特集記事 • 10
安全性確保のための構造材料寿命評価・予測技術の最前線

ボルトの遅れ破壊評価法の現状と展望

Development and Prospect of Delayed Fracture Evaluation for High Strength Steel Bolts

萩原行人
Yukito Hagihara
上智大学　理工学部
機能創造理工学科　教授

1 はじめに

遅れ破壊とは、荷重が負荷されてからある時間経過後に突然破壊する現象で、時間遅れ破壊を略称したものであり、また、遅れ破壊は鋼中に侵入した水素によって引き起こされ、静的荷重のもとで生ずるものである[1)]。遅れ破壊感受性は、鋼材強度の上昇とともに高まる。そのため、近年の省資源、省エネルギーのために構造材料の高強度化による構造物の軽量化が種々の分野で積極的に検討される中で改めて遅れ破壊特性の解明が重要になってきている。遅れ破壊は典型的に高強度ボルトで経験されたが、自動車用の高強度薄鋼板でも高強度化にともなう課題となっている[2,3)]。しかし、本稿では歴史的に遅れ破壊の研究が多くなされてきた高力ボルトを対象にした遅れ破壊評価法の現状と展望について述べる。

ボルト接合において摩擦接合法が取り入れられ、接合部強度を高めるためにボルト締め付け力が増大するのにともない、ボルトの高強度化が進められた。そうした中で1960年代にF13T（引張強度1300MPa）の高力ボルトで遅れ破壊が多数発生した[1)]。それを契機に精力的にボルトの遅れ破壊研究が進められた。

ボルトの遅れ破壊の直接的な再現試験としてボルト暴露試験が1968年に日本鋼構造協会で取り組まれた。それと同時に実験室的な検討も行われ、その成果として1980年にボルトの遅れ破壊試験法がJIS原案[1)]にまとめられた。このJIS原案法ではpH2に調整した25℃の塩酸溶液中で切欠き曲げ定荷重試験を行い、200hでも破壊しない最大応力値で鋼材の遅れ破壊特性を評価するものであった。しかし、浸漬液の腐食条件が厳しく、水素侵入条件が鋼材の実際の大気腐食環境に対応していることを保証するものではないことから、「幻のJIS原案」にとどまった。

その後、水素量に着目した汎用的で定量的な遅れ破壊評価法の検討が進められた。遅れ破壊は、時間遅れはあるが、脆性破壊と同様に遅れ破壊の抵抗力と破壊の駆動力の相対関係で決まる。水素量ベースの評価においては、脆性破壊のK_c（破壊靱性値）に対応する遅れ破壊の抵抗力は水素に対する鋼材の遅れ破壊特性であり、Kに相当する駆動力はボルトの締め付け力と腐食等により環境から鋼材に侵入する水素量である。鋼材の遅れ破壊抵抗力に関しては、実験室試験法の開発とともに、試験片の切欠き形状や負荷応力条件に依存しない指標の検討が進められた。また、遅れ破壊の駆動力に関しては、大気暴露で鋼材中に侵入する水素の解析をもとに検討されている。ここでは、紙面の都合で抵抗力の評価法に絞って紹介する。

2 水素量ベースの遅れ破壊抵抗力の評価法

2.1 定荷重試験法

遅れ破壊は、腐食などが原因で鋼材中に侵入した水素が引き金となって起こるものであることから、水素量にもとづく遅れ破壊評価技術が発展してきた。鋼材中に存在する微量な水素量を解析する昇温脱離分析法を開発することで、ボルトの遅れ破壊抵抗を水素量に着目した評価法が鈴木ら[4)]によって提案された。ボルトのねじ底の応力集中をシミュレートした円周切欠き試験片にボルトの締結力に対応する負荷応力を与えた定荷重試験を行い、100hでも遅れ破壊しないときの試験片に吸蔵されていた平均水素量を鋼材の遅れ破壊に対する抵抗値の指標として限界水素量（遅れ破壊に対するしきい値、H_{th}）とした。

山崎ら[5)]は定荷重試験評価法の緻密化、高精度化をはかった。陰極電解法で水素をプレチャージした後、Cdめっきを施し、24h放置することで吸蔵水素分布を試験片内で均一にして定荷重試験に供した。水素の均一化処理により、設定した力学条件においてH_{th}を正確に求める方法を確立した。

定荷重試験で得られるH_{th}を環境からボルトに侵入する水素量と対比することで、遅れ破壊発生の有無を評価することができるが、切欠形状（応力集中係数、K_t）や負荷応力が変わると改めてその条件で定荷重試験を行って、鋼材の抵抗値としてのH_{th}を求めることが必要となってくる。そのため、ボルトなどの遅れ破壊発生部の形状や寸法、負荷される応力状態に依存しない遅れ破壊特性評価法の一般化をはかる検討が進められた。高木ら[6,7]は切欠き形状を変えたstep-wise定荷重試験を行い、切欠き形状によらない評価法としてLocal Approachの考えを拡張したワイブル応力・水素パラメータを提案した。

2.2 SSRT試験法

Wangら[8,9]は切欠き形状を変えたSSRT試験法（Slow Strain Rate Technique：低ひずみ速度試験法）を行い、材料特性値としての遅れ破壊抵抗の検討を行った。円周切欠き試験片の切欠先端では負荷応力による応力集中が起こり、多軸応力状態になる。Fig.1はWangらのFEM応力解析結果を再整理して、切欠先端における軸方向応力（σ_z）及び平均応力（σ_m）の分布を示したものであり、σ_zが最大となる切欠先端からの位置とσ_mの最大位置はほぼ一致している。

静水圧応力によって水素は応力誘起拡散して集積する。静水圧応力（σ_h）と平均応力を同じものとして扱っている場合があるが、ここでは静水圧応力は、用語の定義に合わせて静水圧（圧縮）の場合を正として、$\sigma_h = -\sigma_m$となる[10]。静水圧応力による集積水素量（H_a）は平均水素量（H）に対して次式で表される[10]。

$$H_a = H\exp\{-\Delta\sigma_h V_H/RT\} = H\exp\{\Delta\sigma_m V_H/RT\} \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで、$\Delta\sigma_h$は静水圧応力の差分、$\Delta\sigma_m$は平均応力の差分、V_Hは水素のモル体積変化（$=2\times10^{-6}$m^3/mol）、Rは気体定数（$=8.314$J/mol）、Tは絶対温度である。

SSRT試験では完全に水素が応力誘起拡散することが前提になるために、水素により粒界破壊する焼戻しマルテンサイト鋼ではSSRT法で0.005mm/minという極低クロスヘッド速度で引張試験を行う必要があり[11]、破断に至るまでの時間は数時間に及んでいる。従って、その間に水素が試験片表面から散逸するのを防ぐために、試験片には水素チャージ後にCdめっき[5]を施している。

SSRT試験結果を、遅れ破壊発生時の切欠実断面の平均応力（σ_N）と試料内の平均水素量（H）の関係で整理したのがFig.2である。水素量の増大にともなって破壊応力は低下するが、切欠形状の依存性があり、切欠先端半径が小さくなるほど、すなわちK_tが大きくなるほど同じ水素量に対してσ_Nは小さくなる。それに対してFEM応力解析結果をもとに得られた粒界破壊を呈した遅れ破壊の発生点に対応する切欠き先端における軸方向応力の最大値とそこの静水圧応力場に集積した水素量の関係で整理したのがFig.3である。試験片

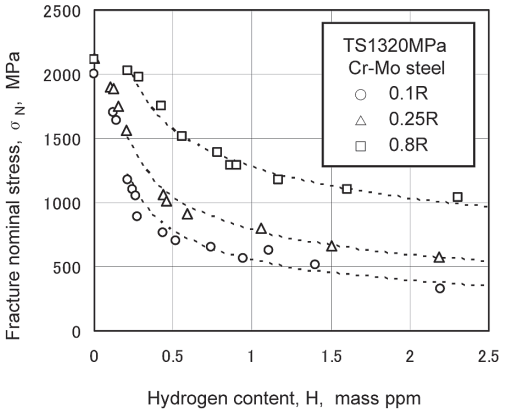

Fig.2 Variation of fracture nominal stress with average hydrogen content for SSRT test (effect of notch root radius).

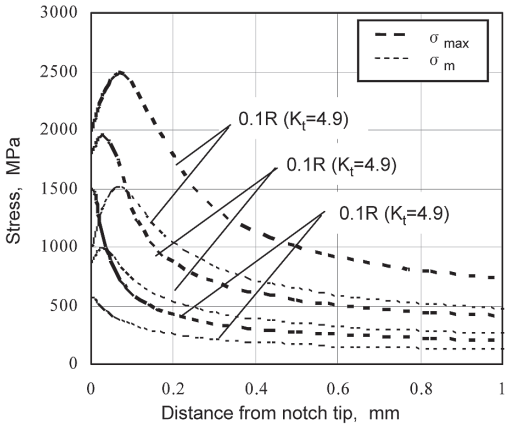

Fig.1 Axial stress and mean stress distribution at the notch tip of circumferentially notched round bar specimen.

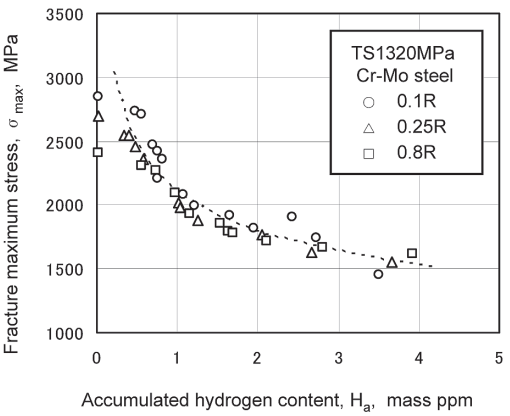

Fig.3 Variation of fracture maximum stress with accumulated hydrogen content for SSRT test.

形状や寸法、応力集中係数に依存しない関係が得られている。このことは遅れ破壊発生点における応力と水素の関係、すなわち、切欠き先端部の最大応力と最大集積水素量との関係が試験片形状などの力学条件によらない材料固有の遅れ破壊抵抗値であることを示している。

2.3 CSRT試験法

SSRT法では水素を封じ込めるめっきの信頼性が、これらの試験の重要なポイントになっており、また、応力誘起拡散による局所集積水素量は応力解析結果をもとに算定することになる。さらに、SSRT試験機という特殊な試験装置を必要とすることも、この評価法の汎用化をはかる上での課題となる。そこで、SSRT試験に代替する評価法として、筆者ら[12]は、遅れ破壊試験を通常の引張試験速度で行い、応力誘起拡散が無視できるきわめて短時間で評価するCSRT (Conventional Strain Rate Technique) 試験法を提案した。SSRT試験法とCSRT試験法の特徴を比較したのがFig.4である。SSRT試験では、負荷応力にともなう静水圧応力の変化に対応して、(1) 式で与えられる水素を集積させるために、水素の拡散に必要な時間をかけることが必要となる。それに対して、CSRT試験法では、あらかじめSSRT試験での集積水素量に相当する水素量を試験片の中心まで均一に吸蔵させ、その状態で遅れ破壊試験を行うことになる。

Wangらの結果[8]から試験片に吸蔵された水素量は約0.1～2mass ppmに対して、切欠き先端の静水圧応力場への集積水素量は最大約4mass ppmとなっている。陰極電解法で溶液として0.1N NaOH、3%NaCl＋0.3g/lNH_4SCN、3%NaCl＋3g/lNH_4SCNの3種類を用い、さらに電流密度を変えることで、最大6ppm程度の水素量を均一にチャージする条件を求めた。また、そのときの昇温分析による水素放出曲線のプロファイルはチャージ条件によらずほぼ一定となっており、水素の存在状態に変わりがないことを示した[12]。

CSRT試験結果を、σ_Nと試験内の平均水素量 (CSRT試験の場合、特にH_{CSRT}と記す) の関係で整理した結果がFig.5である。σ_NとH_{CSRT}の関係は切欠き形状に依存し、切欠き先端半径が小さくなるほど、破壊応力は小さくなる。それに対し、FEM解析結果にもとづく遅れ破壊発生部の最大応力σ_{max}とそこでの水素量H_{CSRT}の関係は、Fig.6に示すようにSSRT試験の場合と同様、切欠き形状によらずその関係は次式のべき乗則で表される。

$$\sigma_{max} = \alpha H_{CSRT}^{-\beta} \quad \cdots\cdots (2)$$

すなわち、σ_NとH_{CSRT}の関係は両対数表示で直線関係となることを示している。

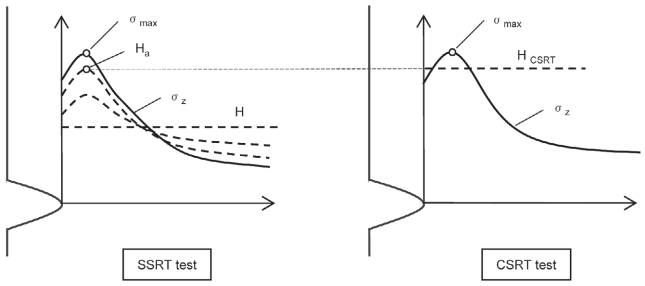

Fig.4 Comparison between SSRT and CSRT method; local stress and hydrogen content at the delayed fracture initiation point.

3 p-S-H評価

遅れ破壊の抵抗力は、破壊発生部の最大応力とそこでの水素量、すなわちSSRTで$\sigma_{max} - H_a$、CSRTで$\sigma_{max} - H_{CSRT}$で表される。$S = \sigma_{max}$とおくと、(2) 式のべき乗則の関係から

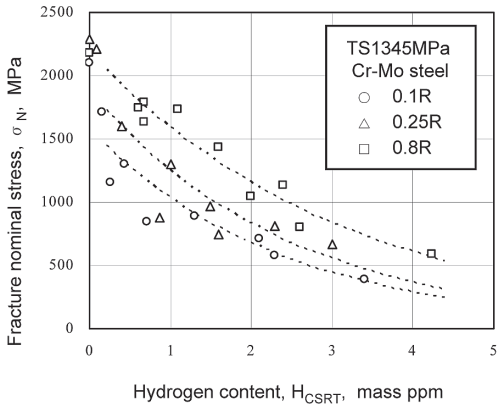

Fig.5 Variation of fracture nominal stress with hydrogen content for CSRT test.

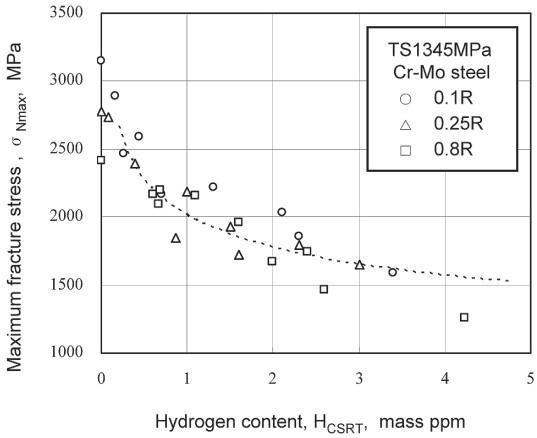

Fig.6 Variation of fracture maximum stress with hydrogen content for CSRT test.

疲労のS-N曲線に対応するS-H曲線というべきものとなる。

疲労のS-N曲線に関してはデータのばらつきを考慮した統計処理が行われ、p-S-N法として確立されている[13]。遅れ破壊についてもp-S-Hの検討を行った。文献12)のCSRT試験データについて評価した結果をFig.7に示す。ボルトの標準的な締め付け条件に対してS-H関係の平均線である破壊確率p＝50%に対する臨界水素量は0.46mass ppmであるが、p＝10%に対しては0.26mass ppmとなる。

暴露試験におけるボルトの遅れ破壊は確率的であり、その要因として駆動力及び抵抗力の確率的要素が挙げられる。抵抗力の確率的要素については、CSRT試験などである数のデータ、例えば、p＝10%についてはn＝8、p＝5%についてはn＝14を採取し、統計処理でそれぞれの確率に対する臨界水素量を求めることができる。一方、駆動力も確率的であり、使用環境によって大きく異なる。これに関しては、例えば地震設計の場合と同様に環境を大きくレベル1～レベル3に分類して駆動力を設定することが考えられる。これについては今後の課題である。

4 おわりに

ボルトの遅れ破壊について抵抗力の研究の現状を紹介した。鋼材の遅れ破壊抵抗力は、粒界破壊を呈する場合には遅れ破壊発生点の最大応力とそこの水素量で表される。

近年、析出物のトラップサイトを活用した遅れ破壊に強い鋼材が開発されているが、そのようなトラップ鋼の遅れ破壊抵抗値の評価、確率的な要因を考慮した評価が課題として上げられる。さらに、今後、遅れ破壊抵抗力に関しては環境をいくつかのレベルに設定して、遅れ破壊を起こさない鋼材の使用範囲を定量的に確立していくことも必要となる。

日本鋼構造協会「超高力ボルトの遅れ破壊特性評価法の開発」小委員会（主査：松山晋作先生）では、遅れ破壊評価法の確立を目指して活動を展開している。そこでの議論を参考にしながら本稿をまとめた。今後の研究の進展に期待したい。

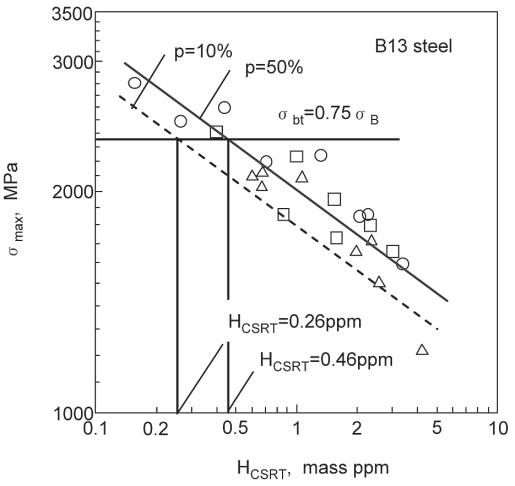

Fig.7 10% and 50% probability of S-H relation and corresponding critical hydrogen contents.

参考文献

1）松山晋作：遅れ破壊，日刊工業新聞社，(1989)
2）K. Hayashi，N. Fujita，S. Takebayashi，M. Takahashi and Y. Sakuma：SAE Paper 2005-01-0497，(2005)
3）田路勇樹，高木周作，吉野正崇，長谷川浩平，藤田毅，田中靖：CAMP-ISIJ，21 (2008)，597.
4）鈴木信一，石井伸幸，宮川敏夫，原田宏明：鉄と鋼，79 (1993) 2，97-102.
5）山崎信吾，高橋稔彦：鉄と鋼，83 (1997) 7，42-47.
6）高木周作，井上忠信，原徹，早川正夫，津崎兼彰，高橋稔彦：鉄と鋼，86 (2000) 10，49-55.
7）高木周作，寺崎聡，津崎兼彰，井上忠信，南二三吉：溶接学会論文集，22-1 (2004)，125-131.
8）M. Wang，E. Akiyama and K. Tsuzaki：Mater. Sci. Eng. A, 398 (2005)，37-46.
9）M. Wang，E. Akiyama and K. Tsuzaki：Corros. Sci.，49 (2007)，4081-4097.
10）A. R. Troiano：Trans. ASM，52 (1960)，54-80.
11）M. Wang，E. Akiyama and K. Tsuzaki：Scr. Mater.，53 (2005)，713-718.
12）萩原行人，伊藤睦人，久森紀之，鈴木啓史，高井健一，秋山英二：鉄と鋼，94 (2007) 6，27-33.
13）日本機械学会基準，JSME S 002-1994：統計的疲労試験方法，(1994)

(2008年8月29日受付)