

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