

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。

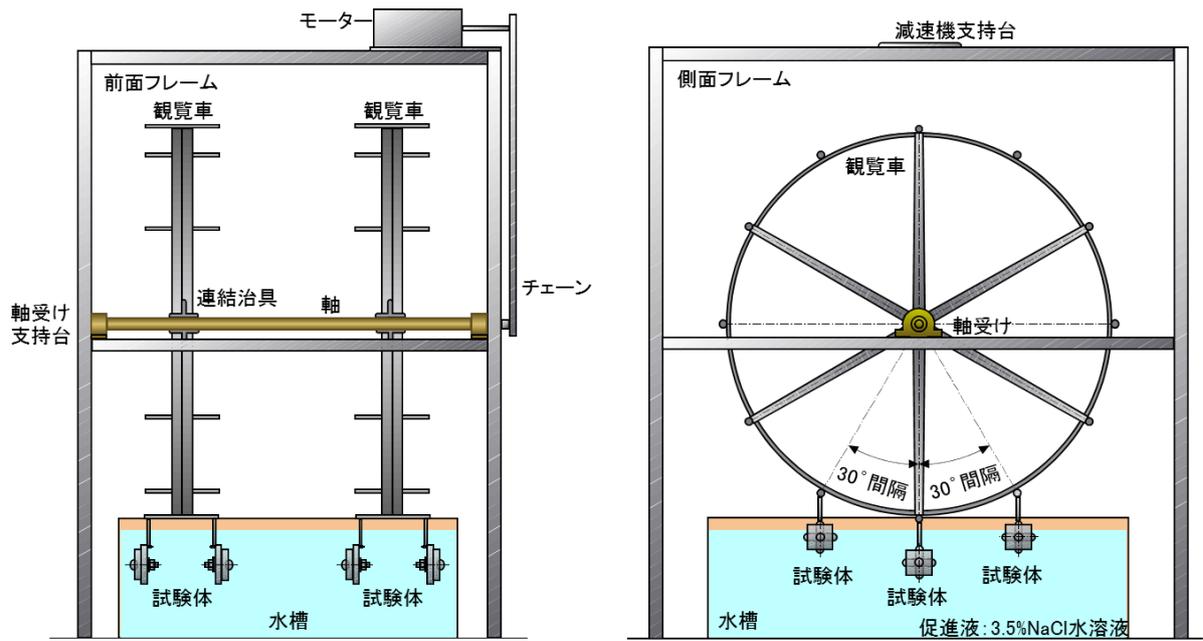


図 4.1.1 観覧車腐食促進試験装置の概要図

(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。

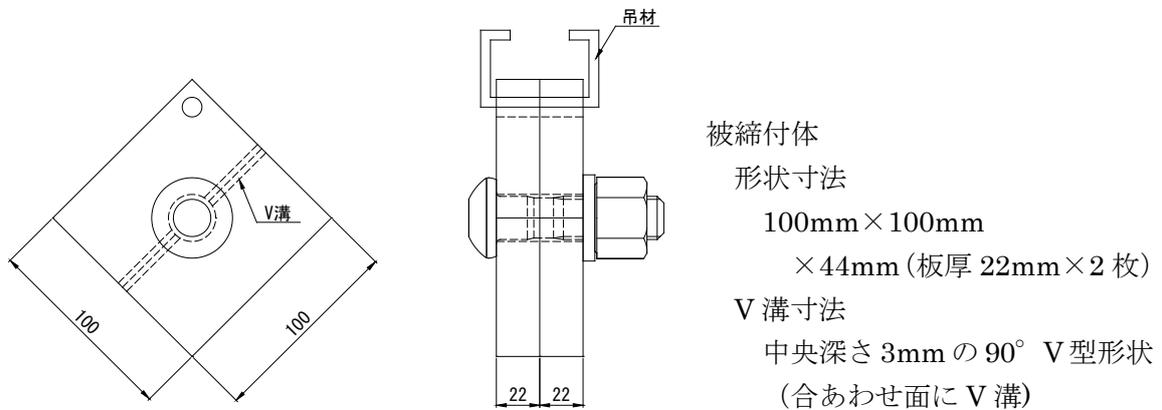


図 4.1.2 ボルト締付け後の 1 体の試験体

(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）

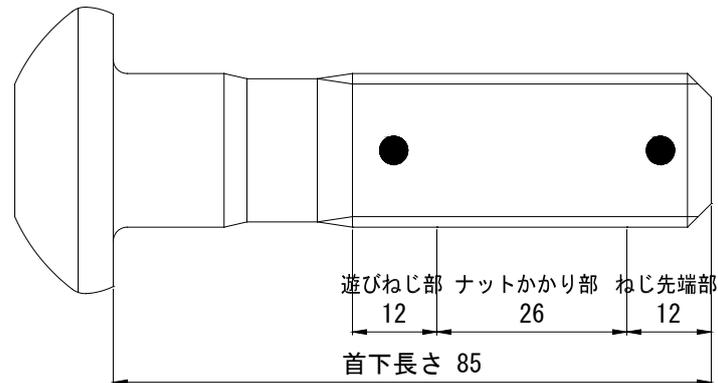
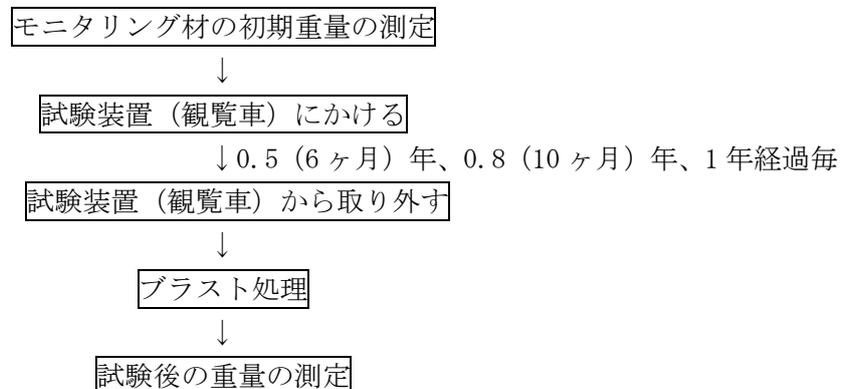


図 4.1.4 侵入水素量 H_E の測定部位

(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）

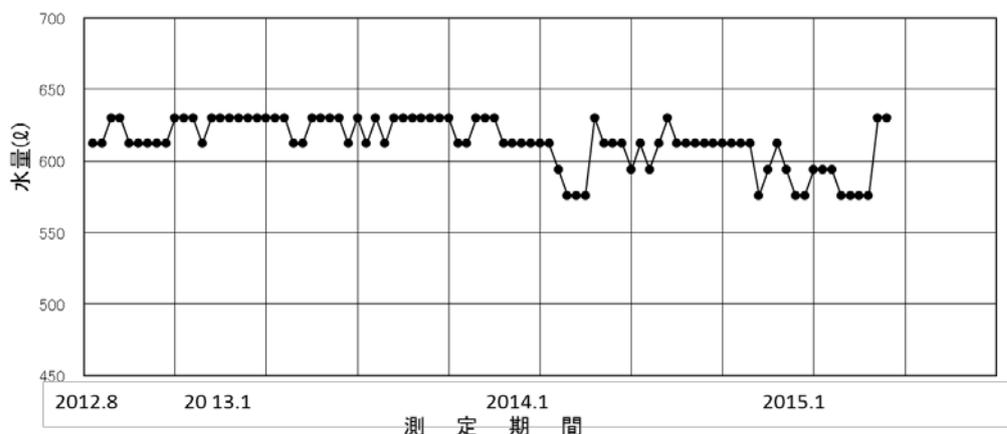


図4.1.7 観覧車腐食促進試験（水量推移）

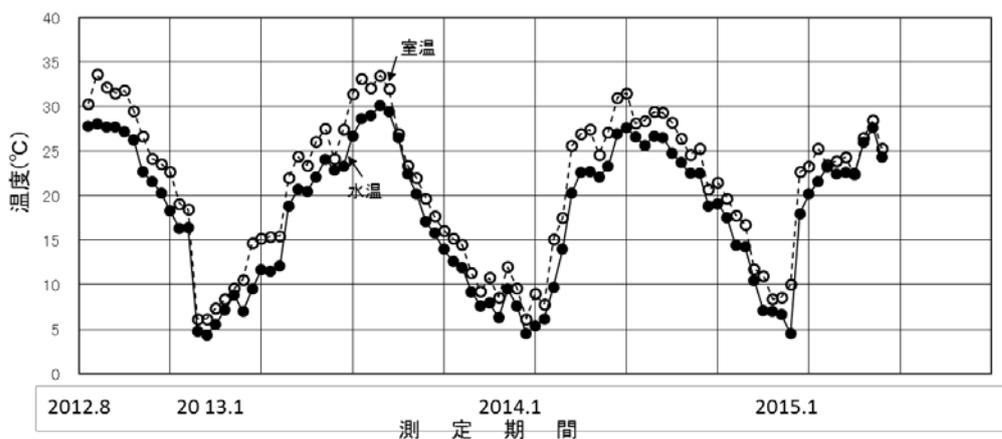


図4.1.8 観覧車腐食促進試験（温度推移）

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 |

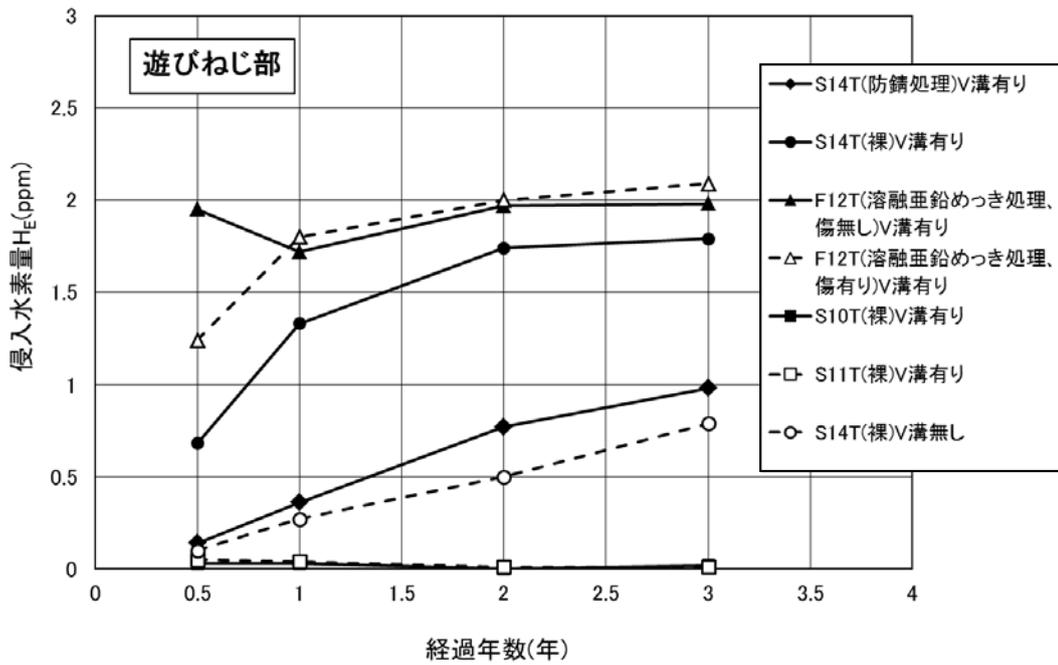


図 4. 1. 9 観覧車腐食促進試験の経過年数と侵入水素量 H_E (遊びねじ部)

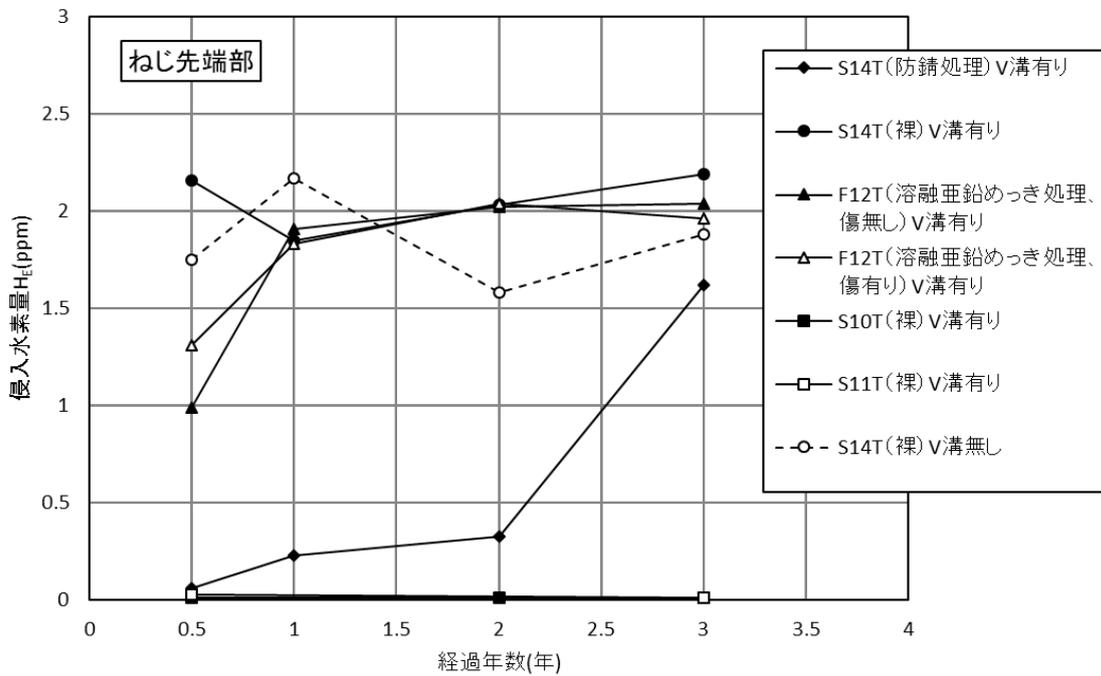


図 4. 1. 10 観覧車腐食促進試験の経過年数と侵入水素量 H_E (ねじ先端部)

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 (0.10R) | 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 | 0.52 | 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)

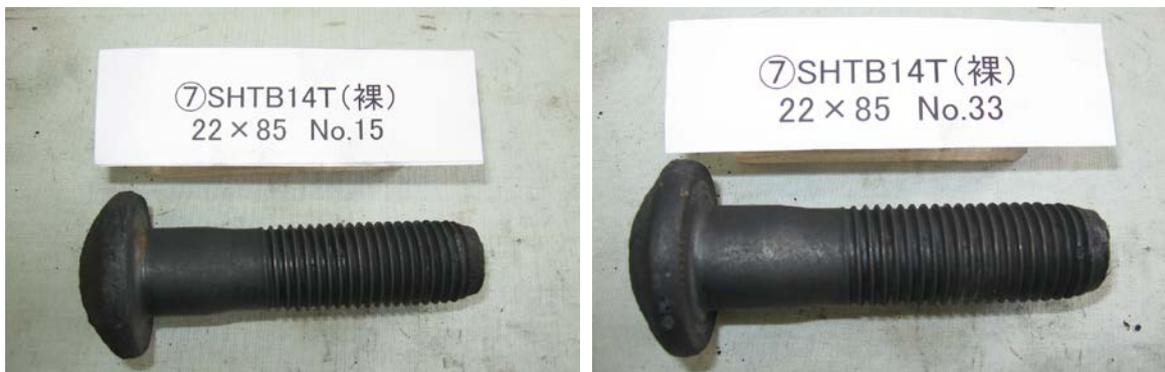
写真 4.1.2 観覧車腐食促進試験の1年経過後のボルト (①、②、③、④)



(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 | 溶融亜鉛めっき処理 | 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 | 溶融亜鉛めっき処理 | 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 | 溶融亜鉛めっき処理 | 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

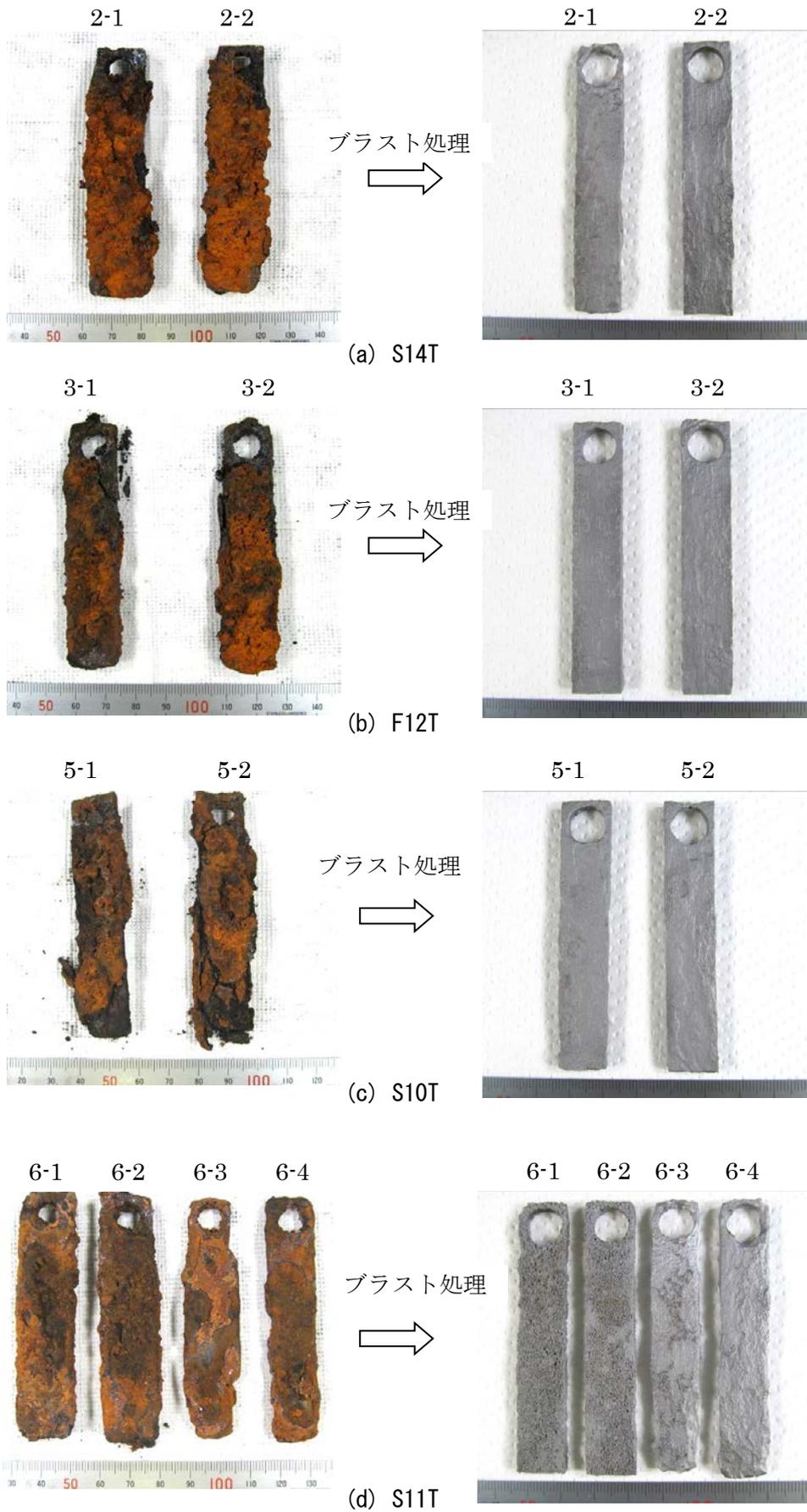


写真 4.1.8 観覧車腐食促進試験の6ヶ月（0.5年）経過後のモニタリング材



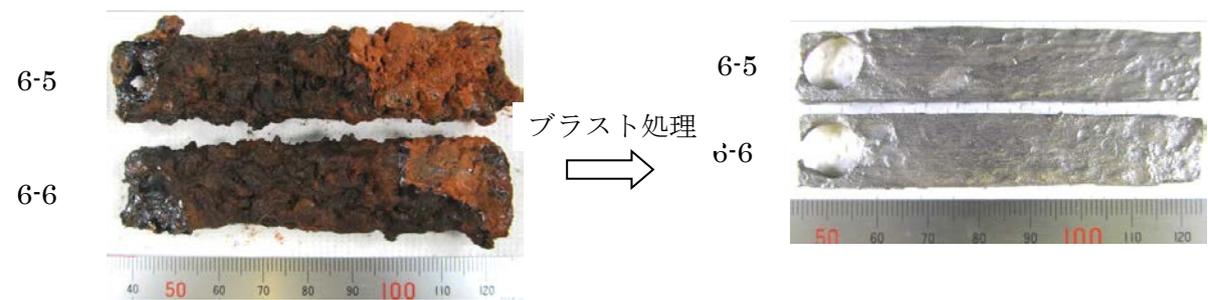
(a) S14T



(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

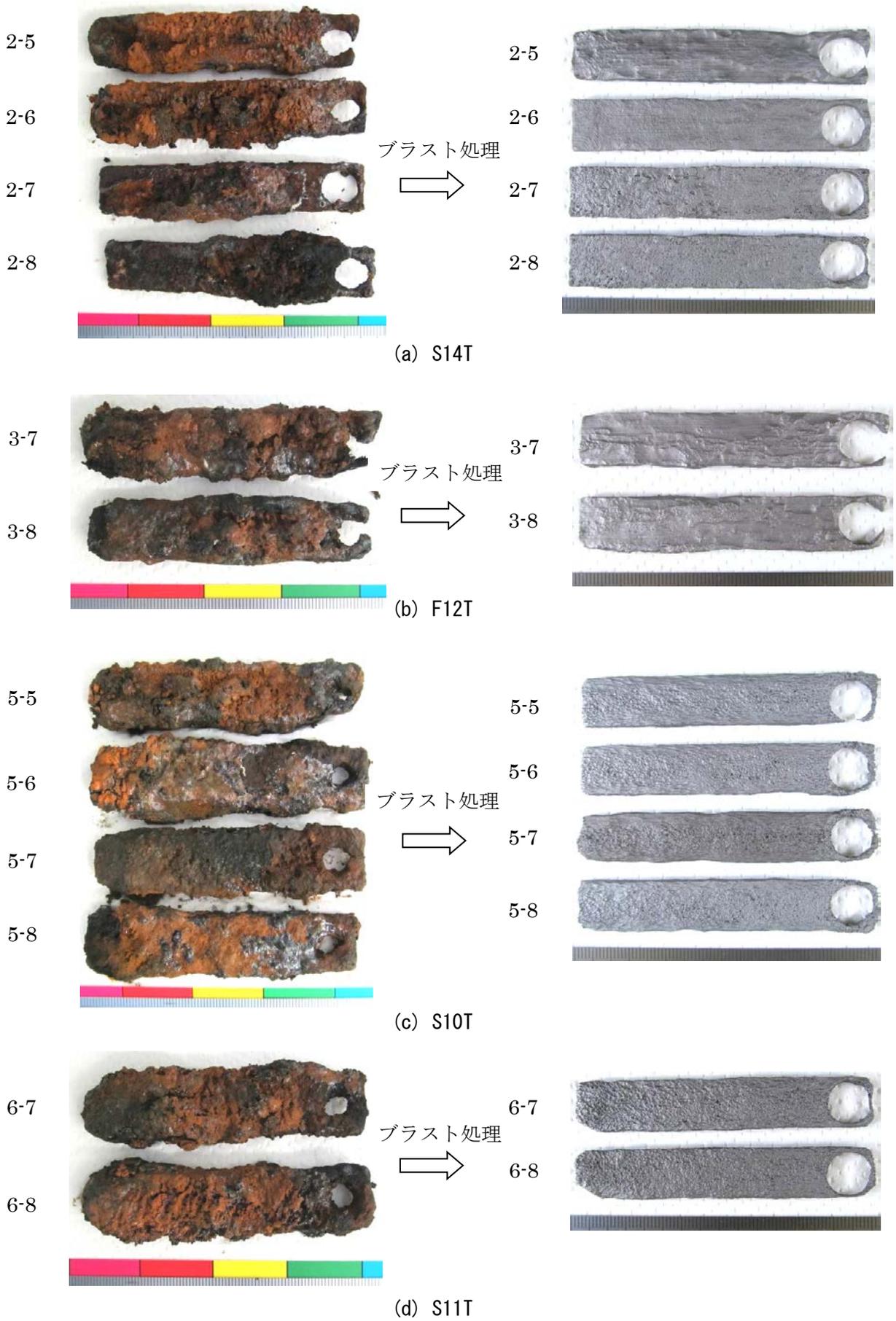


写真 4.1.10 観覧車腐食促進試験の1年経過後のモニタリング材

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。

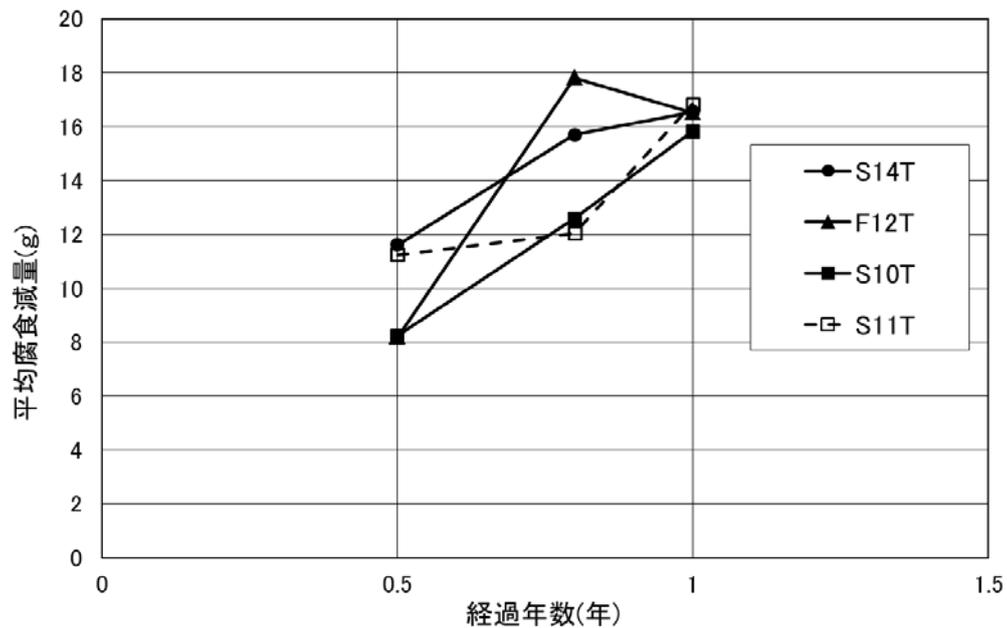


図 4. 1. 11 観覧車腐食促進試験の経過年数と腐食減量

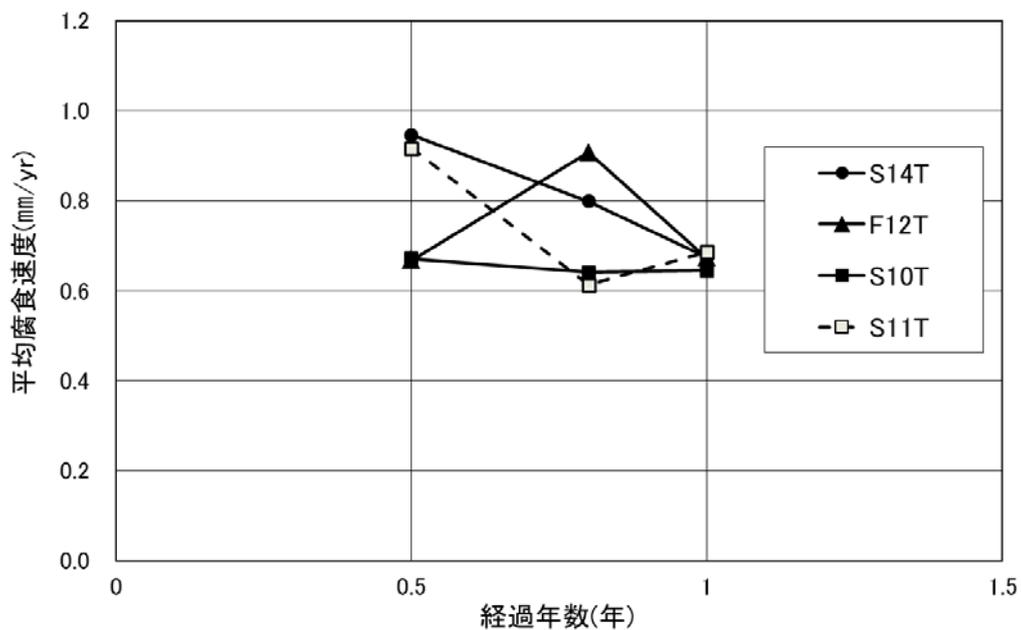


図 4. 1. 12 観覧車腐食促進試験の経過年数と腐食速度

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。

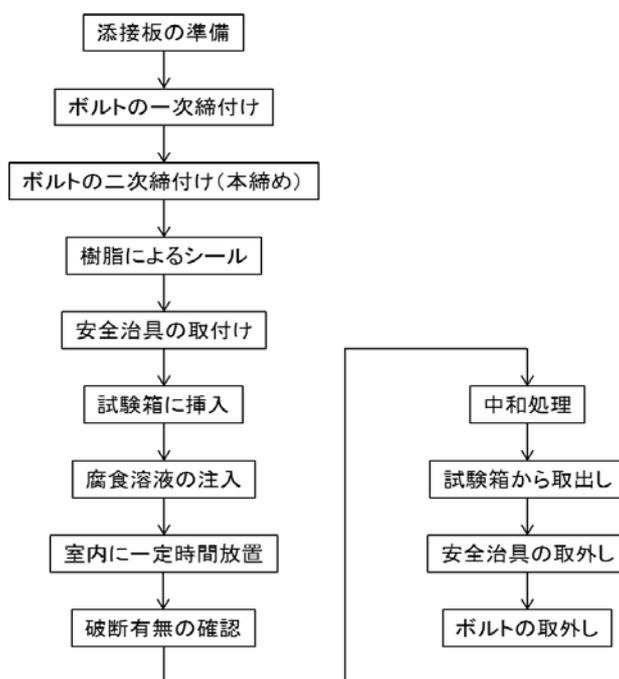


図 4.2.1 腐食促進試験（遅れ破壊試験）の作業フロー

(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。

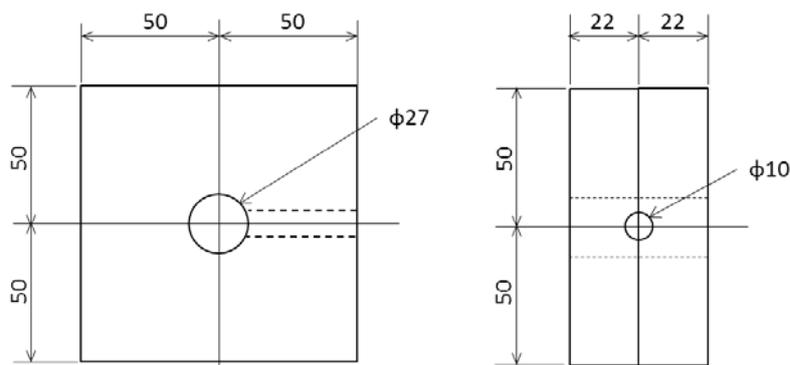


図 4.2.2 添接板

(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ので、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。

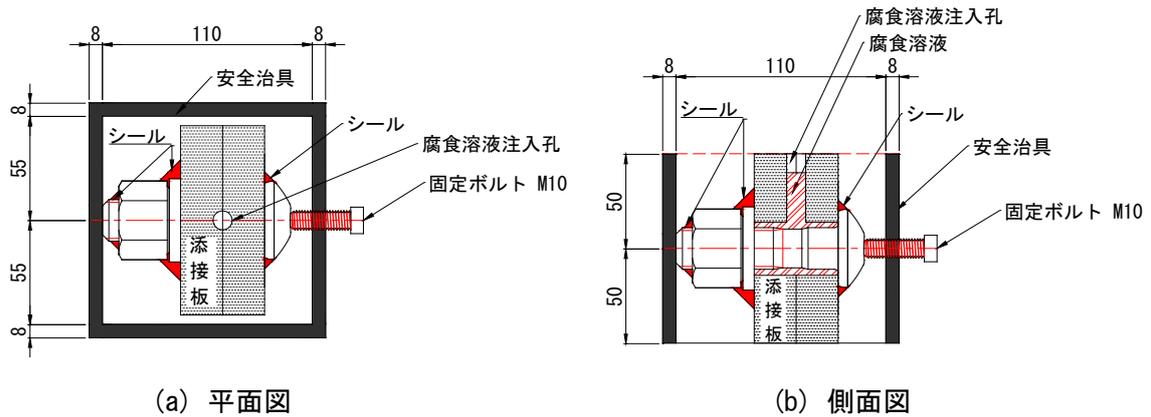


図 4.2.3 安全治具

(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。

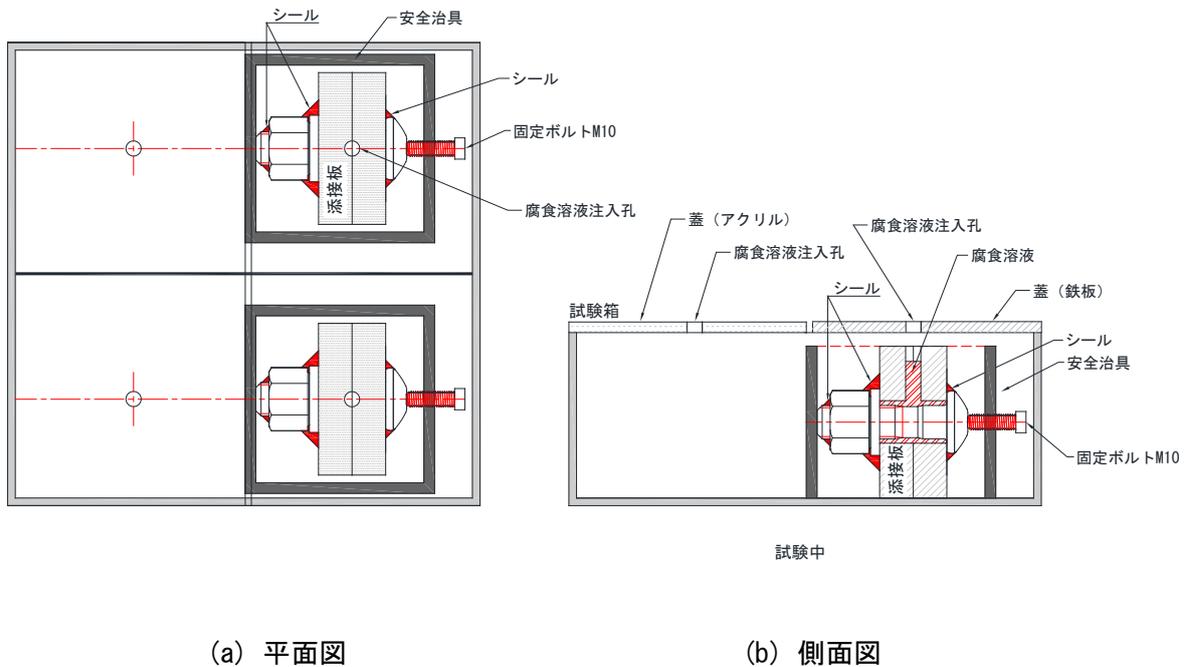


図 4.2.4 試験箱に挿入状況

(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）

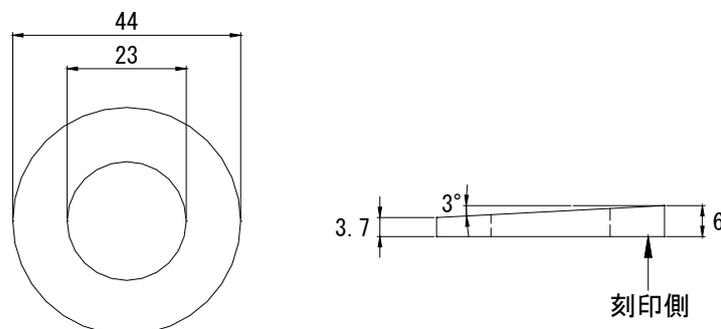


図 4.2.5 テーパー座金形状

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）

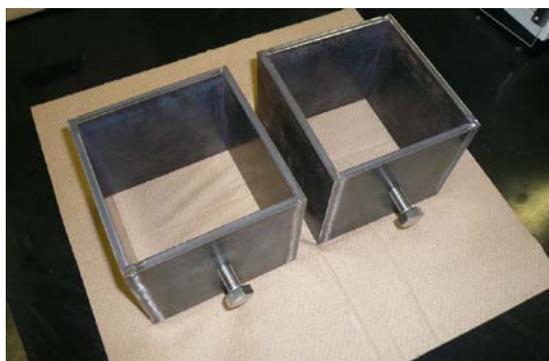


写真 4.2.2 安全治具外観



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す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、直接接触す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