

ISSN 1346-7328
国総研資料第1095号
令和2年3月

国土技術政策総合研究所資料 共同研究報告書

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 1095

March 2020

超高力ボルト材料の耐久性等の品質水準に関する共同研究

国土交通省 国土技術政策総合研究所

公立大学法人 大阪市立大学

日本製鉄株式会社

日鉄ボルテン株式会社

超高力ボルト材料の耐久性等の品質水準に関する共同研究

国土交通省 国土技術政策総合研究所

公立大学法人 大阪市立大学

日本製鉄株式会社

日鉄ボルテン株式会社

概要

本研究では、鋼道路橋の実使用環境に超高力ボルトを適用した場合の耐遅れ破壊性能を評価することを目的とし、材料としての耐遅れ破壊性能とその影響因子を原理に基づく試験法で調査した。また、実施工を模擬した試験体を用いた耐遅れ破壊性能を 2 種類の促進試験法で調査した。さらに、実橋に超高力ボルトを採用した場合の腐食の傾向を推定するため、実橋の使用環境下において長期暴露された高力ボルトの腐食状況を調査した。

その結果、超高力ボルトの耐遅れ破壊性能はねじ形状の選定で一定の改善効果がみられたこと、いずれの試験法でも超遅れ破壊は観察されなかったことが確認された。また、今回適用した遅れ破壊評価に関する腐食促進試験法の有用性も確認された。しかしながら、高力ボルトの腐食状況調査結果を踏まえると、超高力ボルトの使用にあたっては使用環境の選定を慎重に行うこと、実地でのデータのさらなる蓄積が重要であることが分かった。

キーワード：超高力ボルト、遅れ破壊、腐食促進試験

Study on the durability performance of super high strength bolt

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

Osaka City University.

NIPPON STEEL CORPORATION

NIPPON STEEL Bolten CORPORATION

Synopsis

This study has examined the delayed fracture resistance of super high strength bolts for steel bridges. A set of testing types and protocols is proposed including an accelerated corrosion test. Those tests in laboratory have shown that the chance of delayed fracture can be relaxed somehow depending on the form of screw. In addition, super high strength bolts that have been exposed in-situ long-time are carefully observed. As a result, surrounding environments and exposure conditions are crucial in the use of super high strength bolts and in-situ long-term exposure test data should be accumulated more to prove the long-term durability of super high strength bolts.

Key Words: super high strength bolt, delayed fracture, accelerated corrosion test

共同研究参加機関および担当者名簿

(令和2年3月現在 順不同)

【研究期間】平成23年12月～平成28年3月

国土交通省 国土技術政策総合研究所
道路構造物研究部 橋梁研究室

玉越 隆史
大久保 雅憲 (～平成26年3月)
白戸 真大 (平成24年7月～)
石尾 真理 (～平成26年3月)
横井 芳輝 (～平成27年3月)
宮原 史 (平成25年4月～)
河野 晴彦 (平成27年4月～)
氏本 敦 (～平成25年3月)
山崎 健次郎 (～平成27年3月)
窪田 真之 (平成27年4月～)

公立大学法人大阪市立大学
山口 隆司

日本製鉄株式会社
松岡 和巳 (～平成28年3月)
千田 徹志

日鉄ボルテン株式会社
柳瀬 雅人 (～平成28年3月)
畑中 清 (～平成26年9月)
宮川 敏夫 (～平成28年3月)
高浦 弘至 (平成26年4月～)
原田 宏明

執筆担当者
国土交通省 国土技術政策総合研究所
道路構造物研究部 橋梁研究室

河野 晴彦
大西 諒
窪田 真之
高山 文郷
鈴木 克弥

超高力ボルト材料の耐久性等の品質水準に関する共同研究

目次

第1章 研究の概要	1
1.1 研究の背景	1
1.2 高力ボルトの遅れ破壊の特徴と評価法	1
1.3 研究の概要	2
第2章 耐遅れ破壊特性に関する評価法	5
2.1 H_E/H_C 法	5
2.1.1 H_E/H_C 法の概要	5
2.1.2 H_E/H_C 法の試験方法と耐遅れ破壊特性の評価方法	7
2.2 H_E^*/H_C^* 法	9
2.2.1 H_E^*/H_C^* 法の概要	9
2.2.2 H_E^*/H_C^* 法の試験方法と耐遅れ破壊特性の評価方法	9
第3章 高力ボルト材料の耐遅れ破壊特性の評価	13
3.1 本研究で用いる試験方法	13
3.2 供試ボルトの諸元	13
3.2.1 供試ボルト材料の化学成分	13
3.2.2 供試ボルトの製造	13
3.2.3 供試ボルトの機械的性質	14
3.3 限界拡散性水素量 H_C の測定	14
3.3.1 試験片	14
3.3.2 試験方法	15
3.3.3 試験結果	15
3.4 侵入水素量 H_E の測定	18
3.4.1 試験片	18
3.4.2 試験方法	18
3.4.3 試験結果	19

3.5 耐遅れ破壊特性の評価	21
3.5.1 材料性能の違いによる評価	21
3.5.2 ねじ形状の違いによる評価	22
3.6 環状切欠き試験片による実際のボルトの応力再現性	22
3.6.1 高力ボルトを模擬する環状切欠き試験片形状	23
3.6.2 超高力ボルトを模擬する環状切欠き試験片形状	23
第4章 腐食促進試験による高力ボルトの耐遅れ破壊性能の確認	26
4.1 観覧車腐食促進試験	26
4.1.1 概要	26
4.1.2 試験方法	26
4.1.3 試験結果	31
4.2 高濃度腐食溶液による腐食促進試験	49
4.2.1 概要	49
4.2.2 試験方法	49
4.2.3 試験結果	52
4.2.4 試験法の改良に向けて	53
第5章 長期暴露された高力ボルトの腐食状態調査	56
5.1 調査概要	56
5.2 実腐食環境に設置された暴露試験体の腐食状態調査（その1）	56
5.2.1 暴露試験の概要	56
5.2.2 調査結果	57
5.3 実腐食環境に設置された暴露試験体の腐食状態調査（その2）	57
5.3.1 暴露試験の概要	57
5.3.2 調査結果	58
5.4 既設橋の高力ボルト腐食状態調査	62
5.4.1 調査対象橋梁	62
5.4.2 調査結果	62
第6章 まとめ	75

6.1 高力ボルトの耐遅れ破壊特性の評価	75
6.1.1 材料としての耐遅れ破壊特性の評価	75
6.1.2 腐食促進試験による高力ボルトの耐遅れ破壊特性の評価	78
6.2 長期暴露された高力ボルトの腐食状況調査	80

第1章 研究の概要

1.1 研究の背景

鋼道路橋の設計基準である道路橋示方書・同解説（以下、「道示」という）Ⅱ鋼橋編^{1.1)}では、高力ボルト継手に用いるボルトとしてF10T、S10Tが規定されている。過去にはこれらのボルトよりも高強度なボルトが開発され、1973年の道示Ⅱ鋼橋編^{1.2)}でF11Tが規定されたが、実橋において遅れ破壊等による脱落事故が発生したため、1980年の道示Ⅱ鋼橋編^{1.3)}では規定から削除されている。

近年、耐遅れ破壊性能を改善した、引張強さ 1,200N/mm²以上、降伏点 1,080N/mm²以上の高力ボルト（以下、「超高力ボルト(SHTB)」という）が開発され、建築分野では国土交通大臣に認定されたものが鉄骨高層ビルの接合に採用されている^{1.4)、1.5)}。鋼道路橋の新設橋においては、鋼少数I桁橋の採用などにより、使用される鋼板の厚板化・高強度化が進む中、超高力ボルトを用いることで品質確保が難しい厚板溶接の回避に加え、継手部の小型化による必要ボルト本数や施工工数の削減など、合理的で経済的な継手となる可能性が期待される^{1.6)}。しかし、鋼道路橋では建築分野と比較して施工方法が異なり、使用環境においては大きな変動荷重作用下に置かれることが多く、また、直接自然環境下に暴露される鋼道路橋に超高力ボルトを適用するためには、F10TやS10Tと同様な規定及び適用範囲に対する継手性能、耐遅れ破壊性能を明らかにする必要がある。

継手強度については、過去の実績等から載荷試験方法に標準的な項目が確立されており、超高力ボルトS14Tによる摩擦接合を対象に道示で規定されているS10Tの適用条件と同様の条件において、所要の信頼性が期待できる結果が得られている^{1.7)}。

しかし、耐遅れ破壊性能については、これまでもいくつかの試験が行われているものの、試験・評価方法がまちまちであり、その評価が定まっていない。

本共同研究では、鋼道路橋の実際の使用環境に超高力ボルトを適用した場合の耐遅れ破壊性能を評価することを目的とし、材料としての耐遅れ破壊性能、並びに実際の施工を模擬した試験体による耐遅れ破壊性能を調査した。さらに、実際の橋梁に超高力ボルトを採用した場合の腐食促進の傾向を推定するため、実際の使用環境下において長期暴露された高力ボルトの腐食状況を調査した。

1.2 高力ボルトの遅れ破壊の特徴と評価法

高力ボルトの遅れ破壊は、静的な応力が負荷されたボルトの鋼材に、水素脆化や応力腐食などが生じ、ある時間経過後に突然脆性的な破壊を生じる現象のことである。

水素脆化による遅れ破壊は、ボルトが使用環境下において腐食が進行し、腐食等により発生した水素がボルト内部に侵入し、ねじ底等の応力集中部に集積した水素が鋼材の破壊に対する許容量を超えたときに破壊強度が低下し、き裂が発生・進展することで生じることが分かっている^{1.8)}。さらに、ボルトの鋼材が高強度になるほど遅れ破壊が生じやすく、引張強さ 1,200N/mm²以上になると発生が顕著になることが明らかにされている^{1.9)}。

耐遅れ破壊性能の評価法としては、腐食促進試験による破断の有無の確認^{1.10)}や、鋼材の遅れ破壊発生の限界拡散性水素量と侵入水素量の関係から評価する方法^{1.11)、1.12)、1.13)}が提案されているが、JIS規格などの規定化されたものはない。そこで本研究では、過去の様々な試験結果を整

理するとともに、新たに追加試験も実施し、それらを総合的に評価することで、耐遅れ破壊特性の信頼性を評価することを試みる。

1.3 研究の概要

第1章では、高力ボルトに関する規定の経緯と開発、並びに遅れ破壊の特徴と評価法の現状について示した。

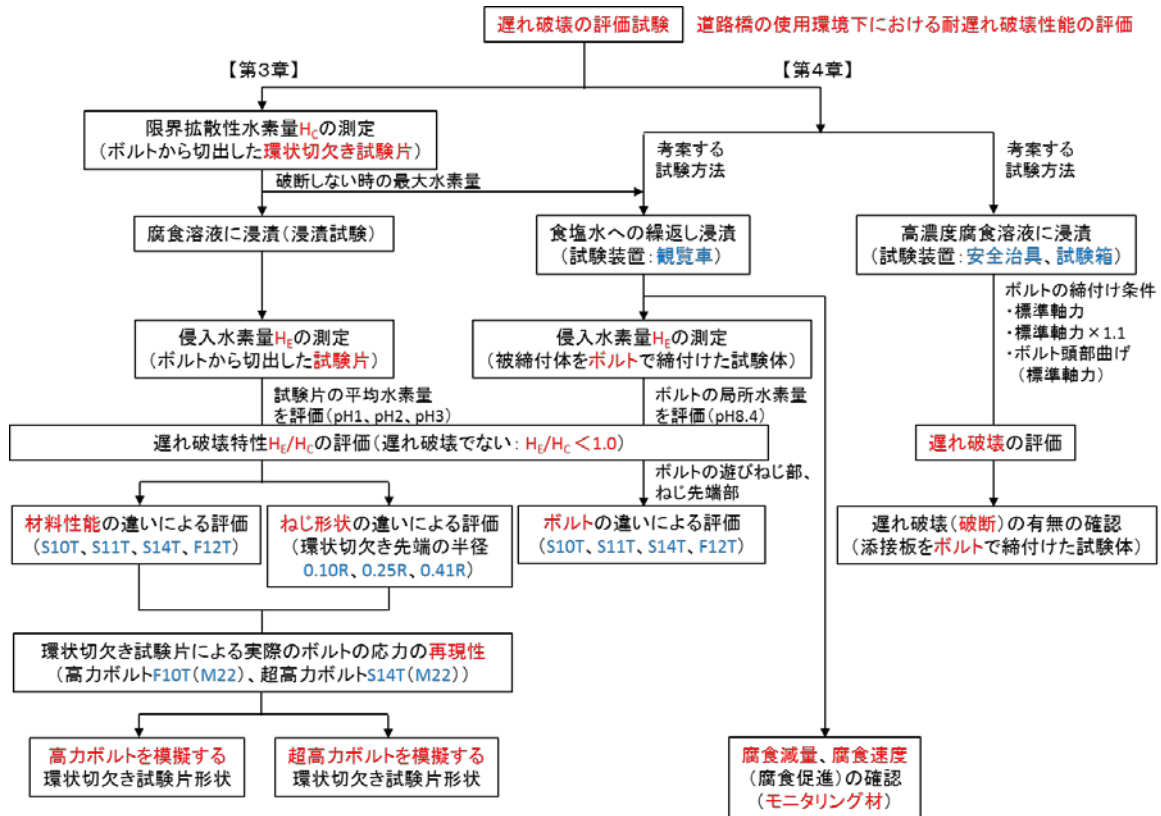
第2章では、既往の耐遅れ破壊特性の評価試験法を調査し、各評価試験法の特徴について整理した。

第3章では、製造した高力ボルト S10T、S11T 並びに超高力ボルト F12T、S14T からねじ形状の違いを模擬して切り欠き加工した試験片を用いて、遅れ破壊発生の限界拡散性水素量 H_c を測定した。また、別に切り出した試験片を用いて、侵入水素量 H_E を測定した。限界拡散性水素量 H_c と侵入水素量 H_E の関係から各ボルトの耐遅れ破壊特性の評価を行い、ボルト材料の違いやねじ形状の違いが耐遅れ破壊特性に与える影響を整理した。

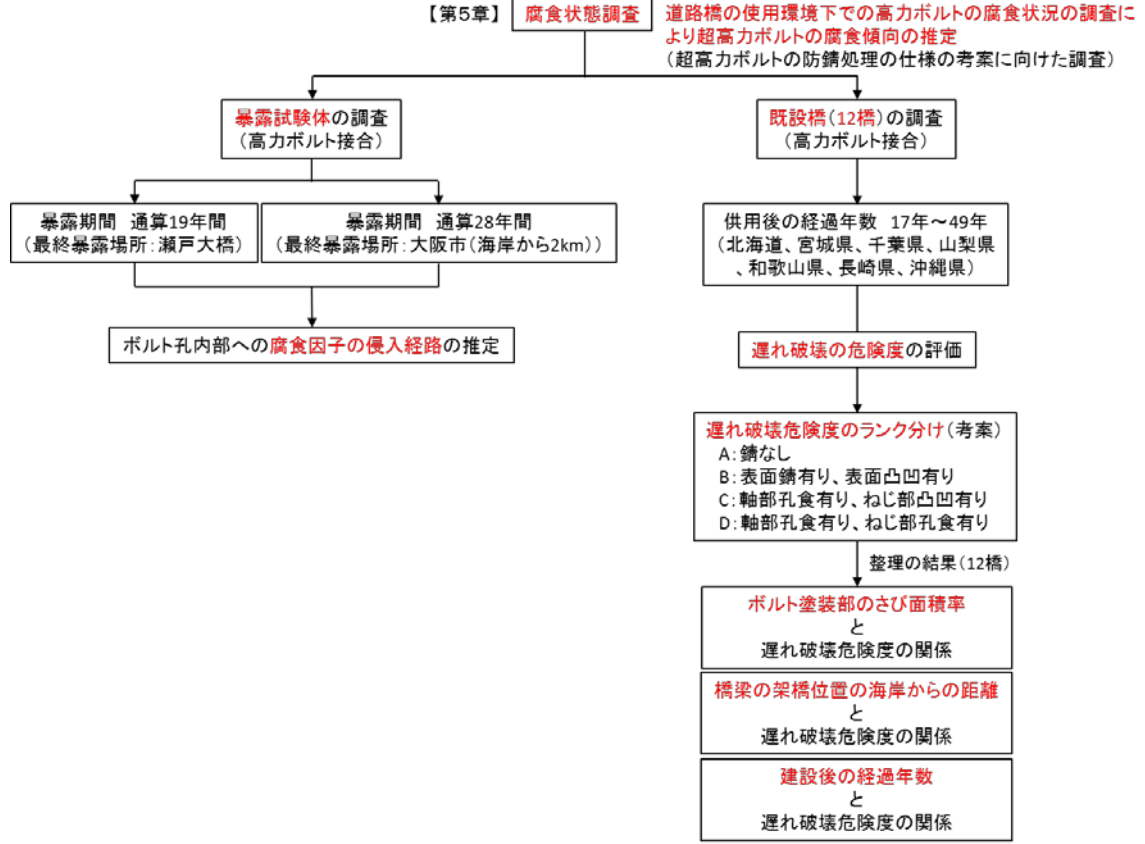
第4章では、鋼道路橋の腐食環境を想定し、第3章で材料としての耐遅れ破壊特性を評価した各ボルトを用いて、添接部を模擬した試験体を作成し、腐食促進試験により耐遅れ破壊性能を確認した。

第5章では、屋外の暴露試験体の腐食状況を調査し、腐食因子の侵入経路の推定を行った。さらに、既設の鋼道路橋に使用されている高力ボルトの腐食、損傷状態を調査し、ボルト塗装部のさび面積率、腐食環境（海岸からの距離）、建設後の経過年数をパラメータとして遅れ破壊危険度の分類を行った。

第6章では、本共同研究で得られた知見についてまとめた。



(a) 遅れ破壊の評価試験



(b) 腐食状態調査

図 1.1.1 研究の概要

第1章 参考文献

- 1.1) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2012.3
- 1.2) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，1973.2
- 1.3) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，1980.2
- 1.4) 脇山広三：高力ボルト接合(6)，超高力ボルトの開発，JSSC，No.40，2001.4
- 1.5) (一社) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2012.3
- 1.6) 太田雅夫，山口隆司：太径・高強度ボルトを用いた摩擦接合の有効性に関する検討，土木学会第57回年次学術講演会，pp.263-264，2002.9
- 1.7) 玉越隆史，白戸真大，横井芳輝，山崎健次郎，水口知樹：鋼道路橋への適用に向けた超高力ボルトを用いた摩擦接合継手の継手強度に関する研究，国総研資料 第827号，2015.2
- 1.8) 宇野暢芳，久保田学，永田匡宏，樽井敏三，蟹澤秀夫，山崎真吾，東清三郎，宮川敏夫：超高力ボルト SHTB，新日鉄技報，第387号，2007
- 1.9) (一社) 日本鋼構造協会，JSSC テクニカルレポート No.96 高力ボルト接合技術の現状と課題，2013.3
- 1.10) 平井敬二，脇山広三，宇野暢芳，宮川敏夫：高力ボルトの遅れ破壊に関する実験的研究(その2 暴露試験)，日本建築学会構造系論文集，第555号，2002.5
- 1.11) 山崎真吾，高橋稔彦：高強度鋼の耐遅れ破壊特性の定量的評価方法，鉄と鋼，Vol.83，1997，No.7
- 1.12) 王毛球，秋山英二，津崎兼彰：Fracture criterion for hydrogen embrittlement of high strength steel，MEASUREMENT SCIENCE & TECHNOLOGY，Vol.22，No.2，2006
- 1.13) 萩原行人，伊藤睦人，久森紀之，鈴木啓史，高井健一，秋山英二：CSRT 法による高強度鋼の遅れ破壊特性の評価，鉄と鋼，Vol.94，2008，No.6

第2章 耐遅れ破壊特性に関する評価法

遅れ破壊の評価方法は、以下に述べる H_E/H_C 法と H_E^*/H_C^* 法が開発され実施されている。各評価法のメリット、デメリットは以下のとおりである。

H_E/H_C 法

メリット : ①試験片：環状切り欠き試験片は研究実績が多く、応力集中特性が明確である。
②荷重方法：試験片に定荷重荷重を行うため、ボルト締付条件に近い試験結果が得られる。

デメリット : ③応力評価：切り欠き部断面での平均応力での評価となり、形状が異なれば、その都度試験を行う必要がある。

④水素チャージ方法：自然環境に暴露、もしくは CCT^{*3} 等の腐食促進試験で行うが、この条件が実構造物環境の模擬として適切かどうか根拠が薄い。

H_E^*/H_C^* 法

メリット : ①試験片： H_E/H_C 法と同様に、環状切り欠き試験片（ $\phi 10$, 切り欠き半径 $R=0.25$ ）の標準形状のものを使用することができる。

②荷重方法：試験片に通常の引張試験と同じ荷重速度で破断まで荷重する。この速度では水素の移動が少なく、試験体内で水素量が均一とみなすことができ、局所水素量と局所応力の関係が明確になる。

③応力評価：標準形状の試験片に発生する局所応力が FEM 解析により算出されているため、破断荷重時の局所応力が明確になる。

④水素チャージ方法：実環境に暴露されたボルトの遅れ破壊試験の結果分析から導かれた腐食溶液を用いており合理性が高い。

デメリット : ⑤荷重方法：定荷重ではなく漸増荷重荷重であるため、荷重方式による破壊荷重に差がでないか懸念が残る。

今回の試験では、対象となるボルト形状ははっきりしており、対象のボルトの耐遅れ破壊性能を評価することが目的のため、基本的には H_E/H_C 法を用いることとする。

2.1 H_E/H_C 法

2.1.1 H_E/H_C 法の概要

この評価法^{2.1)} で用いる試験片は、ボルト材料から切り出した（図 2.1.1）環状切り欠き試験片（環状切り欠きを設けた丸棒試験片）である。この試験片を 3%NaCl 溶液に触媒毒（水素侵入促進材：チオシアン酸アンモニウム）を添加した溶液中に浸漬し、触媒毒量や電流の大きさを種々変えた条件で電解水素チャージ^{*1} を行い、その後試験片表面を亜鉛（Zn）などでめっき処理して侵入水素を封じ込める。そして、この試験片を用いて定荷重試験^{*2} を行い、100 時間経過しても破断しない時の試験片内に侵入した平均水素量の最大値すなわち、限界拡散性水素量 H_C を評価する。一方、ボルトをそのまま、もしくは締め付けた試験体を暴露試験や塩水噴霧と乾燥の繰返し腐食促進試験（CCT^{*3} 等）に供し、侵入水素量 H_E を評価する。これらから得られた H_C と H_E とを比較し、 $H_C > H_E$ の場合は遅れ破壊し

ない、 $H_C \leq H_E$ の場合は遅れ破壊すると判定する。

- *1：電解水素チャージとは、鋼中に水素を侵入させる（チャージ）ために、**図 2.1.2** のように、3%NaCl 溶液に試験片を入れて、試験片に向けて電流を流す試験方法で、詳細は 2.2.2. (1)2 ii で後述する。
- *2：定荷重試験とは、**図 2.1.3** に示す試験装置を用いて、試験片（環状切欠き試験片）に一定荷重で応力を作用させる試験のことである。
- *3：CCT とは、Cyclic Corrosion Test の略である。

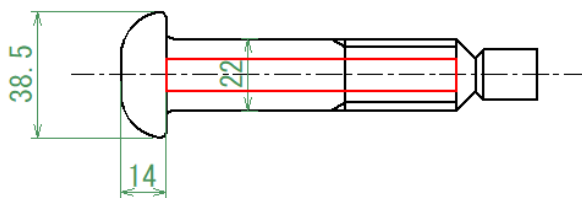


図 2.1.1 環状切欠き試験片採取位置

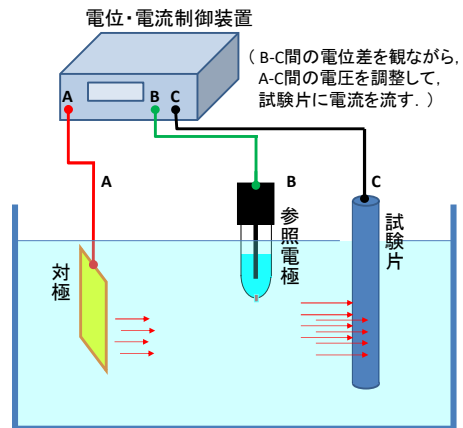


図 2.1.2 電解水素チャージ試験例

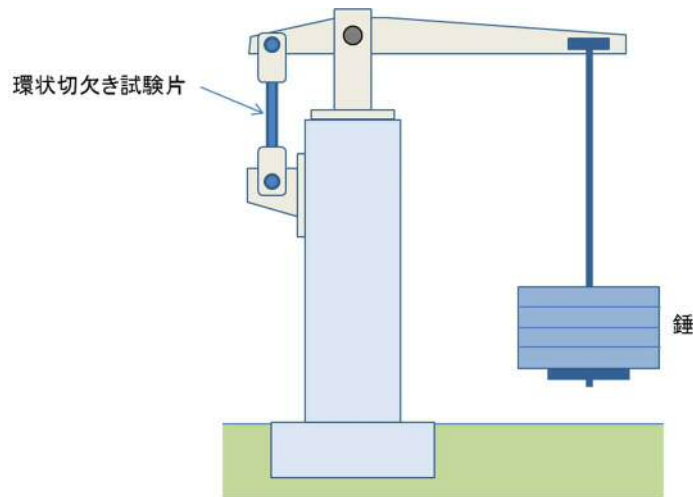


図 2.1.3 定荷重試験機

図 2.1.4 にボルト材料から切り出した環状切欠き試験片（ $\phi 10 \times L80\text{mm}$ 、中央部に環状切欠き）の例を示す。環状切欠き先端の半径は、目的に応じて種々のものを使用される。

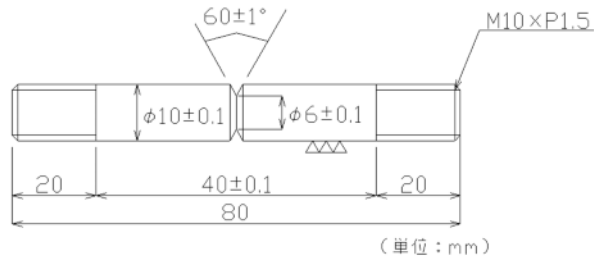


図 2.1.4 環状切欠き試験片の例

2.1.2 H_E/H_C 法の試験方法と耐遅れ破壊特性の評価方法

(1) 限界拡散性水素量 H_C の評価

限界拡散性水素量 H_C の評価フローを図 2.1.5 に示す。このフローに従って電解水素チャージを実施した試験片で定荷重試験を行う。その結果得られた拡散性水素量と荷重载荷開始から破断に至るまでの経過時間（以下、「破断時間」という）との関係例を図 2.1.6 に示す、なお、プロットの要領は第 3 章で詳細に示す。荷重载荷後 100 時間経過しても破断しない、最大の平均水素量（試験片内に侵入した水素量 (g) を試験片の重量 (g) で除した平均値 (単位: ppm)、すなわち限界拡散性水素量 H_C を評価する。ここで拡散性水素量は、通常昇温脱離分析法で測定するものであり、室温から 300°C までの温度域で放出された水素量とされている。

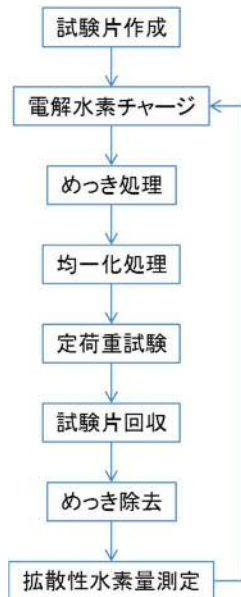


図 2.1.5 限界拡散性水素量 H_C の評価フロー

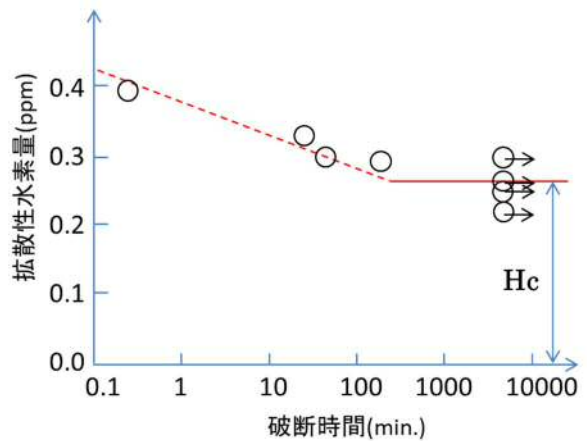


図 2.1.6 拡散性水素量と破断時間 (例)

1) めっき処理

電解水素チャージ後、試験片からの水素の放出を抑制するため、試験片表面にめっき処理を施す。めっきにはカドミウム (Cd) や亜鉛 (Zn) が用いられるが、Cd は毒性が高いため、最近では Zn が用いられている。

2) 均一化処理

試験片の飽和時間に満たない時間で水素チャージした場合、試験片表面において水素濃度が高く、中心部において低い。したがって、試験片内の水素濃度分布が均質となるように室内で一定時間放置する。放置時間の目安は、予め数値計算*4により把握しておくのがよい。

*4：丸棒試験片の場合、軸対象モデルの拡散方程式を解くことで得られる。

3) 定荷重試験

荷重(N)は、環状切欠き部の断面の降伏荷重(=0.9×引張試験で得られた引張強度(N/mm²)×環状切欠き部の断面積(mm²))が通常用いられる。载荷時間は試験片内の応力分布に応じて水素が再配分される時間以上が必要とされるが、100時間が一般的である。

4) 試験片回収

破断後もしくは、未破断の場合は100時間後に回収する。

5) 拡散性水素量測定(昇温脱離分析法)

水素分析には、ガスクロマトグラフ法(TDA)や四重極質量分析計(Q-mass法)が用いられる。室温から1000℃まで加熱して水素放出速度曲線を求め、約200℃から400℃までの第一ピークを積分した水素量を測定する方法が採用される。

(2) 侵入水素量 H_E の評価

侵入水素量 H_E とは、ボルトが使用される環境において、ボルトに侵入する水素量のことである。耐遅れ破壊特性を評価する目的では、厳しい環境を設定することが多く、以下の2つが代表的手法である。

1) 暴露試験法

ボルトを厚板に締結した状態で、腐食環境の厳しい沖縄や海浜地区に暴露し、一定期間暴露後に回収して水素分析を行い、侵入水素量 H_E を求める。

2) 腐食促進試験法

ボルト又はボルトから切り出した試験片を図2.1.7に示すような腐食促進試験(CCT)に供し、一定期間後に回収して水素分析を行い、侵入水素量 H_E を求める。

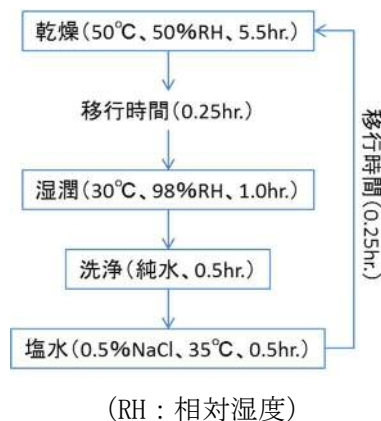


図 2.1.7 腐食促進試験(8hr/サイクル)の例

2.2 H_E^{*}/H_C^{*}法

2.2.1 H_E^{*}/H_C^{*}法の概要

H_E/H_C法が試験片全部もしくは切欠き部近傍の比較的大きな領域の平均的な水素量を指標としているのに対し、H_E^{*}/H_C^{*}法は、ボルトの局所における水素濃度と応力に着目し、これらを統計的に取り扱ったものである^{2.2)}。

2.2.2 H_E^{*}/H_C^{*}法の試験方法と耐遅れ破壊特性の評価方法

(1) H_C^{*}の取得

1) 環状切欠き部断面の公称応力と最大主応力との関係評価【STEP1】

FEM等の応力解析により環状切欠き部の公称応力 σ_N と環状切欠き先端部の最大主応力 σ_{max}^* を求め、 $\sigma_{max}^* - \sigma_N$ の換算式を多項式近似により求める。 σ_B は引張強度である。

$$\left(\frac{\sigma_{max}^*}{\sigma_B}\right) = 0.564 + 1.511\left(\frac{\sigma_N}{\sigma_B}\right) - 0.380\left(\frac{\sigma_N}{\sigma_B}\right)^2 \quad \dots \quad (2.2.1)$$

ここに、

- σ_{max}^* : 環状切欠き先端部の最大主応力 (N/mm²)
- σ_N : 環状切欠き部の公称応力 (N/mm²)
- σ_B : 引張強度 (N/mm²)

2) 環状切欠き部断面の公称応力と拡散性水素量との関係評価【STEP2】

以下に示すCSRT試験法(Conventional Strain Rate Test)により、破断時の公称応力 σ_N と局所拡散性水素量 H_{CSRT} (=H_C^{*})を算出する。

i) 試験片形状

図2.2.1に試験片形状を示す。切り欠きは60°V溝で、その先端の半径はM22高力ボルトのねじ底を模擬したR=0.25とする。

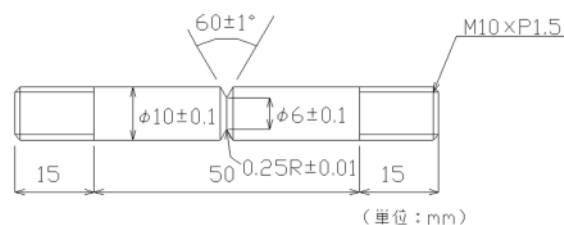


図 2.2.1 試験片形状

ii) 前処理・水素チャージ (CSRT 試験法)

水素チャージは、低濃度水素量向けにはNaOH溶液、高濃度水素量向けには0.3g/lのNH₄SCNの触媒毒を添加した3%NaCl溶液を用いて、定電流制御による陰極電解チャージ法により行う。陽極側に白金、陰極側に試験片をつなぎ、ガルバノスタットで一定電流を流すことで、陽極側より酸素が、陰極側より水素が発生し、試験片に水素が吸蔵される。水素を試験片内に均一に吸蔵させる必要がある

ため、試験片内の水素量が飽和する時間まで電解チャージする。

iii) 引張試験 (CSRT 試験法)

破断するまで試験片を 1mm/min の速度で引張り、荷重・変位関係、破断荷重を求め、破断荷重を有効断面積で除して破断時の公称応力 σ_N を算出する。

iv) 局所拡散性水素量 H_{CSRT} ($=H_c^*$) の測定

水素分析は、昇温脱離分析法を用いて行う。昇温脱離分析法とは、試料を加熱して放出される水素ガス成分を検出して分析するものであり、放出水素の定量分析が可能となる。昇温脱離分析法には下記の 2 つがある。

①ガスクロマトグラフ法 (Thermal Desorption Analysis : TDA)

②四重極質量分析計を使用 (Quadrupole Mass Spectroscopy : Q-mass 法)

昇温速度は 200°C/h とし、昇温は室温から 300°C 以上とし、この水素放出速度曲線の 300°C までの積分値を測定する。

3) 環状切欠き部断面の破断時の最大主応力と局所の限界拡散性水素量の関係を作成【STEP3】

【STEP2】で求めた破断時の公称応力 σ_N を【STEP1】で得た $\sigma_{max}^* \cdot \sigma_N$ 関係の換算式に入力して求めた σ_{max}^* と、【STEP2】で分析された拡散性水素量 H_{CSRT} ($=H_c^*$) の間にべき乗則が成り立つとする既往の研究成果を利用して、図 2.2.2 のようにデータをプロットして対数近似式を作成する。

次に設計で決められた軸力を式 2.2.1 に代入し算出される設計値 (局所の主応力値) を対数近似式に代入し、 H_c^* の統計量 (対数正規分布パラメータ λ_c^*) を逆推定する。もう一つの統計量 ξ_c^* の計算は文献^{2,3)}による。

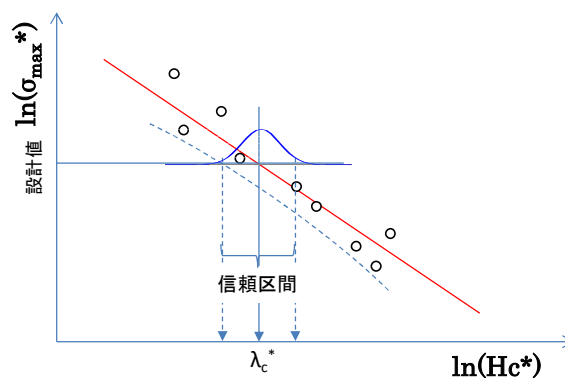


図 2.2.2 $\sigma_{max}^* \cdot H_c^*$ の関係 (例)

(2) H_E^* の取得

最近の研究^{2,3)}から、屋外環境の腐食反応で生じる錆び下の鋼材表面の pH は、NaCl 添加腐食溶液と比較すると pH2 程度まで低下することが明らかとなっている。この腐食状態が永続し、水素がボルト中に侵入し最大応力部に達した際の局所侵入水素濃度を求める。そのために pH2 に調整された NaCl 添加腐食溶液に対象鋼材を長期に浸漬し、飽和状態となった際の水素濃度 H_E を求める。この値を用いて最大静水圧応力 σ_m^* が作用している局所での水素濃度 H_E^* を次式で計算し、これを統計量の一つ (対数正規分布パラメータ λ_E^*) とする。

$$H_E^* = H_E \cdot \exp\left(\frac{V_H \sigma_m^*}{RT}\right) \quad \dots \dots \dots (2.2.2)$$

ここに、

- H_E^* : 局所侵入水素量 (ppm)
- H_E : 侵入水素量 (ppm)
- σ_m^* : 最大静水圧応力 ($N/mm^{-2}=1 \times 10^6 kgm^{-1}s^{-2}$)
- V_H : 鉄中の水素の部分モル体積 ($2.0 \times 10^{-6} m^3mol^{-1}$)
- R : 気体定数 $8.314 (Jmol^{-1}K^{-1}=8.314kgm^2s^{-2}mol^{-1} \cdot K^{-1})$
- T : 温度 ($30^\circ C$) $303 (K)$

もう一つの統計量パラメータ ξ_e は、過去の研究^{2,4)} で得られた値 $\xi_e = 0.04$ を用いる。

(3) 耐遅れ破壊特性の評価 (H_E^*/H_C^* 法) 【STEP4】

H_C^* と H_E^* とがそれぞれ、図 2.2.3 に示す対数正規分布(パラメータ λ_c^* 、 ξ_c^*)、対数正規分布(パラメータ λ_E^* 、 ξ_E^*)に従うと仮定し、 $\ln(Z) = \ln(H_C^*) - \ln(H_E^*)$ を考える。ボルトの破壊確率は、図 2.2.4 に示す確率密度関数を $-\infty < \ln(Z) < 0$ の範囲で積分して計算する。

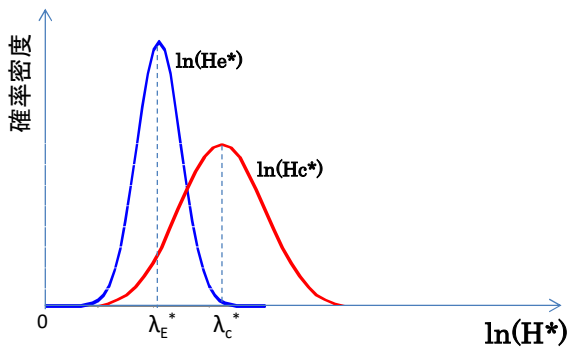


図 2.2.3 H_E^* 、 H_C^* 確率分布

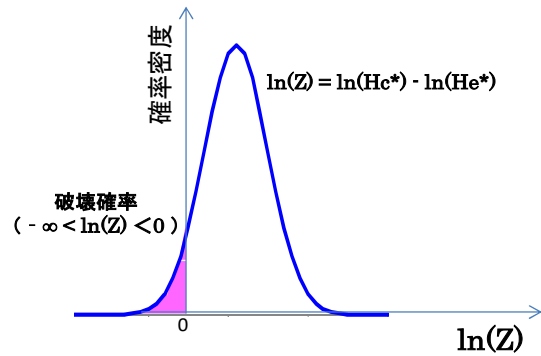


図 2.2.4 $H_E^*-H_C^*$ 確率分布

第2章 参考文献

- 2.1) 山崎真吾, 高橋稔彦: 高強度鋼の耐遅れ破壊特性の定量的評価法, 鉄と鋼, Vol. 83, 1997, No. 7
- 2.2) (一社) 日本鋼構造協会: JSSC テクニカルレポート No. 91, 高力ボルトの遅れ破壊特性評価ガイドブック, 2010.7
- 2.3) (一社) 日本鋼構造協会: 高力ボルトの遅れ破壊評価法ガイドライン, JSS IV 10-2014
- 2.4) 松岡和巳, 宇野暢芳, 秋山英二, 萩原行人, 松山晋作, 原田宏明: 高力ボルトの遅れ破壊に影響を及ぼす侵入水素量の確率論的評価, 鋼構造論文集, 第20巻, 第79号, 2013.9

第3章 高力ボルト材料の耐遅れ破壊特性の評価

3.1 本研究で用いる試験方法

本研究では、実ボルトの締結応力状態に近い試験法を採用して、ボルト材料の違い、ボルトねじ形状の違いを評価するとの観点から、試験方法として基本的に H_E/H_C 法を用いた。すなわち、試験片は対象とするボルトから作成し、試験片形状は各ボルトのねじ部に生じる応力状態を考慮した環状切欠き試験片を用いた。载荷方法はボルト締結状態と同じ定荷重载荷を採用し、耐遅れ破壊性能の評価は侵入水素量と破断時間を比較することにした。ただし、侵入水素量 H_E の測定に関しては、 H_E/H_C 法では厳しい腐食環境での暴露試験や、腐食促進試験が採用されるが、実環境模擬としての合理的根拠に欠けるため、 H_E^*/H_C^* 法で採用されている pH2 に調整された NaCl 添加腐食溶液に浸漬する測定方法を採用した。

また、既往の研究では、屋外環境の腐食反応で生じる錆の下の鋼材表面の pH は、pH2 程度まで低下することが分かっているが、本研究では NaCl 添加腐食溶液の pH の感度も確認するため、既往の研究で用いられてきた pH2 だけでなく、pH を 1~3 に変化させて試験を行うこととした。

3.2 供試ボルトの諸元

本共同研究では、高力ボルト S10T、及び S10T との比較材として S10T の製造過程で焼戻し温度を調整し、引張強さ 1,250N/mm²を目標値として製造したボルト（以下、「S11T」という）、並びに建築分野で採用が進んでいる耐遅れ破壊性能を改善した引張強さ 1,200N/mm²以上の超高力ボルト S14T、F12T（溶融亜鉛めっき処理）を対象に耐遅れ破壊特性を評価した。

3.2.1 供試ボルト材料の化学成分

各供試ボルトの使用材料の化学成分を表-3.2.1 に示す。S14T 及び F12T は耐遅れ破壊性能を向上させるために Mo（モリブデン）及び V（バナジウム）が加えられている。

表-3.2.1 供試ボルトの化学成分（%）

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ti	Mo	V	B
S10T	0.20	0.14	0.80	0.006	0.013	0.38	0.031	0.020	-	-	0.0020
S11T	0.19	0.15	0.80	0.019	0.005	0.38	0.031	0.020	-	-	0.0019
S14T	0.41	0.04	0.47	0.004	0.005	1.23	0.028	-	Add	Add	-
F12T	0.40	0.04	0.48	0.005	0.006	1.23	0.032	-	Add	Add	-

3.2.2 供試ボルトの製造

表-3.2.1 に示す供試ボルトの製造は、素材（バーインコイルφ21.5mm）をボルト成形（冷間圧造）、ねじ転造、熱処理（焼入れ・焼戻し）、溶融亜鉛めっき処理（F12T のみ）の順で行った。ここで、S10T 及び S11T のねじ形状は JIS B 0205 による形状（以下、「JIS ねじ形状」という）であり、S14T 及び F12T はねじ谷部への応力集中が低減された形状（以下、「超高力ボルトねじ形状」という）とした（図-3.2.1）。

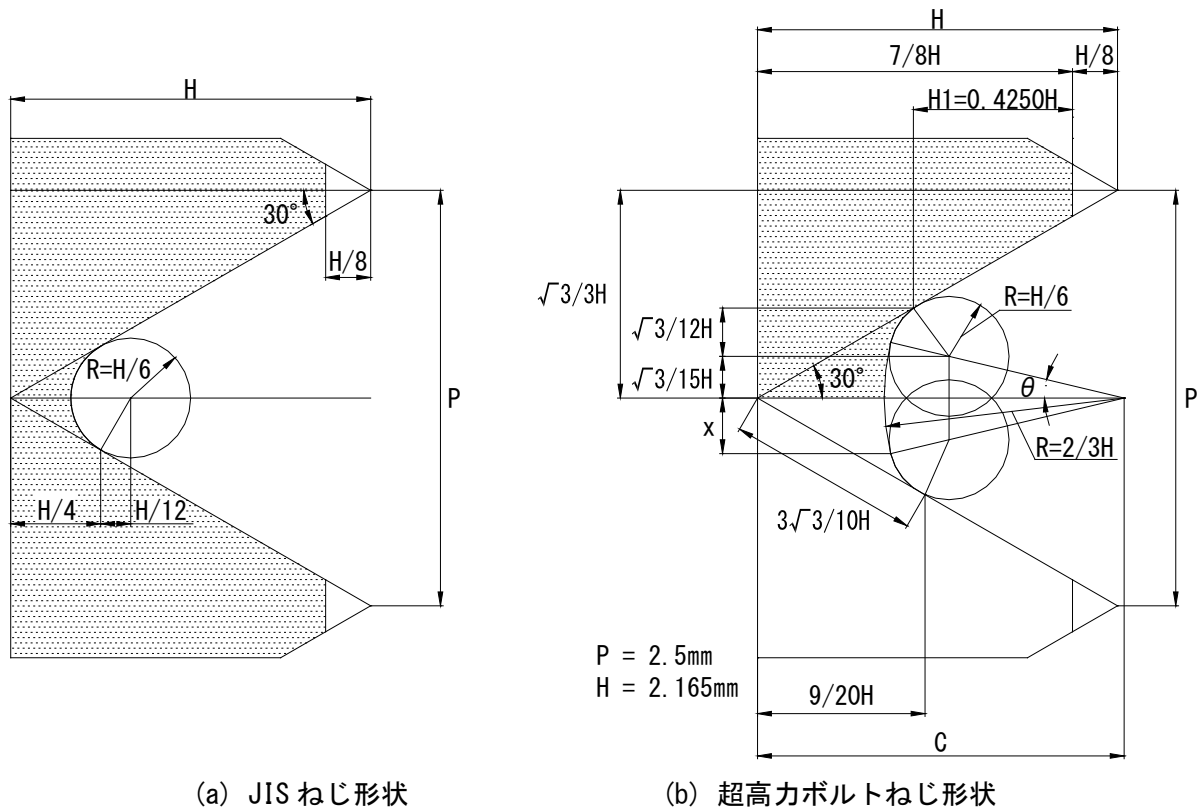


図-3.2.1 ボルトのねじ形状

3.2.3 供試ボルトの機械的性質

製造した各供試ボルトから切り出し加工した試験片及び各供試ボルトの機械的性質を表-3.2.2に示す。

表-3.2.2 供試ボルトの機械的性質

	4号試験片				製品	
	耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	絞り %	引張荷重 kN	硬さ HRC
S10T	1034	1078	20	72	329	33
S11T	1150	1257	18	68	375	39
S14T	1352	1454	16	52	463	43
F12T	1187	1237	18	57	390	40

3.3 限界拡散性水素量 H_c の測定

3.3.1 試験片

遅れ破壊試験に用いた試験片形状を図3.3.1に示す。試験片は、3.2.2で供試ボルトとして製造したボルトから切り出し加工した。環状切欠き先端の形状は、供試ボルトのねじ形状の応力状態を再現できるように3種類（切欠き先端の半径：0.1R、0.25R、0.41R）とした。0.1RはJISのボルト形状のねじ底に発生する応力よりも厳しい条件の再現、0.25RはJISのボルト形状の再現、0.41Rは超高力ボルト形状の再現したものである。

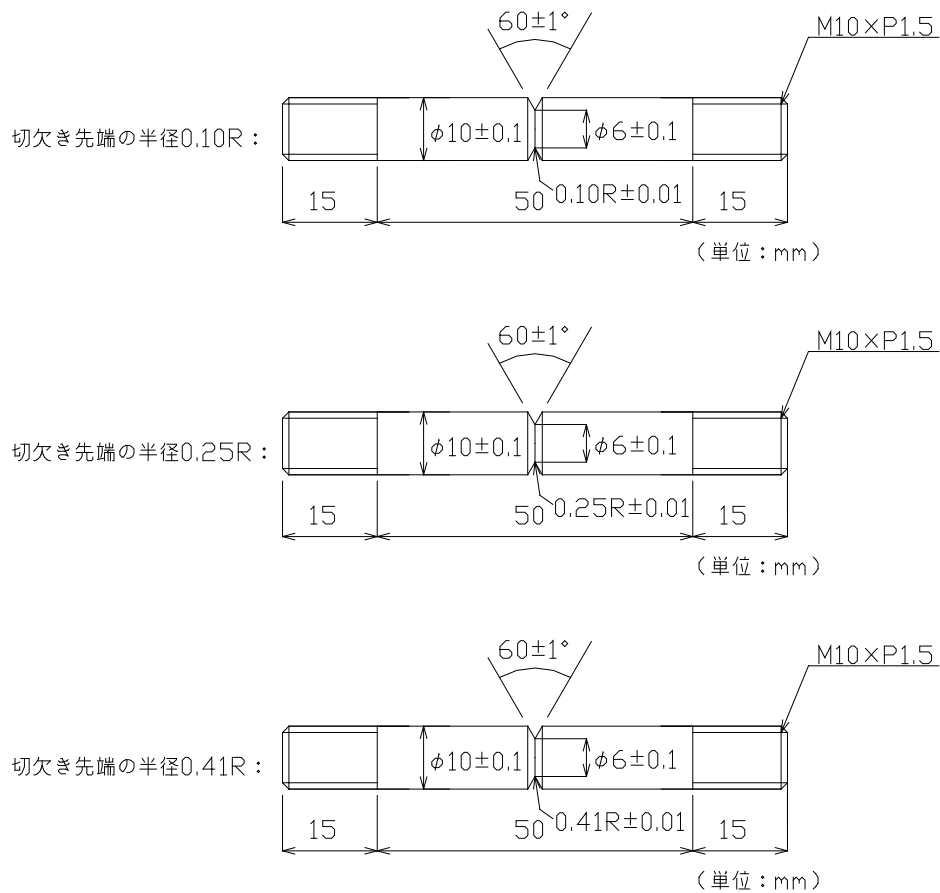


図-3.3.1 試験片形状

3.3.2 試験方法

試験手順は、図 2.1.5 に示した限界拡散性水素量 H_c の評価フローに従い実施した。この試験での均一化処理、水素分析の詳細は以下のようにした。

- ・均一化処理 : S10T、S11T では 3 時間室内放置、S14T、F12T では 96 時間室内放置した。
- ・拡散性水素量測定 : ガスクロマトグラフ法を用いた。

3.3.3 試験結果

定荷重試験で得られた拡散性水素量と破断時間の関係を図 3.3.2 から図 3.3.7 に示す。これらの図を基に、各試験片について 100 時間破断しない時の最大の平均水素量を限界拡散性水素量 H_c として求め、表 3.3.1 にまとめを示す。具体的な H_c の求め方は、100 時間以内で破断した試験片の平均水素量の下限值よりも小さい値で、100 時間経過時点で破断しなかった試験片の平均水素量の最大値を選定した。なお、右下がりの直線（点線）は破断試験片の平均水素量と破断時間との傾向を示すために引いた参考ラインである。

(1) 0.1R 試験片

切欠き先端の半径が 0.1R である試験片に関して、S10T、S11T の結果を図 3.3.2、図 3.3.3 に、S14T、F12T の結果を図 3.3.4、図 3.3.5 に示す。これらは切欠き先端の半径が同じ条件であるので、材料間の耐遅れ破壊特性を比較することができる。S10T (0.1R) の $H_c=0.4\text{ppm}$ に対して、熱処理により強度を高めた S11T (0.1R) では $H_c=0.1\text{ppm}$ となっている。同じ化学成分であっても、強度が高くなることで、耐遅れ破壊性能が低下する（限界拡散性水素量 H_c が小さい）ことがわかる。S14T (0.1R) は $H_c=3.2\text{ppm}$ で、F12T (0.1R) は $H_c=4.0\text{ppm}$ であった。S10T、S11T に比べて、共に H_c の値は大きい。これは化学成分 V（バナジウム）を含有する水素トラップ性能が高い材料の一般的特徴である。

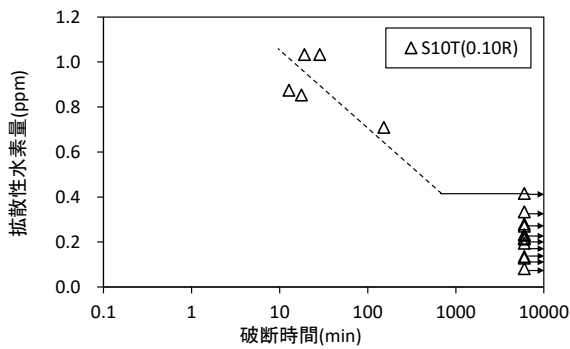


図 3.3.2 拡散性水素量と破断時間 (S10T)

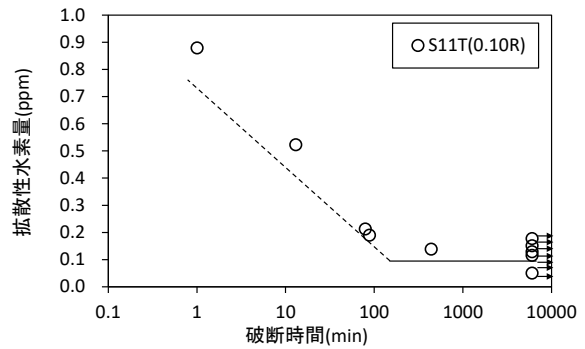


図 3.3.3 拡散性水素量と破断時間 (S11T)

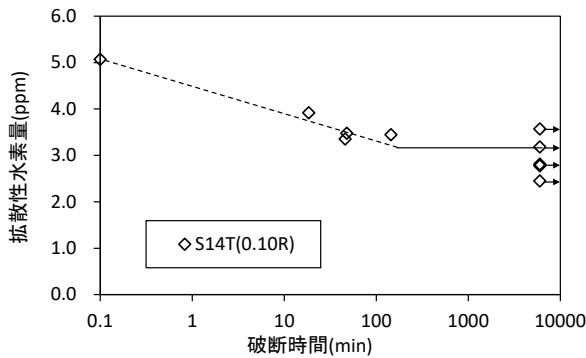


図 3.3.4 拡散性水素量と破断時間 (S14T)

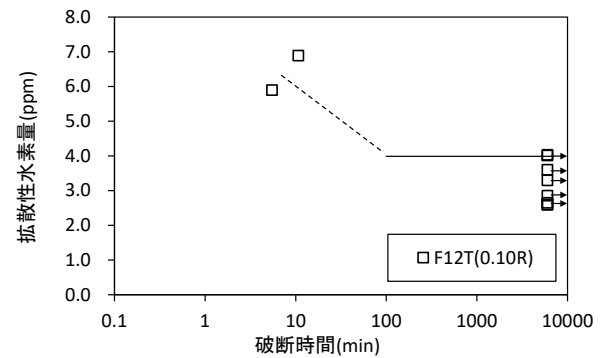


図 3.3.5 拡散性水素量と破断時間 (F12T)

(2) 0.25R 及び 0.41R 試験片

切欠き先端の半径が 0.25R である試験片の S11T と 0.41R である試験片の S14T の結果を図 3.3.6、図 3.3.7 に示す。これらは切欠き先端の半径が 0.1R より大きい条件であるので、切欠き先端の半径が耐遅れ破壊性能に与える影響を調べることができる。

S11T の H_c は、0.25R で $H_c=0.5\text{ppm}$ となり、0.1R に比べて 5 倍となっている。S14T は、0.25R で $H_c=4.0\text{ppm}$ 、0.41R で $H_c=4.1\text{ppm}$ となり 0.1R に比べて若干大きい。いずれの材料に関しても切欠き先端の半径が大きくなることで H_c は大きくなるのがわかる。

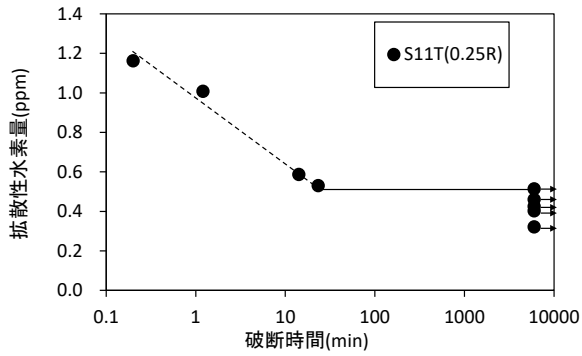


図 3.3.6 拡散性水素量と破断時間 (S11T)

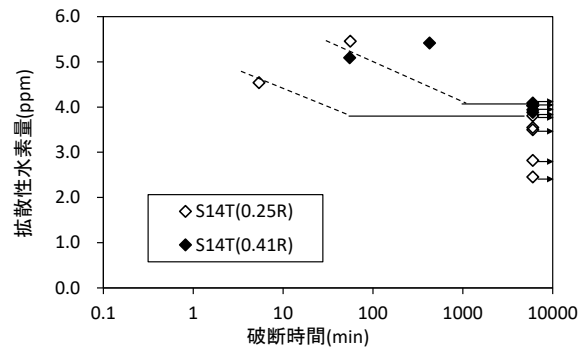


図 3.3.7 拡散性水素量と破断時間 (S14T)

(3) 切欠き先端の半径の影響

S11T と S14T に関して、切欠き先端の半径 R と H_c の関係を図 3.3.8、図 3.3.9 に示す。両試験片においても R が大きくなるに従い、耐遅れ破壊性能が高く（限界拡散性水素量 H_c が大きく）なっている。これは切欠き先端の半径が大きくなることで、応力集中が緩和され、その結果 H_c が大きくなることを示している。このことは、ボルトのねじ山形状を改善することで耐遅れ破壊性能が改善されることを意味している。

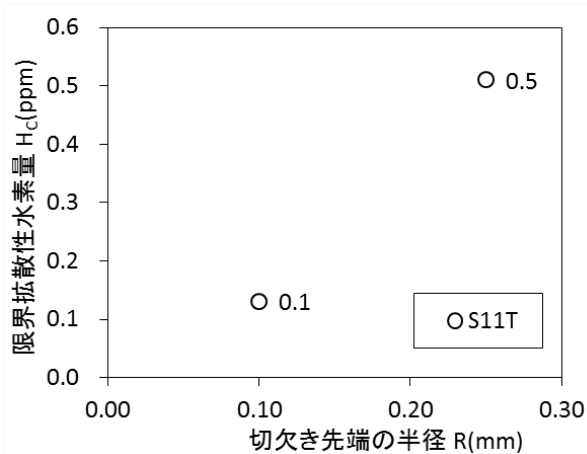


図 3.3.8 H_c と切欠き先端の半径 R (S11T)

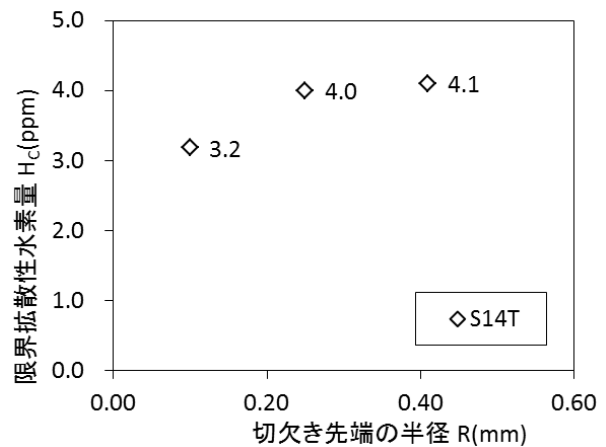


図 3.3.9 H_c と切欠き先端の半径 R (S14T)

表 3.3.1 限界拡散性水素量 H_c の測定結果

	切欠き先端の半径	H_c (ppm)
S10T	0.1R	0.4
S11T	0.1R	0.1
S14T	0.1R	3.2
F12T	0.1R	4.0
S11T	0.25R	0.5
S14T	0.25R	4.0
S14T	0.41R	4.1

3.4 侵入水素量 H_E の測定

3.4.1 試験片

試験片形状は、基本的に S10T、S11T は $\phi = 7.0\text{mm}$ 、 $L = 40\text{mm}$ として試験片数 $n = 1$ 本とした。S14T、F12T の V (バナジウム) 含有の試験片は、水素の拡散速度が極めて遅いため、水素が飽和して定常値となるには長時間の浸漬が必要となる。そこで、試験片形状は細径の $\phi = 3.0\text{mm}$ 、 $L = 40\text{mm}$ とし浸漬時間の短縮を図った。試験片数 $n = 3$ 本を浸漬し平均値として分析した。

3.4.2 試験方法

ボルトに侵入する水素量は、暴露された腐食環境に大きく影響を受けるため、遅れ破壊評価で使用する侵入水素量 H_E をどのように定めるのかはその目的によって異なる。日本鋼構造協会のガイドライン^{3.1)} (以下、「ガイドライン」という) では、高力ボルトの遅れ破壊評価で用いる腐食溶液の仕様を定め、この溶液にボルト材料を浸漬し水素分析を行い H_E を評価する。本共同研究では、この手法に従って実施した。具体的な H_E の評価手順は以下の通りで、**図 3.4.1** にその概要を示す。

- ①試験片加工 (試験片はボルトからの切り出し)
- ②試験片予備処理 (洗浄、脱脂)
- ③浸漬試験による水素チャージ
- ④昇温脱離分析法 (ガスクロマトグラフ法) による水素分析
- ⑤浸漬時間に対して定常値となる分析値 H_E の決定

(1) 腐食溶液

腐食溶液は、 0.5mol NaCl 溶液と HCl 溶液とを用い pH 調整して、pH1、pH2、pH3 の溶液を液温 30°C で準備した。ガイドラインでは、pH2 の腐食溶液が規定されているが、本共同研究では、さらに厳しい条件での結果や、pH に対する試験結果の感度を確認する目的で、pH2 を含む範囲で腐食溶液を準備した。

(2) 浸漬試験

浸漬試験による水素チャージは、浸漬溶液 500cc あたり試験片 3 本を浸漬した。溶液の pH は腐食進行等の影響を受け変化するため、1 日 1 回の溶液交換を行った。浸漬時間は、**図 3.4.1** に示す③、④、⑤の手順を繰り返し行い、水素分析値が一定 (飽和) となる時間が必要である。水素が飽和となる浸漬時間は、材質と試験片の径 (ϕ) に依存する。本共同研究では、これまでの実績や**図 3.4.2** に示した拡散係数の異なる試験片に関する理論計算した浸漬時間と H/H_{sat} ($H_E = H_{\text{sat}}$) の関係を勘案して、いずれの試験片 S10T、S11T、S14T、F12T についても 96 時間とした。

(3) 水素分析

水素分析は、ガイドラインの手順に従って行った。浸漬試験後の試験片の表面には錆び等が付着しているため、事前にサンドペーパー等を用いてこれを除去し、アセトンで超音波洗浄し、大気乾燥させた。水素分析開始までに時間を要する場合は、試験片内の水素の放出を防ぐため、液体窒素の容器に冷凍保存した。

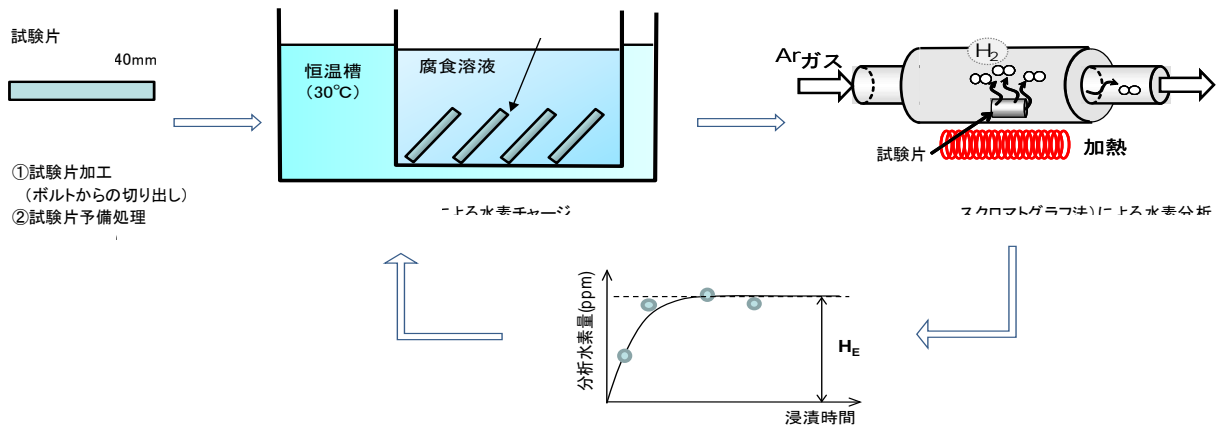


図 3.4.1 侵入水素量 H_E の評価手順 (概要)

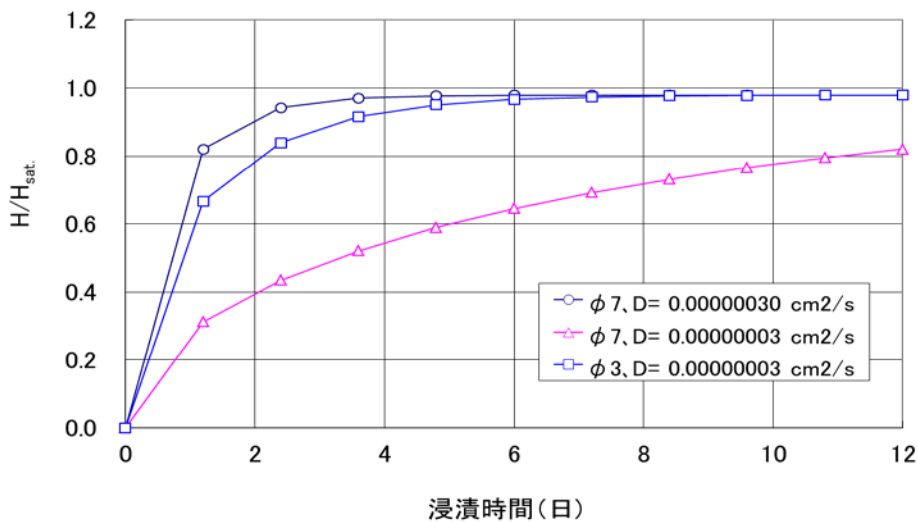


図 3.4.2 浸漬時間と H/H_{sat} . (H_{sat} : 飽和水素量)

3.4.3 試験結果

侵入水素量 H_E の測定値と表 3.3.1 の限界拡散性水素量 H_c を整理した結果を表 3.4.1 に示す。表中の<印は、 H_E の測定値が表中に示した値以下であったことを示す。F12T (子番 3) の pH1 の条件では、216 時間後の時点で試験片を回収したが、腐食が過度に進行し重量が少なく、ガスクロマトグラフ法での測定が不可能であった。

各材料に関する侵入水素量 H_E と腐食溶液 pH との関係、図 3.4.3 から図 3.4.6 に示す。S10T の H_E は、pH3 で 0.01ppm 以下、pH2 で 0.01ppm、pH1 で 0.095ppm となり、pH の低下に伴い H_E は急増する傾向にある。この傾向は、S11T でもほぼ同じ傾向を示している。S14T の H_E は、pH3 で 1.81ppm、pH2 で 1.97ppm、pH1 で 2.65ppm と漸増傾向にある。F12T の H_E は、pH1 では腐食残量が少なく分析値がないが、pH3 で 1.12ppm、pH2 で 2.50ppm と急増傾向となった。浸漬溶液温として 30°C に加え、40°C も行っているが大きな差は見られない。

表 3. 4. 1 侵入水素量 H_E と限界拡散性水素量 H_C の測定結果

材料(n)	子番	腐食溶液			浸漬時間 (hr.)	水素分析 昇温速度 (°C/hr.)	拡散性水素量 積分範囲	H_E (ppm)	H_C (ppm)	H_E/H_C
		溶液	pH	温度 (°C)						
S10T(1)	1	3%NaCl	1	30	96	200	RT~200°C	0.095	0.4 (0.10R)	0.24
S10T(1)	2	3%NaCl	2	30						
S10T(1)	3	3%NaCl	3	30						
S10T(1)	4	3%NaCl	2	40						
S10T(1)	5	3%NaCl	2	30						
S10T(1)	6	3%NaCl	2	30						
S10T(1)	6	3%NaCl	2	30	48					
S11T(1)	1	3%NaCl	1	30	96	200	RT~200°C	0.07	0.1 (0.10R)	0.70
S11T(1)	2	3%NaCl	2	30						
S11T(1)	3	3%NaCl	3	30						
S11T(1)	4	3%NaCl	2	40						
S11T(1)	5	3%NaCl	2	30						
S11T(1)	6	3%NaCl	2	30						
S11T(1)	6	3%NaCl	2	30	48					
S14T(3)	1	3%NaCl	1	30	96	200	RT~300°C	2.65	3.2 (0.10R)	0.83
S14T(3)	2	3%NaCl	2	30						
S14T(3)	3	3%NaCl	3	30						
S14T(3)	4	3%NaCl	2	40						
S14T(3)	5	3%NaCl	2	30						
S14T(3)	6	3%NaCl	2	30						
S14T(3)	6	3%NaCl	2	30	216					
F12T(3)	3	3%NaCl	1	30	216で中断	200	RT~300°C	-	4.0 (0.10R)	-
F12T(3)	1	3%NaCl	2	30	168					
F12T(3)	2	3%NaCl	2	30	288					
F12T(3)	4	3%NaCl	3	30	288					

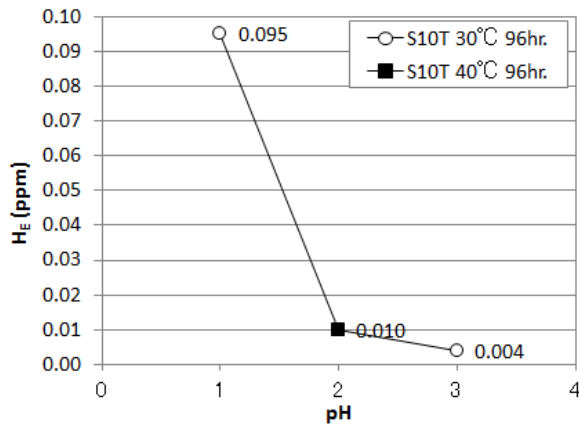


図 3. 4. 3 S10T の侵入水素量 H_E

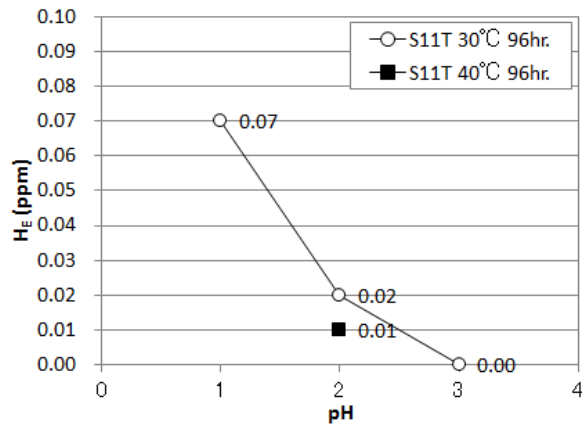


図 3. 4. 4 S11T の侵入水素量 H_E

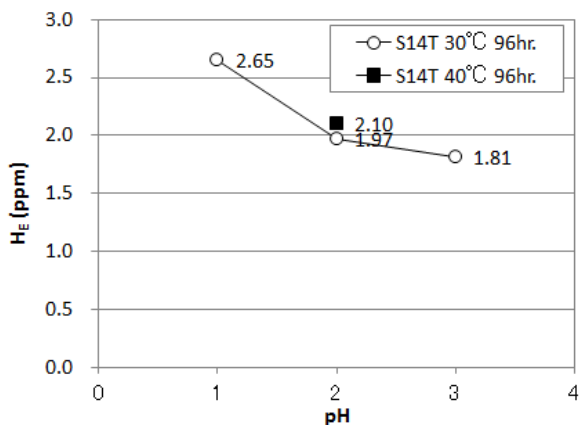


図 3. 4. 5 S14T の侵入水素量 H_E

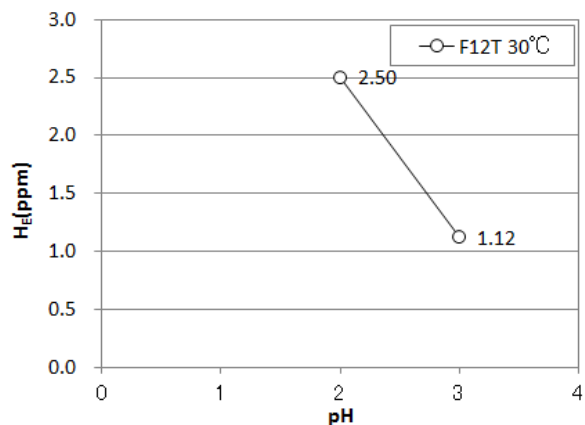


図 3. 4. 6 F12T の侵入水素量 H_E

3.5 耐遅れ破壊特性の評価

実際のボルトの耐遅れ破壊特性は、材料性能とねじ形状の効果が複合した特性となる。以下では、材料性能とねじ形状に着目し、各々の材料の耐遅れ破壊特性の評価を示す。

3.5.1 材料性能の違いによる評価

切欠き先端の半径が 0.1R の条件の定荷重試験から得た限界拡散性水素量 H_c と侵入水素量 H_E から算出した安全指標 H_E/H_c の値を表 3.5.1 に示している。各材料について、腐食溶液の pH と安全指標 H_E/H_c の関係を図 3.5.1 から図 3.5.4 に示す。

最も厳しい pH1 で H_E/H_c を比較すると、S10T、S11T、S14T は、それぞれ 0.24、0.70、0.83 であった。いずれも 1.0 よりも小さく、遅れ破壊に対して余裕がある材料であると判断される。F12T では pH1 の値は無いが、pH2 で H_E/H_c を比較すれば 0.63 であり、S14T の 0.62 とほぼ同じであるから遅れ破壊に対して同程度余裕があると判断される。また、pH3 では 0.28 であり、S14T の 0.57 よりも小さいので S14T に比べれば相対的に遅れ破壊に対して余裕がある材料であると判断できる。S10T の H_E/H_c は、いずれの pH であっても他の試験片と比較して小さく、S11T や S14T に比べると耐遅れ破壊性能に優れた材料と判断される。

S11T は、過去に遅れ破壊で問題となった F11T の模擬を意図して引張強さ $1250\text{N}/\text{mm}^2$ を目標値として製造した比較材である。S10T に比べると H_E/H_c の値が大きいものの、ある程度の遅れ破壊に余裕がある結果となった。この理由は、過去に問題となった材料^{3.2)、3.3)} に比べ、その後の化学成分や製造方法が改善されたことに影響していると考えられる。

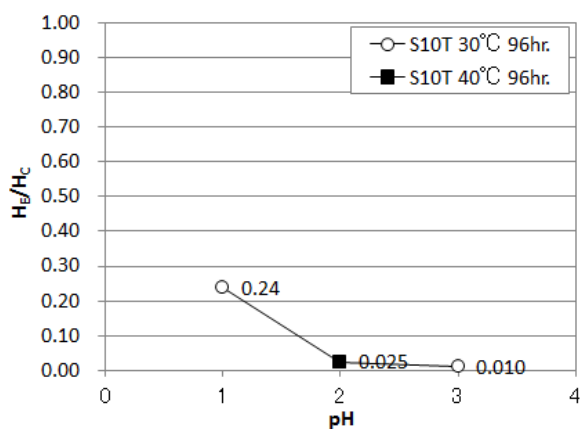


図 3.5.1 S10T (0.10R) の H_E/H_c

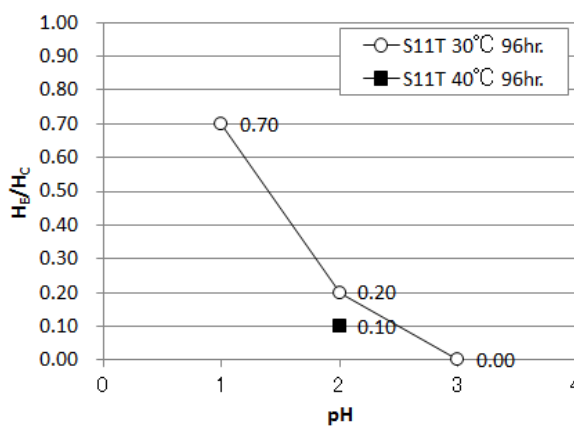


図 3.5.2 S11T (0.10R) の H_E/H_c

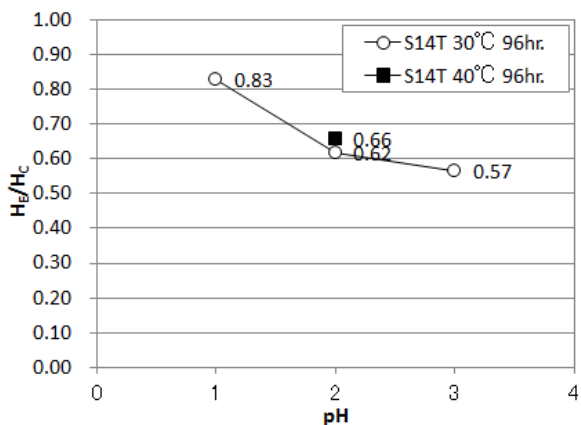


図 3.5.3 S14T (0.10R) の H_E/H_c

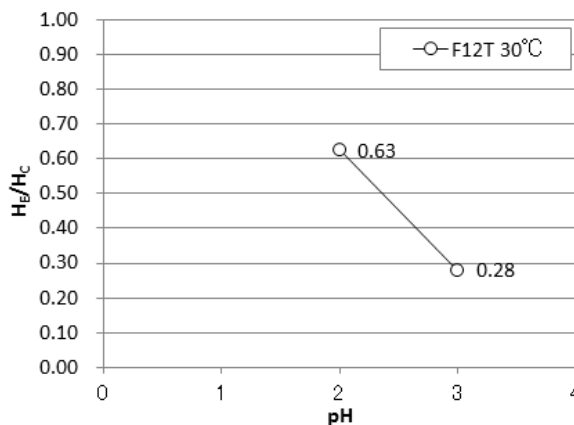


図 3.5.4 F12T (0.10R) の H_E/H_c

3.5.2 ねじ形状の違いによる評価

JIS ねじ形状のねじ谷部の形状は 0.36R、超高力ボルトねじ形状のねじ谷部の形状は特殊なダブル R 形状である。それぞれの応力状態を模擬する環状切欠き先端の半径 R は、3.6 の応力解析の結果によると前者が 0.25R で、後者が 0.41R となる。そこで、0.1R、0.25R、0.41R の環状切欠き試験片を用いた定荷重試験の限界拡散性水素量 H_c 及び H_E/H_c の値を表 3.5.1、表 3.5.2 に示す。また、このうち最も厳しい pH 条件である pH1 での測定結果を抽出し図 3.5.5、図 3.5.6 に示す。S11T の H_E/H_c は、環状切欠き先端の半径 R が 0.1R から 0.25R と大きくなるに伴い大幅に低減している。一方、S14T の場合は、0.1R、0.25R、0.41R と大きくなるに伴い緩やかではあるが低減している。したがって、耐遅れ破壊特性を改善する目的でねじ形状を改善することは有効であるが、それだけでは限界があることも予想される。

表 3.5.1 JIS ねじ形状の耐遅れ破壊特性への影響 (S11T)

材料(n)	子番	腐食溶液				H_E/H_c		
		pH	温度 (°C)	浸漬時間 (hr)	H_E (ppm)	$H_c=0.1$ (0.10R)	$H_c=0.5$ (0.25R)	-
S11T(3)	1	1	30	96	0.07	0.70	0.14	-
S11T(3)	2	2	30	96	0.02	0.20	0.04	-
S11T(3)	3	3	30	96	<0.01	<0.10	<0.02	-

表 3.5.2 超高力ボルトねじ形状の耐遅れ破壊特性への影響 (S14T)

材料(n)	子番	腐食溶液				H_E/H_c		
		pH	温度 (°C)	浸漬時間 (hr)	H_E (ppm)	$H_c=3.2$ (0.10R)	$H_c=4.0$ (0.25R)	$H_c=4.1$ (0.41R)
S14T(3)	1	1	30	96	2.65	0.83	0.66	0.65
S14T(3)	2	2	30	96	1.97	0.62	0.49	0.48
S14T(3)	3	3	30	96	1.81	0.57	0.45	0.44

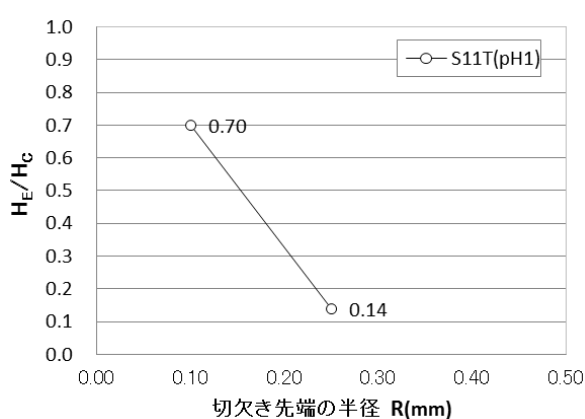


図 3.5.5 H_E/H_c と切欠き先端の半径 R (S11T)

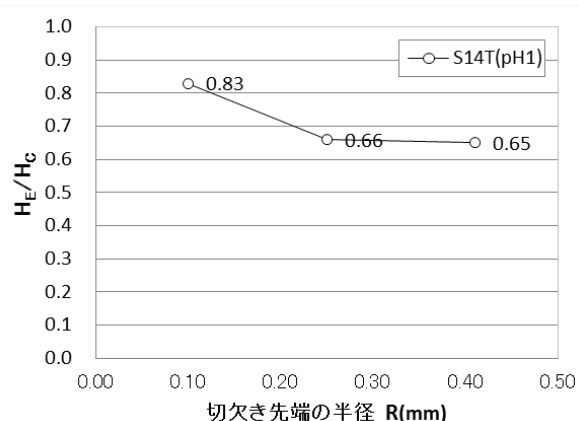


図 3.5.6 H_E/H_c と切欠き先端の半径 R (S14T)

3.6 環状切欠き試験片による実際のボルトの応力再現性

環状切欠き試験片の切欠き部の R 形状は実際のボルトねじ形状とは異なっているため、形状の違いによる局部応力の違いを、解析により検証する。

各材料の耐遅れ破壊特性の評価を行う環状切欠き試験片（環状切欠きを設けた丸棒試験片）に発生する局所応力は、日本鋼構造協会「高力ボルトの遅れ破壊評価法の開発小委員会」で詳細に検討されており、切欠き先端の半径 0.1R、0.25R、0.8R の結果は JSSC テクニカルレポート No. 91^{3,4)} に記載されている。ここでは、前記の JSSC テクニカルレポートで示された解析条件で、JIS ねじ形状及び S14T、F12T のねじ形状に発生する応力を軸対象モデルによる弾塑性解析により、公称応力 σ_N と最大主応力 σ_{max} 及び最大静水圧応力 σ_m との関係性を求め、上記の環状切欠き試験片の結果と比較した。

3.6.1 高力ボルトを模擬する環状切欠き試験片形状

実際のボルト F10T (M22) に発生する最大主応力 (実 σ_{max})、最大静水圧応力 (実 σ_m) と環状切欠き試験片 ($\phi = 10\text{mm}$, 0.25R) に発生する最大主応力 ($V\sigma_{max}$)、最大静水圧応力 ($V\sigma_m$) と、ボルト及び試験片に発生する公称応力 σ_N との関係性を数値解析結果から類推したものを図 3.6.1 に示す。両軸とも引張強さ σ_B で除した値としている。実際のボルトと試験片の σ_{max} 、 σ_m は共に標準ボルト張力 $\sigma_N / \sigma_B = 0.743$ の近傍で良好に一致している。したがって、F10T に発生する応力状態は、環状切欠き試験片 ($\phi = 10\text{mm}$, 0.25R) で模擬が可能と判断できる。

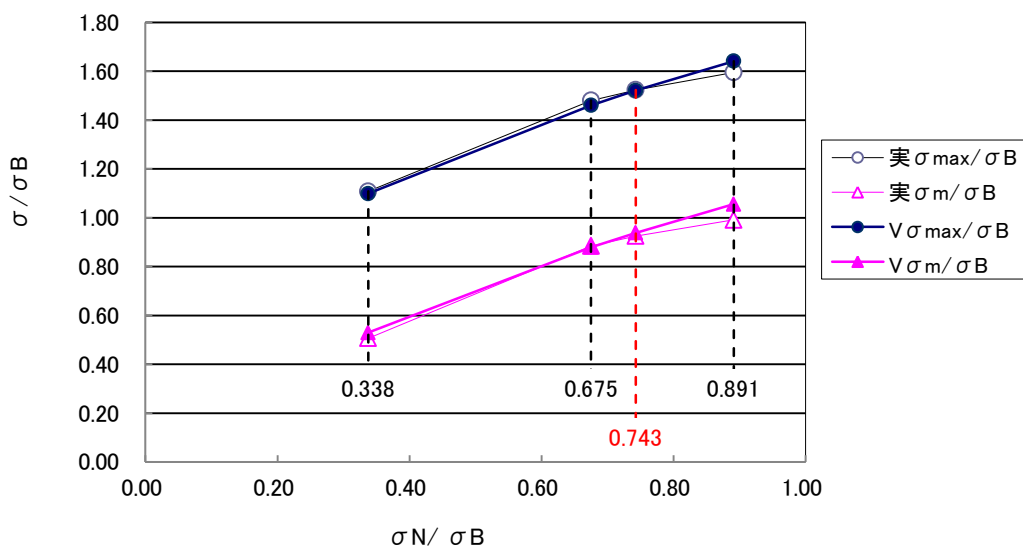


図 3.6.1 実際のボルト F10T (M22) と環状切欠き試験片の応力 (0.25R)

3.6.2 超高力ボルトを模擬する環状切欠き試験片形状

S14T (M22) の実際のボルト形状にて発生する最大主応力 (実 σ_{max})、最大静水圧応力 (実 σ_m) の計算値と環状切欠き試験片 ($\phi = 10\text{mm}$, 0.35R, 0.41R) 形状にて発生する最大主応力 ($V\sigma_{max}$)、最大静水圧応力 ($V\sigma_m$) の計算値、ボルト及び試験片に与える公称応力 σ_N の関係を図 3.6.2、図 3.6.3 に示す。両軸とも引張強さ σ_B で除した値としている。標準ボルト張力 $\sigma_N / \sigma_B = 0.743$ に対して、実際のボルトと試験片の σ_{max} に一致する環状切欠き先端の半径は 0.35R が最も近く、 σ_m に一致は 0.41R が最も近いことがわかった。 σ_{max} と σ_m を比べたとき、 σ_{max} は遅れ破壊に対する作用応力としての寄与、 σ_m は水素集積への寄与がある。したがって、S14T に発生する応力状態は、環状切欠き試験片の切欠き先端の半径を 0.35R~0.41R の範囲に設定することで模擬できると

考えられる。

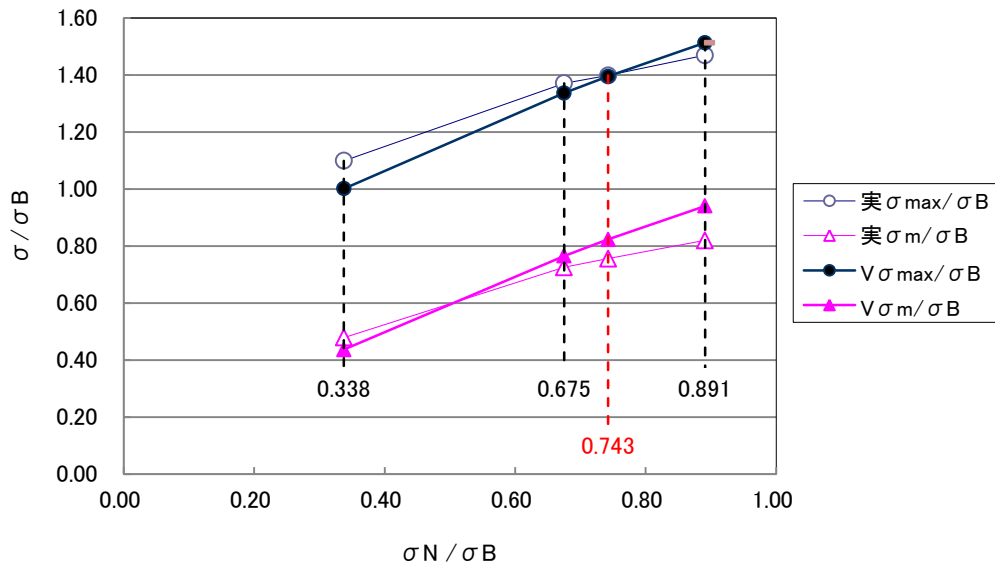


図 3. 6. 2 実際のボルト S14T (M22) と環状切欠き試験片の応力 (0.35R)

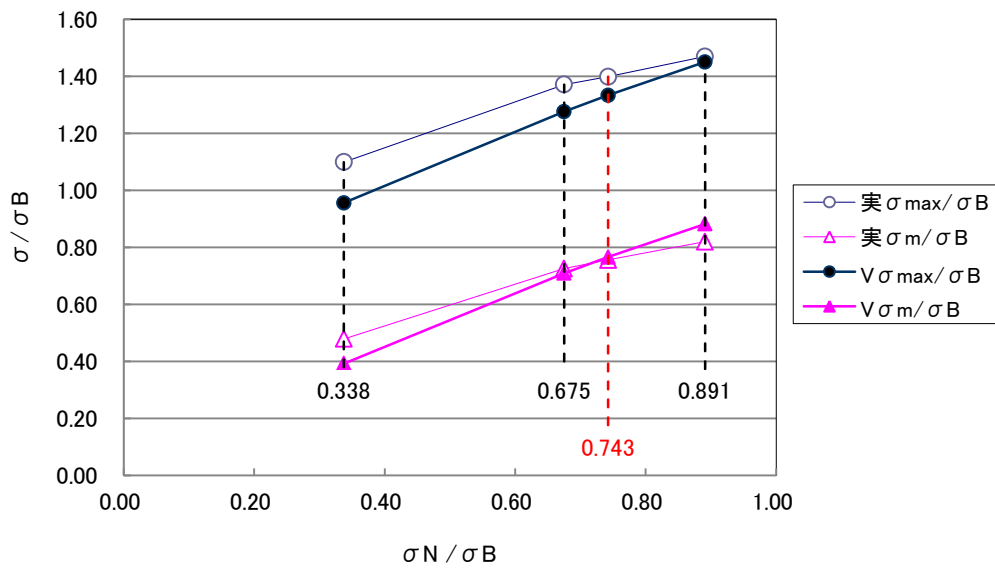


図 3. 6. 3 実際のボルト S14T (M22) と環状切欠き試験片の応力 (0.41R)

第3章 参考文献

- 3.1) (一社) 日本鋼構造協会：高力ボルトの遅れ破壊評価法ガイドライン, JSSC IV 10-2014
- 3.2) (一社) 日本橋梁建設協会：高力ボルトの遅れ破壊と対策, 2007.3
- 3.3) (一社) 日本鋼構造協会：高力ボルトの遅れ破壊, JSSC, Vol.6, No.52, 1970
- 3.4) (一社) 日本鋼構造協会：JSSC テクニカルレポート No. 91, 高力ボルトの遅れ破壊特性評価ガイドブック, 2010.7

第4章 腐食促進試験による高力ボルトの耐遅れ破壊性能の確認

高力ボルトは、添接部のボルト孔に挿入し、施工要領に従い締付けられる。そして、実際の使用環境に長期間暴露される。過去の経験や5章の腐食調査によると、その使用環境は、適切に施工され、その後も適切に維持管理が行われれば腐食も軽微であるが、実際には塗膜の劣化等により、添接部のすき間から雨水が浸入し、常にボルトが濡れている環境となり、激しい腐食となる場合もある。したがって、このような環境を模擬した遅れ破壊を行い、厳しい環境でも耐遅れ破壊性能が確保されるかどうかを確認する。

本共同研究では、実際に近い環境すなわち乾湿を繰り返す環境を想定した試験と、さらに厳しい高濃度の腐食溶液を用いて、ボルトが濡れ続けている厳しい腐食環境を想定した試験を行い、それぞれの耐遅れ破壊性能を確認する。また、腐食促進試験法の有用性についても確認する。

4.1 観覧車腐食促進試験

4.1.1 概要

本試験の基本思想である「乾湿を繰り返す環境」を簡易に模擬する方法として、**図 4.1.1** に示す装置が提案されている^{4.1), 4.2)}、本試験機の形状が観覧車に似ていることから、本試験を「観覧車腐食促進試験」、試験機の回転体を「観覧車」と呼ぶこととする。

本試験は、ボルト試験材を板厚 44mm (22mm+22mm) の被締付体に締付け、これを室内の常温で 3.5%食塩水 (海水相当) 中へ浸漬と引上げを繰り返し、乾湿を繰り返すことにより行う。試験体は観覧車に吊り下げられ、1 時間に 1 回 3.5%食塩水中に浸かるようにした。試験条件は以下に示すとおりとし、試験を行った。

- ①水槽 : 1200×1500×400=0.72m³ (常時 約 600ℓ)
3.5%食塩水 (海水相当、pH8.4) を入れる
- ②試験体数(本数) : 12×4=48 本と 8 本の計 56 本
(48 軸の内、1 軸に 2 本吊り下げたものが 8 軸あり)
- ③試験装置(観覧車) : 一定スピード (1 回転/時間) で回転し、各試験体が 10 分/時間で、浸漬するように設定
- ④観察頻度と項目 : 3 回/月の頻度で以下の項目を計測・確認
 - ・塩分濃度を計測、変動がある場合は調整
 - ・水位を計測、変動がある場合は調整
 - ・回転の有無・速度を目視により確認、異常がある場合は調整
 - ・破断の有無を目視により確認

4.1.2 試験方法

(1) 試験装置

観覧車腐食促進試験は、概要図を**図 4.1.1** に示す。

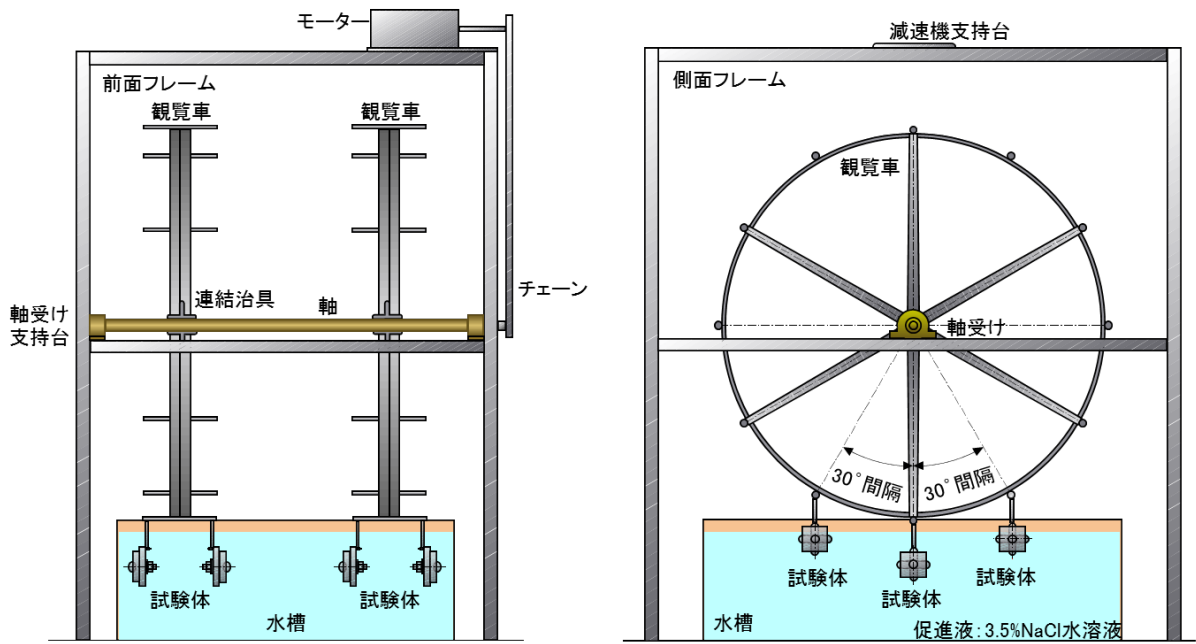


図 4.1.1 観覧車腐食促進試験装置の概要図

(2) 試験体形状

ボルト締付け後の 1 体の試験体形状を、図 4.1.2 に示す。

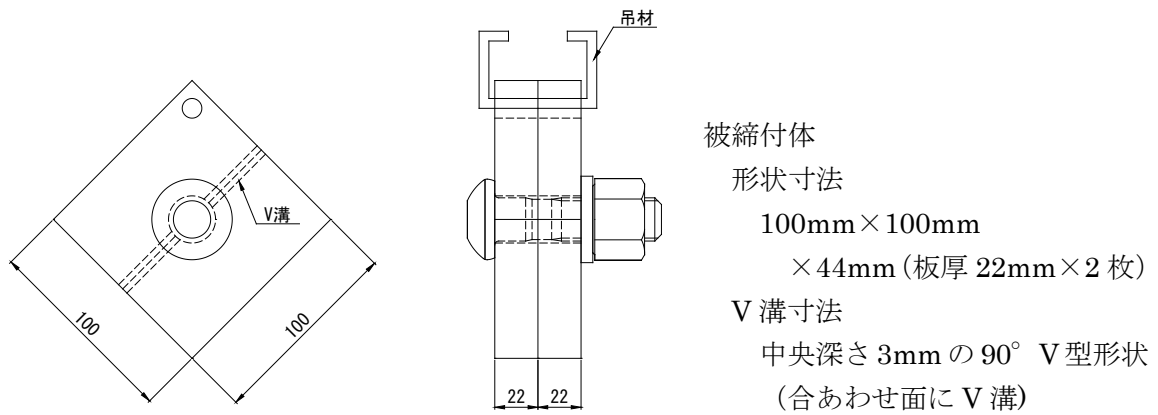


図 4.1.2 ボルト締付け後の 1 体の試験体

(3) 試験の組合せ

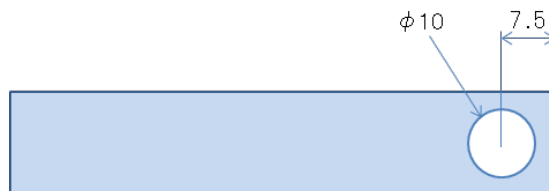
ボルト試験材の種類、本数及び被締付体の表面状態を、表 4.1.1 に示す。試験は、計 56 体（計 56 本）を実施した。

表 4.1.1 ボルト試験材の種類、本数及び被締付体の表面状態

ボルト試験材の種類	規格	試験体数	被締付体の表面状態
① S14T (防錆処理)	SHTB 22×85	8 本	V 溝有り 裸 (ブラスト処理)
② S14T (裸)	〃	〃	V 溝有り 裸 (ブラスト処理)
③ F12T (熔融亜鉛めっき処理)	12G SHTB 22×90	〃	V 溝有り 熔融亜鉛めっき処理
④ F12T (熔融亜鉛めっき処理、傷有り)	〃	〃	V 溝有り 熔融亜鉛めっき処理
⑤ S10T (裸)	M22×80	〃	V 溝有り 裸 (ブラスト処理)
⑥ S11T (裸)	〃	〃	V 溝有り 裸 (ブラスト処理)
⑦ S14T (裸)	SHTB 22×85	〃	V 溝無し 裸 (ブラスト処理)
—	—	計 56 本	—

注)

- ①、②、⑤、⑥では、①が評価すべき本仕様、②は①の防錆効果の評価のための仕様、⑤と⑥は②と対比して高力ボルトの種類の違いを評価するための仕様を示す。
- ③、④では、③が評価すべき本仕様、④は熔融亜鉛めっきに傷がある場合に発生する水素侵入の影響を評価するための仕様を示す。
- ⑦は、①～⑥が腐食促進するために被締付体に V 溝を設けたものであるのに対し、一般的な使用の場合を考え、被締付体に V 溝を設けないものを示す。
- 本試験の腐食促進の尺度とするために、モニタリング材を設置する。モニタリング材はボルト試験材（②、③、⑤、⑥）で各 8 枚を取り付ける。モニタリング材の形状を図 4.1.3 に示す。このモニタリング材の重量減による腐食量と侵入水素量を経時的に測定し、腐食促進の尺度とする。



寸法：幅15mm×長さ80mm×板厚4mm
表面仕上げ：△△△+糸面取り

図 4.1.3 モニタリング材

(4) 侵入水素量 H_E の測定部位

ボルトを取り外して、外観（腐食状況）とガスクロマトグラフ法により侵入水素量 H_E を測定する。サンプリングの時期は、0.5 年後、1 年後、2 年後、3 年後とし、それぞれで各 2 本のボルト試験材を回収する。侵入水素量 H_E の測定部位は、水素が多いと予想されるねじ先端部（使用時にナットから突出しており、腐食環境が一番厳しい部位）と遊びねじ部（使用時に応力大きく、形状的にも応力集中が大きい部位）の 2 点とした。（図 4.1.4 に示す●部）

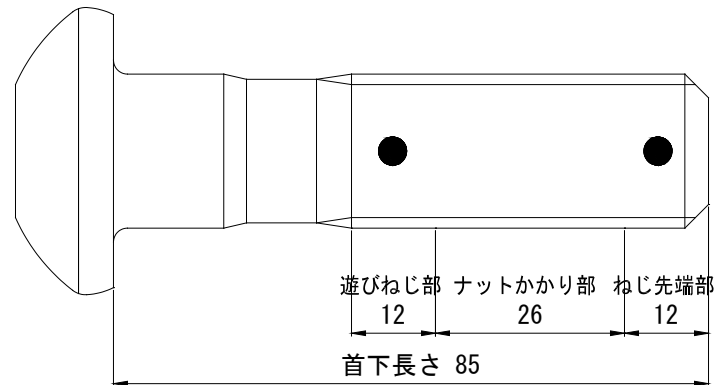
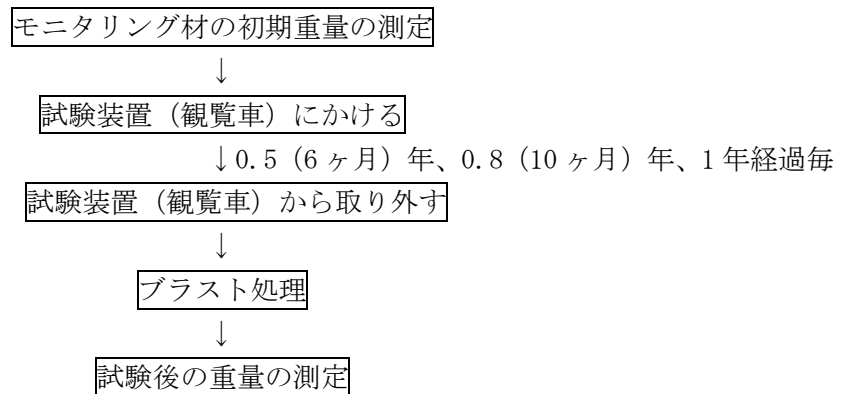


図 4.1.4 侵入水素量 H_E の測定部位

(5) 腐食量の調査

図 4.1.5 に示すように、図 4.1.3 に示すモニタリング材を試験装置（観覧車）にかけ、0.5 年（6 ヶ月）後、0.8 年（10 ヶ月）後、1 年後の腐食減量を測定し、腐食速度に換算する。



腐食減量 (g) : 初期重量－試験後の重量

腐食速度 (mm/yr) : (腐食減量 / モニタリング材表面積) / 0.00785 × (365 / 試験日数)

図 4.1.5 腐食量の調査（概要）

(6) ボルトの機械的性質及び締付け軸力

試験に使用したボルトの機械的性質及び締付け軸力を表 4.1.2 に示す。ボルトの化学成分を表 4.1.3 に示す。

表 4.1.2 ボルトの機械的性質及び締付け軸力

ボルト試験材の種類	鋼種	規格	機械的性質						締付け軸力 kN
			4号試験片				製品		
			耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	絞り %	引張荷重 kN	硬さ HRC	
①S14T (防錆処理)	SHTB	SHTB 22×85	1352	1454	16	52	463	43	357
②、⑦S14T (裸)			1352	1454	16	52	463	43	346
③F12T (溶融亜鉛めっき処理)		12G							
④F12T (溶融亜鉛めっき処理、 傷有り)		SHTB 22×90	1187	1237	18	57	390	40	330
⑤S10T (裸)	BOLTEN 110NM	M22×80	1034	1078	20	72	329	33	228
⑥S11T (裸)			1150	1257	18	68	375	39	280

注) 締付け軸力は、試験データによる軸力を示す。

表 4.1.3 ボルトの化学成分 (%)

ボルト試験材の種類	鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ti	Mo	V	B
①S14T (防錆処理) ②、⑦S14T (裸)	SHTB	0.41	0.04	0.47	0.004	0.005	1.23	0.028	—	Add	Add	—
③F12T (溶融亜鉛めっき処理) ④F12T (溶融亜鉛めっき処理、 傷有り)		0.40	0.04	0.48	0.005	0.006	1.23	0.032	—	Add	Add	—
⑤S10T (裸)	BOLTEN	0.20	0.14	0.80	0.006	0.013	0.38	0.031	0.020	—	—	0.0020
⑥S11T (裸)	110NM	0.19	0.15	0.80	0.019	0.005	0.38	0.031	0.020	—	—	0.0019

注) 化学成分は、鋼材検査証明書による。

4.1.3 試験結果

腐食促進試験は、平成24年7月31日に開始し、平成27年8月26日までの、3年と約1ヶ月間、いずれの試験体においても破断はなかった。

3.5%に設定した食塩水の濃度、水量の測定及び水温、室温は1ヶ月に3回程度を測定した。

(1) 試験状況

腐食促進試験の環境状況を図4.1.6～図4.1.8及び表4.1.4に示す。また、試験状況を写真4.1.1に示す。



図 4.1.6 観覧車腐食促進試験（食塩水濃度推移）

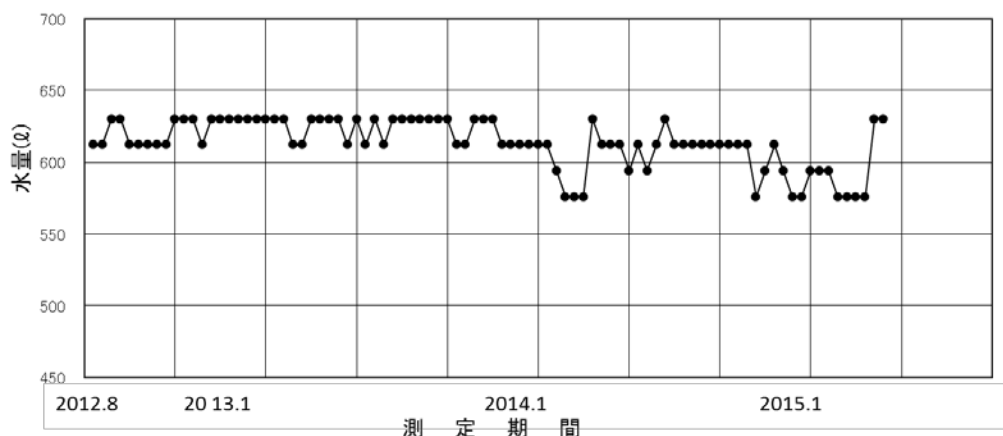


図 4.1.7 観覧車腐食促進試験（水量推移）

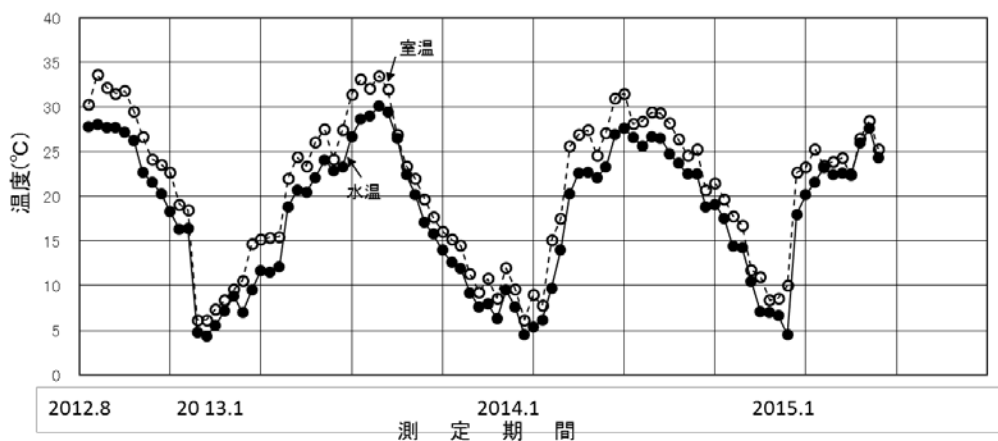


図 4.1.8 観覧車腐食促進試験（温度推移）

表 4.1.4 観覧車腐食促進試験の環境状況まとめ

食塩水濃度	3.0～3.9% (設定 3.5%)
水温	4.4～30.1℃
水位 (水量)	32～35 cm (576～630ℓ)
室温	6.2～33.6℃
観覧車回転速度	1 時間に 1 回転



(a) 正面



(b) 試験体拡大



(c) 試験体拡大

写真 4.1.1 観覧車腐食促進試験状況

(2) 侵入水素量 H_E の測定結果

腐食促進試験の開始後 6 ヶ月、1 年、2 年及び 3 年経過の侵入水素量 H_E の測定値を表 4.1.5～表 4.1.8 及び図 4.1.9、図 4.1.10 に示す。測定時には被締付体からボルトを取り外し、汚れを拭き取った。外観を写真 4.1.2～写真 4.1.7 に示す。

遊びねじ部（応力のかかる移行部からねじ部にかかる部位）の侵入水素量 H_E には、以下の特徴が見られた。

- ・S10T（裸、V 溝有り）の侵入水素量は、1 年目で 0.03ppm、2 年目で 0.00ppm、3 年目で 0.02ppm であり、極めて少ない。
- ・S11T（裸、V 溝有り）の侵入水素量は、1 年目で 0.04ppm、2 年目で 0.01ppm、3 年目で 0.01ppm であり、極めて少ない。
- ・S14T（裸、V 溝有り）の侵入水素量は、経過年数と共に増加傾向を示しているが、2 年目で 1.74ppm、3 年目で 1.79ppm と安定する傾向を示した。
- ・S14T（防錆処理、V 溝有り）の侵入水素量は、経過年数と共に増加傾向を示し、2 年目で 0.77ppm、3 年目で 0.98ppm であった。裸材に比べて侵入水素量は少なく、防錆処理の影響と考えられる。しかし、この傾向は防錆処理の効果の消失とともに、S14T（裸、V 溝有り）に徐々に漸近していくものと推定される。
- ・S14T（裸、V 溝無し）の侵入水素量は、経過年数と共に増加傾向を示し、2 年目で 0.50ppm、3 年目で 0.79ppm であった。V 溝がない場合、V 溝がある場合に比べて侵入水素量は小さくなる傾向が見られる。
- ・F12T（溶融亜鉛めっき処理、傷無し、V 溝有り）の侵入水素量は、1 年目で 1.72ppm、2 年目で 1.97ppm、3 年目で 1.98ppm であり、1 年目以降大きな変化が見られず安定していた。
- ・F12T（溶融亜鉛めっき処理、傷有り、V 溝有り）の侵入水素量は、1 年目 1.80ppm、2 年目 2.00ppm、3 年目で 2.09ppm であり、2 年目以降大きな変化が見られず安定していた。

また、ねじ先端部の侵入水素量 H_E には、以下の特徴が見られた。

- ・S10T（裸、V 溝有り）の侵入水素量は、6 ヶ月で 0.01ppm、2 年目で 0.01ppm、3 年目で 0.01ppm であり、極めて少ない。
- ・S11T（裸、V 溝有り）の侵入水素量は、6 ヶ月で 0.03ppm、3 年目で 0.01ppm であり、極めて少ない。
- ・S14T（裸、V 溝有り）の侵入水素量は、1 年目で 1.85ppm、2 年目で 2.03ppm、3 年目で 2.19ppm と 1 年目以降急増がなく安定している傾向を示した。
- ・S14T（防錆処理、V 溝有り）の侵入水素量は、経過年数と共に増加傾向を示し、1 年目で 0.23ppm、2 年目で 0.33ppm、3 年目で 1.62ppm と 3 年目で急増した。裸材に比べて侵入水素量は少なく、防錆処理の影響と考えられる。しかし、この傾向は防錆処理の効果の消失とともに、S14T（裸、V 溝有り）に徐々に漸近していくものと推定される。
- ・S14T（裸、V 溝無し）の侵入水素量は、1 年目で 2.17ppm、2 年目で 1.58ppm、3 年目で 1.88ppm とばらつきがあるものの安定している傾向を示した。V 溝がない場合、V 溝がある場合に比べて侵入水素量は小さくなる傾向が見られる。
- ・F12T（溶融亜鉛めっき処理、傷無し、V 溝有り）の侵入水素量は、1 年目で 1.91ppm、2 年目で 2.02ppm、3 年目で 2.04ppm であり、1 年目以降大きな変化が見られず安定していた。
- ・F12T（溶融亜鉛めっき処理、傷有り、V 溝有り）の侵入水素量は、1 年目で 1.83ppm、2 年目で 2.04ppm、3 年 1.96ppm であり、とばらつきがあるものの安定している傾向を示した。

表 4.1.5 6ヶ月経過の侵入水素量 H_E (ppm)

ボルト試験材の種類	遊びねじ部			ねじ先端部		
	No.1	No.2	平均	No.1	No.2	平均
① S14T (防錆処理) V溝有り	0.17	0.10	0.14	0.05	0.06	0.06
② S14T (裸) V溝有り	0.66	0.70	0.68	2.12	2.21	2.16
③ F12T (熔融亜鉛めっき処理、 傷無し) V溝有り	1.94	1.95	1.95	0.95	1.02	0.99
④ F12T (熔融亜鉛めっき処理、 傷有り) V溝有り	1.51	0.97	1.24	0.96	1.66	1.31
⑤ S10T (裸) V溝有り	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01
⑥ S11T (裸) V溝有り	0.05	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03
⑦ S14T (裸) V溝無し	0.10	0.09	0.10	1.38	2.12	1.75

表 4.1.6 1年経過の侵入水素量 H_E (ppm)

ボルト試験材の種類	遊びねじ部			ねじ先端部		
	No.1	No.2	平均	No.1	No.2	平均
① S14T (防錆処理) V溝有り	0.32	0.40	0.36	0.29	0.17	0.23
② S14T (裸) V溝有り	1.24	1.42	1.33	1.93	1.77	1.85
③ F12T (熔融亜鉛めっき処理、 傷無し) V溝有り	1.94	1.51	1.72	1.85	1.97	1.91
④ F12T (熔融亜鉛めっき処理、 傷有り) V溝有り	1.91	1.69	1.80	1.82	1.85	1.83
⑤ S10T (裸) V溝有り	0.03	0.03	0.03	—	—	—
⑥ S11T (裸) V溝有り	0.05	0.03	0.04	—	—	—
⑦ S14T (裸) V溝無し	0.31	0.24	0.27	2.12	2.21	2.17

表 4.1.7 2年経過の侵入水素量 H_E (ppm)

ボルト試験材の種類	遊びねじ部			ねじ先端部		
	No.1	No.2	平均	No.1	No.2	平均
① S14T (防錆処理) V溝有り	0.67	0.88	0.77	0.35	0.31	0.33
② S14T (裸) V溝有り	1.67	1.81	1.74	1.99	2.07	2.03
③ F12T (溶融亜鉛めっき処理、 傷無し) V溝有り	2.17	1.77	1.97	2.05	1.99	2.02
④ F12T (溶融亜鉛めっき処理、 傷有り) V溝有り	1.98	2.01	2.00	2.00	2.08	2.04
⑤ S10T (裸) V溝有り	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
⑥ S11T (裸) V溝有り	0.01	0.00	0.01	—	—	—
⑦ S14T (裸) V溝無し	0.28	0.73	0.50	1.44	1.71	1.58

表 4.1.8 3年経過の侵入水素量 H_E (ppm)

ボルト試験材の種類	遊びねじ部			ねじ先端部		
	No.1	No.2	平均	No.1	No.2	平均
① S14T (防錆処理) V溝有り	1.06	0.90	0.98	2.13	1.11	1.62
② S14T (裸) V溝有り	2.18	1.39	1.79	2.51	1.87	2.19
③ F12T (溶融亜鉛めっき処理、 傷無し) V溝有り	1.90	2.06	1.98	2.07	2.01	2.04
④ F12T (溶融亜鉛めっき処理、 傷有り) V溝有り	2.10	2.08	2.09	1.93	1.99	1.96
⑤ S10T (裸) V溝有り	0.01	0.03	0.02	0.00	0.01	0.01
⑥ S11T (裸) V溝有り	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
⑦ S14T (裸) V溝無し	0.69	0.89	0.79	1.43	2.33	1.88

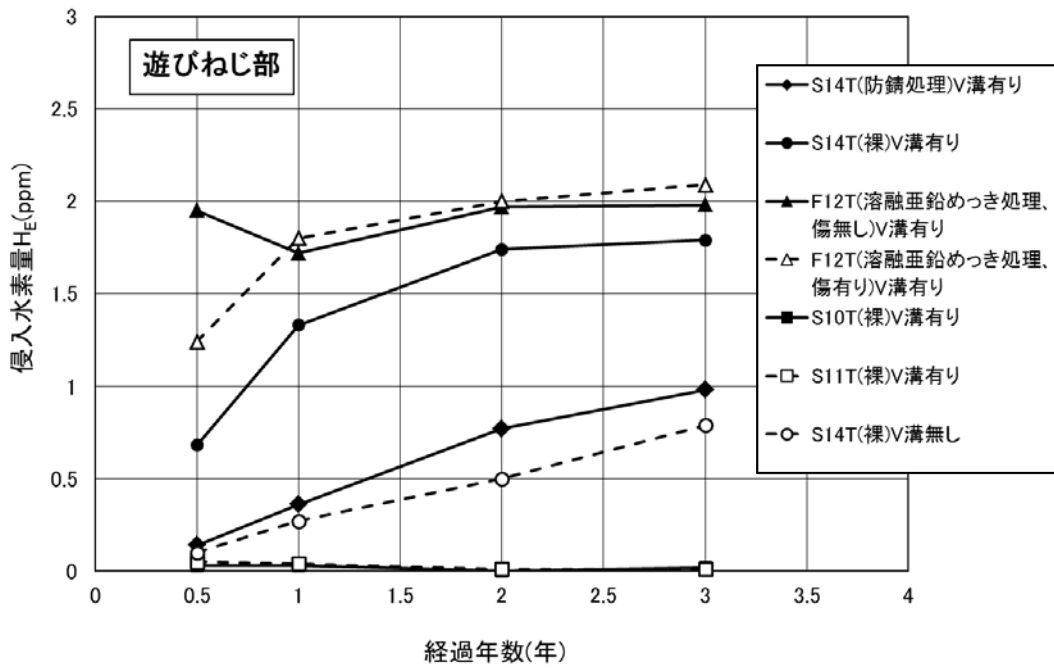


図 4.1.9 観覧車腐食促進試験の経過年数と侵入水素量 H_E (遊びねじ部)

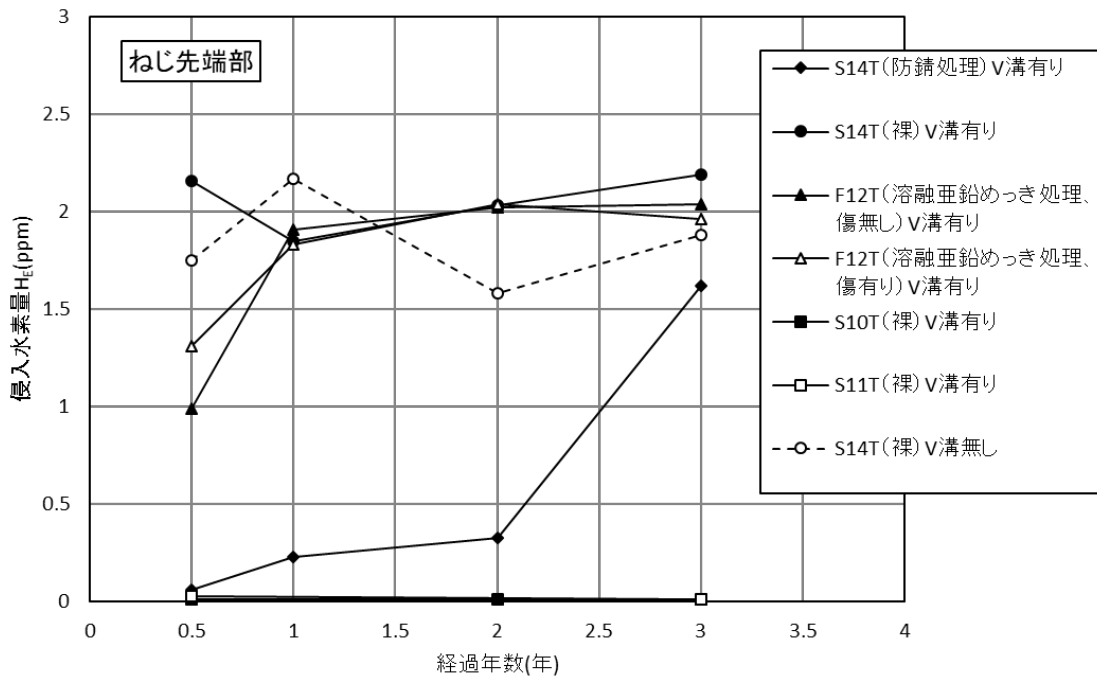


図 4.1.10 観覧車腐食促進試験の経過年数と侵入水素量 H_E (ねじ先端部)

表 4.1.9 侵入水素量 H_E と遅れ破壊の安全指標 H_E/H_C

ボルト試験材の種類	H_E (ppm)		H_C (ppm)	腐食促進試験結果 H_E/H_C		遅れ破壊試験結果 H_E/H_C
	遊びねじ部	ねじ先端部		遊びねじ部	ねじ先端部	
S10T(裸) V溝有り	0.02	0.01	0.4 (0.10R)	0.05	0.025	0.08
S11T(裸) V溝有り	0.01	0.01	0.1 (0.10R)	0.10	0.10	0.20
S14T(裸) V溝有り	1.79	2.19	3.2 (0.10R)	0.56	0.68	0.66
S14T(裸) V溝無し	0.79	1.88		0.25	0.59	
S14T(防錆処理) V溝有り	0.98	1.62		0.31	0.51	
F12T(溶融亜鉛めっき処理、傷無し) V溝有り	1.98	2.04	4.0	0.50	0.51	0.63
F12T(溶融亜鉛めっき処理、傷有り) V溝有り	2.09	1.96	(0.10R)	0.52	0.49	

注)

1. 侵入水素量 H_E は、3年経過の値を示す。
2. 限界拡散性水素量 H_C は、定荷重試験で得られた拡散性水素量と破断時間の関係から求めた値を示す。
3. 腐食促進試験結果 H_E/H_C は、上記1.、2. の侵入水素量 H_E と限界拡散性水素量 H_C により算出した値を示す。
4. 遅れ破壊試験結果 H_E/H_C は、腐食溶液 pH2 の値(最大)を示す。

表 4.1.9 に各ボルト試験材の3年目の遊びねじ部、ねじ先端部の侵入水素量 H_E と遅れ破壊の安全指標 H_E/H_C を示す。 H_E/H_C は、いずれのボルト試験材も 1.0 よりも小さい結果となり、実際に破断が観察されなかった試験結果と符合する。侵入水素量 H_E が第3章に示すボルトから切出した試験片を用いて浸漬試験(腐食溶液 pH2)を行い測定した値とほぼ同じであり、この H_E/H_C とも概ね類似する。したがってこの腐食促進試験法は、実ボルトを用いて第3章に示した耐遅れ破壊試験法と同等の評価が可能と判断される。個々には以下の特徴が見られる。

- S10T、S11T の遊びねじ部の H_E/H_C はそれぞれ 0.05、0.10 で、また、ねじ先端部の H_E/H_C はそれぞれ 0.025、0.10 で、他のボルト試験材と比較して小さい。S10T、S11T の侵入水素量 H_E は共に3年間、低い値で推移しており、3年以降の H_E/H_C に大きな変化は少ないと考えられる。
- S14T の遊びねじ部の H_E/H_C は裸材の V 溝有りで 0.56 であるが、防錆処理の V 溝有りが 0.31、裸材の V 溝無しが 0.25 となっており、また、ねじ先端部の H_E/H_C は裸材の V 溝有りで 0.68 であるが、防錆処理の V 溝有りが 0.51、裸材の V 溝無しが 0.59 となっており、 H_E の増加に対する防錆処理及び V 溝無しの抑制効果が認められる。しかし、いずれの場合も増加傾向にある。
- F12T の H_E/H_C は、本来、限界拡散性水素量 H_C の値を切欠き先端の半径が 0.41R (超高力ボルト) の結果で評価すべきところを、0.10R の結果を用いているため、厳しい側での評価となっている。しかし、遊びねじ部の H_E/H_C は溶融亜鉛めっき処理で傷無しの V 溝有りで 0.50、溶融亜鉛めっき処理で傷有りの V 溝有りで 0.52 であり、また、ねじ先端部の H_E/H_C は溶融亜鉛めっき処理で傷無しの V 溝有りで 0.51、溶融亜鉛めっき処理で傷有りの V 溝有りで 0.49 であり、この試験の範囲では、傷の有無では大差が認められない。侵入水素量 H_E は初期より遊びねじ部が 1.24~1.95、ねじ先端部が 0.99~1.31 と高い値を示し、その後 2.00 程度で安定する傾向を示しており、 H_E/H_C は 0.5 程度に収束するものと推定される。

以上の得られた結果は、いずれのボルト試験材においても H_E/H_C が 1.0 未満で、その後もこの傾向を示すことが推定される。しかし、実際に腐食促進試験を3年以上継続した場合には、ボルト試験材の全面的な腐食進行だけではなく孔食の発生進展の可能性も出てくる。その場合には H_E/H_C の値が 1.0 未満であっても遅れ破壊が生じることは十分考えられる。



(a) ①S14T (防錆処理)



(b) ②S14T (裸)



(c) ③F12T (溶融亜鉛めっき処理)



(d) ④F12T (溶融亜鉛めっき処理、傷有り)

注) 被締付体の合わせ面にV溝有り (被締付体から取り外し、汚れ拭き取り)

写真 4.1.2 観覧車腐食促進試験の1年経過後のボルト (①、②、③、④)



(a) ⑤S10T (裸)



(b) ⑥S11T (裸)



(c) ⑦S14T (裸)

- 注) 1. 被締付体 (⑤、⑥) の合わせ面に V 溝有り (被締付体から取り外し、汚れ拭き取り)
 2. 被締付体 (⑦) の合わせ面に V 溝無し (被締付体から取り外し、汚れ拭き取り)

写真 4.1.3 観覧車腐食促進試験の 1 年経過後のボルト (⑤、⑥、⑦)



(a) ①S14T (防錆処理)



(b) ②S14T (裸)



(c) ③F12T (溶融亜鉛めっき処理)



(d) ④F12T (溶融亜鉛めっき処理、傷有り)

注) 被締付体の合わせ面にV溝有り (被締付体から取り外し、汚れ拭き取り)

写真 4.1.4 観覧車腐食促進試験の2年経過後のボルト (①、②、③、④)



(a) ⑤S10T (裸)



(b) ⑥S11T (裸)



(c) ⑦S14T (裸)

- 注) 1. 被締付体 (⑤、⑥) の合わせ面に V 溝有り (被締付体から取り外し、汚れ拭き取り)
2. 被締付体 (⑦) の合わせ面に V 溝無し (被締付体から取り外し、汚れ拭き取り)

写真 4.1.5 観覧車腐食促進試験の 2 年経過後のボルト (⑤、⑥、⑦)



(a) ①S14T (防錆処理)



(b) ②S14T (裸)



(c) ③F12T (溶融亜鉛めっき処理)



(d) ④F12T (溶融亜鉛めっき処理、傷有り)

注) 被締付体の合わせ面にV溝有り (被締付体から取り外し、汚れ拭き取り)

写真 4.1.6 観覧車腐食促進試験の3年経過後のボルト (①、②、③、④)



(a) ⑤S10T (裸)



(b) ⑥S11T (裸)



(c) ⑦S14T (裸)

- 注) 1. 被締付体 (⑤、⑥) の合わせ面に V 溝有り (被締付体から取り外し、汚れ拭き取り)
 2. 被締付体 (⑦) の合わせ面に V 溝無し (被締付体から取り外し、汚れ拭き取り)

写真 4.1.7 観覧車腐食促進試験の3年経過後のボルト (⑤、⑥、⑦)

(3) 腐食量の調査結果

腐食促進試験の開始後6ヶ月(0.5年)経過、10ヶ月(0.8年)経過及び1年経過の腐食量の調査結果を表4.1.10～表4.1.12に示す。試験装置(観覧車)から取り外したモニタリング材のブラスト処理前後の外観を写真4.1.8～写真4.1.10に示す。

表4.1.10 6ヶ月(0.5年)経過の腐食量の調査結果

モニタリング材種類			試験材番号	腐食減量(g)				モニタリング材表面積 (cm ²)	試験日数 (年)	腐食速度 (mm/yr)	平均腐食速度 (mm/yr)
				初期重量:A	試験後重量:B	減量:A-B	平均減量				
1	S14T	裸	2-1	35.968	22.237	13.731	11.611	31.285	0.5	1.1182	0.9456
			2-2	35.939	26.448	9.491		31.285	0.5	0.7729	
2	F12T	熔融亜鉛めっき処理	3-1	35.895	26.948	8.947	8.190	31.285	0.5	0.7286	0.6670
			3-2	35.916	28.482	7.434		31.285	0.5	0.6054	
3	S10T	裸	5-1	35.935	27.413	8.522	8.246	31.285	0.5	0.6940	0.6715
			5-2	35.842	27.872	7.971		31.285	0.5	0.6491	
4	S11T	裸	6-1	35.947	24.484	11.463	11.253	31.285	0.5	0.9335	0.9164
			6-2	35.929	25.548	10.381		31.285	0.5	0.8454	
			6-3	35.998	23.167	12.831		31.285	0.5	1.0449	
			6-4	36.043	25.708	10.335		31.285	0.5	0.8417	

6ヶ月(0.5年)経過の腐食量 S14T ≧ S11T > S10T ≧ F12T

表4.1.11 10ヶ月(0.8年)経過の腐食量の調査結果

モニタリング材種類			試験材番号	腐食減量(g)				モニタリング材表面積 (cm ²)	試験日数 (年)	腐食速度 (mm/yr)	平均腐食速度 (mm/yr)
				初期重量:A	試験後重量:B	減量:A-B	平均減量				
1	S14T	裸	2-3	35.820	18.529	17.291	15.694	31.285	0.8	0.8801	0.7988
			2-4	35.982	21.886	14.096		31.285	0.8	0.7175	
2	F12T	熔融亜鉛めっき処理	3-5	35.928	18.181	17.747	17.819	31.285	0.8	0.9033	0.9069
			3-6	35.457	17.567	17.890		31.285	0.8	0.9106	
3	S10T	裸	5-3	35.984	23.227	12.757	12.590	31.285	0.8	0.6493	0.6408
			5-4	35.941	23.518	12.423		31.285	0.8	0.6323	
4	S11T	裸	6-5	35.978	24.187	11.791	12.044	31.285	0.8	0.6001	0.6130
			6-6	35.918	23.621	12.297		31.285	0.8	0.6259	

10ヶ月(0.8年)経過の腐食量 F12T > S14T > S10T > S11T

表4.1.12 1年経過の腐食量の調査結果

モニタリング材種類			試験材番号	腐食減量(g)				モニタリング材表面積 (cm ²)	試験日数 (年)	腐食速度 (mm/yr)	平均腐食速度 (mm/yr)
				初期重量:A	試験後重量:B	減量:A-B	平均減量				
1	S14T	裸	2-5	36.030	18.183	17.847	16.545	31.285	1	0.7267	0.6737
			2-6	35.913	20.012	15.901		31.285	1	0.6475	
			2-7	35.932	19.210	16.722		31.285	1	0.6809	
			2-8	35.904	20.194	15.710		31.285	1	0.6397	
2	F12T	熔融亜鉛めっき処理	3-7	35.900	20.590	15.310	16.516	31.285	1	0.6234	0.6725
			3-8	35.913	18.191	17.722		31.285	1	0.7216	
3	S10T	裸	5-5	35.949	19.846	16.103	15.826	31.285	1	0.6557	0.6444
			5-6	35.934	20.342	15.592		31.285	1	0.6349	
			5-7	35.958	19.529	16.429		31.285	1	0.6690	
			5-8	35.933	20.754	15.179		31.285	1	0.6181	
4	S11T	裸	6-7	35.977	19.479	16.499	16.846	31.285	1	0.6718	0.6860
			6-8	35.937	18.743	17.194		31.285	1	0.7001	

1年経過の腐食量 S11T > S14T ≧ F12T > S10T

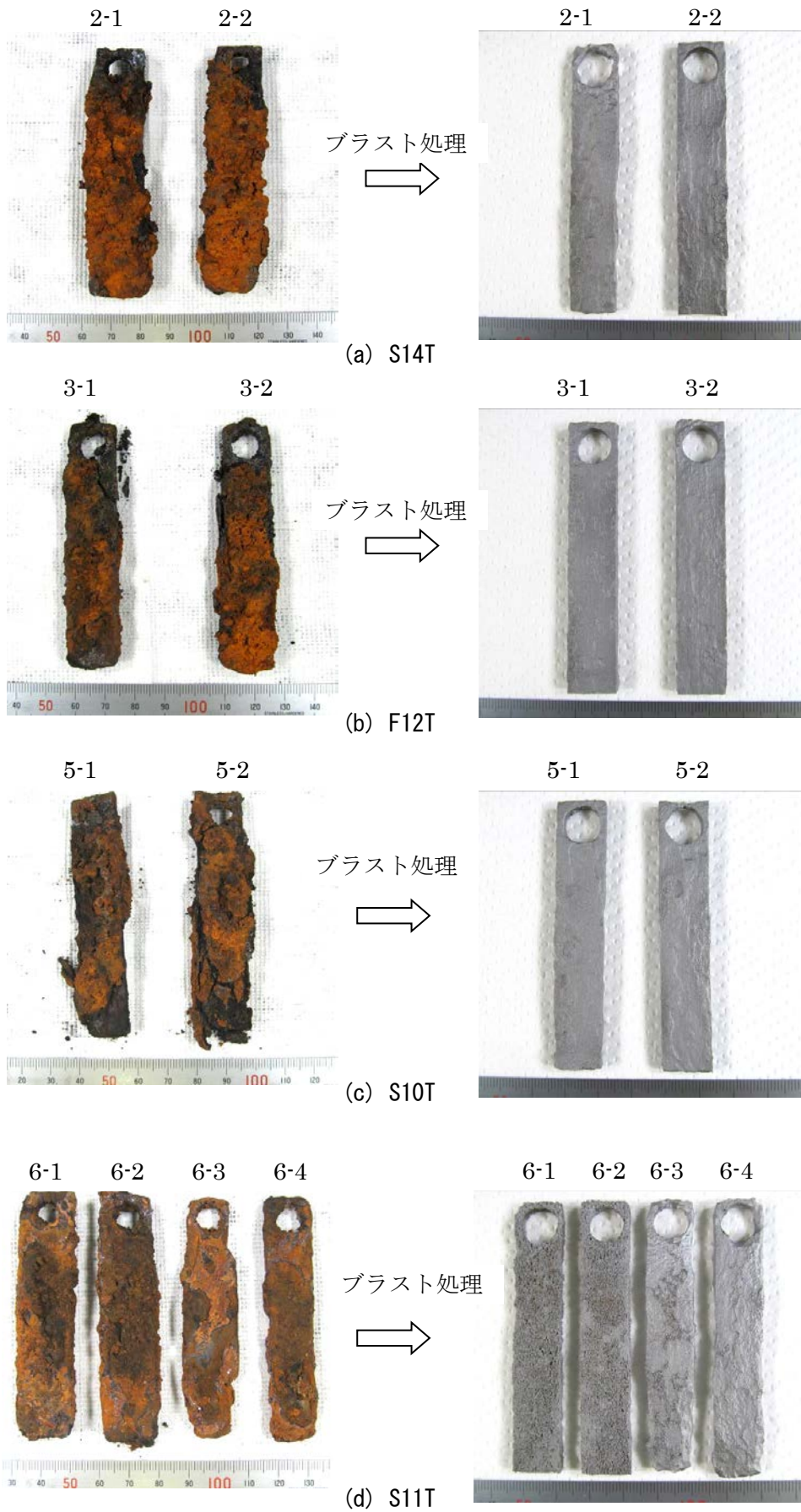


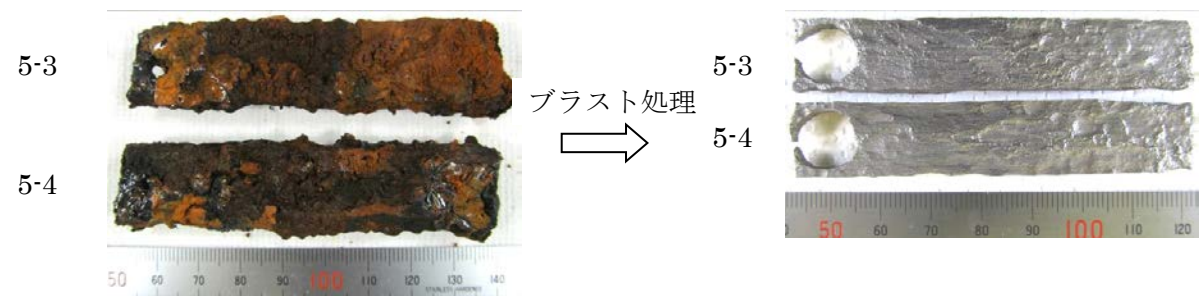
写真 4.1.8 観覧車腐食促進試験の6ヶ月（0.5年）経過後のモニタリング材



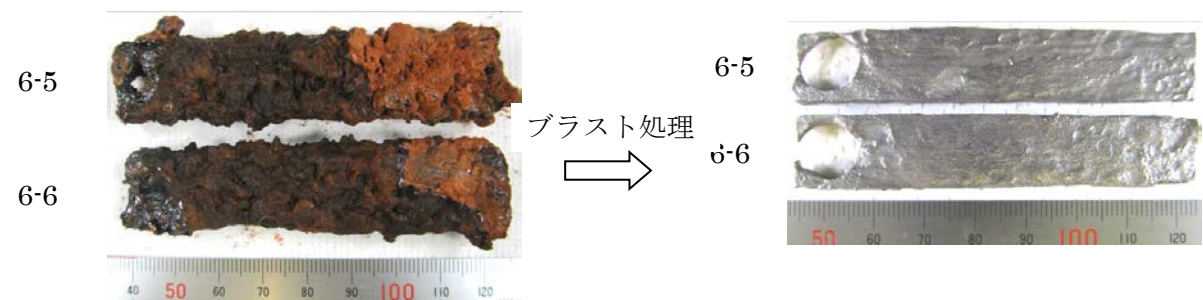
(a) S14T



(b) F12T



(c) S10T



(d) S11T

写真 4.1.9 観覧車腐食促進試験の 10 ヶ月 (0.8 年) 経過後のモニタリング材

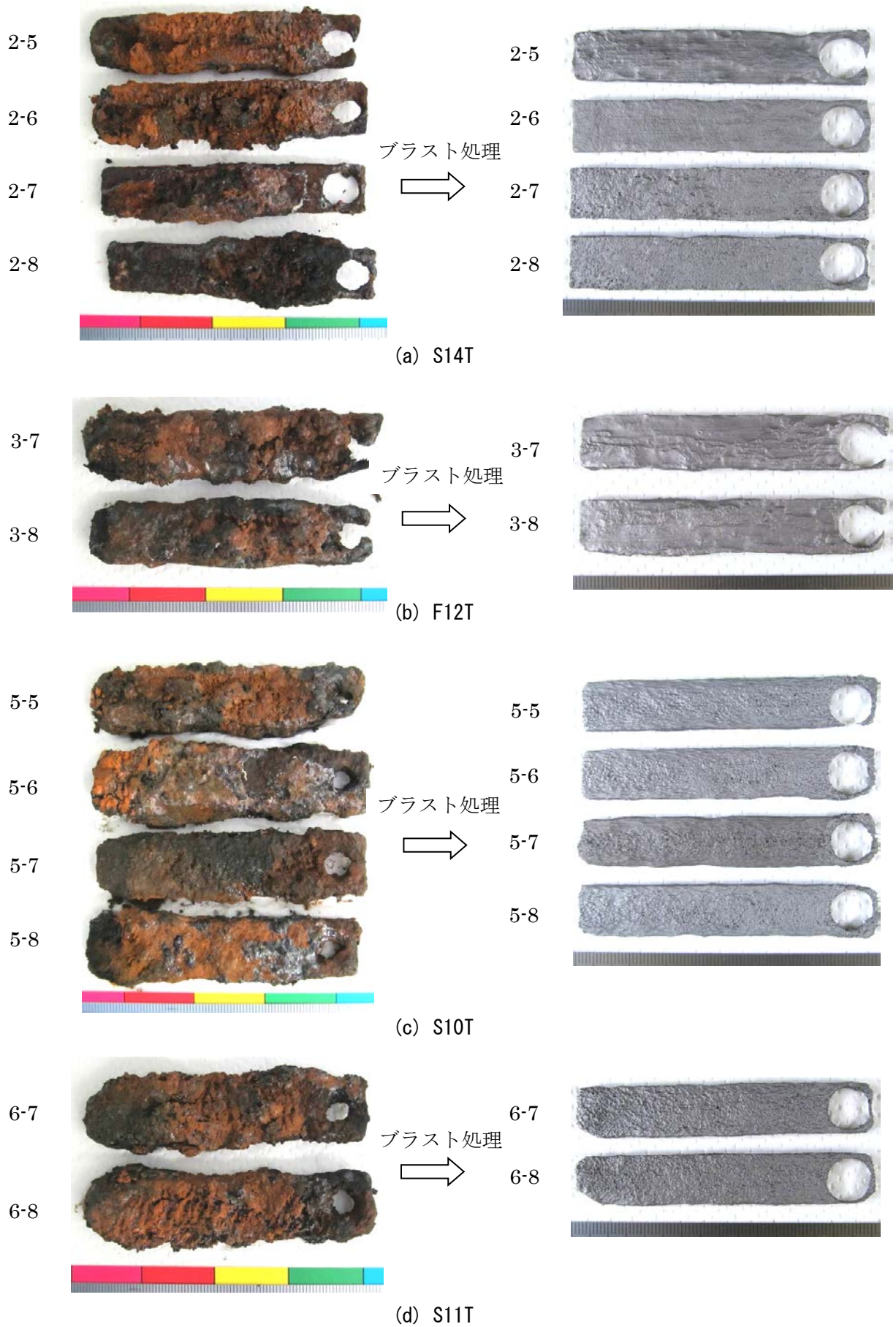


写真 4.1.10 観覧車腐食促進試験の1年経過後のモニタリング材

腐食促進試験の開始後6ヶ月(0.5年)、10ヶ月(0.8年)及び1年の腐食減量、腐食速度を
 図4.1.11、図4.1.12に示す。ボルトの種類による腐食減量(g)の差はほとんど認められず、1
 年後の腐食速度(mm/yr)は、いずれもほぼ0.7mmである。沖縄海浜地区で実施された暴露試験
 において観察された1年間の腐食量は、0.135mmの報告^{4.3)}があるので、今回の試験の腐食促進
 倍率は、暴露試験の5倍程度の促進効果があったと考えられる。

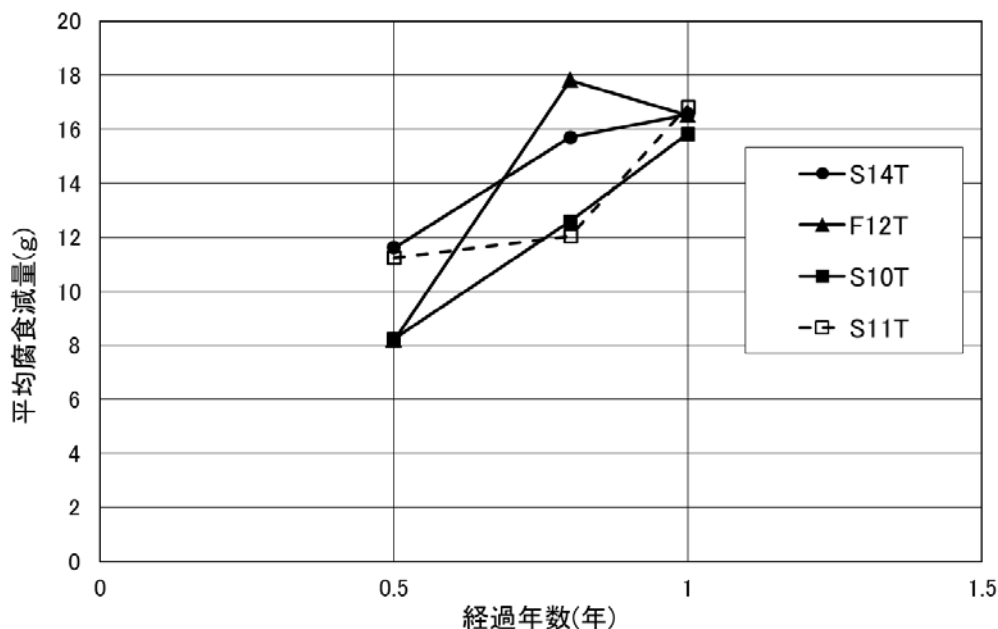


図 4. 1. 11 観覧車腐食促進試験の経過年数と腐食減量

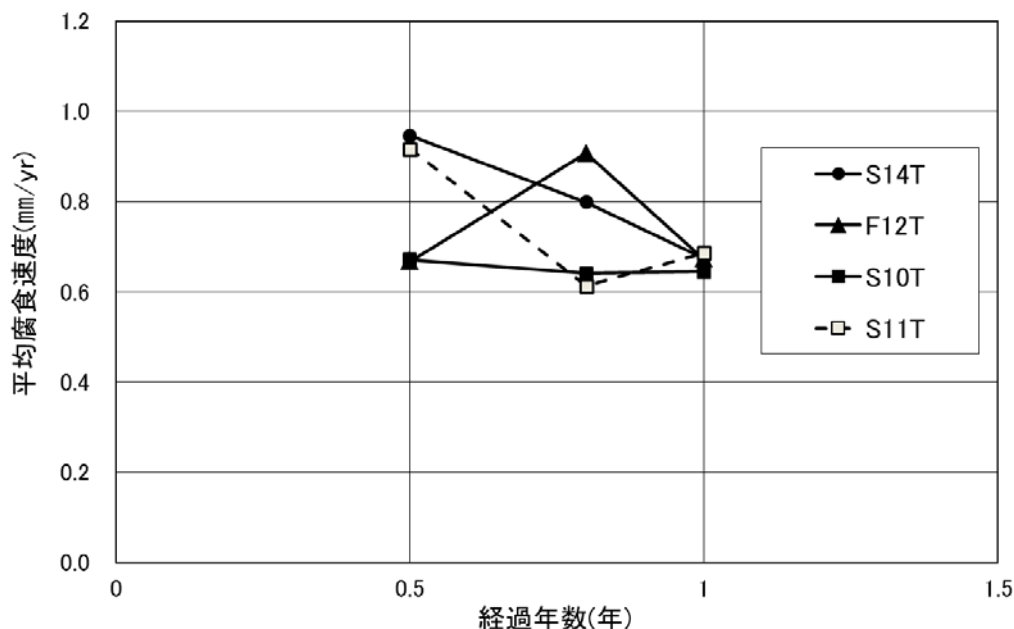


図 4. 1. 12 観覧車腐食促進試験の経過年数と腐食速度

4.2 高濃度腐食溶液による腐食促進試験

4.2.1 概要

本試験は、常にボルトが濡れている激しい腐食となる環境下を模擬して、ボルト試験材を浸漬する腐食溶液の pH をより厳しい条件で遅れ破壊特性を評価するものである。試験は、試験用に準備した 2 枚の添接板を高力ボルトにより締付け、第 3 章に記した腐食溶液^{4.3)}を添接板内に注ぎ、高力ボルトが常時浸漬した状態として、一定時間放置し、遅れ破壊発生（破断）の有無の確認を行うことにより行った。

4.2.2 試験方法

腐食促進試験（遅れ破壊試験）の作業フローを図 4.2.1 に示す。

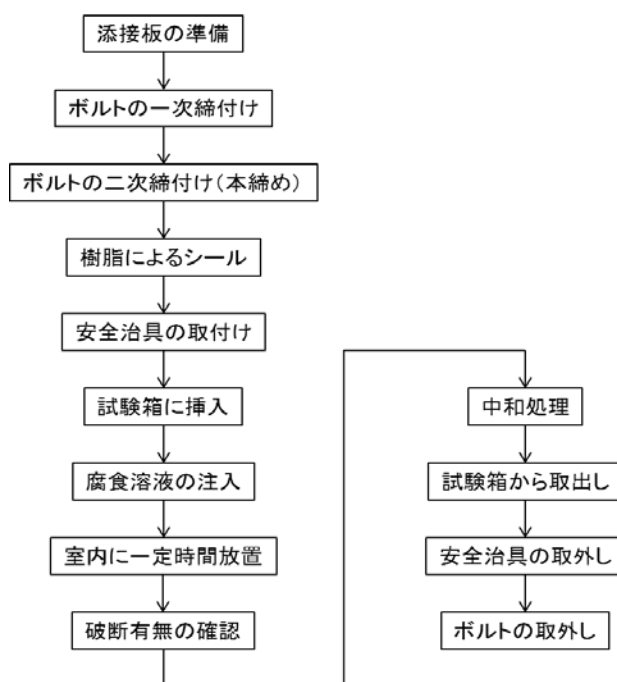


図 4.2.1 腐食促進試験（遅れ破壊試験）の作業フロー

(1) 添接板の準備

図 4.2.2 に示すように、2 枚の添接板を準備する。添接板は、 $\phi 27$ のボルト孔のある形状寸法 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 、板厚 22mm で、その合わせ面には $\phi 10$ の腐食溶液注入孔を設ける。

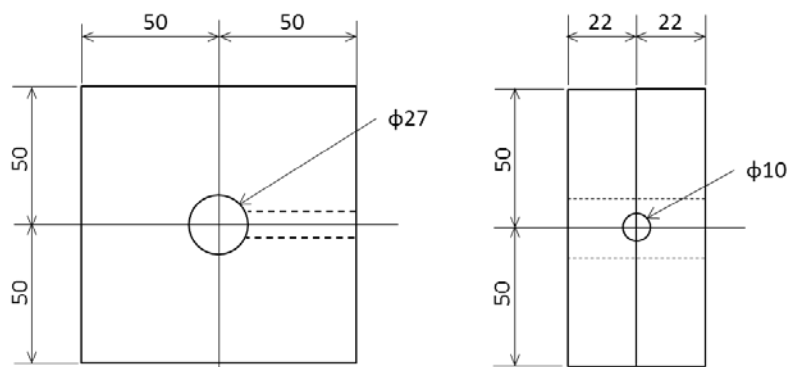


図 4.2.2 添接板

(2) ボルトの締付け

試験に用いる高力ボルトは、ナットかかり部から頭部までの軸部を予めアセトンで脱脂しておく。添接板を合わせ、中央にあるφ27のボルト孔に高力ボルトを挿入し、締付けボルト軸力を確保して締付ける。

(3) 樹脂によるシール

ボルト頭部、ワッシャー部、ナット部のすき間から腐食溶液が漏れないようにシリコン樹脂等でシールする。

(4) 安全治具の取り付け

試験中にボルトの破断が生じる可能性があるため、安全のために図4.2.3に示す安全治具にて試験体の周囲を覆い、固定ボルトで治具を固定する。

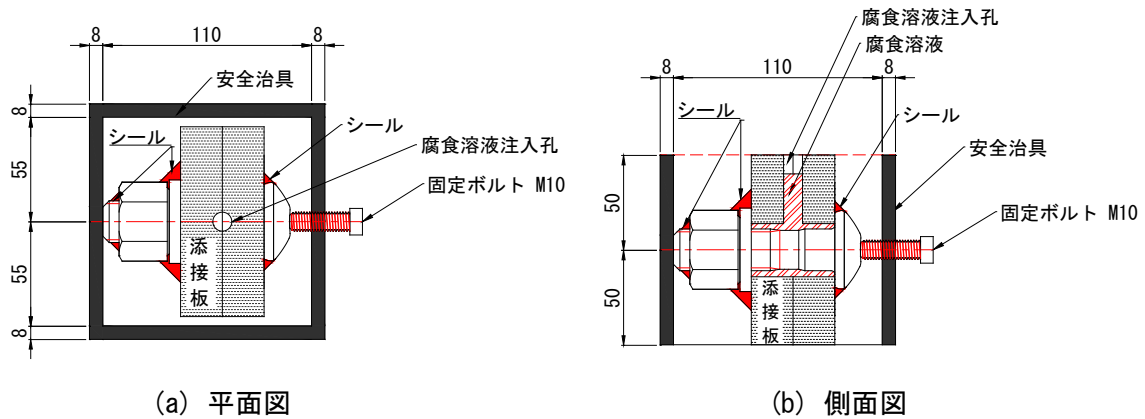


図 4.2.3 安全治具

(5) 試験箱に挿入

図4.2.4に示すように、安全治具を取り付けた試験体を鋼製の試験箱に挿入する。

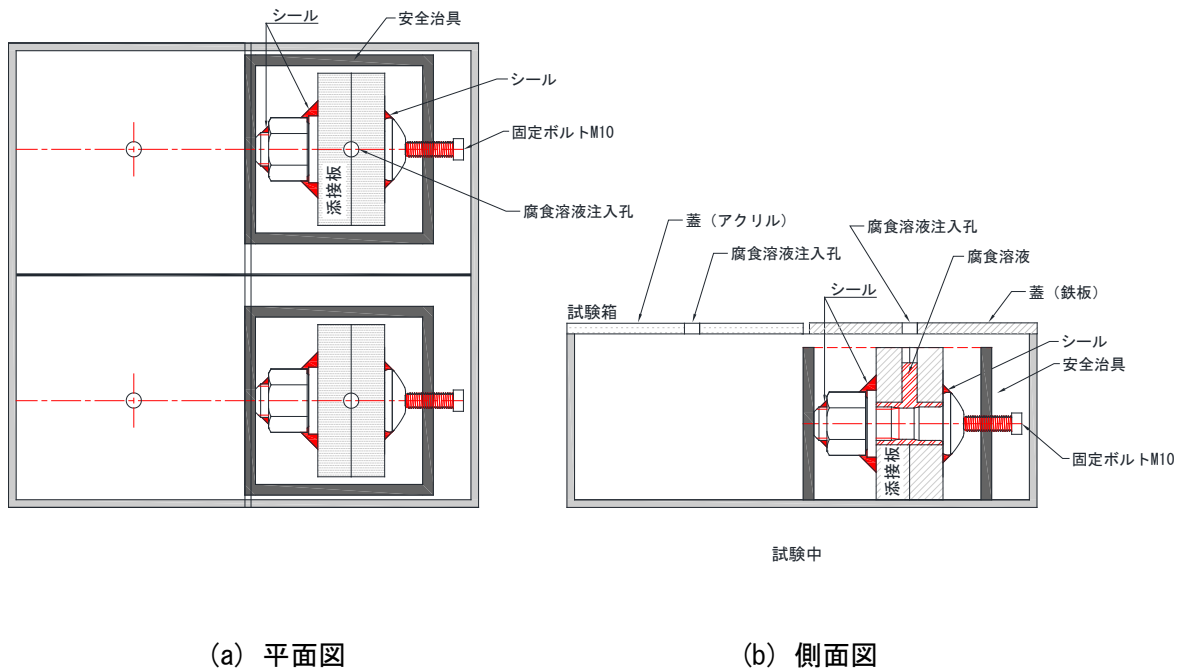


図 4.2.4 試験箱に挿入状況

(6) 腐食溶液の注入

添接板の側面のφ10の孔から、第3章の結果で一番厳しい腐食溶液（pH1、室温）^{4.3)}を腐食溶液注入孔がいっぱいになるまで注入する

(7) 室内に一定時間放置

室内に放置し、遅れ破壊発生の有無を観察する。放置は、腐食溶液中の水素がボルト軸部に侵入し、ねじ底から約200μm内側にある最大応力部まで達する時間以上行う必要があり、各材料の拡散係数を用いた拡散計算により決定する。例えば、S10Tでは2日程度、S14Tでは4日程度以上がおよその目安となる。腐食溶液は時間経過とともに劣化しpHは上昇傾向となる。そのため、定期的な交換が必要となる。例えば、交換は1日1回以上が目安となる。

(8) 破断有無の確認

試験箱の開口部から目視でボルトの破断の有無を確認する。

(9) 中和処理

試験箱の開口部からスポイトや注射器などを用いて、適当な濃度のNaOH水溶液を腐食溶液中に注入、散布して中和処理を行う。

(10) 試験箱からの取り出し

ボルトの破断が試験体の取り出し中に発生する可能性もあるため、作業には注意を要する。取り出して、水洗い後、内部を十分に乾燥させる。

(11) 安全治具の取り外し

ボルトの破断に十分に注意しながら固定ボルトを緩め、安全治具を取り外す。

(12) ボルトの取り外し

添接板を万力やアムスラーなどで固定し、レンチで高力ボルトを取り外す。

本試験のボルト試験材は、S10T、S11T、S14T、F12Tを用いた。試験条件は、S14Tのみ、ボルトの締付け軸力を標準軸力以外も考慮し、実際の施工で起こり得る以下に示す3種類の応力状態とし、試験を行った。

①標準軸力

②過大軸力（標準軸力×1.1）

③頭部曲げ（標準軸力、頭部に図4.2.5に示す3°テーパ座金を使用）

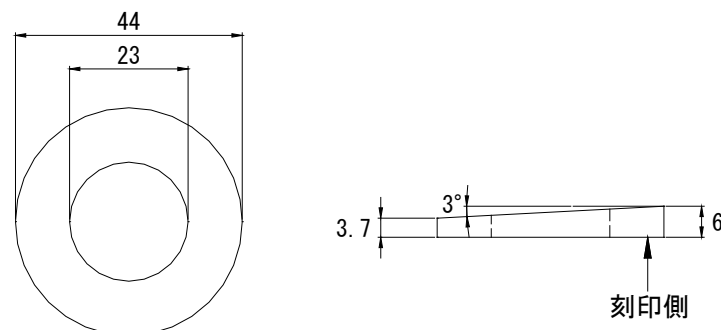


図 4.2.5 テーパー座金形状

4.2.3 試験結果

試験に用いた試験体を写真 4.2.1、安全治具を写真 4.2.2、試験箱に納めた試験体を写真 4.2.3 に、試験結果を表 4.2.1 に示す。標準軸力で締付けられた S10T、S11T、S14T、F12T のいずれの高力ボルトにおいても、1 日 1 回箱内の腐食溶液交換を行いながら、96 時間以上観察したが、遅れ破壊（破断）は見られなかった。また、過大軸力（標準軸力×1.1）、ボルト頭部に曲げを受けた状態（標準軸力）で締付けられた S14T の高力ボルトにおいても、同様に箱内で 96 時間観察したが、遅れ破壊（破断）は見られなかった。試験後のボルト外観を写真 4.2.4 に示す。試験を行ったすべての高力ボルトにおいて、表面に錆びはあるものの、遅れ破壊の破壊起点とされている孔食的な箇所は目視の範囲では見られなかった。

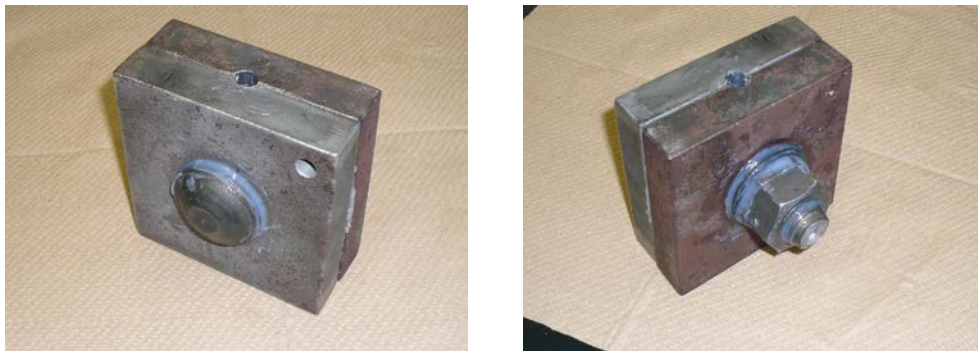


写真 4.2.1 試験体外観（シール後）

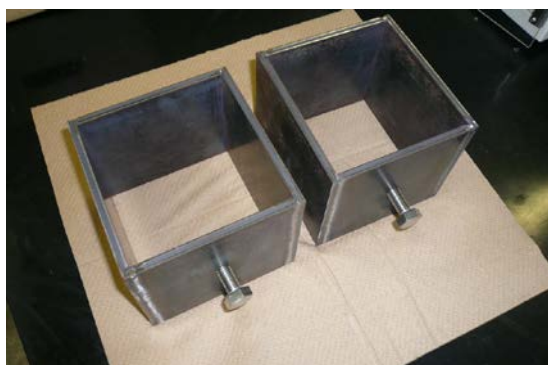


写真 4.2.2 安全治具外観



写真 4.2.3 試験箱に納めた試験体外観

表 4.2.1 高力ボルトの腐食促進試験（遅れ破壊試験）の条件と試験結果

ボルト試験材の種類	子番	腐食溶液		試験時間	締付け軸力	条件	破断有無	備考
		pH	温度(°C)					
S10T(裸)	1	1	室温	96	標準軸力		無	24時間毎に腐食溶液交換
	2	1	室温	96	標準軸力		無	24時間毎に腐食溶液交換
	3	1	室温	120	標準軸力		無	24時間毎に腐食溶液交換
S11T(裸)	1	1	室温	96	標準軸力		無	24時間毎に腐食溶液交換
	2	1	室温	96	標準軸力		無	24時間毎に腐食溶液交換
	3	1	室温	120	標準軸力		無	24時間毎に腐食溶液交換
S14T(裸)	1	1	室温	96	標準軸力		無	24時間毎に腐食溶液交換
	2	1	室温	96	標準軸力		無	24時間毎に腐食溶液交換
S14T(裸)	1	1	室温	96	過大軸力	標準軸力×1.1(30° 増し締め)	無	24時間毎に腐食溶液交換
	2	1	室温	96	過大軸力	標準軸力×1.1(30° 増し締め)	無	24時間毎に腐食溶液交換
	3	1	室温	96	過大軸力	標準軸力×1.1(30° 増し締め)	無	24時間毎に腐食溶液交換
	4	1	室温	96	過大軸力	標準軸力×1.1(30° 増し締め)	無	24時間毎に腐食溶液交換
S14T(裸)	1	1	室温	96	標準軸力	3° テーパー座金使用	無	24時間毎に腐食溶液交換
	2	1	室温	96	標準軸力	3° テーパー座金使用	無	24時間毎に腐食溶液交換
	3	1	室温	96	標準軸力	3° テーパー座金使用	無	24時間毎に腐食溶液交換
F12T (溶融亜鉛めっき処理)	1	1	室温	120	標準軸力		無	24時間毎に腐食溶液交換
	2	1	室温	120	標準軸力		無	24時間毎に腐食溶液交換
	3	1	室温	120	標準軸力		無	24時間毎に腐食溶液交換

4.2.4 試験法の改良にむけて

本試験は、常にボルトが濡れている激しい腐食となる環境下を模擬して、ボルト試験材を浸漬する腐食溶液のpHをより厳しい条件で遅れ破壊特性を評価する手法として考案したものである。今後、より精緻な試験法として改良する点としては以下が挙げられる。

(1)本試験では添接板に開けたボルト孔φ27と腐食溶液注入孔φ10の内面は、防錆処理は行わなかったため、腐食溶液が直接接触れる鋼表面積はボルト表面以外にもこれら内面積も加わった条件となった。腐食溶液量に対して、直接接触れる鋼裸表面積が多いと、腐食溶液の劣化度が大きく、条件の緩和が懸念される。したがって、ボルト孔、腐食溶液注入孔の内面、等のボルト表面以外の表面積は防錆処理を施すことが望ましい。

(2)腐食溶液の交換は1日1回としたが、交換時にpH測定を行い、腐食溶液の劣化傾向を把握し限度を定めて交換頻度を決定するとより精緻な試験となる。

(3)締結軸力が低い場合、添接板合わせ面の面圧が小さく、試験中の腐食溶液の漏洩が懸念される。そのため合わせ面周囲にも十分なシール塗布が必要となる。



写真 4.2.4 試験後のボルト外観

第4章 参考文献

- 4.1) 船見国男, 清水秀治, 恵藤元大: 高張力ボルトの遅れ破壊に及ぼす熱処理表面軟化層の影響, 圧力技術, 第22巻, 第1号, pp.16-21, 1984
- 4.2) 清水秀治, 船見国男, 恵藤元大: 高力ボルト表面の脱炭および浸炭層が遅れ破壊および疲労破壊に及ぼす影響, 材料, 第38巻, 第425号, pp.29-35, 1989.2
- 4.3) (独)建築研究所 (一社)日本鉄鋼連盟: 「先端技術による新しい鋼構造建築システムの開発」「超高力ボルトの性能評価法の開発」委員会 報告書, 2002.3

第5章 長期暴露された高力ボルトの腐食状態調査

5.1 調査概要

高力ボルトの遅れ破壊は、腐食等により発生した水素が大きく影響することが分かっている。しかし実際の高力ボルトの点検は締付状態での外観目視検査にとどまってしまう、内部の腐食状況までは把握しきれていないのが実情である。

一方、高力ボルトの耐遅れ破壊性能を評価するには、ボルト軸部の腐食状況を確認する必要があるものの、点検時にボルトをばらして内部まで観察することは現実的ではない。

そこで本章では、過去に行われた、高力ボルトを締付状態で暴露したのちにばらして内部観察した事例、および実橋のボルトをばらして点検した事例を紹介する。これらの外観と内部の腐食状況を対比することにより、点検時に腐食状況を推定する参考にすることができる。

5.2 実腐食環境に設置された暴露試験体の腐食状態調査（その1）

本事例は1990年代～2010年代に高力ボルト協会が行った暴露試験の結果を紹介している。^{5.2)}

5.2.1 暴露試験の概要

暴露試験体は、写真5.2.1に示すように本州四国連絡橋の下部工コンクリート上面に設置されていた。年代毎に暴露場所は移動されたが暴露は継続され、その経緯は以下に示すとおりである。暴露期間は通算で19年間である。

- ・1991年～ : 明石海峡大橋 1A 横
- ・1994年～ : 下津井瀬戸大橋 3P 橋脚基部
- ・2006年～2010年 : 大鳴門橋 1A

ボルト試験材は、F10Tの裸材で、その軸部は当初より腐食環境に曝す意図から海水で濡らしたガーゼが巻かれ、10本を添接板（厚膜形無機ジンクリッチペイント塗布、V溝無し）に締付けて暴露されていた。暴露状況は写真5.2.2に示すとおりで、これらから4本を抜き取り腐食状態の調査が行われた。



写真 5.2.1 暴露場所



写真 5.2.2 暴露状況

5.2.2 調査結果

調査が行われた4本の暴露ボルトの外観を**写真 5.2.3**に示す。外部環境に曝されているボルト頭、ワッシャー、ナットには全面に錆の進行がみられる。一方、ガーゼが巻かれていた軸部は、湿潤状態であったものの軽微な黒錆が確認された程度と報告されている。軸部には当初より発錆に必要となる塩化物や水分は十分に存在したものの、摩擦接合面、ボルト孔内に無期ジンクリッチペイントが塗布されていたことで、内部環境が外部環境より遮断され、長期に健全な状態が維持されたものと報告されている。

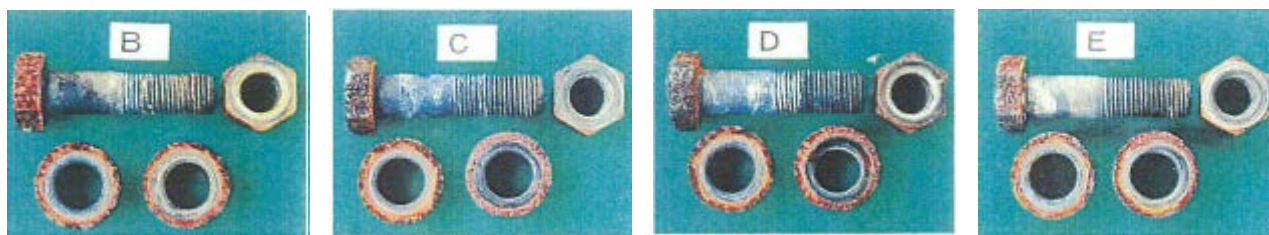


写真 5.2.3 暴露ボルトの外観

5.3 実腐食環境に設置された暴露試験体の腐食状態調査（その2）

本事例は1980年代～2010年代に本州四国連絡高速道路(株)と高力ボルト協会が行った暴露試験の結果を紹介している。^{5.3)}

5.3.1 暴露試験の概要

暴露試験体は、**写真 5.3.1**に示すように複せん断（摩擦接合）のボルト継手形状である。ボルト試験材は防錆処理したF10T（M22）で（防錆処理ボルト）、ボルト頭部を上面として架台に載せて海浜地区に暴露されていた。調査は暴露試験体3体（暴露ボルト12本）を回収し行われ、**写真 5.3.2**に回収時の暴露ボルトの外観を示す。暴露ボルトの上面及び下面は**図 5.3.1**に示す塗装仕様により防食されている。

暴露場所は一回移動されたが暴露は継続され、その経緯は以下に示すとおりである。暴露期間は通算で28年間である。

- ・1982年～ : 泉大津市臨海部（海岸から0.8km）
- ・2004年～2010年 : 大阪市住之江区緑木（海岸から2km）



写真 5.3.1 暴露状況



写真 5.3.2 暴露ボルトの外観 (左: ボルト頭部, 右: ナット部)

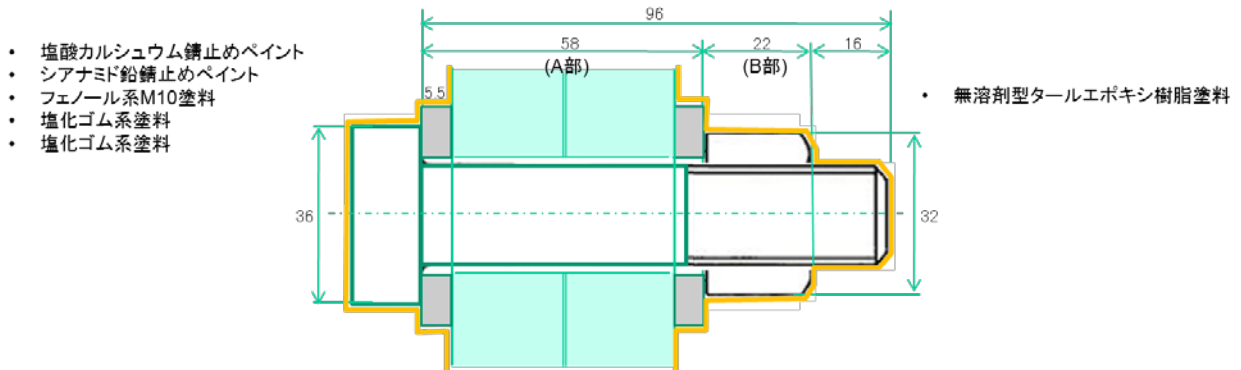


図 5.3.1 ボルトの塗装仕様

5.3.2 調査結果

回収された暴露ボルト 12 本を解体調査した結果、発錆が観察されたのは暴露ボルト No. 1、No. 2 の 2 本で、他の暴露ボルトは発錆が観られず健全であった。写真 5.3.3、写真 5.3.4 に暴露ボルト No. 1 の外観とナットかかり部 (B 部) の拡大を、写真 5.3.5、写真 5.3.6 に暴露ボルト No. 2 の外観とナットかかり部 (B 部) の拡大を示す。ボルトの塗膜を酸洗により全て除去し、鋼表面の観察を行った。しかし、茶色に見えた箇所には特に孔食や表面の凸凹は観察されなかった。茶色に見えたのはボルト孔等からの錆が付着したものと思われる。ナット部とボルト余長部の付け根付近の表面に多少の凹凸が観察された。これはタールエポキシ樹脂塗料の一部が何らかの原因で劣化し、そこから腐食因子が侵入し腐食が発生したと思われる。

写真 5.3.7 に主材と添接板の取外し後の腐食状況を示す。各ボルト孔の近くには錆は見られず、ボルトの外側には腐食がみられる、今回の試験体では当該箇所では腐食は見られなかったものの、添接板の密着性に何らかの不備があった場合に、腐食因子が添接板の合面から侵入することは十分考えられる。

以上の結果から判断すると、ボルト孔内部への腐食因子の侵入には図 5.3.2 に示す 2 つの経路があると予想できる。

- ①ボルト余長部の付け根から腐食因子が侵入
- ②添接板の摩擦接合面から腐食因子が侵入

ボルト軸部、ねじ部の腐食を防ぐためには、これらからの腐食因子の侵入を防ぐことが重要と考えられる。



写真 5. 3. 3 暴露ボルト No. 1 の外観

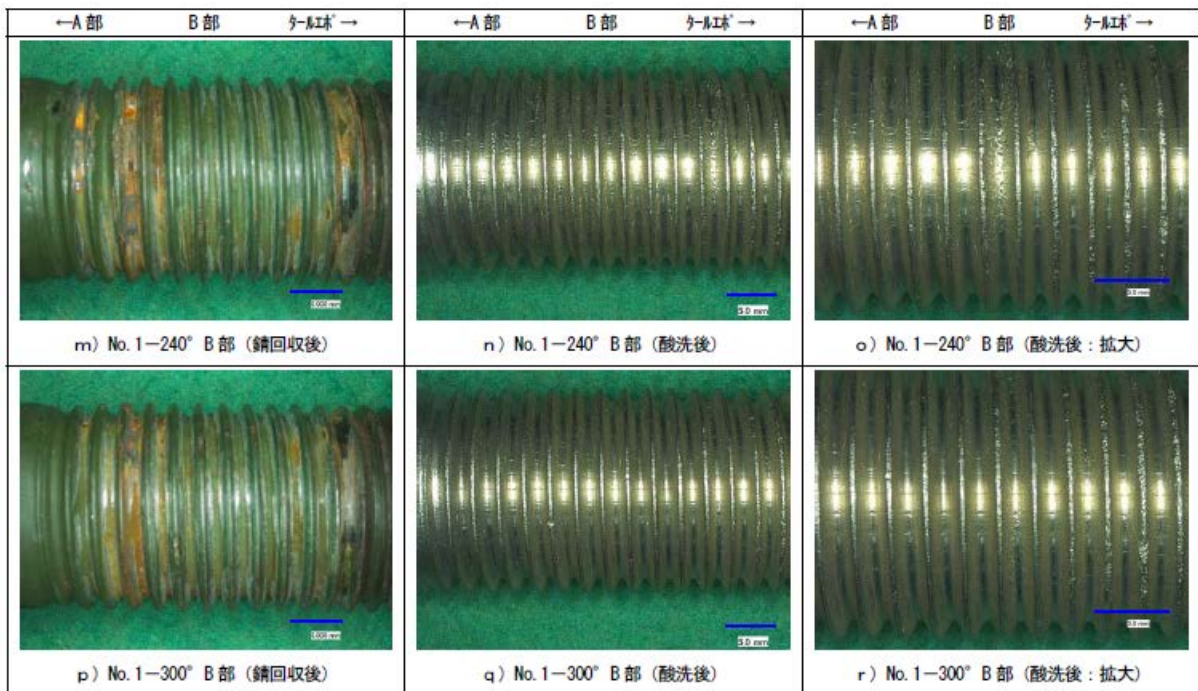


写真 5. 3. 4 暴露ボルト No. 1 のナットかかり部 (B部) の拡大



写真 5. 3. 5 暴露ボルト No. 2 の外観

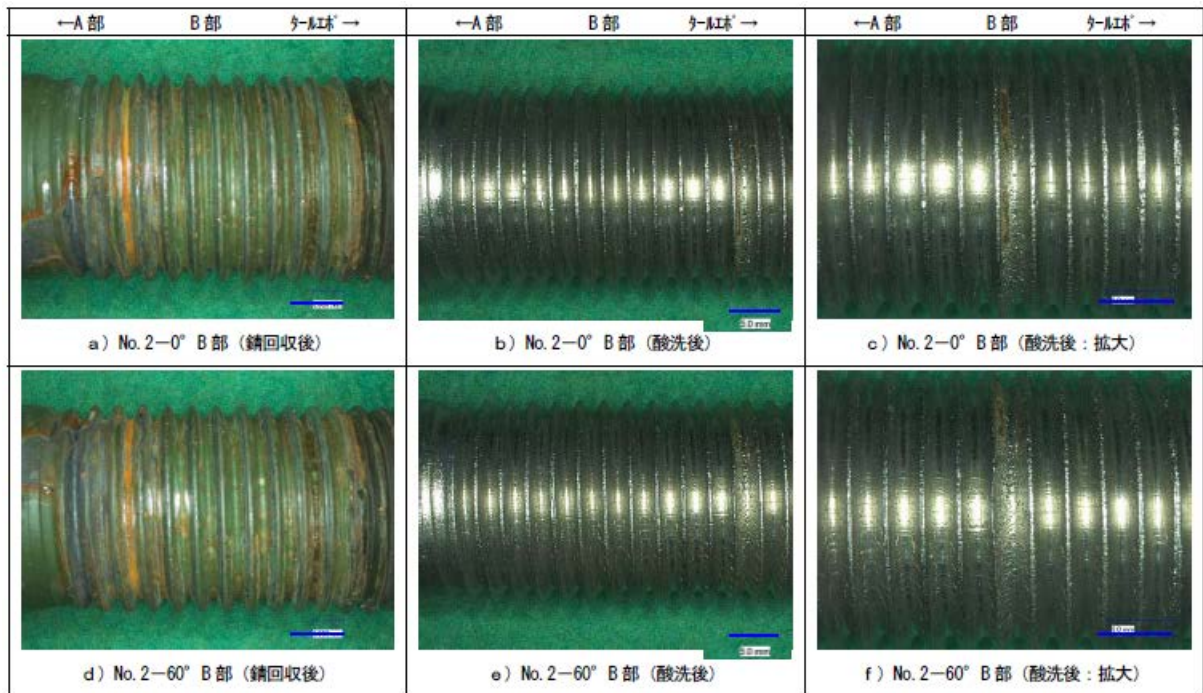
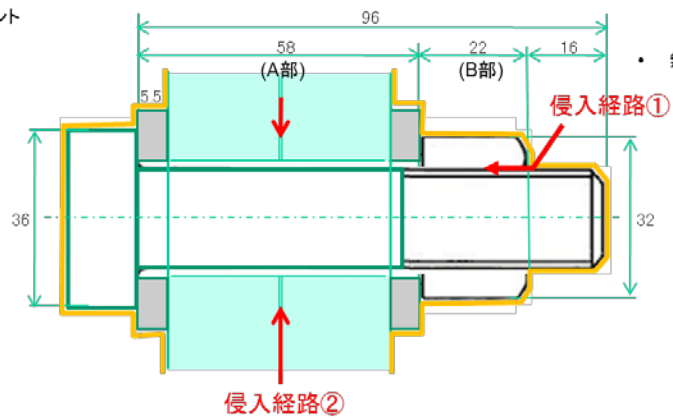


写真 5. 3. 6 暴露ボルト No. 2 のナットかかり部 (B部) の拡大



写真 5. 3. 7 主材と添接板の腐食状況

- 塩酸カルシウム錆止めペイント
- シアナミド鉛錆止めペイント
- フェノール系M10塗料
- 塩化ゴム系塗料
- 塩化ゴム系塗料



- 無溶剤型タールエポキシ樹脂塗料

図 5. 3. 2 想定される腐食因子の侵入経路

5.4 既設橋の高力ボルトの腐食状態調査

本節では、遅れ破壊の危険度を評価する観点で、ボルトの表面状態から、遅れ破壊の危険性のランク分けを想定し、そのランクとさびの面積率、海岸からの距離、経過年数との相関を考察した。

5.4.1 調査対象橋梁

調査橋梁は既設の12橋梁で、**図 5.4.1**にその架橋位置を示す（当初15橋を選定したが6、8、13番は未調査のため欠番）。供用後の経過年数は17年から49年の範囲にある。調査橋梁の様子は**表 5.4.1**に示す。さらに各橋梁の解体後の摩擦接合面又はボルト孔及びボルトの外観は**写真 5.4.1**から**写真 5.4.12**に示す。なお、これらの橋梁で遅れ破壊が発生していたとの情報はなかった。

過去の高力ボルトの暴露試験結果^{5.3)}によると、遅れ破壊の発生箇所は、首下、不完全ねじ部、ナットかかり部が一般的で、そこに発生した孔食がその破壊起点とされている。したがって、この調査ではボルト頭側及びナット側の塗装の発錆状況と軸部及びねじ部の孔食の有無に着目して調査を行った。

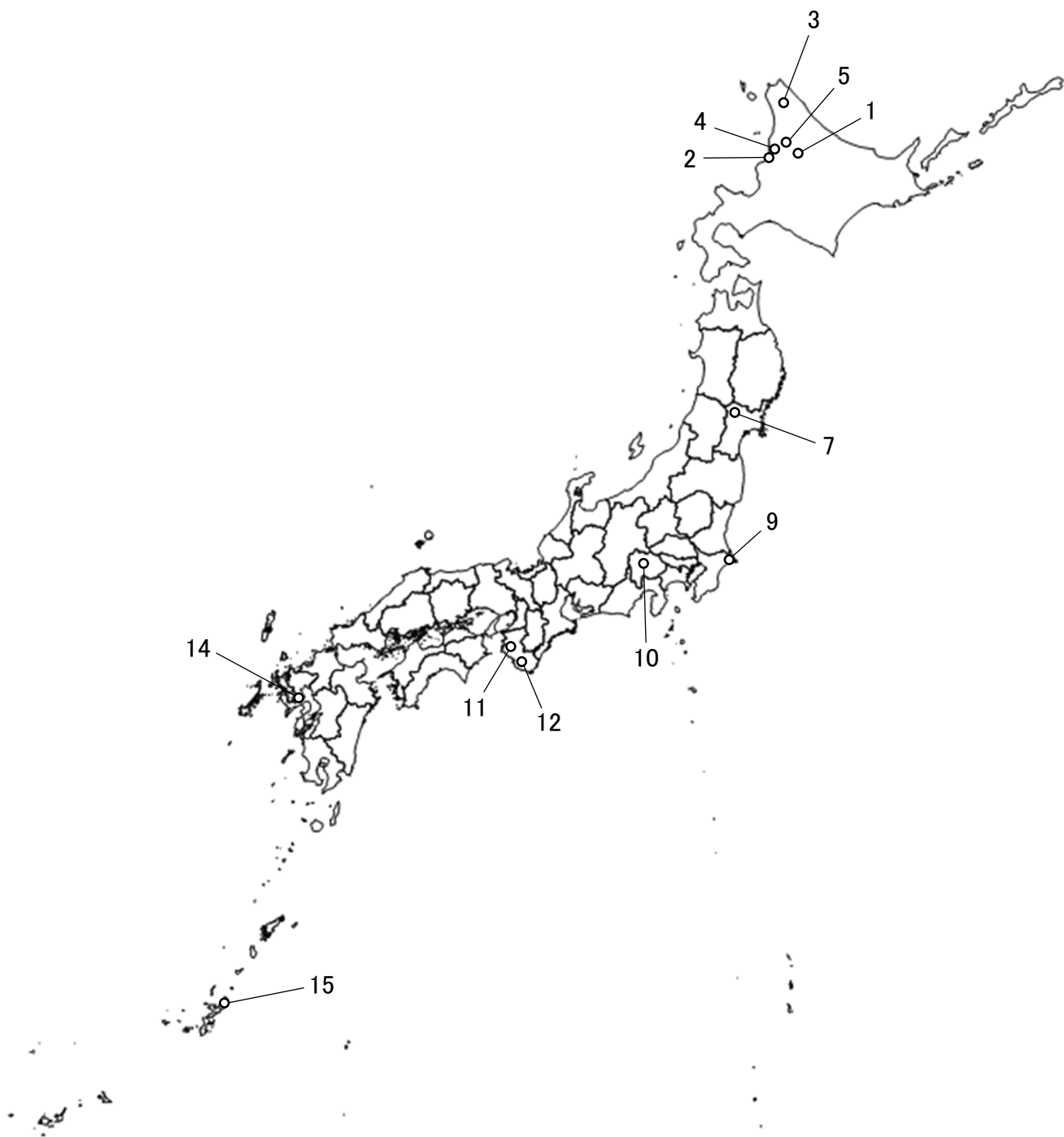
5.4.2 調査結果

調査を行った12橋の高力ボルトは、普通の高力ボルトではあるが、実橋で長期間使用されたボルトを解体・回収したものである。

遅れ破壊の危険度は、ボルトの表面錆の有無、表面凹凸の有無、軸部孔食の有無、ねじ部凹凸の有無、ねじ部孔食の有無、そして、ねじ部に孔食が存在する状態を考慮し、遅れ破壊の危険性のランク分けを以下のように考えた。

危険度	遅れ破壊危険度のランク	橋梁 No.
低	A：錆無し	3、12
↑	B：表面錆有り、表面凹凸有り	1、7、15
↓	C：軸部孔食有り、ねじ部凹凸有り	4、5、10、11、14
高	D：軸部孔食有り、ねじ部孔食有り	2、9

注) 橋梁 No.15 は耐候性鋼材を使用した無塗装橋梁



※国土地理院のホームページよりダウンロードした地球地図日本のデータに加筆

図 5.4.1 調査橋梁の架橋位置

以下にボルト塗装部のさび面積率、橋梁の架橋位置の海岸からの距離、建設後の経過年数それぞれと遅れ破壊危険度のランクとの関係を示す。

(1) ボルト塗装部のさび面積率と遅れ破壊危険度の関係

ボルト塗装部のさび面積率と遅れ破壊危険度の関係を図 5.4.2 に示す。橋梁 No.9 (千葉県)、橋梁 No.10 (山梨県) を除く全ての橋梁では、ナット側の塗装に高い腐食率がみられる。橋梁 No.9 (千葉県) は塗替え塗装後の経過年数が短く健全であった。橋梁 No.10 (山梨県) については履歴がはっきりしないが塗膜が厚く、塗替え塗装が行われている可能性がある。したがって、橋梁 No.9、橋梁 No.10 は腐食部を除去し再塗装が行われ、その後の経過年数が短いので発錆が観られなかったものと考えられる。

以上の結果より、ボルト塗装部のさび面積率が高くなると、ボルト表面も腐食、凹凸があり、さらには軸部に孔食、ねじ部に凹凸も発生する可能性が高まる傾向がみられる。したがって、ボルト塗装部のさび面積率は、高力ボルトの遅れ破壊危険度を評価する指標の 1 つとして有効と考えられる。

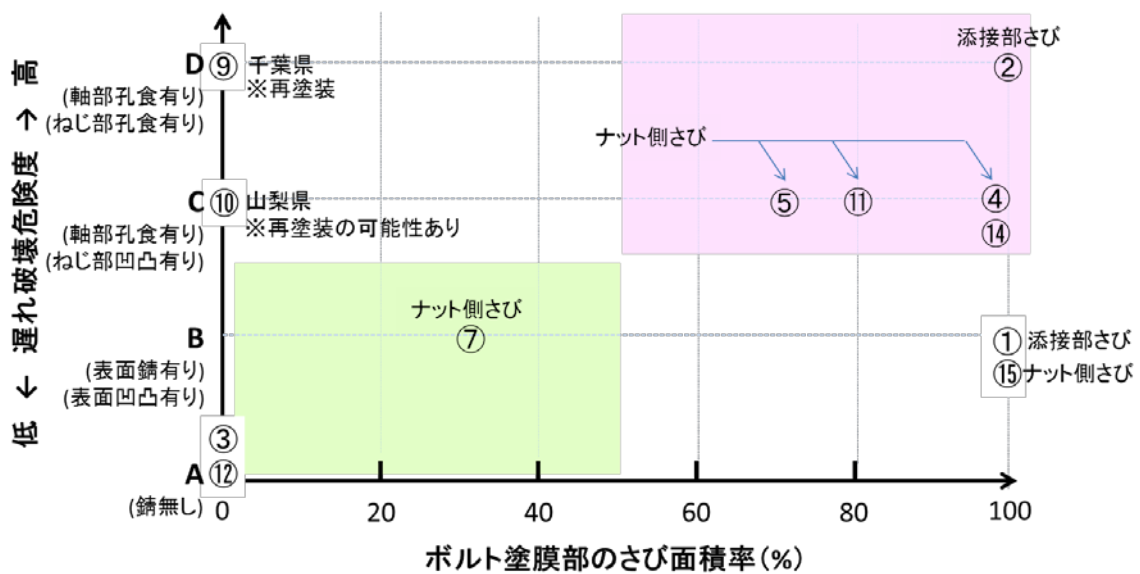


図 5.4.2 ボルト塗装部のさび面積率と遅れ破壊危険度

(2) 橋梁の架橋位置の海岸からの距離と遅れ破壊危険度の関係

橋梁の架橋位置の海岸からの距離と遅れ破壊危険度の関係を図 5.4.3 に示す。海岸からの距離が近くなると共に危険度がランク C、ランク D と高くなる傾向がみられる。しかし、橋梁 No. 10 (山梨県) は海岸からの距離が 60km あるものの C ランクとなっている一方、No. 15 (沖縄県) のように海岸からの距離が近くても、今のところ B ランクに留まっている例もある。実環境では隣接する橋の間や、同じ橋の中でも部位ごとに局所的な暴露環境は異なることが想定され、架橋地点の選定について配慮すること、及び橋の中でも高力ボルトの使用位置に配慮することが良いと考えられる。

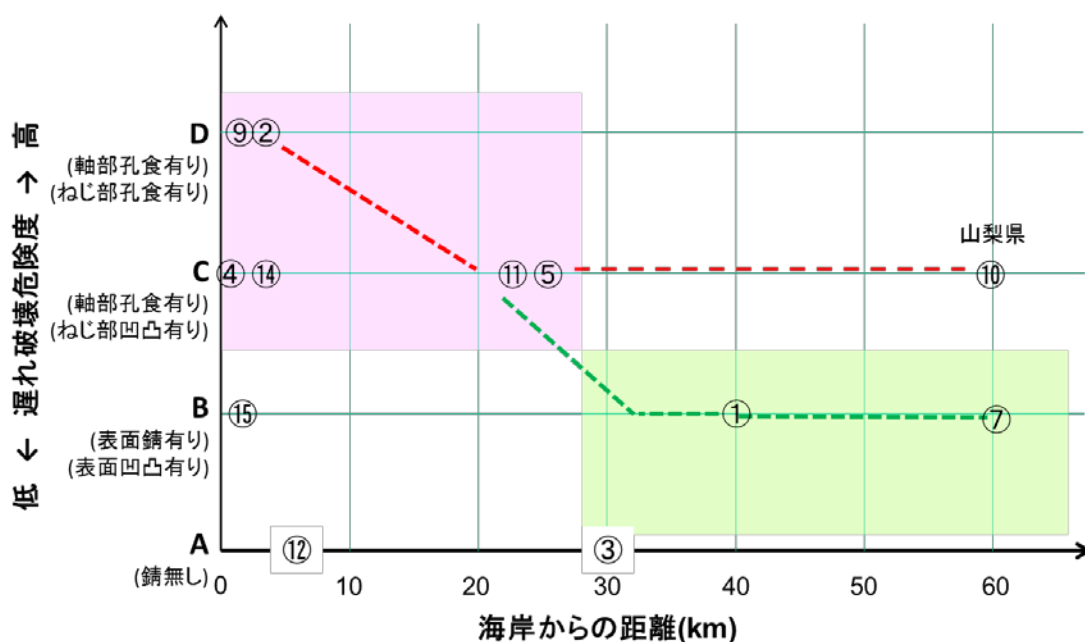


図 5.4.3 海岸からの距離と遅れ破壊危険度

(3) 建設後の経過年数と遅れ破壊危険度の関係

建設後の経過年数と遅れ破壊危険度の関係を図 5.4.4 に示す。建設後の経過年数と共に遅れ破壊危険度が増加する傾向がみられる。橋梁 No.9 (千葉県) は海岸から近く、特異な条件であると考えられる。橋梁 No.3 (北海道) は 1996 年建設で建設後 17 年経過しているが、唯一 A ランクにとどまっている。この理由は、建設後の経過年数が短いこと、1990 年の道路橋示方書で摩擦接合面に無機ジンクリッチペイントの塗布が規定された以降に建設されたものであり、摩擦接合面の防食性能が高いことが考えられる。

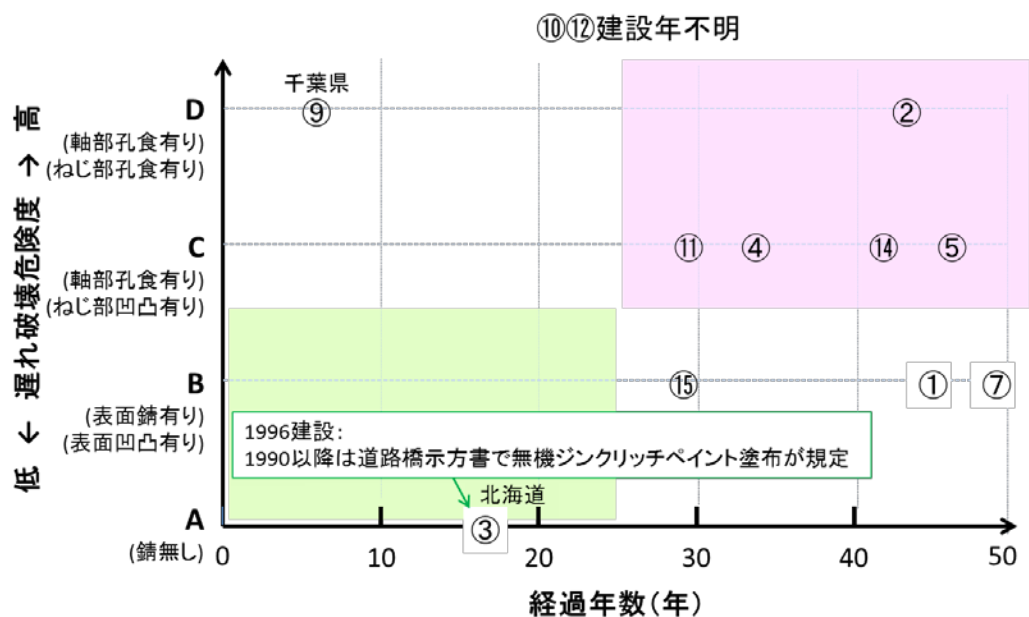


図 5.4.4 建設後の経過年数と遅れ破壊危険度

以上は、既設の 12 橋梁から回収した高力ボルトの調査結果である。遅れ破壊危険度とナット部のさびの状態に相関があることは分かったが、他のパラメーターとの明確な相関は見られなかった。このことから点検時には少なくともボルト周辺のさびの状態を確認しておく必要があると考えられる。

また、超高力ボルトを実際の橋梁に適用した際の遅れ破壊危険度を適切に評価するためには、今後、更なる調査を積み重ねて検証していく必要があると考えられる。

表 5.4.1 調査橋梁の仕様

No.	県名	供用	経年	ボルト種類	外面塗装	軸部状況	ネジ部状況	不完全ネジ部	海からの距離(km)	硬さ調査	備考
1	北海道	1968	45	F9T(M22)	①頭側 : 0%さび ②ナット側 : 0%さび ③添接面 : 全面さび (床版から漏水が原因)	①一部浮き錆 ②小凹凸有	①一部に浮き錆 ②凹凸無し	A	40		
2	北海道	1970	43	不明(M22)	①頭側 : 0%さび ②ナット側 : 0%さび ③添接面 : さび進展有	①全面浮錆, 一部硬い錆 ②小凹凸有 + 孔食有	①全面浮錆, 一部硬い錆 ②小凹凸有 + 孔食有	A	2.5		3本調査
3	北海道	1996	17	F11T(M22)	①頭側 : 0% ②ナット側 : 0% ③添接面 : 0%	①黒皮状態 (一部に油残存)	①黒皮状態 (一部に油残存)	A	29		2体中, 1体調査
4	北海道	1980	33	F11T(M22)	①頭側 : 100%さび ②ナット側 : 95%さび	①一部浮き錆 ②小凹凸有 + 孔食有	①一部に浮き錆 ②一部に凹凸有	A	0.4	○	2体中, 1体調査
5	北海道	1967	46	F11T(M22)	①頭側 : 40%さび ②ナット側 : 70%さび	①黒皮状態 ②ごく一部に孔食有	①黒皮 ②ごく一部山に凹凸有	A	25.2	○	
7	宮城	1964	49	F10T(M22)	①頭側 : 30%さび ②ナット側 : 30%さび	①一部浮き錆 ②小凹凸有	①一部浮き錆 ②凹凸有	A	60	○	
9	千葉 補強 1940- 1946	不明	6	S10T(M20)	①頭側 : 0% ②ナット側 : 0%	①黒皮状態, 一部に浮錆あり ②一部に凹凸有 + 孔食有 (径1mm)	①黒皮状態, 一部に浮錆あり ②一部に凹凸有 + 孔食有 (径1mm)	B	1.8		
10	山梨	不明	不明	F10T(M22)	①頭側 : 0% ②ナット側 : 0%	①薄い浮き錆状態 ②小凹凸あり + 孔食有 (径1mm)	①薄い浮き錆状態 ②小凹凸あり	B	59.1		
11	和歌山	1984	29	F10T (M不明)	①頭側 : 30%さび ②ナット側 : 80%さび	①一部浮き錆 ②小凹凸有 + 孔食有	①一部浮き錆 ②小凹凸有	B	22.7		
12	和歌山	不明	不明	F10T(M22)	①頭側 : 0% ②ナット側 : 0%	①黒皮状態	①黒皮状態	A	6.7		
14	長崎	1972	41	F11T(M22)	①頭側 : 100%さび ②ナット側 : 95%さび	①一部浮き錆 ②小凹凸有 + 孔食有	①一部に浮き錆 ②凹凸有	A	2.9	○	
15	沖縄	1981	29	不明	①頭側 : 100%さび ②ナット側 : 100%さび	①一部浮き錆 ②小凹凸有	①一部に浮き錆 ②凹凸有	不明	0.5		

No.1 北海道



【解体後外観】

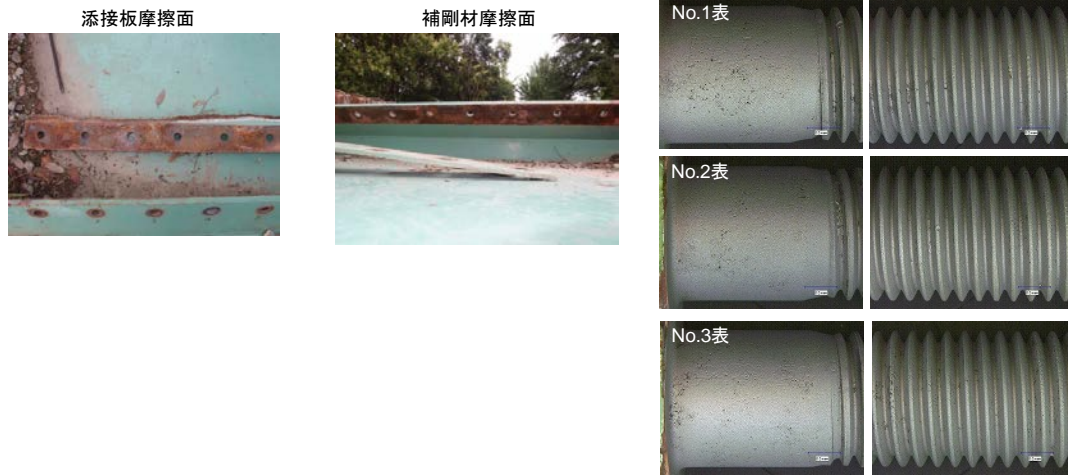
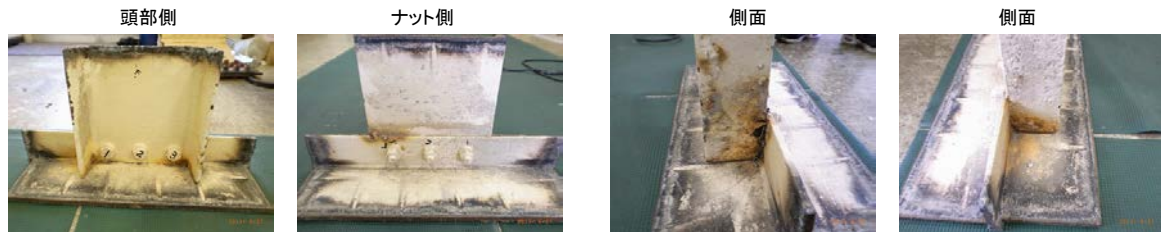


写真 5. 4. 1 調査橋梁の解体後の外観 (1/12)

No.2 北海道

【撤去後外観】



【解体後外観】

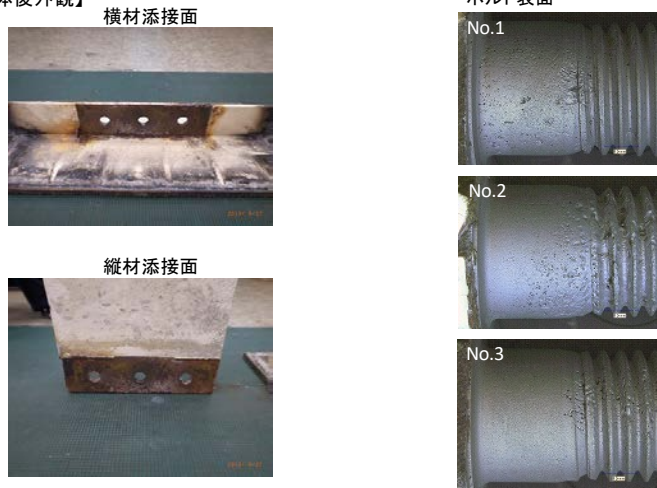


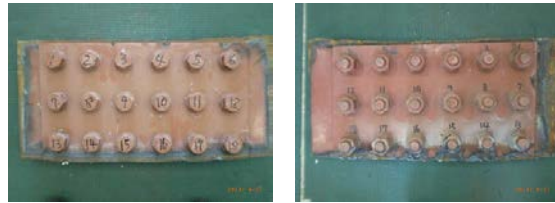
写真 5. 4. 2 調査橋梁の解体後の外観 (2/12)

No.3 北海道

【撤去後外観】

頭部側

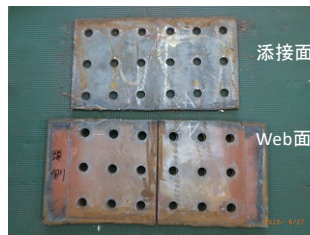
ナット側



【解体後外観】

添接面その1

添接面その2



ボルト表面

No.1表



No.2表



No.3表



写真 5. 4. 3 調査橋梁の解体後の外観 (3/12)

No.4 北海道

撤去後外観

全景



頭部側



ナット側

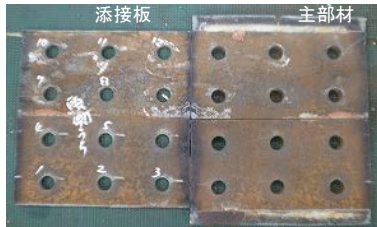


ナット側拡大図



解体後外観

添接面その1

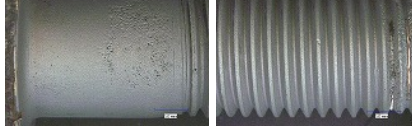


添接面その2



ボルト表面

No.2表



No.3表



No.4表



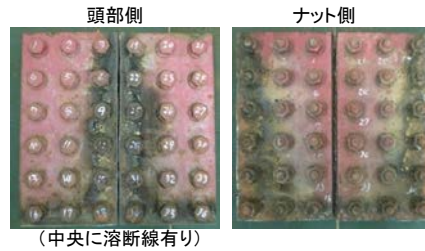
写真 5. 4. 4 調査橋梁の解体後の外観 (4/12)

No.5 北海道

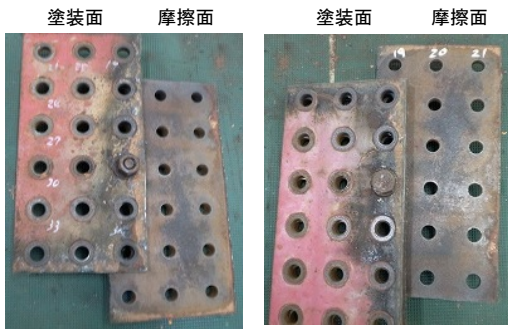
【現地全景】



【撤去後外観】



【解体後外観】



ボルト表面

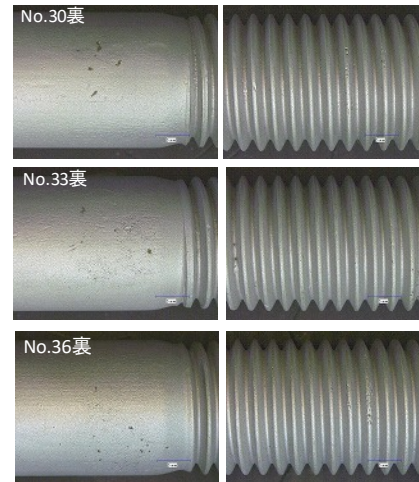


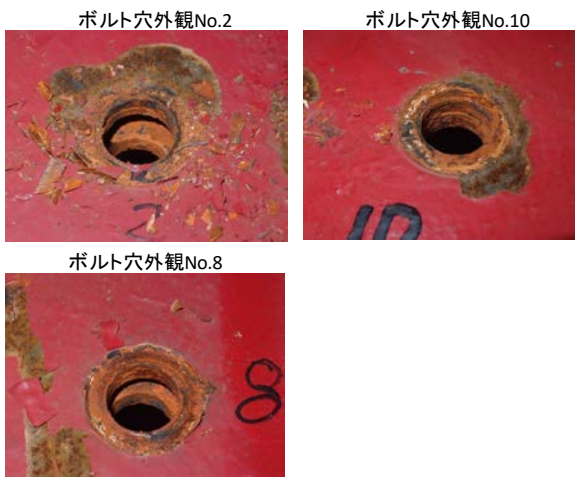
写真 5. 4. 5 調査橋梁の解体後の外観 (5/12)

No.7 宮城県

【撤去後外観】



【解体後外観】



ボルト表面

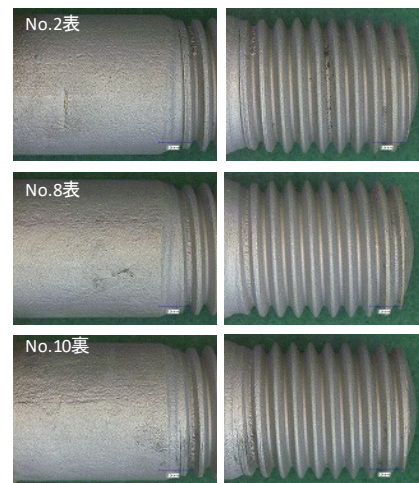
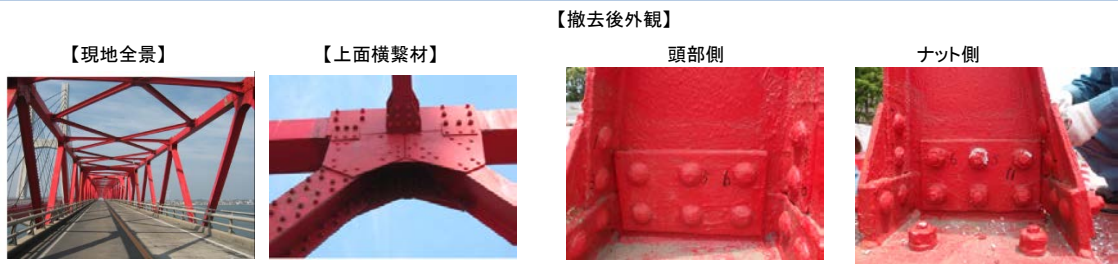


写真 5. 4. 6 調査橋梁の解体後の外観 (6/12)

No.9 千葉県



【解体後外観】

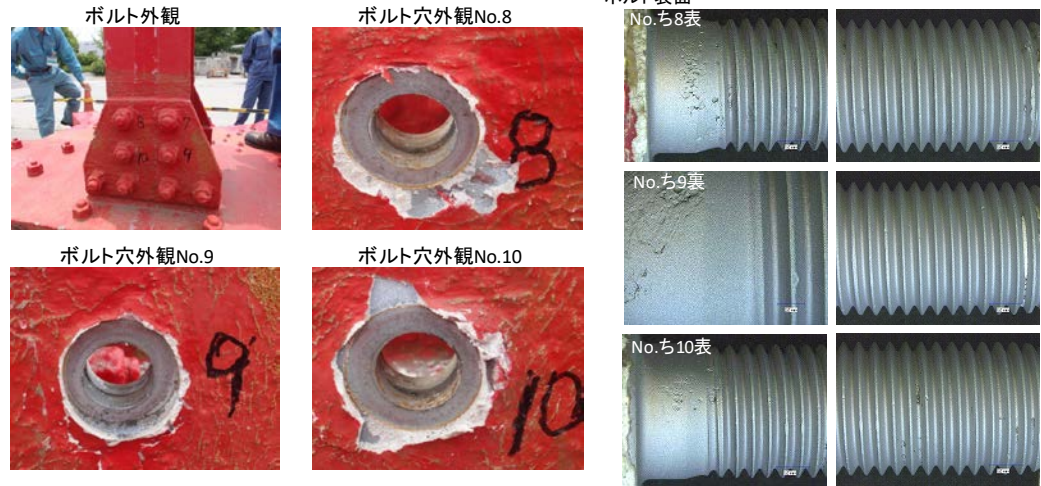


写真 5. 4. 7 調査橋梁の解体後の外観 (7/12)

No.10 山梨県



【解体後外観】

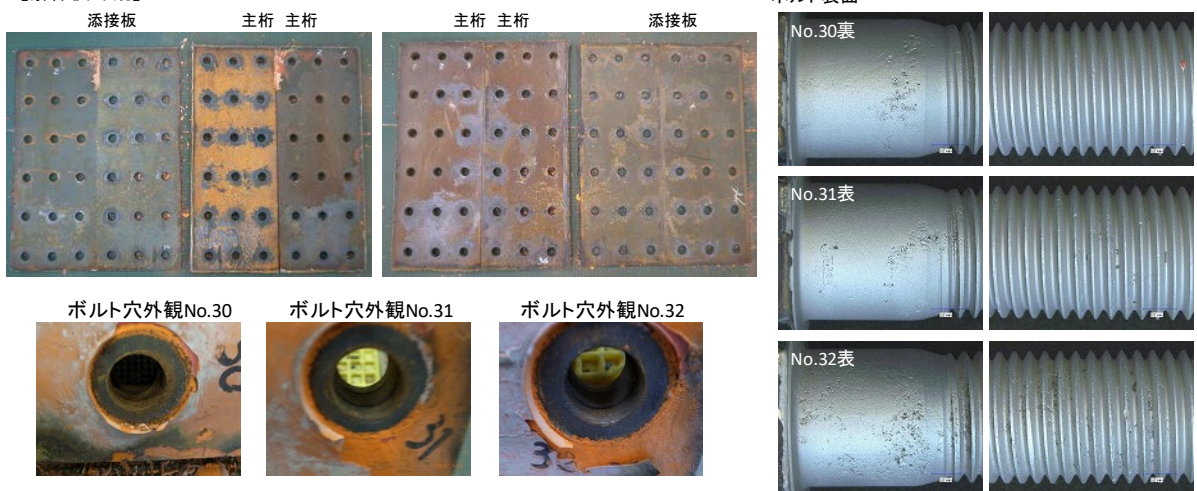


写真 5. 4. 8 調査橋梁の解体後の外観 (8/12)

No.11 和歌山県

【現地全景】



【下横鋼】



【撤去後外観】

【解体後外観】

ボルト表面

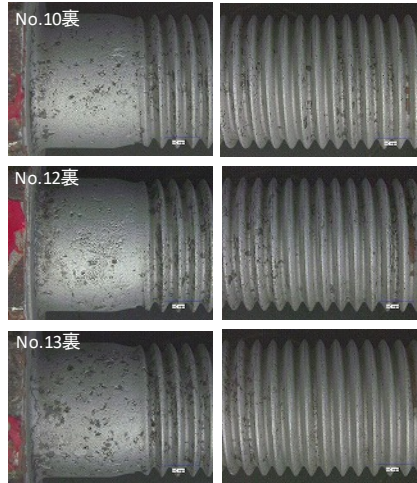


写真 5. 4. 9 調査橋梁の解体後の外観 (9/12)

No.12 和歌山県

【撤去後外観】

全景



頭部側



ナット側



【解体後外観】

ボルト穴外観



ボルト穴外観No.2



ボルト穴外観No.1



ボルト穴外観No.3



ボルト表面

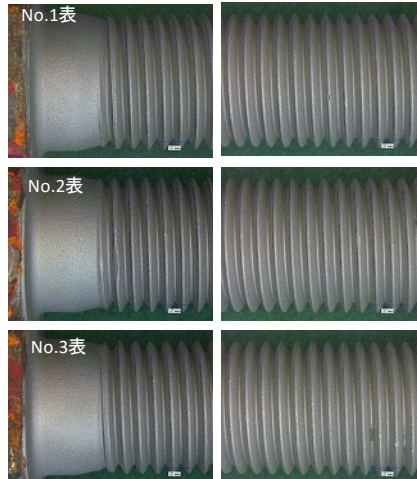
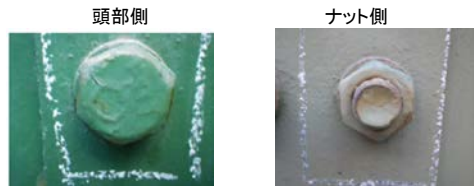


写真 5. 4. 10 調査橋梁の解体後の外観 (10/12)

No.14 長崎県



【撤去後外観】



【解体後外観】

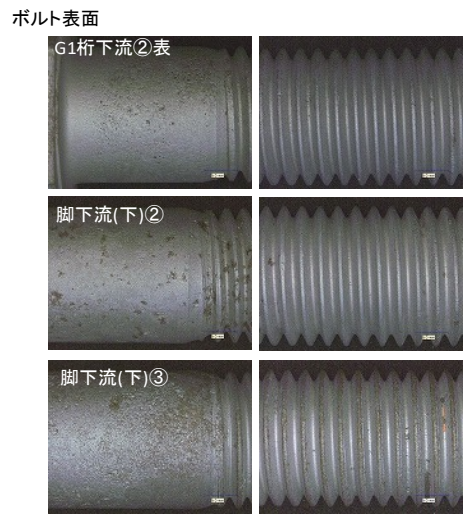
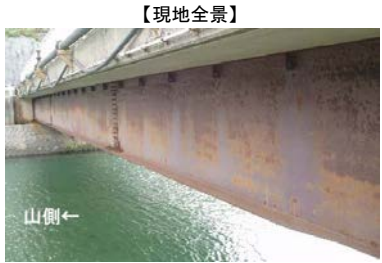
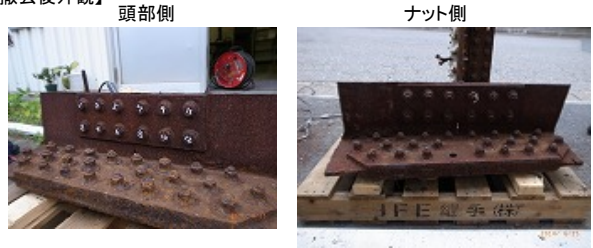


写真 5. 4. 11 調査橋梁の解体後の外観 (11/12)

No.15 沖縄県



【撤去後外観】



【解体後外観】

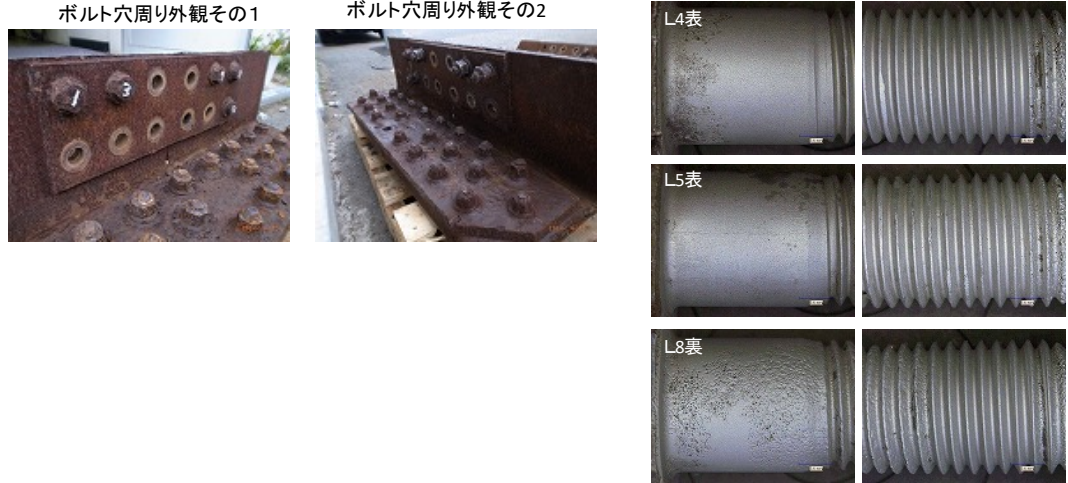


写真 5. 4. 12 調査橋梁の解体後の外観 (12/12)

第 5 章 参考文献

- 5.1) (独) 建築研究所 (独) 物質・材料研究機構 (一社) 日本鉄鋼連盟：「先端技術による新しい鋼構造建築システムの開発」「超高力ボルトの性能評価法の開発」委員会 最終報告書，2005.3
- 5.2) 池田秀継，畑中清：耐力点締付法に用いる摩擦接合用高力ボルトの暴露試験報告，鋼構造論文集，第 21 巻，第 84 号，2014.12
- 5.3) (一社) 日本鋼構造協会：JSSC テクニカルレポート No. 91，高力ボルトの遅れ破壊特性評価ガイドブック，2010.7

第6章 まとめ

本研究の成果について、以下にまとめる。

6.1 高力ボルトの耐遅れ破壊特性の評価

6.1.1 材料（ボルト材料の違い、ねじ形状の違い）としての耐遅れ破壊特性の評価（第3章）

材料としての耐遅れ破壊特性の評価は、製造した供試ボルトから切出し加工した試験片を用いて、鋼材の遅れ破壊発生の限界拡散性水素量 H_c と侵入水素量 H_E の関係から評価する方法で行った。用いたボルト材料とねじ形状は、以下に示す。

- ・ボルト材料

高力ボルト : S10T、S11T (S10T との比較材として、S10T の製造過程で焼き戻し温度を調整し、引張強さ $1,250\text{N/mm}^2$ を目標値としたボルト)

超高力ボルト : S14T、F12T

- ・ねじ形状（環状切欠き試験片の切欠き先端の半径）

0.10R : JIS ねじ形状のねじ底に発生する応力よりも厳しい条件を再現

0.25R : JIS ねじ形状を再現

0.41R : 超高力ボルトねじ形状のねじ底に発生する静水圧応力条件を再現

(1) 限界拡散性水素量 H_c の測定

限界拡散性水素量 H_c の測定は、製造した供試ボルトから切出し加工した環状切欠き試験片を用いて定荷重試験を行い、その後ガスクロマトグラフ法（昇温脱離分析法）により行った。

その結果、以下のことを確認した。

- ・限界拡散性水素量 H_c は、ボルト材料の強度が高くなるほど、少なくなる（耐遅れ破壊特性が低下）。
- ・限界拡散性水素量 H_c は、ボルト材料の強度を高くした場合でも、V（バナジウム）およびMo（モリブデン）を添加することで、その成分の影響により多くなる（水素トラップ性能の高い材料となり、粒界破壊が抑制されて、耐遅れ破壊特性が向上）。
- ・限界拡散性水素量 H_c は、ねじ形状を再現した環状切欠き試験片の切欠き先端の半径が大きくなるほど、多くなる（応力集中が緩和され、耐遅れ破壊特性が向上）。

(2) 侵入水素量 H_E の測定

侵入水素量 H_E の測定は、製造した供試ボルトから切出し加工した試験片を用いて浸漬試験による水素チャージを行い、その後ガスクロマトグラフ法（昇温脱離分析法）により行った。

その結果、以下のことを確認した。

- ・侵入水素量 H_E は、試験片を浸漬して水素チャージを行う腐食溶液の pH が小さくなるほど、

多くなる。(腐食溶液は、ガイドラインでは pH2 が規定されているが、pH1、pH2、pH3 の 3 種類とした。)

- ・侵入水素量 H_E は、腐食溶液の温度の違いでは大きな差は見られない。

(3) 耐遅れ破壊特性の評価

耐遅れ破壊特性の評価は、測定した限界拡散性水素量 H_c と侵入水素量 H_E から算出した安全指標 H_E/H_c により行った。

1) ボルト材料の違いによる評価

ボルト材料の違いによる評価は、S10T、S11T、S14T の H_E/H_c が pH1 条件でそれぞれ 0.24、0.70、0.83 となり、F12T の H_E/H_c が、pH2 条件で 0.63 となり、これら材料のすべてで $H_E/H_c < 1.0$ となった。ここで比較した S11T は、過去に遅れ破壊で問題となった F11T の模擬を意図として、S10T の製造過程で焼き戻し温度を調整し、引張強さ 1250N/mm^2 を目標値として製造したボルトであり、S10T に比べると H_E/H_c の値は大きくなり、 $H_E/H_c < 1.0$ であるが、遅れ破壊に対しての余裕度が低下する結果となった。

2) ねじ形状の違いによる評価

JIS ねじ形状のねじ谷部の形状である 0.36R を模擬した環状切欠き先端の半径は 0.25R、超高力ボルトねじ形状のねじ谷部の形状である特殊なダブル R 形状を模擬した環状切欠き先端の半径は 0.41R となる。JIS ねじ形状を模擬した S11T では、環状切欠き試験片の切欠き先端の半径が 0.10R から 0.25R へ大きくなると、 H_E/H_c の値は低減し、耐遅れ破壊特性が改善された。超高力ボルトねじ形状を模擬した S14T では、環状切欠き試験片の切欠き先端の半径が 0.10R から 0.41R へ大きくなると、 H_E/H_c の値は低減し、耐遅れ破壊特性が改善された。

3) 環状切欠き試験片と実際のボルトの応力再現性

環状切欠き試験片と実際のボルトの応力再現性は、JIS ねじ形状及び超高力ボルトねじ形状に発生する応力を、JSSC テクニカルレポート No. 91 に示されている解析条件で軸対象モデルによる弾塑性解析により、実際のボルトと環状切欠き試験片の公称応力 σ_N と最大主応力 σ_{\max} 及び最大静水圧応力 σ_m との関係を比較して判断した。

a) 高力ボルトを模擬した環状切欠き試験片の場合

実際のボルト F10T (M22) と環状切欠き試験片 ($\phi = 10\text{mm}$ 、0.25R) の公称応力 σ_N と最大主応力 σ_{\max} 及び最大静水圧応力 σ_m との関係を比較した。その結果、標準ボルト張力 $\sigma_N/\sigma_B = 0.743$ の近傍で最大主応力 σ_{\max} 、最大静水圧応力 σ_m が共にほぼ一致しており、F10T (M22) に発生する応力状態は、環状切欠き試験片 ($\phi = 10\text{mm}$ 、0.25R) で模擬が可能と判断できる。

b) 超高力ボルトを模擬した環状切欠き試験片の場合

実際のボルト S14T (M22) と環状切欠き試験片 ($\phi = 10\text{mm}$ 、0.35R、0.41R) の公称応力 σ_N と最大主応力 σ_{\max} 及び最大静水圧応力 σ_m との関係を比較した。その結果、標準ボルト張力 σ_N/σ

$B=0.743$ の近傍で最大主応力 σ_{\max} 、最大静水圧応力 σ_m が共に一致することがなく、最大主応力 σ_{\max} にほぼ一致する環状切欠き試験片の切欠き先端の半径は $0.35R$ 、静水圧応力 σ_m にほぼ一致する環状切欠き試験片の切欠き先端の半径は $0.41R$ であるため、S14T (M22) に発生する応力状態は、環状切欠き試験片 ($\phi = 10\text{mm}$) の切欠き先端の半径を $0.35R \sim 0.41R$ の範囲で模擬するのがよいと判断できる。

6.1.2 腐食促進試験による高力ボルトの耐遅れ破壊特性の評価（第4章）

実構造を模擬して2枚の添接板にボルトを締結した試験体を腐食促進試験に供し、ボルト破断の有無を確認する方法で耐遅れ破壊特性の評価を行った。腐食促進試験は、実際の腐食環境を模擬して添接部のすき間から雨水が浸入するなど、常にボルトが湿潤状態で激しい腐食となる環境を模擬した試験方法を考案し行った。

(1) 食塩水への繰返し浸漬による腐食促進試験による評価（考案する試験方法①）

高力ボルト（ボルト試験材）を被締付体に締付けた試験体と腐食量の測定のためのモニタリング材を観覧車腐食促進試験機に吊り下げ、食塩水へ浸漬と上げを繰り返す方法で試験を行った。

1) 破断の有無

いずれのボルトにおいても破断は観られなかった。

2) 侵入水素量 H_E の測定

侵入水素量 H_E の測定は、観覧車腐食促進試験の開始後、6ヶ月、1年、2年及び3年経過のボルトにおいて行った。その結果、各ボルトの H_E は第3章の耐遅れ破壊試験の浸漬試験（腐食溶液 pH2）で測定された値と概ね類似していた。個々には遊びねじ部（応力のかかる移行部からねじ部にかかる部位）について、以下を確認した。

- ・ S10T、S11T の侵入水素量 H_E は、測定期間をとおして、極めて小さい値であった。
- ・ S14T の侵入水素量 H_E は、経過年数と共に増加傾向を示すが、2年目以降は安定する傾向を示した。防錆処理した S14T の侵入水素量 H_E は、経過年数と共に増加傾向を示すが、その値は裸材に比べて小さい。
- ・ F12T（溶融亜鉛めっき処理）の侵入水素量 H_E は、2年目以降は大きな変化が見られない。

3) 遅れ破壊の安全指標 H_E/H_C の算出

遅れ破壊の安全指標 H_E/H_C は、侵入水素量 H_E は観覧車腐食促進試験の3年経過の値を用い、限界拡散性水素量 H_C は第3章の耐遅れ破壊試験で測定した値を用い、算出した。いずれの高力ボルト（ボルト試験材）も $H_E/H_C < 1.0$ となり、実際に破断が観察されなかった試験の結果と符合し、且つその値も第3章の耐遅れ破壊試験結果（腐食溶液 pH2）と結果が類似する。個々には以下を確認した。

- ・ S10T、S11T の安全指標 H_E/H_C は、他のボルト試験材と比較して小さく、耐遅れ破壊性能に優れていると判断できる。
- ・ S14T の安全指標 H_E/H_C は、ボルトの防錆処理及び被締付体の合わせ面に V 溝が無い場合には小さくなり抑制効果が認められる。
- ・ F12T（溶融亜鉛めっき処理）の安全指標 H_E/H_C は、傷の有無には大差がなく、侵入水素量 H_E が 2.00 程度で安定する傾向を示しており、0.5 程度の値で収束するものと推定される。

3) 腐食量の測定

いずれのボルトも、腐食減量 (g) は1年でほぼ同じとなり、腐食速度 (mm/yr) は約 0.7mm/yr であった。

(2) 高濃度腐食溶液による腐食促進試験による評価 (考案する試験方法②)

腐食液注入孔を有する 2 枚の添接板にボルトを締付け、添接板内に海浜地区に暴露された条件に対応しているとして提案された腐食溶液 (pH2) よりも厳しい pH1 溶液を注ぎ、高力ボルトが常時浸漬した状態として、一定時間放置し破断の有無を確認する方法で耐遅れ破壊試験を行った。高力ボルトの締付けは、以下の 3 種類の応力状態とした。

- ・ 標準軸力
- ・ 過大軸力 (標準軸力×1.1)
- ・ 頭部曲げ (ボルト頭部側に 3° テーパー座金を使用、標準軸力)

試験の結果を以下に示す。

- ・ いずれの高力ボルト (ボルト試験材) も破断はなかった。
- ・ 製造した供試ボルトから切出し加工した試験片を用いた遅れ破壊試験結果は、腐食溶液が pH1 の場合は遅れ破壊が発生しない (破断しない) とする評価結果 ($H_E/H_C < 1.0$) と一致するものであった。
- ・ 高力ボルト (ボルト試験材) の表面には錆はあるものの孔食的な箇所はなかった。

この試験法は、(1) で示した腐食促進試験法に比べると、同様の添接板にボルトを締結した試験体を用い、腐食環境はより厳しい条件を採用しているものの、簡便で且つ短期間で同等レベルでの耐遅れ破壊特性が評価できる有用な方法であると判断される。

6.2 長期暴露された高力ボルトの腐食状況調査（第5章）

高力ボルトの既存の暴露試験の結果や、実橋の点検時にばらした高力ボルトの状態をもとに考察を行った。

- ①屋外の添接板に高力ボルトを締付けた暴露試験体の腐食状態を調査し、高力ボルト接合部の腐食因子の侵入経路を推定した。
- ②既設の鋼道路橋の高力ボルト接合部の腐食状態を調査し、遅れ破壊危険度をランク分けを行い、各種パラメーターとの関係を整理した。

(1) 高力ボルト接合部の腐食因子の侵入経路の推定

実腐食環境に設置された2箇所の暴露試験体の腐食状態の調査を行い、その結果から判断すると、ボルト孔内部への腐食因子の侵入には、以下の2つの経路があったと推定した。

- ①ボルト余長部の付け根から腐食因子の侵入
- ②添接板の摩擦接合面から腐食因子の侵入

(2) 遅れ破壊危険度のランク分け

供用後の経過年数が17年から49年の既設の12橋において、ボルトをばらし表面の腐食状態の調査を行い、遅れ破壊の危険度を評価する観点で、ボルトの表面錆の有無、ボルトの表面凹凸の有無、軸部孔食の有無、ねじ部凹凸の有無、ねじ部孔食の有無について分類し、ねじ部に孔食が存在する状態が最も遅れ破壊の危険度が高いと位置付け、以下に示す遅れ破壊危険度のランク分けとした。

- 遅れ破壊危険度のランク
- A：錆無し
 - B：表面錆有り、表面凹凸有り
 - C：軸部孔食有り、ねじ部凹凸有り
 - D：軸部孔食有り、ねじ部孔食有り

本研究で調査した既設の12橋について、以下の3つの関係を整理した。①については明確な相関がみられたが、②③については相関が見られなかった。このことから点検時にはボルト周辺のさびの状態を把握することが重要であると考えられる。

また、超高力ボルトを実橋に適用した際の遅れ破壊危険度を適切に評価するためには、今後、更なる調査を積み重ねて検証していく必要がある。

- ①ボルト塗装部のさび面積率と遅れ破壊危険度の関係
- ②橋梁の架橋位置と海岸からの距離と遅れ破壊危険度の関係
- ③建設後の経過年数と遅れ破壊危険度の関係

国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of NILIM
No.1095 March 2020

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国土技術政策総合研究所 企画部 研究評価・推進課
〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地 電話 029-864-2675