体では主材に新規材を使用した。これは腐食による板表面の凹凸がすみ肉溶接の脚長やルートの溶込みなどの品質に影響を及ぼすことが考えられるため、比較検討用として実施したものである。なお、溶接は脚長 6mm の全周すみ肉溶接と被覆アーク溶接で行った。疲労試験は、500kN サイボ型疲労試験機を用いて行った。繰返し速度は 8Hz であり、下限荷重を 10kN とした完全片振りの応力条件で試験した。

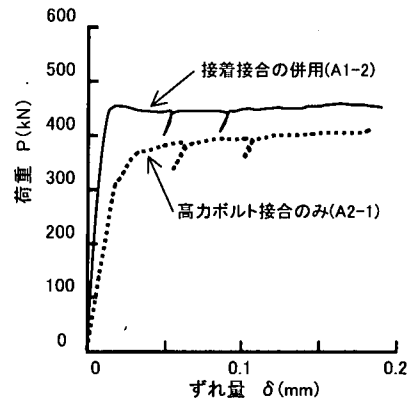
(2) 静的引張試験結果

降伏荷重および最大荷重を表-8にまとめて示す。試験体の破断位置はいずれの場合も継手端部の第一ボルト列断面(図-9に示す計測ライン2または8の断面)である。また、いずれの試験体とも第一ボルト列断面において主材の降伏が生じそれに伴い荷重が一旦低下した。その後、荷重の増加とともに主材と補強板とのずれが顕著に増大し最大荷重に達した。ここで、表-8に示す降伏荷重は主材の降伏が生じた荷重を示している。最大荷重に関しては、接着剤を塗布した場合において多少高めの値を示しているものの、接合面の表面処理方法の違いや締付け軸力の違いによる顕著な差異は認められない。降伏荷重については、接着剤の塗布の有無により明らかな違いが認められ、2種ケレン処理した場合、ブラスト処理した場合とも接着剤を塗布したケースが塗布しなかったケースより高い強度が得られている。この傾向はブラスト処理した場合において顕著であり、接着剤を塗布した場合の降伏荷重は、塗布しない場合の1.3倍程度となっている。なお、ブラスト処理した場合、ケレン処理した場合とも締付け軸力の影響については、ほとんど認められない。

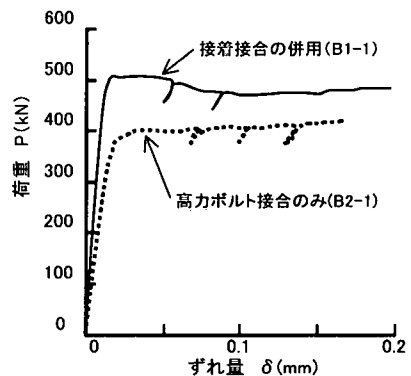
図-11は、ケレン処理、ブラスト処理した場合について、荷重の増加に伴う主材と補強板とのずれ量の変化を示したものである。いずれの場合においても接着剤を塗布したケースの方が高い荷重領域まで線形関係を保っており、また接合剛性も高く、前述したすべり試験の結果と同様に接着接合を併用することにより優れた荷重伝達性能を有することがわかる。図-12, 13は、載荷荷重がそれぞれ200kN および400kN 時における主材と補強板のひずみ分布を示したものである。図中の計測ライン番号は試験体軸方向の計測断面位置を示したものであり、計測ライン番号5が継手中央断面にあたる。主材、補強板のひずみ値については、それぞれの断面位置における継手中心線上および板側面において計測されたひずみの平

表-8 当板補強試験の降伏荷重および最大荷重

試験体 No.	接合面の表面処理		接着剤の有無	締付け軸力 N (kN)	降伏荷重 Py (kN)	最大荷重 Pu (kN)		
	主材側	補強板側						
A1-1	2種ケレン (腐食材)	ブラスト (新規材)	有り	221	435	503		
A1-2				221	439	508		
A1-3				221	438	516		
A1-4				98	433	509		
A1-5				98	413	510		
A2-1			無し	221	389	479		
A2-2				98	390	467		
A2-3				98	382	475		
B1-1				ブラスト (腐食材)	ブラスト (新規材)	有り	221	500
B1-2			221				505	505
B1-3	221	490	505					
B1-4	98	515	520					
B1-5	98	524	524					
B2-1	無し	221	409			478		
B2-2		221	403			483		
B2-3		98	370			472		
B2-4		98	395	475				



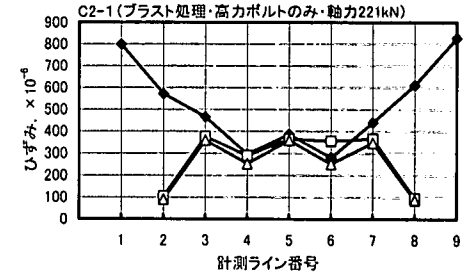
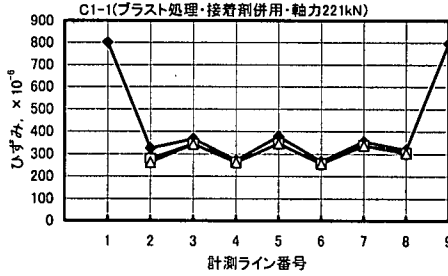
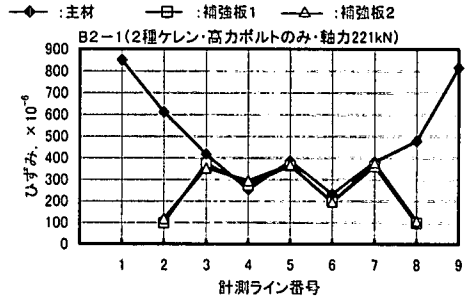
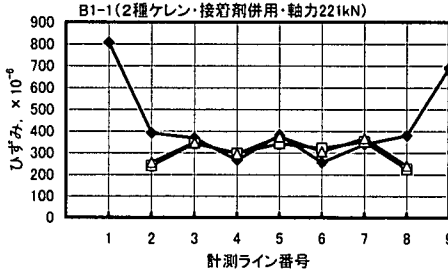
(a) 2種ケレン処理の場合



(b) ブラスト処理の場合

図-11 主材と補強材とのずれ挙動

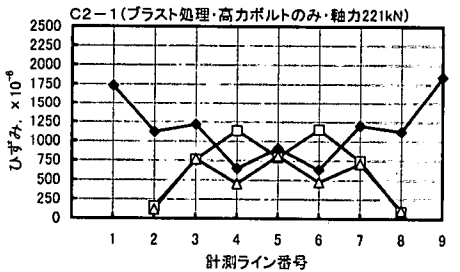
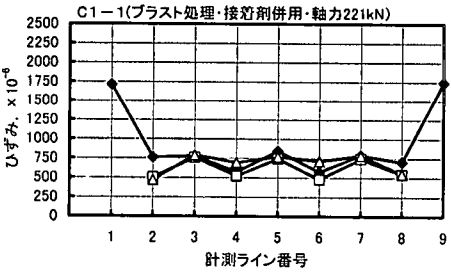
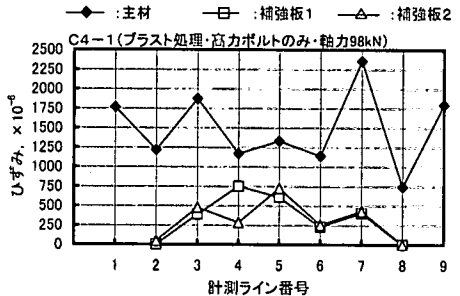
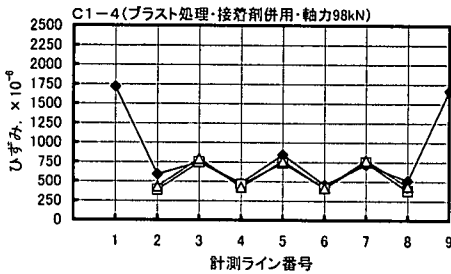
均値を用いている。載荷荷重 200kN 時のひずみ分布に着目すると、接着剤を併用した場合と同一の締付け軸力で高力ボルトのみの場合とでは第一ボルト列位置(計測ラ



(a) 接着接合を併用した場合

(b) 高力ボルト接合のみの場合

図-12 主材および補強板のひずみ分布 (載荷荷重 200kN 時)



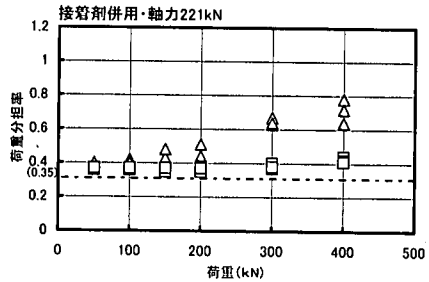
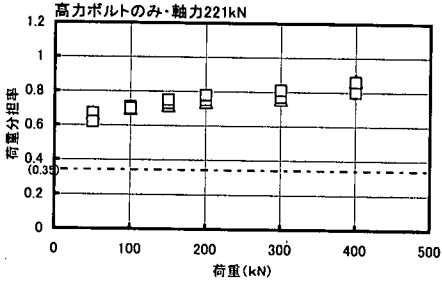
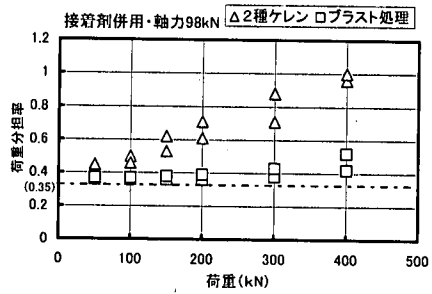
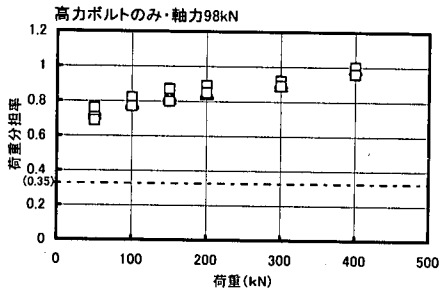
(a) 接着接合を併用した場合

(b) 高力ボルト接合のみの場合

図-13 主材および補強板のひずみ分布 (載荷荷重 400kN 時)

イン2, 8)のひずみ分布性状に大きな差異が生じている。接着剤を併用した場合には主材と補強板とのひずみに大きな差がなく主材と補強板とはずれを生じることなく一体として挙動していることがわかる。一方、高力ボルトのみの場合には、主材と補強板のひずみに大きな差

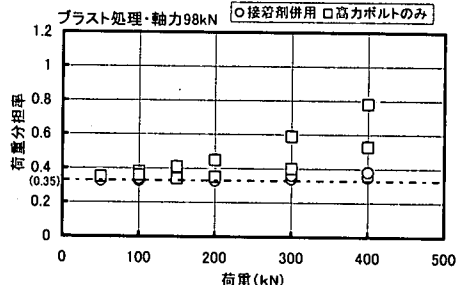
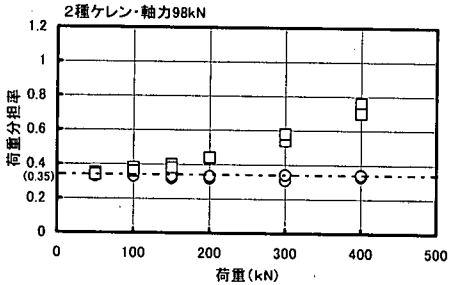
が生じており、この部位においては主材と補強板間において既にずれが生じていることがわかる。また、接着剤を併用した場合について、プラスト処理した場合と2種ケレン処理した場合を比較するとプラスト処理した場合の方が主材と補強板間でのひずみ差が小さいことがわか



(a)高力ボルト接合のみの場合

(b)接着接合を併用した場合

図-14 主材の荷重分担率 (計測ライン2)



(a)2種ケレン処理の場合

(b)プラスト処理の場合

図-15 主材の荷重分担率 (計測ライン4)

る。載荷荷重 400kN 時のひずみ分布においては、接着剤を併用した場合には主材と補強板とのひずみ差は少なく依然として一体とした挙動を呈しているのに対し、高力ボルトのみの場合には、継手のほぼ全域において主材と補強板間にはひずみ差が生じており、十分な荷重伝達となされていないことがわかる。なお、接着剤の塗布の有無に関してのこのような相違については、締付け軸力が 98kN の場合において顕著であり、接着剤を併用した場合については、締付け軸力が 221kN の場合とほぼ同様なひずみ分布を呈しているのに対して高力ボルトのみの場合には、主材と補強板間のひずみ差は、締付け軸力が 221kN の場合よりさらに大きなものとなっている。

図-14 は第一ボルト列 (計測ライン2) における各荷

重段階での主材と補強板との荷重分担について示したものである。図の縦軸は、主材に作用する力が継手の全作用力に占める割合を主材の荷重分担率と定義し示したものである。なお、主材、補強材での各作用力はひずみの計測値から算出した。ここで、主材と補強板とが一体となって挙動し、それぞれに生じるひずみが同一である場合には、各断面積比に応じて荷重分担がなされることとなり、この場合の主材の荷重分担率は 0.35 となる。高力ボルトのみの場合と接着剤を併用した場合について荷重分担率を比較すると、低荷重領域において顕著な差異が生じている。高力ボルトのみの場合には、主材での荷重分担率が大きく補強材への荷重伝達の程度が少ないのに対して、接着剤を併用することにより主材の荷重分担率

は補強材の断面積比にほぼ応じたものとなっており、補強板へのスムーズな荷重伝達が行なわれているといえる。また、高力ボルトのみの場合も接着材を併用した場合も、荷重の増加にともない荷重の伝達性能が低下する傾向にあるが、接合面をブラスト処理して接着剤を併用した場合には比較的に高い荷重領域まで荷重伝達性能が保持されている。締付け軸力の大きさが荷重伝達性能に及ぼす影響については、締付け軸力が大きいほど主材の荷重分担率は小さく、したがって補強板への荷重伝達性能は優位な結果となっている。しかし、その影響の度合いは接着剤併用の有無の場合と比較して小さく、締付け軸力が98kNの場合でも接合面をブラスト処理して接着剤を併用した場合には高い荷重伝達性能を有している。

図-15は第二ボルト列(計測ライン4)における主材の荷重分担率を締付け軸力が98kNの場合について示したものである。第二ボルト列においては、高力ボルトのみの場合でも低荷重領域では十分な荷重伝達性能を有しているが、荷重の増加にともないその性能は低下し400kN時においては第一ボルト列と同程度の荷重分担率となっている。接着剤の併用の効果については、第二ボルト列においても明らかであり、2種ケレン処理して接着剤を塗布した場合でもブラスト処理した場合と同等の荷重伝達性能を有している。

以上のように、接着剤の併用により荷重の伝達性能は向上し、特に、腐食により表面に凹凸が生じているような場合の補強材の接合方法として有用であると考えることができる。また、第一ボルト列における主材の荷重分担を低減させる効果が大きく、このことは道路橋示方書・同解説で規定されている²³⁾引張材の孔引きによる断面控除に対して有効に作用することが考えられる。たとえば、プレートガーダー橋の引張フランジの腐食部分に当板をボルト添接補強しようとした場合、第一ボルト列断面における孔引きを考慮して応力的に問題とならない断面位置まで補強板を延長することとなり、添接領域が必要以上に長くなってしまふことがある。図-16は、主材の第一ボルト列断面における降伏荷重の計算値と実験値との比について孔引きを考慮した場合(純断面積で評価した場合)と考慮しない場合(総断面積で評価した場合)について示したものである。ここで、計算値は、表-2に示す腐食材の降伏点と主材の平均板厚を用いて算出した値であり、断面積の算出に際しては、孔引きを考慮しない場合には、試験体の全幅に平均板厚を乗じて断面積を算出し、孔引きを考慮する場合には、試験体の全幅から孔断面積分(24.5φ×2個)を減じて断面積を算出している。また、実験値は表-8に示す降伏荷重であり、継手端部の第一ボルト列断面において主材が降伏した荷重を示している。なお、試験における破断位置はすべてのケースにおいて第一ボルト孔断面である。高力ボルト

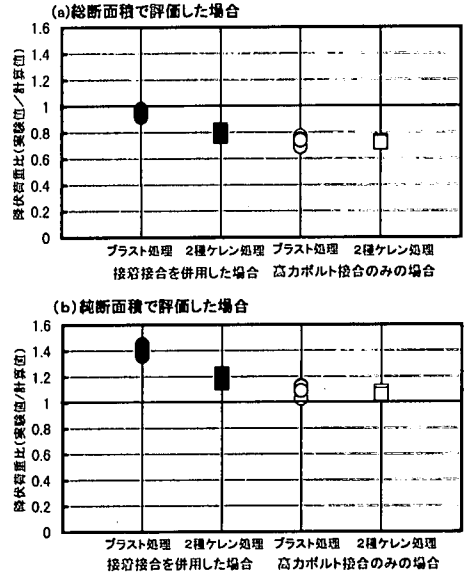


図-16 降伏荷重の実験値と計算値との比較

のみの場合には、孔引きを考慮し純断面積で評価した場合で実験値は計算値の1.1倍程度、孔引きを考慮しない総断面積で評価した場合で0.75倍程度となっており、総断面積での評価は主材の降伏に関して危険側の評価を与え、孔引きによる影響を考慮する必要があることを示している。これに対して、接着剤を併用した場合には、孔引きを考慮した場合で1.2~1.4倍程度、総断面積で評価した場合で0.8~1.0倍程度となっている。特に接合面をブラスト処理して接着剤を塗布した場合には、総断面積で評価した場合の計算値は実験値とほぼ等しく、接着剤の併用継手においては主材の降伏荷重の評価に際して必ずしも孔引きの影響を考慮する必要はなく、道路橋示方書に規定されているような孔引きによる断面控除を緩和できる可能性があることを示しているといえる。

(3) 疲労試験結果

各試験体について主材の応力範囲と破断までの繰り返し数との関係を図-17に示す。応力範囲は孔引きを考慮しない主材の総断面積を用いて算出したものであり、主材の板厚については平均板厚を用いた。また、図中には日本鋼構造協会疲労設計指針・同解説(以下JSSC疲労設計指針と呼ぶ)に示されているB等級からE等級までの疲労設計曲線²⁴⁾を併記した。

腐食材単体(F1)、高力ボルト接合のみで添接補強した場合(F2)および高力ボルトと接着剤を併用して添接補強した場合(F3)の疲労強度については、いずれの場合もJSSC疲労設計指針のC等級を満足する結果となってお

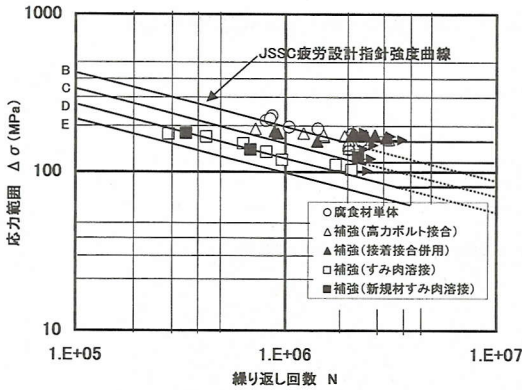


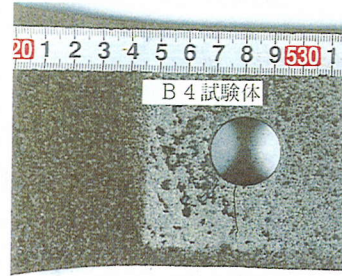
図-17 当板添接補強試験体の疲労試験結果

り、ボルト添接補強にともなう疲労強度の変化は特に認められない。また、接着剤併用の有無による差異も認められない。これに対して補強板をすみ肉溶接した場合（F4, F5）には、D等級を満足しない結果となっており、腐食材単体に比べて疲労強度が低下することがわかる。なお、腐食材にすみ肉溶接した場合も新規材にすみ肉溶接した場合もその強度に大きな違いは認められない。

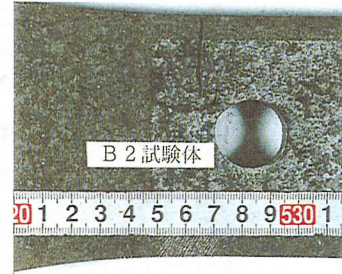
腐食材単体における亀裂の発生点は腐食板表面の凹部である。高力ボルトのみの場合および接着剤を併用した場合には第一ボルト孔縁から発生する場合と、ボルト孔位置から少し離れた主材表面から発生する場合とがあった。後者については、高力ボルトのみの場合の試験体において多く確認された亀裂であるが、図-8に示したように腐食による板表面の凸部と補強板との局所的な接触部位が起点となって、この部位でフレッチングにより亀裂が生じたものと考えられる。写真-2に孔縁部および板表面から発生した亀裂の外観を示す。これらに対して、すみ肉溶接した場合には、前面すみ肉溶接の止端部から亀裂が発生した。この場合の疲労強度は腐食材単体および高力ボルトのみの場合より低く、止端部での局所的な形状に起因する応力集中の影響が孔縁部や腐食凹凸部での応力集中より厳しいといえる。なお、腐食材にすみ肉溶接した場合と新規材にすみ肉溶接した場合とでその強度に大きな違いがなかったことから、今回試験体に用いた程度の凹凸を有する腐食材への溶接に関しては、疲労強度の低下を招くような溶接品質への影響は少ないと考える。

4. 添接補強したI形鋼の曲げ試験

フランジ部に腐食による板厚減少および断面欠損の生じたI形鋼の実部材を用いて曲げ試験を実施し、腐食フ



(a) 孔縁から発生した亀裂



(b) フレッチングにより発生した亀裂

写真-2 主材孔周辺部からの亀裂の発生状況

ランジに当板添接補強した場合の曲げ耐力の向上効果について検討した。

(1) 曲げ試験桁の形状寸法と試験内容

曲げ試験に用いた腐食部材は既設橋梁の縦桁として使用されていたI形鋼である。地覆からRC床版下面を伝わってきた雨水によりフランジ部に腐食が生じた外縦桁部材とほとんど腐食の発生していない内縦桁部材である。写真-3にプラスト処理により表面の付着錆を除去した後のフランジ部の腐食状況を健全部と比較して示す。フランジ上面では腐食により著しい凹凸が発生しており、また、フランジ幅については公称幅130mmから100mm程度に欠損している部分も見られた。

試験桁の形状寸法および荷重方法を図-18に示す。実橋の縦桁部材（部材長3200mm）から全長2600mmの試験桁を切り出した。試験桁の支間は2500mmであり、中央区間800mmを等曲げ区間として荷重梁を介して荷重を2点に荷重した。表-9に試験桁各部についての材料試験結果を示す。材料試験片については腐食による凹凸の影響を除去するために板表面を平滑に仕上げた。上下フランジ部に比較してウェブ部の強度が多少高いI形鋼であり、降伏点が約200MPa、引張強さが約300MPaと現行JIS規格で定められた一般構造用鋼材（SS400材）の規格値²⁵⁾に比較して低い強度を有した材料である。

試験桁の種類と試験内容を表-10に示す。試験桁は3

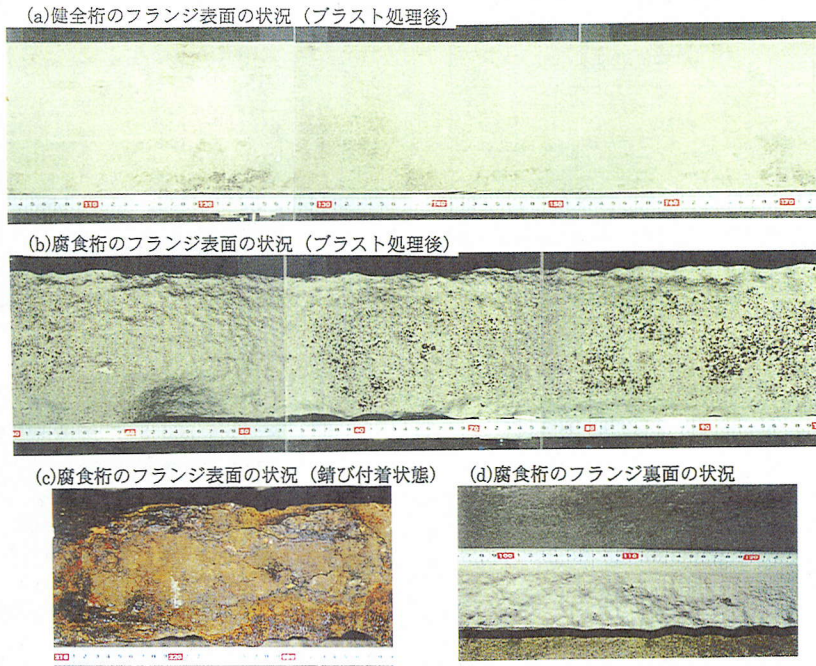


写真-3 I形鋼フランジ部の腐食状況

体製作した。フランジに著しい腐食の生じている試験桁 2 体（腐食桁：A1, A2）と腐食のない健全な状態の試験桁 1 体（健全桁：B1）である。腐食桁 A1, A2 については、引張フランジに腐食の生じた場合の当板添接補強の効果について検討するため、腐食したフランジを下フランジとして使用した。各試験桁における試験内容は表-10 に示すとおりである。腐食桁 A1 については腐食の生じた状態のままで耐力試験を実施し、腐食のない健全桁 B1 との対比から腐食が耐力性能に及ぼす影響について検討した。腐食桁 A2 は当板添接補強の効果について検討するための試験桁であり、下フランジに板厚 12mm の当板補強材をボルト添接した。補強材の長さについては、第一ボルト列の孔引き断面において試験桁の強度が決定されることのないように補強材端部が支点部から 430mm となるような長さとした。なお、ボルトピッチは 120mm であり、等曲げ区間外のせん断力の作用区間において桁の降伏荷重以上の荷重作用に対して十分なせん断力の伝達が可能な本数の M22, F10T 高力ボルトを配置した。試験内容は、補強材の接合方法の違いによる影響を検討するための弾性範囲内試験と接着剤を併用した場合を対象とした繰り返し荷重試験および耐力試験である。弾性範囲内試験については、高力ボルトのみで接合した場合として締付け軸力を M22, F10T 高力ボルトの標準締付け軸力 176kN としたケース（A2-1）と接着剤による高い荷重伝達性能を

期待して締付け軸力を手締め程度の 20kN とし接着剤を併用したケース（A2-2）の 2 ケースについて同一の試験桁を用いて試験を行った。最初に高力ボルトのみで補強板を添接した場合の試験を行い、その後、接着剤を併用した場合について試験した。試験における接合面の処理はブラスト処理である。また、使用した接着剤は前述したとおり試験において使用した接着剤と同じであり、フランジおよび補強材の接合面に接着剤を塗布し高力ボルトで締付けた後、1 週間の養生を行い試験した。これら一連の弾性範囲内の試験を終了した後に接着剤を併用したケースについて荷重の繰り返し作用にともなう補強効果の変化を確認するための繰り返し荷重試験を行い（写真-4 参照）、最後に耐力試験を実施した。

弾性範囲内試験および耐力試験には 200tf 静的荷重試験機を用い、試験桁の横倒れ座屈を防止するために支点位置および荷重点位置において横倒れ防止装置を設置した。繰り返し荷重試験には、500kN サーボ型疲労試験機を用いた。弾性範囲内の試験結果を参考として上限荷重を 200kN、下限荷重を 10kN とした。また、繰り返し速度を 1Hz とし、200 万回まで繰り返し荷重した。

試験における計測内容は試験桁各部におけるひずみ、補強材端部における補強材と下フランジとのずれおよび桁のたわみである。計測位置を図-18 に併記する。

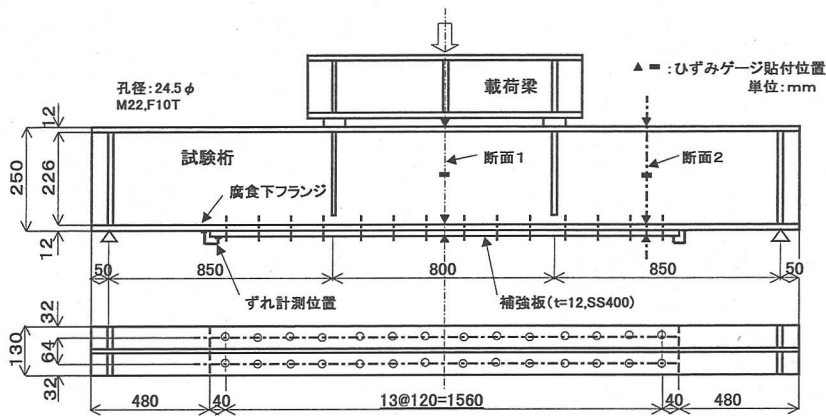


図-18 I形鋼曲げ試験桁の形状寸法および載荷方法

表-10 曲げ試験桁の種類と試験内容

試験ケースNo.	使用桁	補強の有無	補強板の接合方法	試験内容
A1	腐食桁	無し	-	耐力試験
A2	A2-1	腐食桁 当板添接補強	高力ボルト接合（締付け軸力176kN）	弾性範囲内試験
	A2-2		高力ボルト接合（締付け軸力20kN） + 接着剤接合の併用	弾性範囲内試験、繰返し載荷試験、 耐力試験
B1	健全桁	無し	-	耐力試験

表-9 I形鋼各部の引張試験結果

採取位置	試験片 No.	降伏点 σ_y (MPa)	引張強さ σ_u (MPa)
下フランジ	JIS 1A号	198	295
上フランジ	JIS 1A号	198	293
ウェブ	JIS 1A号	221	328

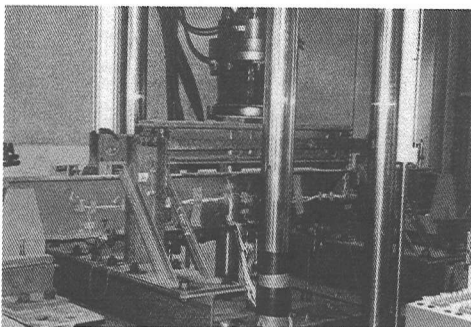


写真-4 補強した腐食桁の繰返し載荷試験状況

(2) 試験桁の断面形状の計測結果

試験桁として用いた I 形鋼が現行 JIS 規格に規定されていない材料であったことから、その断面形状について健全桁を用いて計測した。また、腐食の生じているフランジについて、マイクロメータを用いて 5mm×5mm のメッシュ間隔で板厚計測を実施するとともに試験桁の長さ方向に 5mm 間隔でフランジ幅の計測を実施した。

健全桁の両端部における断面形状の測定結果を図-19 に示す。フランジ板厚にテーパを有する I 形鋼である。JIS 規格外の材料であり断面特性値の算出に際しては図に示すようにフランジ部を断面積が等価な矩形断面にモデル化した。腐食桁については、腐食したフランジ部について、板厚およびフランジ幅の測定結果から試験桁の長さ方向に 5mm 間隔でフランジ断面積を算出して健全桁の場合と同様に断面積が等価な矩形断面に置換した。腐食フランジの断面積測定結果を表-11 にまとめて示す。表中の最小断面積、最大断面積は桁の長さ方向に 5mm 間隔で計測した各断面の断面積における最大、最小を示しており、平均値は測定全断面の平均を示している。また、平均板厚およびフランジ幅は図-19 中に示すように、最小、最大断面積を有する断面での平均板厚およびフランジ幅を示している。腐食桁 A1 と A2 では腐食の程度に大差はなく、腐食フランジの最小、最大断面積および平均断面積ともほぼ同等の値となっている。また、健全桁

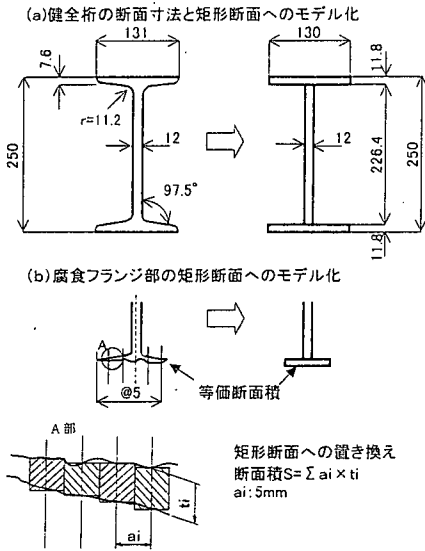


図-19 I形鋼の形状寸法計測結果とそのモデル化

表-11 腐食フランジの断面積計測結果

試験桁の種類	断面積 (cm ²)	平均板厚 (cm)	フランジ幅 (cm)
腐食桁	A1 最小断面	792	7.6
	A1 最大断面	1260	9.7
	A1 平均値	1092	—
	A2 最小断面	814	7.4
	A2 最大断面	1213	9.4
	A2 平均値	1118	—
健全桁	1534	11.8	130

に比較して、フランジ断面積が最大で50%程度に、平均的には30%程度に減少している。

(3) 当板補強材の接合方法と弾性範囲内の挙動

支間中央のたわみの挙動について、当板補強材を高力ボルトのみで接合した場合 (A2-1) と高力ボルトと接着剤を併用した場合 (A2-2) について、無補強 (腐食桁のまま) の場合 (A1) と対比して図-20 に示す。図中の計算値は、表-11 に示した腐食フランジの断面積測定結果における平均断面を用いて算出した梁理論値であり、当板補強した場合の計算値については、腐食フランジと当板補強材とが完全に合成されているものと仮定して算出した。無補強の場合のたわみは、計算値と比較的良好一致しており、平均的な断面を仮定することで腐食桁の剛性評価は可能なものと考えられる。当板補強した場合には無補強の場合と比較して、いずれの接合方法においても剛性が向上しているが、その程度は接合方法によって異なったものとなっている。高力ボルトのみで接合した場合 (A2-1) には荷重が100kN 程度までは線形的な挙動

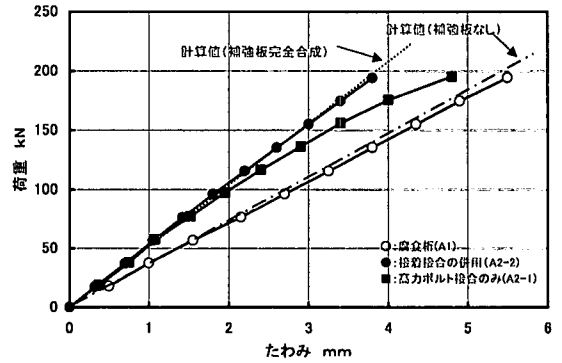


図-20 補強における接合方法と桁のたわみ挙動

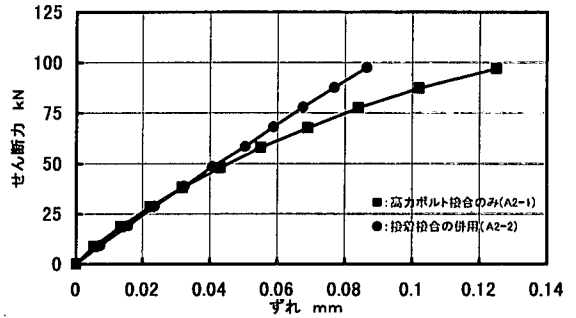


図-21 下フランジと補強材とのずれ挙動

を示しているが、それ以降については非線形的な挙動を呈し、荷重の増加にともない無補強の場合のたわみに近づく傾向にある。それに対して、高力ボルトと接着剤を併用した場合 (A2-2) には、締付け軸力が20kN であっても高力ボルトのみの場合と比較して高い剛性を有しており、また、実験値はフランジと当板補強材とが完全合成されていると仮定した計算値とよく一致し補強材と下フランジとが一体となって挙動しているといえる。

図-21 は当板補強材の端部における補強材とフランジ間とのずれとこの部分に作用するせん断力との関係を示したものである。ずれ挙動はたわみの場合と同様な性状を示しており、高力ボルトのみの場合 (A2-1) には、作用せん断力が50kN 程度から非線形的な挙動を呈しずれ量の増加が顕著なものとなっている。ここで、すべり係数を0.4 と仮定した場合の補強材と下フランジ間でのすべり荷重に相当するせん断力は563kN であり、高力ボルトのみの実験結果はこの計算値に比較して相当に低い荷重段階ですべりの生じていることを示している。

図-22 は、支間中央断面 (断面1) および補強材端近傍断面 (断面2) におけるひずみ分布を示したものである。図中の計算値は図-20 に示した計算値と同様の仮定により算出したものである。荷重100kN 時のひずみ分布については、中央断面位置および端部断面位置ともフランジと補強材とが完全合成していると仮定した場合の計

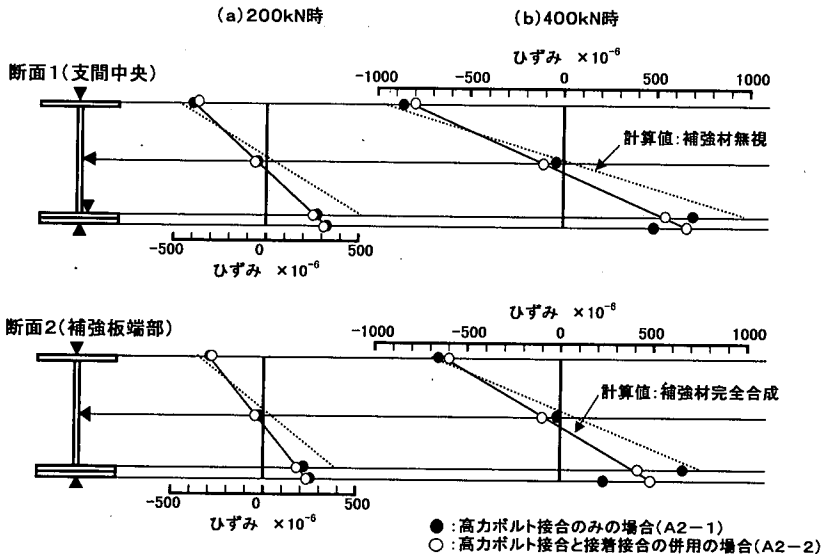


図-22 桁断面におけるひずみ分布

算値によく一致した分布となっており、また、接合方法の違いによる差異はほとんど認められない。これに対して、荷重 200kN 時においては、高力ボルトのみで接合した場合 (A2-1) において補強材と下フランジ間でのひずみの不連続性が確認され、その程度は補強材端部位置において顕著なものとなっている。下フランジと補強板間とのずれの増加により補強材への荷重伝達性能が低下したためと考えられる。接着剤を併用した場合 (A2-2) には、補強板とフランジ間でのひずみに連続性が確認され補強板において十分な荷重分担がなされており、接着剤が有効に作用しているものと考えられる。

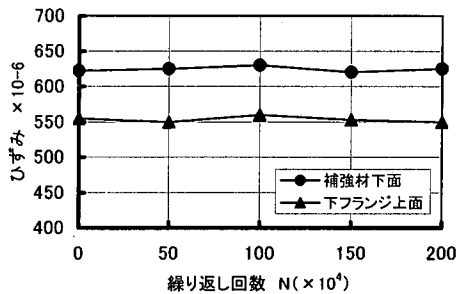


図-23 繰り返し荷重に伴うひずみ変化

(4) 繰り返し荷重試験結果

接着剤を併用し補強材を添接したケース (A2-2) について、荷重振幅 190kN (補強板の最大応力振幅 124MPa) の条件で 200 万回の繰り返し荷重試験を行った。また、繰り返し数 50 万回毎に静的荷重試験を実施して桁各部のひずみの変化について計測した。図-23 に支間中央の下フランジおよび補強板のひずみと荷重回数との関係を示す。荷重回数が増加してもひずみはほぼ一定の値を示しており、今回の繰り返し回数の範囲では、高力ボルト接合と接着接合とを併用した場合の効果に変化がないことが確認できた。

(5) 耐力試験結果

健全桁 (B1)、腐食桁 (A1) および補強桁 (A2) の耐力試験における支間中央のたわみと荷重の関係を図-24 に示す。図中には、それぞれの桁に関してフランジ部でのひ

ずみ計測結果から求めた降伏荷重とその計算値を併記した。降伏荷重の計算においては、表-9 に示すフランジ材についての降伏点を用いるとともに、腐食フランジの断面積には、表-11 に示した平均値を使用した。また、補強桁の計算値は補強材と下フランジが完全合成されているものとし、孔引きを考慮しない縦断面について算出したものである。

いずれの試験体ともフランジ部が降伏に達した後に横方向固定点間において横倒れ座屈が発生し、その進行とともにたわみが増加する崩壊性状を示した。試験では、載荷装置の能力からたわみが約 40mm に達するまで荷重を継続したが、その時点で明確な荷重の低下は認められず試験を終了した。腐食桁については、フランジ部の断面欠損により桁の剛性が低下し、降伏荷重は健全桁の場合の 80% 程度となっている。また、腐食フランジ部の平均断面積を用いて算出した降伏荷重は実験値と比較的良く一

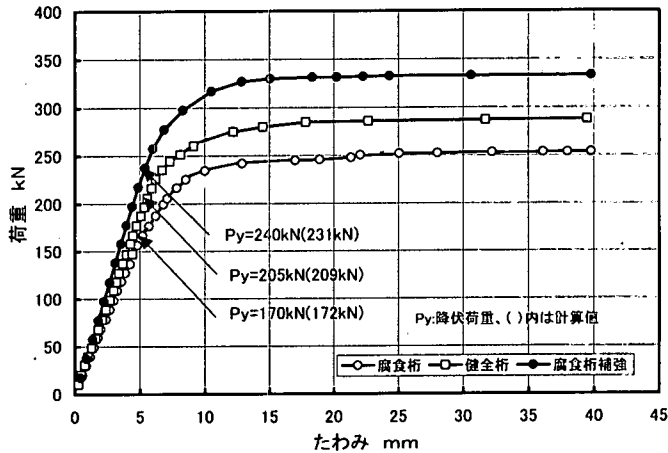


図-24 耐荷力試験における荷重-たわみ線図

致しており、腐食桁の耐力に関しては平均断面を用いての評価が可能であるものと考えられる。補強桁に関しては、桁の剛性が明らかに増加しており、当板添接補強の効果が認められる。また、降伏荷重は補強材とフランジが完全合成していると仮定し、孔引きを考慮しない総断面積が有効として算出した計算値にほぼ等しい荷重となっており、高力ボルトの締付け軸力が20kNと手締め程度であっても接着接合を併用することで十分な曲げ耐力を確保することが可能であるといえる。

5. まとめ

腐食部材の補強方法として当板添接補強を取り上げ、実際に腐食減厚した部材の材片およびI形鋼を用いて、腐食材に当板を高力ボルト接合のみで添接した場合と高力ボルト接合と接着接合を併用した場合について実験を行い、それぞれの補強効果について検討した。結果を要約すると以下のようなものである。

(1) 最大深さ2.6mm程度、平均深さ0.7mm程度の凹凸を有する腐食材に添接板をボルト接合した場合のすべり特性について検討した結果、凹凸を有する腐食面を接合面として使用した場合、すべり係数は0.25~0.4程度となり、十分なすべり耐力を確保することが困難な場合があることを確認できた。

(2) 腐食材と添接板との接合面に接着剤を塗布し高力ボルトで締付けることにより、継手のすべり特性は改善され、道路橋示方書で規定されているすべり係数0.4を十分に満足するすべり耐力の得られることが確認できた。なお、接合面の表面処理法についてブラスト処理の場合と2種ケレン処理の場合とを比較した結果、ブラスト処

理の方がより接着接合の併用効果が高いことが確認できた。

(3) 高力ボルト接合と接着接合との併用接合により腐食材に添接板を接合した場合のボルト軸力の変化について計測した結果、軸力の低減量は5%程度であり、接着剤を塗布したことによるボルト軸力のリラクゼーションへの影響は認められなかった。

(4) 腐食材に補強板をボルト接合し引張試験を行った結果、高力ボルト接合と接着接合とを併用することにより腐食材と補強材との完全合成化が期待でき補強材への荷重の伝達性能が向上することが確認できた。なお、腐食材接合面の表面処理をブラスト処理した場合ほど、あるいは締付け軸力を大きくした場合ほど荷重伝達性能の向上効果は大きい。

(5) 高力ボルト接合と接着接合との併用は第一ボルト列位置における腐食材への荷重分担を低減させる効果が大きく、高力ボルト接合のみの場合と比較して第一ボルト列断面における降伏強度を向上させることが可能である。使用する接着剤の接合強度や接合面の表面処理方法、締付け軸力の大きさによっては、総断面積で評価した場合の降伏強度にほぼ等しい強度の得られることが確認できた。

(6) 腐食材に補強材を接合した場合の疲労強度について検討した結果、腐食材単体、高力ボルト接合のみの場合、高力ボルト接合と接着接合とを併用した場合ともその疲労強度に大きな違いは認められず、JSSC疲労設計指針におけるC等級強度を満足する結果であった。また、腐食材に補強材をすみ肉溶接した場合の疲労強度はD等級強度を満足しない結果であり、高力ボルト接合あるいは高力ボルト接合と接着接合との併用は疲労強度の面で優位であることが確認できた。

(7) フランジ部に腐食による板厚減少および断面欠損が生じた I 形鋼の縦桁部材(最大フランジ断面減少量 50%程度, 平均フランジ断面減少量 30%程度)を用いて桁の曲げ試験を実施し, 腐食フランジに当板添接補強した場合の曲げ耐力の向上効果について検討した。補強当板の接合方法として高力ボルト接合と接着接合とを併用した場合には, 高力ボルトの締付け軸力が 20kN と手締め程度であっても高力ボルト接合のみの場合と比較して桁の剛性向上効果が大きく, 降伏荷重に近い荷重段階まで補強材がフランジ材と完全合成されていることが確認できた。また, 補強桁の降伏耐力は, 部材の総断面積が有効と仮定した場合の降伏耐力にほぼ等しいことが確認できた。

(8) I 形鋼の曲げ試験桁を用いて, 繰り返し載荷試験により併用接合した場合の合成挙動の変化について検討した結果, フランジ応力が 120MPa 程度の条件で 200 万回の繰り返し載荷後も合成効果の変化は認められず, 荷重の繰り返し作用に対して耐久性を有していることが確認できた。

謝辞: 本研究を進めるにあたって, 貴重な助言と資料の提供および多大な協力を頂いた(社)日本橋梁建設協会・維持管理委員会(委員長:野田清人)の各委員の方々により感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西川和廣, 村越潤, 上仙嶺, 中島浩之: 橋梁の架替に関する調査結果(Ⅲ), 土木研究所資料第 3512 号, 1997. 10.
- 2) 名取暢, 村越潤: 鋼橋の腐食とその原因, 橋梁と基礎, Vol. 27, No. 6, pp. 39-44, 1993. 6.
- 3) 古閑俊之, 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.
- 4) 松本勝, 白石成人, 三宅広昭: 鋼橋の腐食劣化の評価に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 1097-1102, 1992. 3.
- 5) 村中昭典, 皆田理, 藤井聖: 腐食鋼飯の表面性状と残存耐荷力, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 1063-1071, 1998. 3.
- 6) 村上茂之, 西村宣男, 亀井義典: 腐食被害を受けた周辺支持板および自由突出板の圧縮強度特性, 土木学会第 47 回年次学術講演会概要集第 1 部, pp. 232-233, 1992. 9.
- 7) 西川和廣, 村越潤, 松本孝之, 名取暢: 腐食部材の板厚計測法と静的強度の評価に関する検討, 土木学会第 49 回年次学術講演会概要集第 1 部, pp. 522-523, 1994. 9.
- 8) 松本勝, 白井義朗, 中村幾雄, 白石成人: 腐食鋼飯の有効板厚評価法の一提案, 橋梁と基礎, Vol. 23, No. 12, pp. 19-25, 1989.
- 9) 鉄道総合技術研究所: 鋼構造物補修・補強・改造の手引, 1992. 7.
- 10) 菱田健一郎, 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. 7.
- 11) 堀川浩甫, 池田圭一, 鈴木博之, 中野正義: 荷重作用下にあるプレートガーダーの改造に関する実験, 橋梁と基礎, Vol. 20, No. 4, pp. 7-12, 1986. 4.
- 12) 梅津省吾, 宮沢智明, 長堀正幸: 腐食の進んだトラス橋床組の補修, 宮地技報, No. 6, pp. 62-66, 1990.
- 13) 日本港構造協会: 鋼構造物への接着接合の適用—接着接合研究小委員会報告一, JSSC テクニカルレポート, No. 26, 1993. 5.
- 14) 一宮充, 岩崎雅紀, 村中昭典, 皆田理: 接着剤と高力ボルトを併用した疲労損傷部の添接補強実験, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 1139-1146, 2000. 3.
- 15) 山下清, 杉崎守, 喜多淳: ボルト・接着剤併用せん断継手の研究, 橋梁と基礎, Vol. 133, No. 6, pp. 29-32, 1999. 6.
- 16) 茂手木茂, 島辺政秀, 北野勇一: 鋼橋腐食部の断面補修工法, 川田技報, Vol. 16, pp. 105-107, 1997. 1.
- 17) 結城正洋, 新田興吉, 松本好生, 名取暢: 鋼版デッキプレートの腐食減厚に対する補修方法の検討, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 971-980, 1993. 3.
- 18) 皆田理, 村中昭典, 勝野壽男, 山口錦訓, 梶本勝也: 高力ボルトと接着剤の併用継手に関する実験的研究, 三菱重工工事技報, Vol. 4, pp. 47-53, 2000.
- 19) 村中昭典, 皆田理: 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 回年次学術講演会概要集第 1 部, pp. 594-595, 1991. 9.
- 20) 名取暢, 寺尾圭史: 接着剤を併用した腐食材の当て板補強について, 土木学会第 46 回年次学術講演会概要集第 1 部, pp. 848-849, 1991. 9.
- 21) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 丸善, pp. 423-427, 1996. 12.
- 22) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 丸善, pp. 133-136, 1996. 12.
- 23) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 丸善, pp. 196-197, 1996. 12.
- 24) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, pp. 51-57, 1993. 4.
- 25) 日本規格協会: JIS G 3192 熱間圧延形鋼の形状, 寸法, 質量およびその許容差, 1994.

(2000. 8. 25 受付)

STUDY ON RESTRENGTHENING OF CORRODED STEEL BRIDGE MEMBERS

Toru NATORI, Kazuhiro NISHIKAWA, Jyun MURAKOSHI and Takashi OHNO

Corrosion is major cause of deterioration of steel bridges, and corrosion damages seriously affect on the durability of steel bridges. So, corrosion damage must be carefully evaluated and the damaged part of members must be repaired or restrengthened. In many restrengthening ways, reinforcement by cover plates is often selected because of its simplicity and effectiveness. But, in case of application to corroded members, there are some indefinite points. This report describes an investigation of reinforcement by cover plates that are connected with high-strength bolts and both use of high-strength bolts and adhesives.