

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 $1,250\text{N/mm}^2$ 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 $1,200\text{N/mm}^2$ 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 $\phi 21.5\text{mm}$ ）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）。

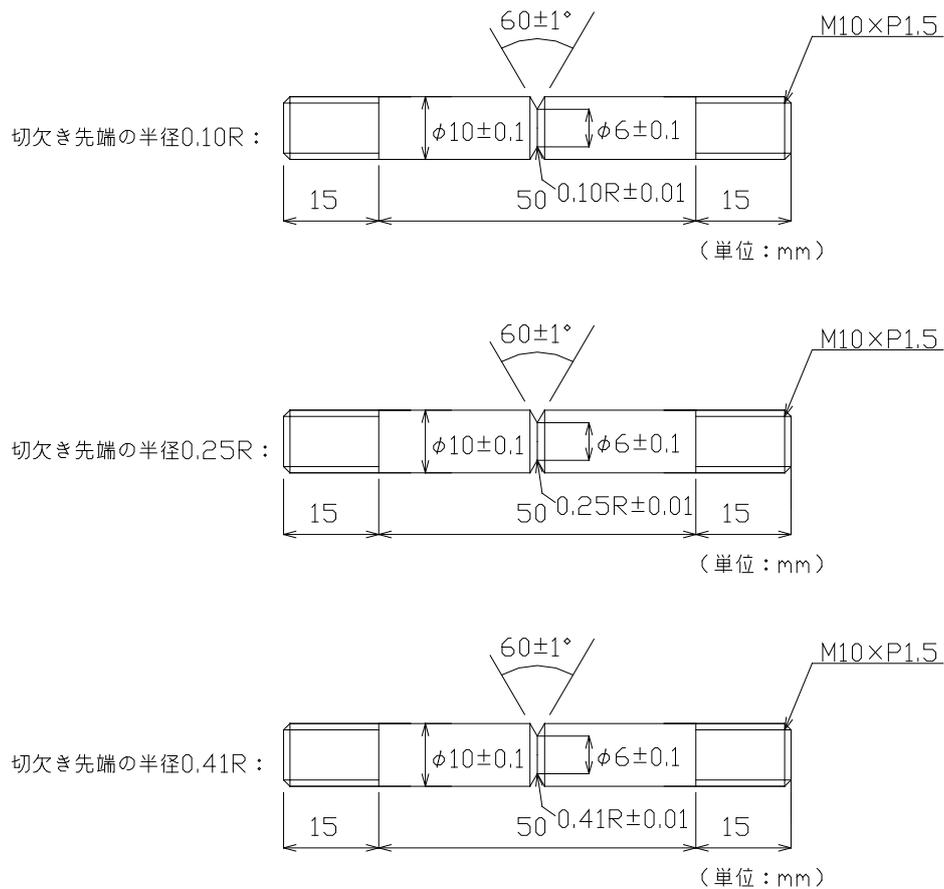


図-3.3.1 試験片形状

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。

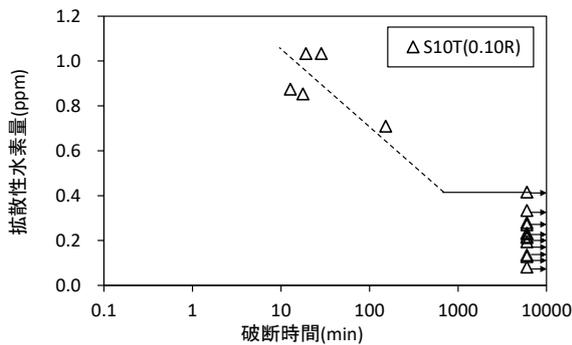


図 3.3.2 拡散性水素量と破断時間 (S10T)

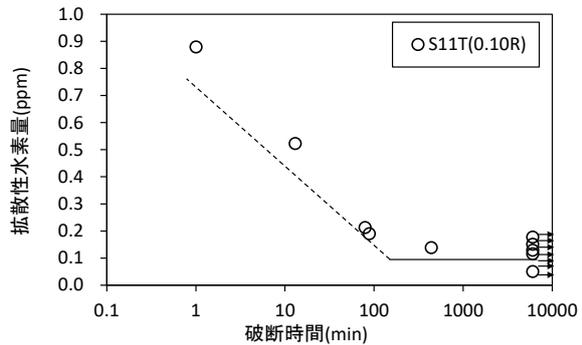


図 3.3.3 拡散性水素量と破断時間 (S11T)

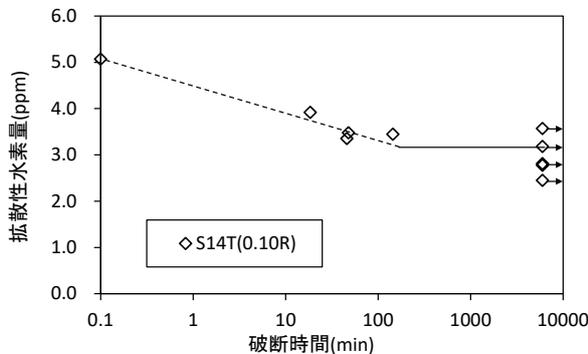


図 3.3.4 拡散性水素量と破断時間 (S14T)

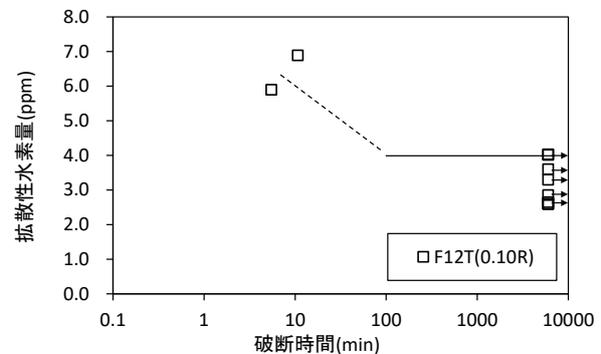


図 3.3.5 拡散性水素量と破断時間 (F12T)

(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。

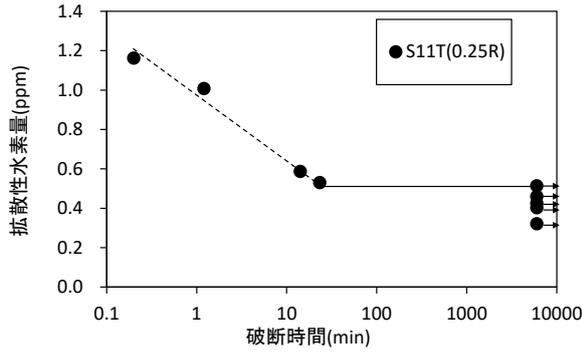


図 3.3.6 拡散性水素量と破断時間 (S11T)

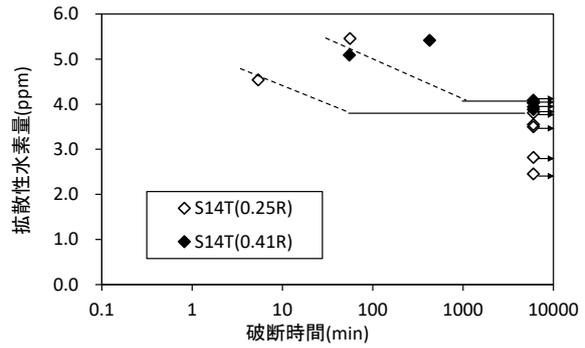


図 3.3.7 拡散性水素量と破断時間 (S14T)

(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。

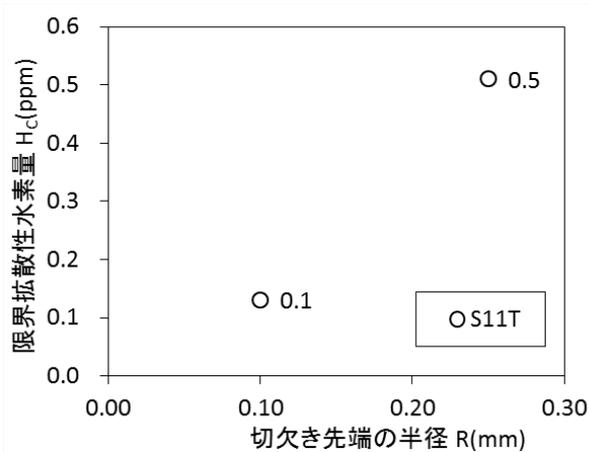


図 3.3.8 H_c と切欠き先端の半径 R (S11T)

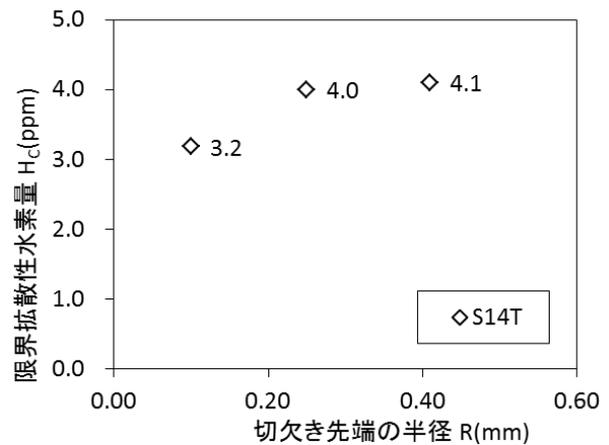


図 3.3.9 H_c と切欠き先端の半径 R (S14T)

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。

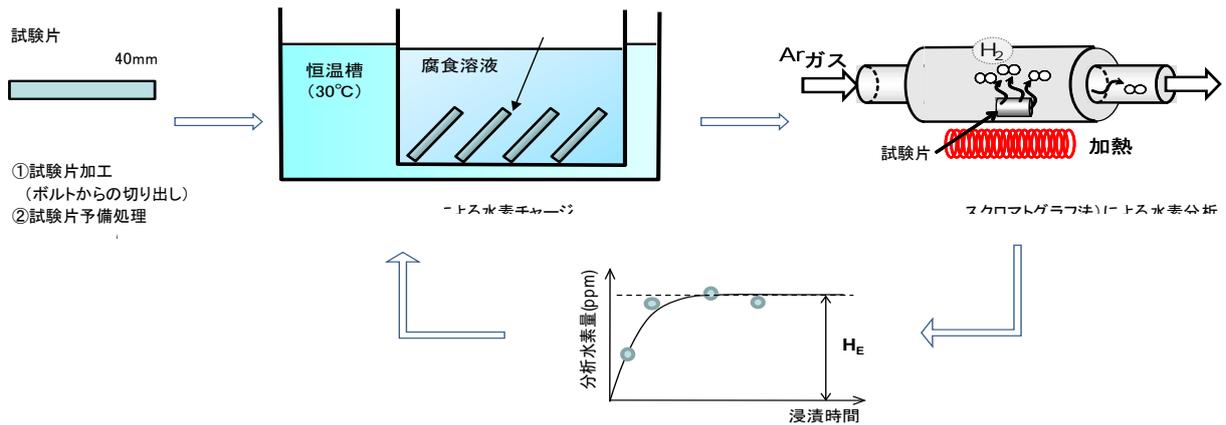


図 3.4.1 侵入水素量 H_E の評価手順 (概要)

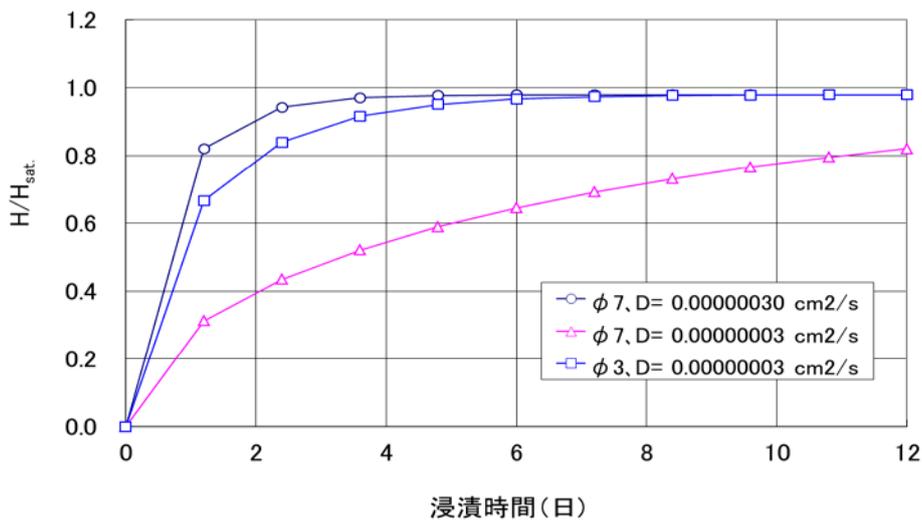


図 3.4.2 浸漬時間と H/H_{sat} . (H_{sat} : 飽和水素量)

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			0.02		0.05
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			0.02		0.20
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			2.04		0.64
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					

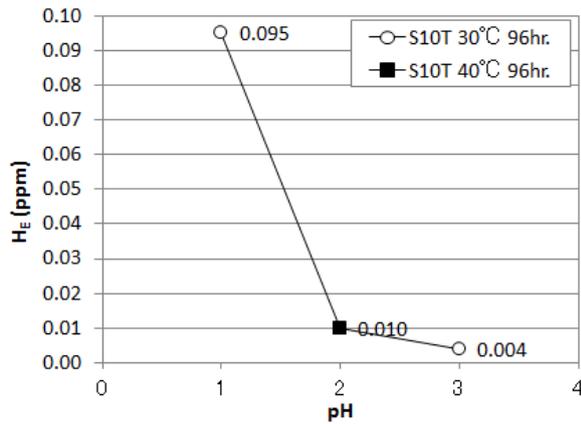


図 3. 4. 3 S10T の侵入水素量 H_E

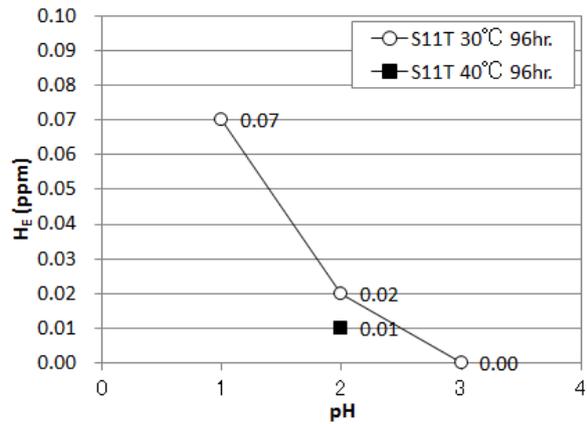


図 3. 4. 4 S11T の侵入水素量 H_E

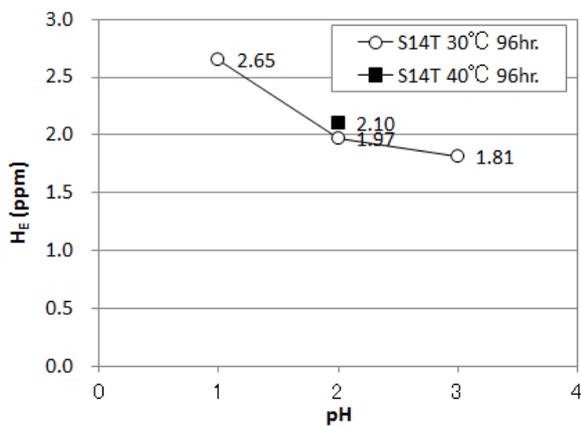


図 3. 4. 5 S14T の侵入水素量 H_E

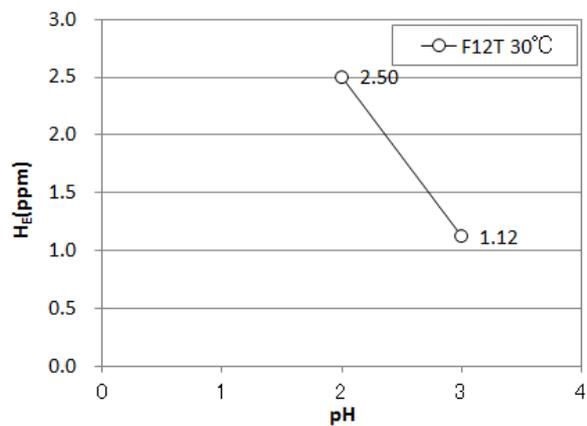


図 3. 4. 6 F12T の侵入水素量 H_E

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。

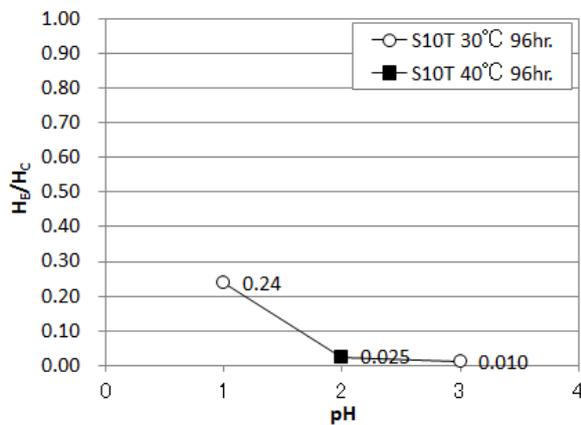


図 3.5.1 S10T (0.10R) の H_E/H_c

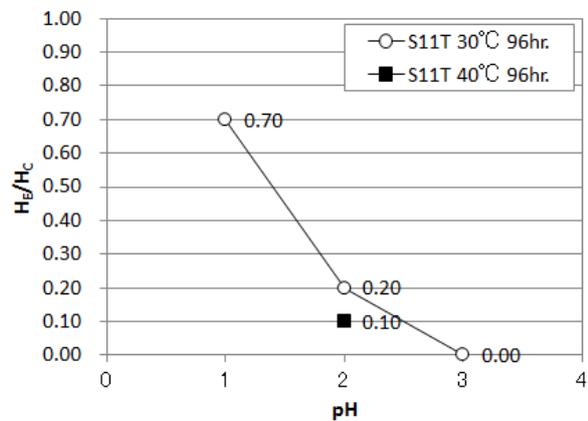


図 3.5.2 S11T (0.10R) の H_E/H_c

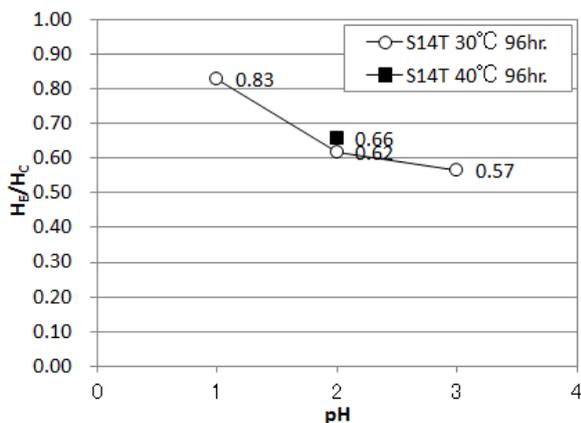


図 3.5.3 S14T (0.10R) の H_E/H_c

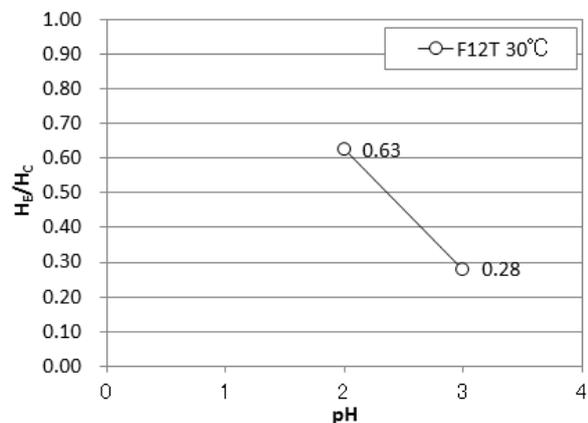


図 3.5.4 F12T (0.10R) の H_E/H_c

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

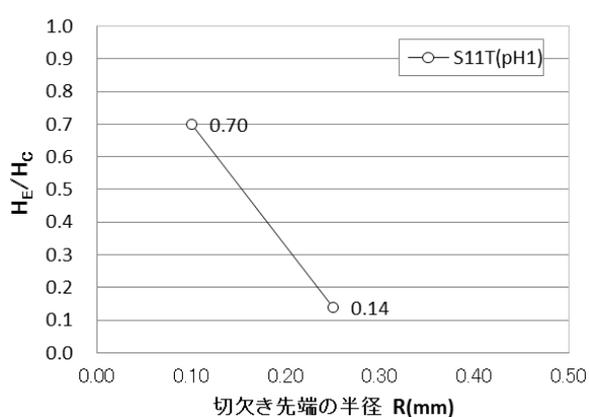


図 3.5.5 H_E/H_c と切欠き先端の半径 R (S11T)

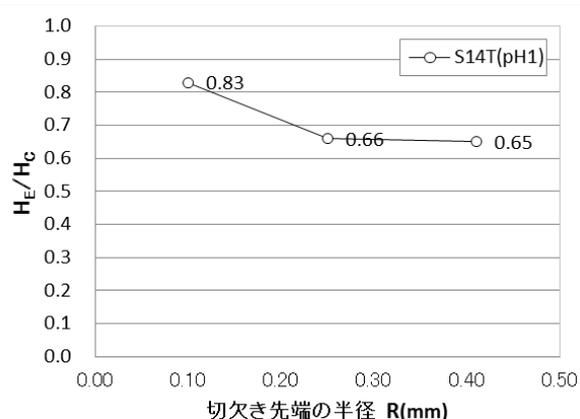


図 3.5.6 H_E/H_c と切欠き先端の半径 R (S14T)

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。

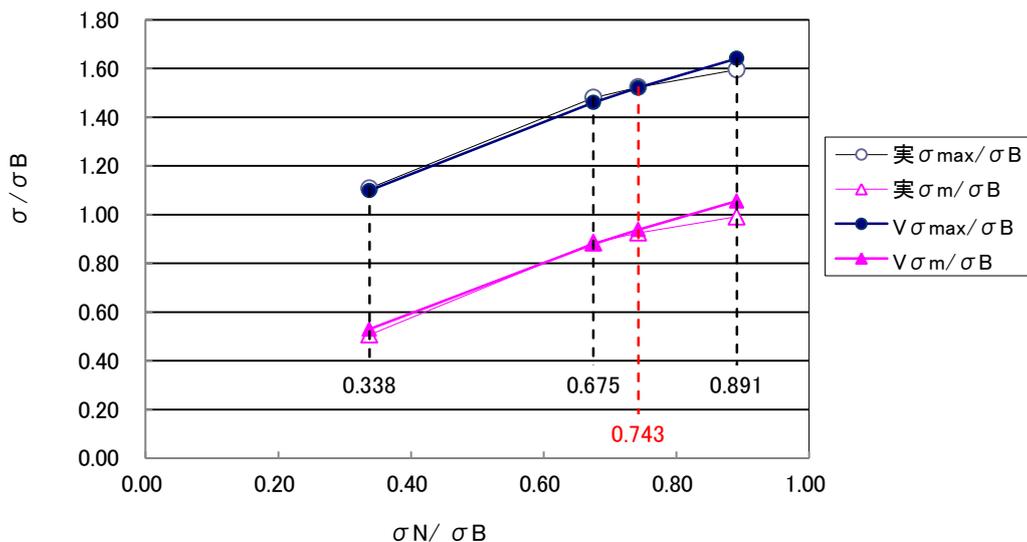


図 3.6.1 実際のボルト F10T (M22) と環状切欠き試験片の応力 (0.25R)

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。

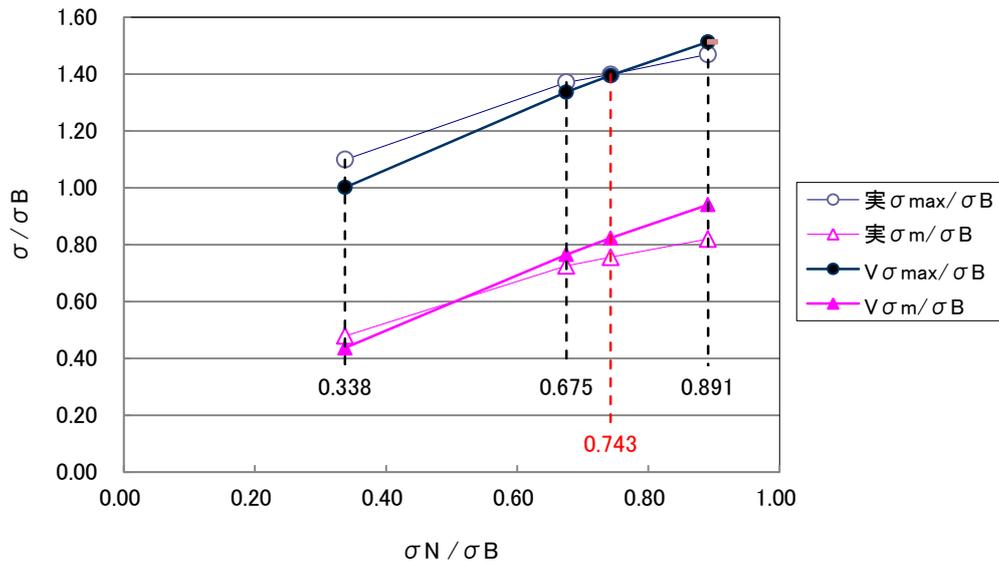


図 3. 6. 2 実際のボルト S14T (M22) と環状切欠き試験片の応力 (0.35R)

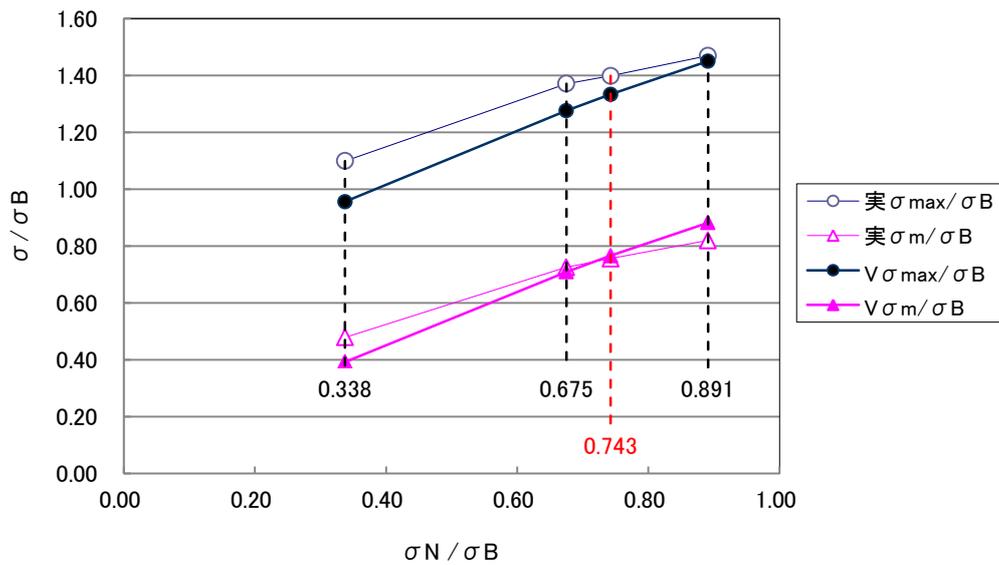


図 3. 6. 3 実際のボルト S14T (M22) と環状切欠き試験片の応力 (0.41R)

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