

## 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<sup>\*3</sup>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<sup>2.1)</sup>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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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<sup>\*3</sup>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。

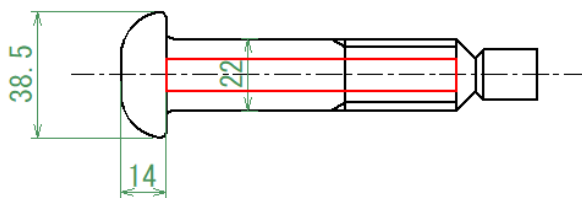


図 2.1.1 環状切欠き試験片採取位置

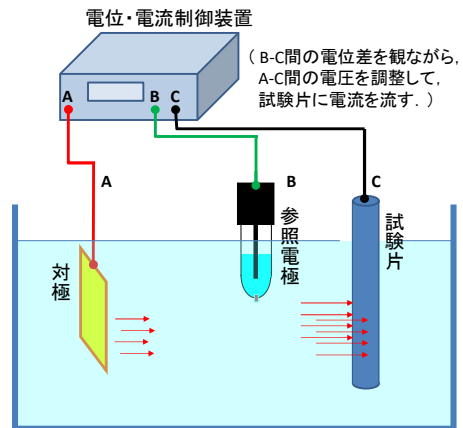


図 2.1.2 電解水素チャージ試験例

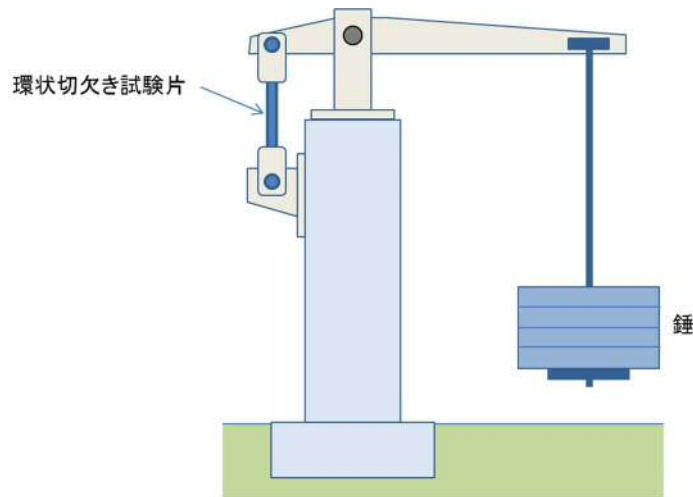


図 2.1.3 定荷重試験機

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。

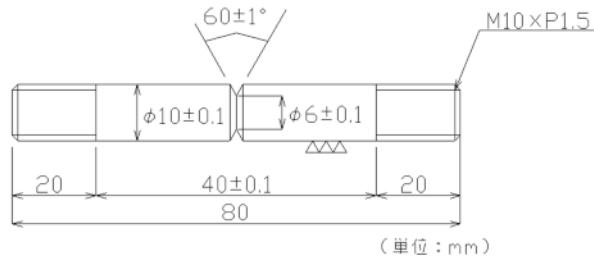


図 2.1.4 環状切欠き試験片の例

## 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。

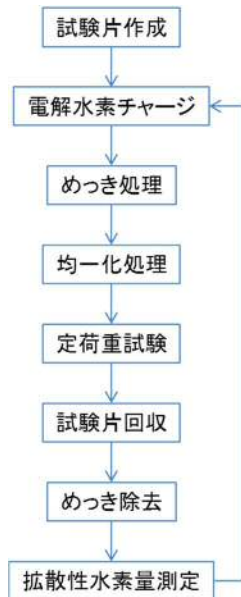


図 2.1.5 限界拡散性水素量  $H_C$  の評価フロー

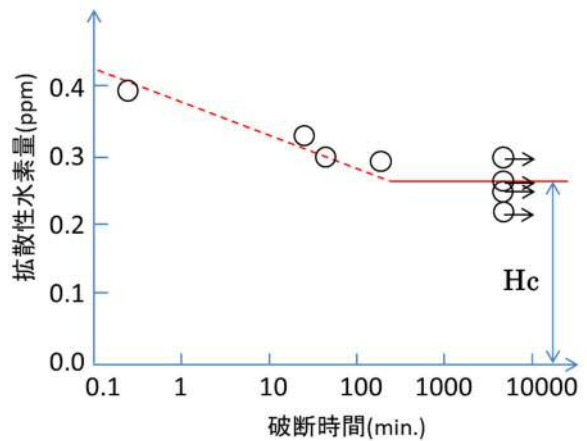


図 2.1.6 拡散性水素量と破断時間 (例)

### 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/mm<sup>2</sup>)×環状切欠き部の断面積(mm<sup>2</sup>))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。

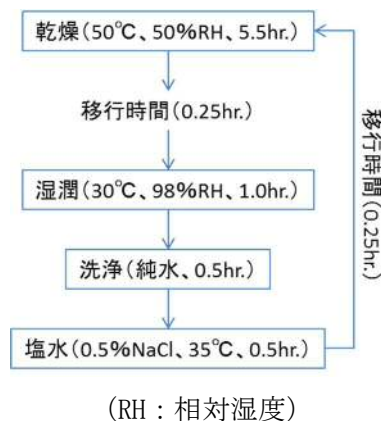


図 2.1.7 腐食促進試験(8hr/サイクル)の例

## 2.2 H<sub>E</sub><sup>\*</sup>/H<sub>C</sub><sup>\*</sup>法

### 2.2.1 H<sub>E</sub><sup>\*</sup>/H<sub>C</sub><sup>\*</sup>法の概要

H<sub>E</sub>/H<sub>C</sub>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<sub>E</sub><sup>\*</sup>/H<sub>C</sub><sup>\*</sup>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<sup>2.2)</sup>。

### 2.2.2 H<sub>E</sub><sup>\*</sup>/H<sub>C</sub><sup>\*</sup>法の試験方法と耐遅れ破壊特性の評価方法

#### (1) H<sub>C</sub><sup>\*</sup>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 $\sigma_N$ と環状切欠き先端部の最大主応力 $\sigma_{\max}^*$ を求め、 $\sigma_{\max}^* - \sigma_N$ の換算式を多項式近似により求める。 $\sigma_B$ 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、

$\sigma_{\max}^*$  : 環状切欠き先端部の最大主応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_N$  : 環状切欠き部の公称応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_B$  : 引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

##### 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 $\sigma_N$ と局所拡散性水素量 $H_{\text{CSRT}} (=H_C^*)$ 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。

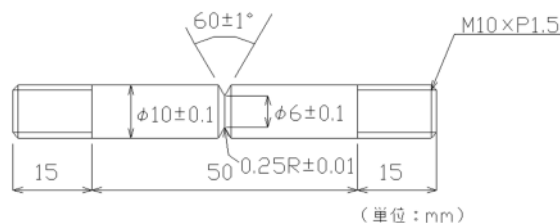


図 2.2.1 試験片形状

#### 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NH<sub>4</sub>SCN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  $\sigma_N$  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  $\sigma_N$  を【STEP1】で得た  $\sigma_{max}^* \cdot \sigma_N$  関係の換算式に入力して求めた  $\sigma_{max}^*$  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  $\lambda_c^*$ ) を逆推定する。もう一つの統計量  $\xi_c^*$  の計算は文献<sup>2,3)</sup>による。

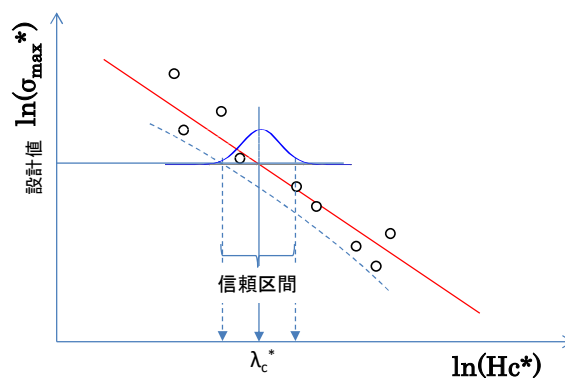


図 2.2.2  $\sigma_{max}^* \cdot H_c^*$  の関係 (例)

(2)  $H_E^*$  の取得

最近の研究<sup>2,3)</sup>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  $\sigma_m^*$  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  $\lambda_E^*$ ) 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)
- $\sigma_m^*$  : 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  $\xi_e$  は、過去の研究<sup>2,4)</sup> 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  $\lambda_c^*$ 、 $\xi_c^*$ )、対数正規分布(パラメータ  $\lambda_E^*$ 、 $\xi_E^*$ )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。

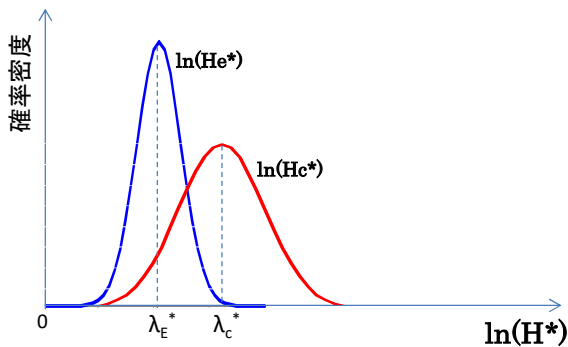


図 2.2.3  $H_E^*$ 、 $H_C^*$  確率分布

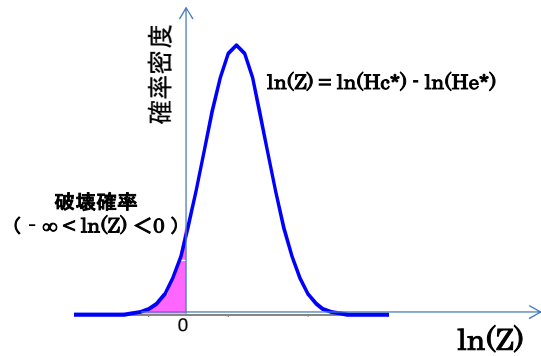


図 2.2.4  $H_E^*-H_C^*$  確率分布

## 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