

戦-23 鋼橋桁端部の腐食に対する補強法に関する研究

研究予算：運営交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 18～平 20

担当チーム：橋梁チーム

研究担当者：村越 潤，田中 良樹

【要旨】

本研究では、著しく腐食した鋼部材の当て板補強方法及び鋼橋桁端部に腐食が見られた際の補修・補強方法の判定方法について検討を行う。平成 19 年度は、腐食が著しい鋼部材への当て板補強を想定して、高力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場合の、樹脂のクリープ特性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。その結果、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ことを確認し、その算定法を提示した。また、桁端部に模擬腐食を有する鋼桁供試体を用いて静的載荷試験及び疲労試験を実施するとともに、桁端部腐食の原因除去のための簡易排水装置の試作と実橋への試験設置を行った。

キーワード：補強，高力ボルト継手，エポキシ樹脂，接着剤，クリープ，(桁端部の)疲労

1. はじめに

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

腐食した鋼部材の補強方法の 1 つとして、高力ボルトによる当て板補強が挙げられる。この場合、腐食による凹凸を伴う接合面でのすべり耐力の確保や防食のため、パテ状のエポキシ樹脂を充填する事例が見られる。しかし、断面欠損が著しい部材にボルト孔を削孔した場合、その周囲で局部的に樹脂が厚くなることが想定され(図-2)、樹脂のクリープ変形とそれに起因したボルト軸力の低下やすべり耐力の低下が懸念される。このような樹脂厚の影響については、既往の研究²⁾⁵⁾における試験のデータ数が少なく、かつ断面欠損深さ(樹脂厚)が限定的であるため必ずしも明確ではない。平成 18 年度は、一般的な高力ボルト継手小型供試体の接合面(腐食が生じていない平滑面)に樹脂厚が 1～

5mm となるようにエポキシ樹脂を塗布して、その樹脂厚の違いがボルト軸力やすべり耐力に及ぼす影響について実験的検討を行った。その結果、樹脂厚が大きくなるほどボルト軸力が著しく低下するが、接合面のずれに対する剛性が向上することにより、いずれの樹脂厚の場合も樹脂無しの高力ボルト摩擦接合継手に比べて高いすべり耐力が得られることを確認した。



図-1 鋼橋桁端部の腐食例

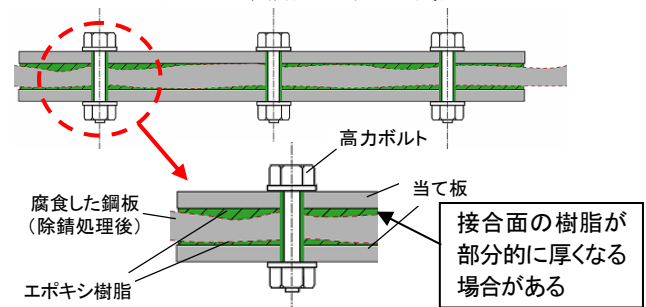


図-2 腐食鋼板の当て板補強 (模式図)

平成19年度は、同試験に関連した追加試験を実施して、エポキシ樹脂のクリープがボルト軸力の低下に及ぼす影響を検討するとともに、模擬腐食がボルト軸力に及ぼす影響について検討を行った。また、桁端部の腐食による断面欠損が鋼桁の使用性に及ぼす影響を把握するため、支点付近に模擬腐食を有する鋼桁供試体を用いて、桁端部周辺の静的挙動と疲労に及ぼす影響について検討を行った。さらに、桁端部の腐食原因の除去を目的とした、簡易排水装置を考案して、実橋において試験的な適用を行った。

2. 接合面にエポキシ樹脂を塗布した高力ボルト継手のボルト軸力測定及び静的引張試験⁶⁾⁷⁾

2.1 試験方法

図-3に、試験のフローを示す。

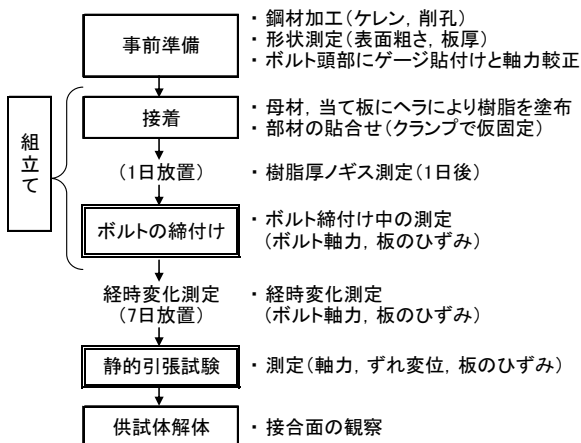


図-3 高力ボルト継手の試験フロー

(1) 供試体

図4に供試体の形状寸法とひずみゲージ等の測定位置を示す。母材と当て板は、いずれも腐食していない平滑材とした。表-1にエポキシ樹脂の仕様を示す。樹脂は、いずれも市販のもので、主剤と硬化剤の2液混合型エポキシ樹脂のパテ及びペースト状接着剤(以下、ペースト)を用いた。

接合面の樹脂の厚さ(目標値)は0mm(樹脂無し), 0.1(ペースト), 1, 2, 3, 5mmとした。ボルトの目標導入軸力は、使用した高力ボルト(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)及び0kN(ボルトなし)を目標値とした。

図-5に示すように、母材の片面に模擬腐食としてボルト孔の両側に窪み(φ25mm, 深さ1.2mm)を設けた供試体2体を用意して、樹脂厚1mm, 目標導入軸力

225kNとして、上記の供試体と同様の試験を実施した。

供試体の組立てでは、樹脂を母材と当て板の両接合面に塗布した後、貼り合わせた。1日(室温5~25°C)養生後、アルミ板を取り外して設定した締め付け順(図-4中のボルト記号BL2→3→1→4)に2度締め(1回目:目標値の60%, 2回目:目標値)によりボルト軸力を導入した。

ボルト締め付け前後に、図-4に記した●の位置において接合面1面当たりの樹脂厚をノギスにより測定した。実測樹脂厚は、測定した母材と当て板を含む接合部の厚さから母材厚, 当て板厚を差し引いたものとした。

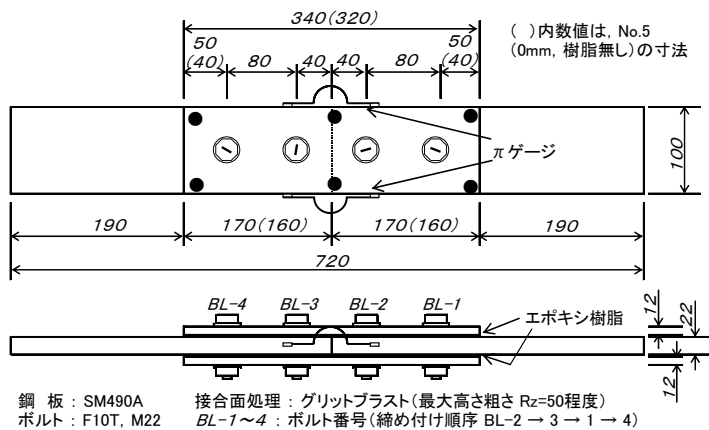


図-4 供試体の形状寸法

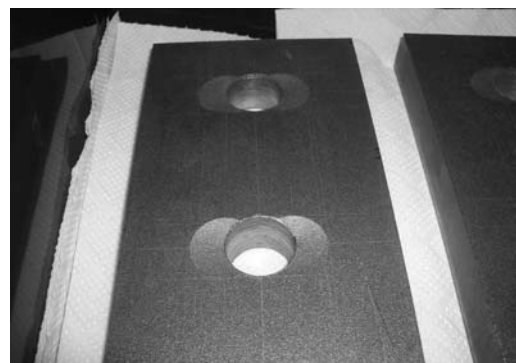


図-5 模擬腐食の状況(円孔削孔後, ばり取り前)

表-1 エポキシ樹脂の仕様

性状	パテ	ペースト
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 (質量比=樹脂:添加材)	繊維, 骨材 (1:2)	繊維, 骨材 (1:1)
可使用時間	90分/10°C	60分/20°C
硬化時間	24時間/5°C	24時間/20°C
引張せん断強度(MPa)	14.3/12.7	18.2/14.5
圧縮降伏強さ(MPa)	79.5/36.8	70.3/27.9
圧縮弾性係数(GPa)	56.9/8.6	/
線収縮率(%)	0.06	0.04
熱膨張係数(1/°C)	3.22 × 10 ⁻⁵ (20°C~50°C)	6.80 × 10 ⁻⁵ (0°C~30°C)

注1) 数値は、メーカーのカタログ値及び技術資料による
注2) 強度性能(7日/1日)の測定時温度は、パテが10°C, ペーストが20°Cであった。

(2) ボルト軸力の管理と経時変化測定

目標導入軸力の管理及び軸力の経時変化測定は、ボルト軸力との比例関係にあるボルト頭部のひずみ(ひずみゲージ長 5mm)により行った⁸⁾。以下、本文で示すボルト軸力は、個々のボルトの較正值(回帰から得られた傾き)を用いて実測ひずみから換算した値である。ボルト軸力の経時変化測定は、全ボルトについて、7日間実施した。初期導入軸力(4本面締め付け時の4本の平均)は、先行して締めたボルトの軸力低下のため、目標樹脂厚 1~3 mm で目標導入軸力の約 5%，同 5 mm で約 8%の低下が見られた。

(3) 静的引張試験

7日間のボルト軸力の経時変化測定後、静的引張試験を実施した。載荷は、継手のすべり挙動を確認するまでの単調載荷とした。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。

2.2 ボルト軸力の経時変化

図-6に、ボルト軸力の経時変化について、目標導入軸力 225 kN の供試体において最後に締付けたボルト(BL-4)の結果を例に示す。残存軸力は、締付け完了時の軸力を 100%として示す。ボルト締付けから7日後のボルト軸力は、樹脂無しの供試体 No.1 では、目標導入軸力 225kN に比べて2%程度低下していた。目標導入軸力が50%以下の場合、樹脂無しの供試体のボルト軸力低下はほとんど見られなかった。

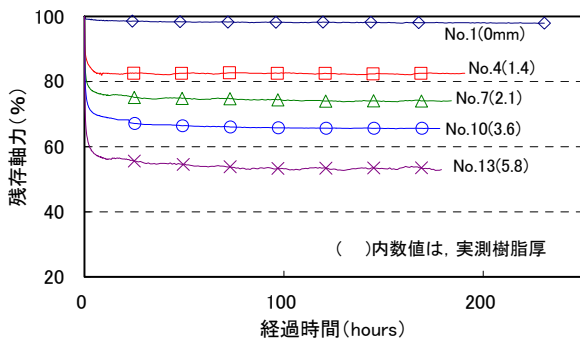


図-6 ボルト軸力の経時変化 (目標樹脂厚 1~5 mm, 目標導入軸力 225kN)

2.3 静的引張試験結果

接着継手⁹⁾や接合面に樹脂を塗布した高力ボルト継手¹⁰⁾(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(1)に示すせん断強度 v_s で表されることがある。図-7に、式(1)で計算した各供試体のせん断強度 v_s と、式(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。

$$v_s = (P / 2) / A_c \quad (1)$$

$$\sigma_o = (m \times N_r) / A_c \quad (2)$$

ここに、 $P / 2$: 接合面 1 面当たりのすべり荷重, N_r : 試験前ボルト軸力(上側, 下側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。図-7に、模擬腐食を有する供試体の結果も示した。模擬腐食による窪みがあってもすべり耐力に及ぼす影響は比較的軽微であった。

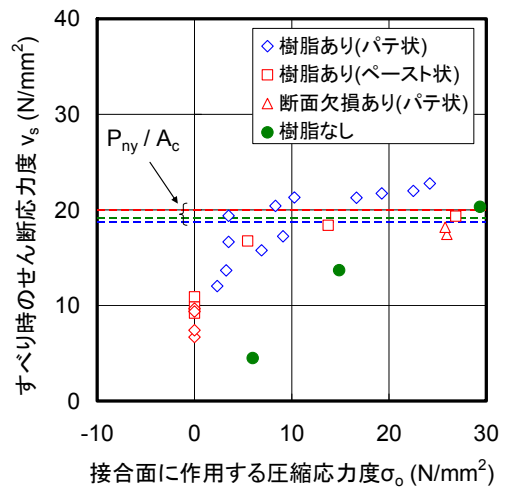


図-7 継手のせん断強度 v_s とボルトの締付けによる支圧応力度 σ_o の関係

2.4 ボルト軸力に及ぼす樹脂のクリープの影響

図-6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。次に示す式(3)、式(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(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。

$$\epsilon_{bolt} = \epsilon_{resin} \times t_{resin} \times n / L_{bolt} \quad (3)$$

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(4)は、実測したボルト軸力の経時変化から、上記の影響因子を考慮して、樹脂のクリープによるボルト軸ひずみ減少量 ϵ_{cr} を算出するものである。

$$\epsilon_{cr}(t) = \epsilon_o - \epsilon(t) - \epsilon_{relax}(t) - \epsilon_{sh}(t) - \epsilon_T(t) \quad (4)$$

ここに、 $\epsilon_{cr}(t)$: 樹脂のクリープに伴うボルトの軸ひずみ、 t : ボルト締付け後から経過時間(時間)、 ϵ_0 : 初期導入軸力によるボルトの軸ひずみ、 $\epsilon(t)$: 締付け後 t 時間におけるボルトの軸ひずみ、 $\epsilon_{relax}(t)$: 樹脂無し
の供試体における締付け後 t 時間におけるボルトの軸ひずみ、 $\epsilon_{sh}(t)$: 樹脂硬化時の収縮によるボルトの軸ひずみ、 $\epsilon_T(t)$: 樹脂の温度変化に伴うボルトの軸ひずみ

図-8 に、樹脂のクリープ量に関する測定結果(式(4))により算定した樹脂のクリープによるボルト軸ひずみ減少量 $\epsilon_{cr}(t)$ の例を示す。クリープの検討に用いた軸力の経時変化のデータは、各供試体とも最後に締付けた 1 本のボルト(BL-4)の結果を用いた。比較のため、同図には、各影響を分離する前の軸ひずみ減少量($\epsilon_0 - \epsilon(t)$)を合わせて示した。本試験の範囲では、硬化時の収縮及び温度変化の影響、ボルトのリラクセーションの影響は、いずれもクリープの影響に比べると軽微であった。供試体 No.7 の例では、全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。 $\epsilon_{cr}(t)$ は、時間とともに一定値に収束する傾向がより明確に現れた。各供試体の測定結果によれば、樹脂のクリープによるボルト軸力の低下は締付け後 1 ~ 2 日程度で収束していた。

式(4)のうち $t=24 \sim 168$ 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-9 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、 $\epsilon_{cr}(t)$ をクリープのモデルの一つである式(7)¹¹⁾ に当てはめ、パラメータ τ を算定する。

$$\epsilon_{cr}(t) = \epsilon_{cr}^* (1 - e^{-t/\tau}) \quad (5)$$

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 ($t=24 \sim 168$ 時間のデータ $\epsilon_{cr}(t)$ の平均値)

ただし、本試験の結果では、 τ は一定値とならないことから、次に示す式(6)または単純化した式(7)のとおり表わすこととした。

$$\tau = a \cdot t^b \quad (6)$$

$$\tau = a' \cdot t^{0.5} \quad (7)$$

ここに、 a, b, a' : 定数

図-8 にあてはめ結果の一例を示す。あてはめ結果は式(4)とよく一致することが確認できる。これらのあてはめ結果から、樹脂厚が厚い供試体 12 体(目標樹脂厚 1 ~ 5mm, 模擬腐食なし)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(6), (7)ともに 0.90 以上)。式(5)と単純化した式(7), 及び a' の平均値から次式(8)が得られる。

$$\epsilon_{cr}(t) = \epsilon_{cr}^* (1 - \exp(-t^{0.5}/0.75)) \quad (8)$$

図-8 に、式(8)による計算結果を示す。式(8)は、 $\epsilon_{cr}(t)$ 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。

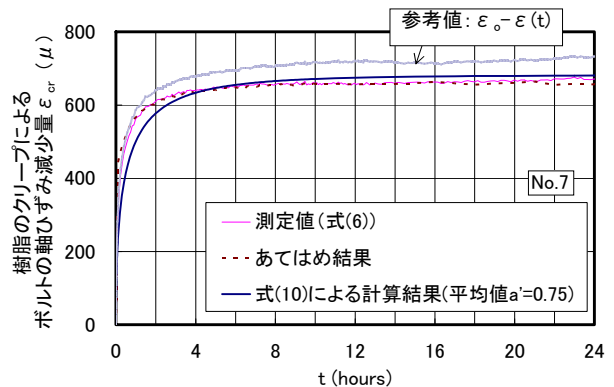


図-8 樹脂のクリープによるボルト軸ひずみの計算例 (供試体No.7)

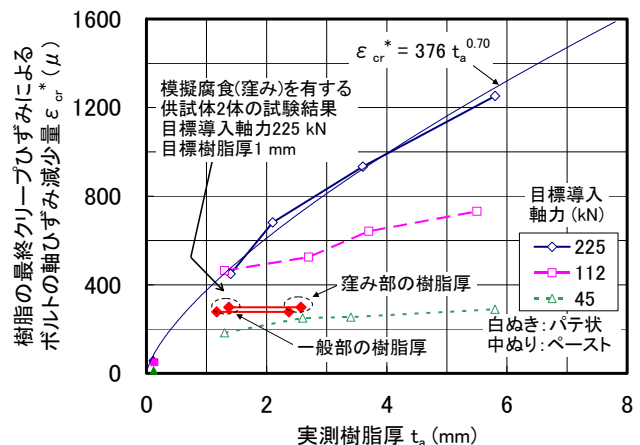


図-9 ϵ_{cr}^* と実測樹脂厚の関係

2.5 模擬腐食がボルト軸力に及ぼす影響

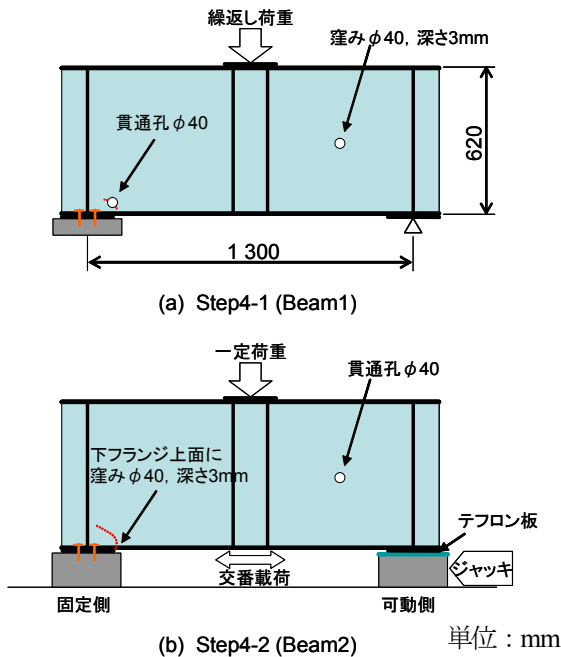
図-9 に、模擬腐食(図-5 に示した、ボルト孔周囲における深さ 1.2mm の窪み)を有する供試体 2 体の ϵ_{cr}^* を、模擬腐食のない供試体の結果とともに示す。模擬腐食供試体の樹脂厚は、窪みのない一般部の値と、窪み部の値(一般部の樹脂厚に 1.2mm を加えた値)の範囲で示した。模擬腐食供試体の ϵ_{cr}^* は一般部の樹脂厚でプロットした方が、模擬腐食なしの結果(相関式: $\epsilon_{cr}^* = 376 t_a^{0.70}$)に近い結果であった。このことから、模擬腐食がボルト軸力に及ぼす影響はほとんど見られなかったことがわかる。

3. 模擬腐食を有する鋼桁の荷重試験

桁端部における腐食による断面欠損が耐荷力・疲労耐久性に及ぼす影響の評価方法を検討するため、模擬腐食(φ40mmの円孔またはφ40×深さ3mmの窪み)を有する鋼桁2体を用いて静的荷重試験を行い、各部のひずみ分布を測定するとともに、局部ひずみが疲労耐久性に及ぼす影響について検討を行った。図-10に、鋼桁供試体と荷重方法の概略図を示す。また、図-11に、鋼桁の荷重試験方法の概要を示す。図-12に、静的荷重試験の結果の一例として、供試体 Beam1 で模擬腐食導入後における主応力図と模擬腐食(円孔)周囲のひずみ分布を示す。Beam2のようにウェブの中央付近の円孔ではせん断応力が支配的な応力集中(斜め45°の軸に対称となるひずみ分布)¹²⁾が生じていたが、図-3(b)では、支点部の鉛直方向の応力も作用するため、45度の線に対して非対称の分布となっていた。

疲労試験時は、この円孔縁のひずみ範囲の最大値は引張側で約1000μ、圧縮側で約1700μであったが、約220万回までは円孔まわりに疲労亀裂が見られなかった。一方、Beam1の窪みの底の部分では、概ね板厚減少量に応じてひずみが増加している程度で、疲労に問題となるようなひずみは発生していなかった。

Beam2は、水平荷重によってソールプレートと下フランジの溶接部に降伏ひずみを超える局部ひずみを生じさせた(次年度、この局部的な降伏がソールプレート溶接部の疲労耐久性に及ぼす影響について検討する)。



断面:2-F1 300×10, 1-web 600×10, 材質:SS400

図-10 鋼桁供試体と荷重方法

(亀裂は計画であり、現時点では未発生)

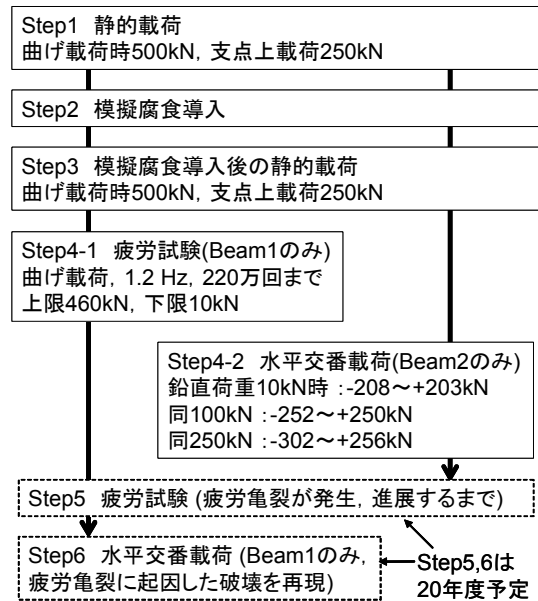


図-11 鋼桁の荷重試験方法の概要

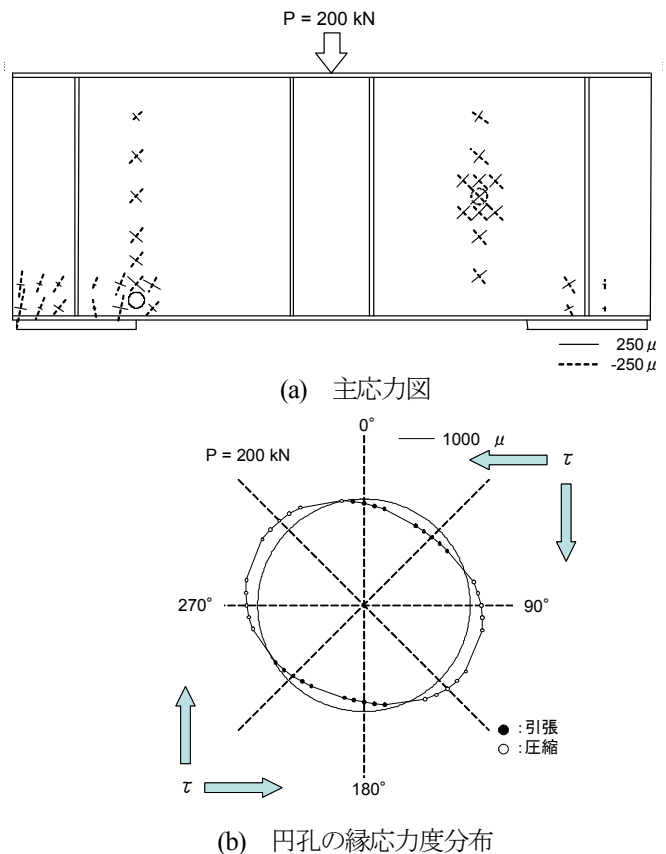


図-12 Beam1, Step4-1の荷重試験結果の一例

4. 簡易排水装置を用いた桁端部の腐食環境改善¹³⁾

膨大な数の既設道路橋を対象とした桁端部の腐食環境改善の一つとして、伸縮装置取替えまでの、簡易排水装置を用いた暫定的な対策を考案し、実橋に試験的に設置してその適用性の検討を行った。

本調査を実施した橋は、昭和30年代の一般的な単純

合成プレートガーダー橋である。現行の伸縮装置は鋼製櫛型であるが、桁端部に土砂が多量に堆積するとともに、鋼桁の一部の腐食も見られたことから、図-13(上図)に示すとおり、桁下からウレタンを当てて簡易な非排水化を行っている。本調査では、図-13(下図)のとおり、端部のみ、ウレタンを除去して簡易排水装置を設置した。図-14に簡易排水装置の設置状況を示す。簡易排水装置はポリエチレン製のものを製作し、橋台パラペットにボルトで固定した。

橋面下面から設置できる簡易排水装置を実橋において試行的に適用した結果、現時点では凍結による割れなどなく、良好に機能していた。19年度から橋脚上についても試験的に設置しており、経過観察中である。

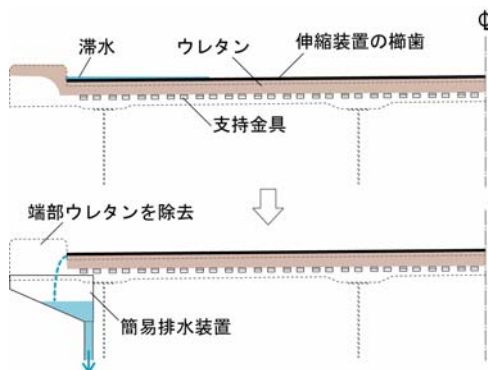


図-13 対象橋の非排水化と簡易排水装置の設置方法



図-14 簡易排水装置の設置状況

5. まとめ

平成18年度に引き続き、接合面にエポキシ樹脂を塗布した高力ボルト継手の試験とその検討を実施して、新たに以下の1)~3)の結果が得られた。

- 1) 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ゼ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。
- 2) 樹脂のクリープに伴うボルト軸ひずみの経時変

化を表す $(1 - \exp(-t^{0.5}/0.75))$ は、本試験における樹脂厚、目標導入締付け軸力に関係なく、測定結果とよく一致していた。また、樹脂の最終クリープひずみによるボルト軸ひずみの減少量 ϵ_{σ}^* は、導入軸力が225kNの場合に、樹脂厚の増加とともに大きくなる傾向が明確に見られた。しかし、導入軸力が45kN及び112kNの場合は、樹脂厚が ϵ_{σ}^* に及ぼす影響は小さかった。

- 3) 接合面にエポキシ樹脂を塗布した模擬腐食(深さ1.2mm)を有するボルト継手の試験から、この程度の断面欠損が、ボルト軸力、すべり耐力に及ぼす影響は断面欠損がない場合に比べて軽微であった。その他、模擬腐食を有する鋼桁の載荷試験や、桁端部の塩分環境調査方法の検討について平成19年度の概要をまとめた。

謝辞：本調査にご協力いただいた関係事務所、出張所の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 西川和廣, 村越潤, 上仙靖, 福地友博, 中島浩之: 橋梁の架替に関する調査結果(III), 土木研究所資料第3512号, 1997.10.
- 2) 村中昭典, 皆田理, 重吉勝: 腐食部材を用いた樹脂併用高力ボルト接合の静的強度, 土木学会第46回年次学術講演会, pp.594-595, 1991.9.
- 3) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 腐食部材の添接板補強に関する研究, 土木学会論文集No.682/I-56, pp.207-224, 2001.7.
- 4) 茂手木博, 島辺政秀, 北野勇一: 鋼橋腐食部の断面補修工法, 川田工業技報No.16, pp.105-107, 1997.1.
- 5) 大野崇, 名取暢, 稲田育朗: 腐食部材の健全度評価に関する研究, 横河ブリッジ技報No.27, pp.82-94, 1998.1.
- 6) 船木孝仁, 村越潤, 田中良樹: 接合面に塗布したエポキシ樹脂が高力ボルト継手のすべり耐力に及ぼす影響, 土木学会第62回年次学術講演会, 2007.
- 7) 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, 土木学会, 構造工学論文集, No.54A, 2008.3.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Albrecht, P. and Sahli, A.H.: Static Strength of Bolted and Adhesively Bonded Joints for Steel Structures, Adhesively Bonded Joints -Testing, Analysis and Design-, ASTM STP981, pp.229-251, 1988.
- 11) 複合材料ハンドブック, 日本複合材料学会, 1989.11.
- 12) 西田正孝: 応力集中, 森北出版, 1967.9.
- 13) 田中良樹, 村越潤: 簡易排水装置を用いた桁端部の腐食環境改善, 第27回日本道路会議, 2007.11.

RESEARCH ON RETROFITTING FOR CORRODED STEEL GIRDERS AROUND EXPANSION JOINTS

Abstract :

In this research, a retrofitting method using cover plates by bolted connection with epoxy resin putty, and a practical procedure for selecting efficient retrofitting methods are discussed. In FY2007, for retrofitting significantly-corroded steel members by the cover plate method, influence of creep of thick epoxy resin putty on bolt tension and slip resistance were investigated. The results revealed that reduction of bolt tension on the cover plate method was mostly influenced by creep of the resin, and showed a prediction method for the influence. Static and fatigue loading tests of steel beams containing structural deficiency were carried out for discussing emergency levels of the retrofitting. In addition, for preventing steel girders from corrosion, a simplified drainage system made of polyethylene for temporary use was attached to an existing highway bridge as a trial case.

Key words : retrofitting, high strength bolted connection, epoxy resin, adhesive, creep, fatigue

本研究では、著しく腐食した鋼部材の当て板補強方法及び鋼橋桁端部に腐食が見られた際の補修・補強方法の判定方法について検討を行う。平成19年度は、腐食が著しい鋼部材への当て板補強を想定して、高力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場合の、樹脂のクリープ特性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。その結果、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ことを確認し、その算定法を提示した。また、桁端部に模擬腐食を有する鋼桁供試体を用いて静的載荷試験及び疲労試験を実施するとともに、桁端部腐食の原因除去のための簡易排水装置の試作と実橋への試験設置を行った。

キーワード：補強，高力ボルト継手，エポキシ樹脂，接着剤，クリープ，(桁端部の)疲労