

高強度鋼における水素割れ感受性の評価パラメータ

高木 周作*・井上 忠信*・原 徹*・早川 正夫*
津崎 兼彰*・高橋 稔彦*

Parameters for the Evaluation of Hydrogen Embrittlement of High Strength Steel

Shusaku TAKAGI, Tadanobu INOUE, Toru HARA, Masao HAYAKAWA,
Kaneaki TSUZAKI and Toshihiko TAKAHASHI

Synopsis : The influences of the applied stress and the stress concentration factor (Kt) on hydrogen embrittlement were investigated in the commercial JIS SCM440 steel with the tensile strength of 1403 MPa. The applied stress was changed from 0.33 times to 0.72 times the tensile strength of the notched specimen, while the Kt was altered from 2.1 to 6.9. The hydrogen embrittlement property was evaluated with the resistance to the diffusible hydrogen in the steel. The diffusible hydrogen concentrations were analyzed by thermal desorption analysis. The results are as follows.

(1) The hydrogen embrittlement occurs under the lower diffusible hydrogen concentrations with increasing Kt. However, the H_D - t (diffusible hydrogen concentration - time to failure) curves become almost the same when the Kt and the applied stress are high.

(2) The criterion of the hydrogen embrittlement cannot be determined by the combination of the maximum local axial stress in the specimen and the maximum diffusible hydrogen concentration locally accumulated in the specimen.

In the discussion part, it was proposed that it is very important to consider the stress distribution in the specimen for the evaluation of hydrogen embrittlement.

Key words: delayed fracture; martensitic steel; critical diffusible hydrogen concentration; local hydrogen concentration; local tensile stress; probability of failure.

1. 緒言

高強度ボルトの実用化のためには、高強度鋼の遅れ破壊特性の改善が最も重要な課題である。遅れ破壊特性の向上に関する研究は従来より多数行われており、旧 γ 粒界を脆化させる元素の低減¹⁻³⁾、ベイナイト変態を利用した旧 γ 粒界への炭化物析出の抑制^{4,5)}、フェライト相の利用⁶⁾、高温焼戻しによる粒界析出炭化物の球状化⁷⁻¹⁰⁾、Nb添加による組織の微細化^{1,3)}などに関するものがある。最近注目されている手法としては、SiとCaの複合添加¹¹⁾、誘導加熱を利用した結晶粒微細化^{3,12)}、VC等の水素トラップサイトの利用¹³⁾、Niの表面濃化による水素侵入抑制^{7,8)}、改良オースフォーム利用¹⁴⁻¹⁷⁾があげられる。

一方で、これらの鋼の実環境での使用の可否を判定する遅れ破壊特性評価についても種々の研究および提案が行われている。遅れ破壊は環境から鋼材中に侵入する水素と鋼材に作用する応力により引き起こされる。そのため、遅れ破壊特性評価には鋼材の使用環境と鋼材の力学条件を示す2つのパラメータを決定する必要がある。従来から知られている評価法には、JIS原案法¹⁸⁾、SSRT試験法 (Slow Strain Rate Technique: 低ひずみ速度試験法)¹⁹⁾、FIP (Fédér-

ation Internationale de la Précontrainte: 国際プレストレストコンクリート連盟) 試験法²⁰⁾がある。これらの評価法は、鋼材の使用環境を示すパラメータをpHとし、pHを一定に保って試験を行っている。しかしながら、水素侵入条件が鋼材の実際の使用条件に対応していることを保証する実験結果はない。最近では、鋼材の使用環境を示すパラメータを鋼中の水素透過係数とし、その値を使用環境における値に設定した櫛田の提案した評価法^{21,22)}や鋼中の拡散性水素量をパラメータとした山崎らの提案した方法²³⁾がある。これら2つの評価法は、環境を示すパラメータとして遅れ破壊の主たる原因である水素に着目した点で非常に革新的な評価法である。しかしこれらの評価法においては、遅れ破壊試験結果に及ぼす試験片の切欠き形状および負荷応力の影響が明らかにされていない。つまり、力学条件を示すパラメータが決定されていない。そのため、これらの評価法で使用した試験片形状および応力条件と異なる使用条件下での鋼材の遅れ破壊特性の評価には用いることができない。

遅れ破壊の発生メカニズムの詳細はまだ不明である。現在までのところ、材料内の静水圧応力最大点付近に応力誘起拡散で水素が集積することにより割れが発生し、その割

平成12年5月25日受付 平成12年7月27日受理 (Received on May 25, 2000; Accepted on July 27, 2000)

* 金属材料技術研究所フロンティア構造材料研究センター (Frontier Research Center for Structural Materials, National Research Institute for Metals, 1-2-1 Sengen Tsukuba 305-0047)

れが進展して遅れ破壊が引き起こされると考えられている²⁴⁾。さらに、割れ発生に必要な水素量は割れの進展に必要な水素量よりも小さく、割れが発生すると必ず破断に至るとの報告²⁵⁾がある。野末²⁶⁾は、強度レベルの異なる種々の鉄鋼材料の遅れ破壊試験結果について、静水圧応力の最大位置に集積した鋼中の拡散性水素量を計算により推定し、集積拡散性水素量と試験片内の最大応力（引張軸方向）の間には反比例の関係があることを見出した。これより、最大応力を力学条件を示すパラメータとし、集積拡散性水素量を環境条件を示すパラメータとすることにより、鋼材の水素割れ感受性を試験片形状や負荷応力条件によらず一義的に評価できる可能性があるとして指摘している。

野末の試みは、限られた試験結果から種々の形状や応力状態で使用される部品における遅れ破壊の有無を判定できる評価基準を求めようとするもので重要である。しかし、解析結果を見ると同一応力値における集積拡散性水素量が3~5 ppmの範囲にありばらつきが大きい。このばらつきの要因として、解析に用いたデータが種々の鋼材や試験方法で行われた結果を含んでいることがあげられる。遅れ破壊の有無を一義的に判定する評価基準を検討するためには、同一の鋼材と試験方法において試験片形状と負荷応力を種々に変化させた結果を用いる必要がある。しかし、従来このような試験結果は報告されていない。

我々は遅れ破壊特性の評価法を確立することを念頭において、まず鋼材の水素割れ感受性に関して、同一材質の鋼材を用いて、試験片の応力集中係数および負荷応力条件が破断に必要な鋼中水素量に及ぼす影響を明らかにすることに着手した。本稿ではこれらの結果を報告するとともに、野末の提案した手法を適用し、水素割れ感受性を一義的に判定できる評価基準を確立するために必要なパラメータについて検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は、Table 1に示す組成の直径22 mmのSCM440鋼の熱間圧延材を用いた。供試材を直径12 mmの丸棒に切削加工した後、ソルトバスを用いて、1153Kで45分間のオーステナイト化処理後に油焼入れした。引き続き、723Kで90分間の焼戻しを行い水冷した。Fig. 1に光学顕微鏡組織を示す。旧 γ 粒径は17 μm であった。引張試験は直径3.5 mm、平行部長さ25 mmの試験片を用い、クロスヘッドスピード0.5 mm/min、ゲージ長12.7 mmの条件で行った。Fig. 2に、供試材の応力-ひずみ曲線を示す。0.2%耐力は1276 MPa、引張強さは1403 MPaであった。また、供試材をFig. 3に示す水素割れ感受性試験片に加工後に引張試験（クロスヘッドスピード：0.5 mm/min）を行った。それぞれの形状の試験片で2本もしくは3本の試験を行い、切欠

Table 1. Chemical composition of steel used (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
0.40	0.24	0.81	0.020	0.007	1.03	0.16	bal.

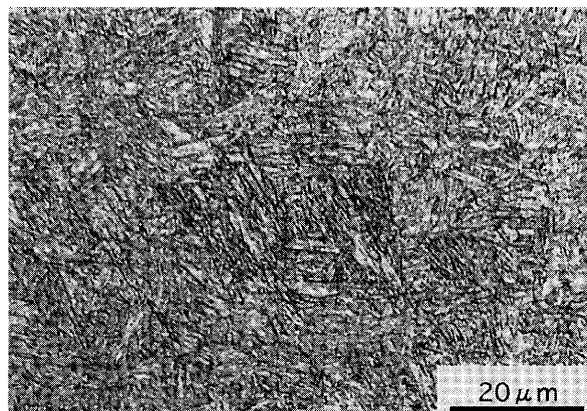


Fig. 1. Light microstructure of test specimen.

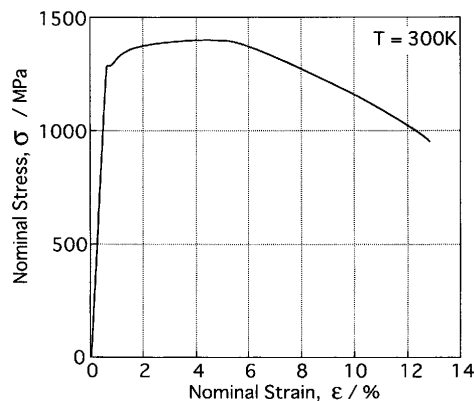


Fig. 2. Nominal stress-nominal strain curve of steel used.

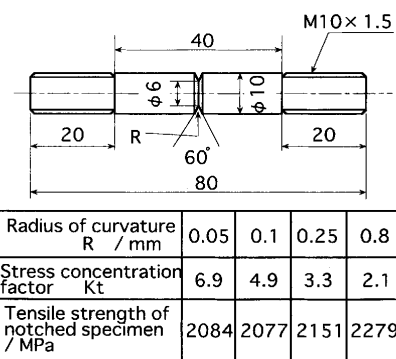


Fig. 3. Specimen used for hydrogen embrittlement tests. (unit: mm)

き材の引張強さを各条件の平均値として求めた。その結果をFig. 3にあわせて示す。

2.2 水素割れ感受性試験

水素割れ感受性試験は、Table 2に数値を記入した欄の計12条件にて行った。数値は、各条件において求められた限界拡散性水素量であり詳細は後述する。試験方法は、山

Table 2. Conditions of hydrogen embrittlement tests and maximum diffusible hydrogen concentration in unfailed specimens (Hc; mass ppm).

		Stress concentration factor Kt				
		2.1	3.3	4.9	6.9	
Applied stress for minimum cross section area (Net stress)	Tensile strength of notched specimen	0.33	/	/	0.52	0.34
		0.40	/	/	0.22	0.14
		0.47	/	0.39	0.13	0.09
		0.60	0.44	0.14	0.11	0.09
		0.72	/	/	0.08	/

崎らの方法²³⁾に基づいて行った。すなわち、試験片に種々の量の水素を陰極チャージし、カドミウムメッキを施した後、24時間以上室温で放置し、試料内の水素を均一化した。その試験片に所定の荷重を荷し、試験片の破断後に四重極質量分析計を用いて100 K/hの速度で昇温分析を行った。荷重荷後100時間経過しても破断しなかった試験片は、除荷後に未破断のまま水素分析を行った。得られた水素放出曲線から拡散性水素量を計算した。本論文では、拡散性水素量は室温から573Kまでに放出された水素量と定義した。

試験片ノッチ底の応力集中係数（以降Ktと表記する）は、西田²⁷⁾の提唱する式(1)を用いて評価した。

$$Kt(2\theta) = 1 + \frac{1 - \exp(-0.9\sqrt{B/d}(\pi - 2\theta))}{1 - \exp(-0.9\pi\sqrt{B/d})} (Kt(0) - 1) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 θ はノッチ開き角の1/2、 B はノッチのない部分の試験片半径、 d はノッチ深さ、 $Kt(0)$ はノッチ開き角 0° のときの応力集中係数²⁸⁾である。

試験片への荷重応力は、試験片のノッチ底の最小断面積で荷重荷重を割った値（ネット応力）で評価した。荷重応力は、Fig. 3に示す切欠き試験片の平均引張強さ2148 MPa（以降 σ_{NB} と表記する）の0.33倍から0.72倍に設定した。この応力水準は、平滑試験片の引張強さの0.51倍から1.10倍、降伏強さの0.56倍から1.21倍に相当する。

Fig. 4に供試材の水素放出曲線の一例を示す。水素放出のピーク温度は、チャージした水素量によらず、約423Kであった。非拡散性水素と考えられている673K以上で現れる水素放出のピーク値は拡散性水素のピーク値よりもはるかに小さく、約1/40であった。

2.3 試験片内の応力分布解析方法

応力荷重時の試験片内の応力分布は、汎用有限要素コードABAQUS/Standardを用いた数値解析により求めた。要素タイプは8節点軸対称要素、モデル化は試験片の1/4とした。要素数および節点数は、試験片形状によって異なり、要素数1067~1279、節点数3376~3978とした。最小要素長

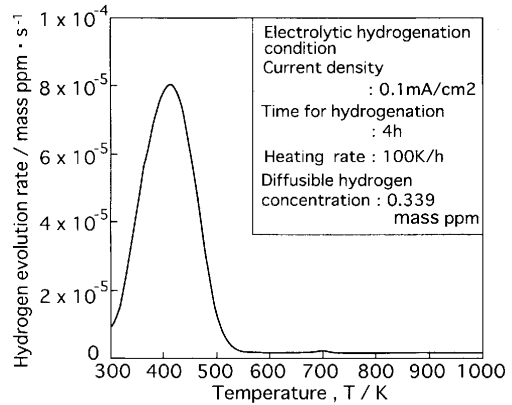


Fig. 4. A typical example of hydrogen evolution rate curve.

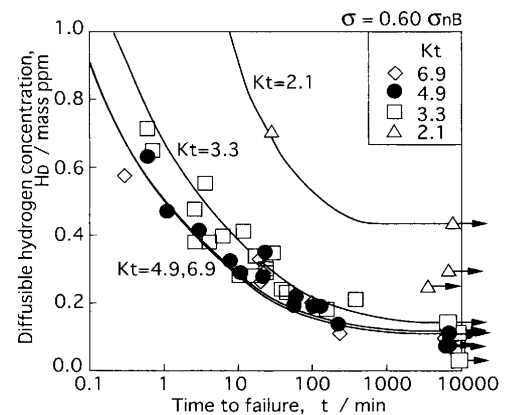


Fig. 5. Effect of stress concentration factor (=Kt) on H_D-t curves at applied stress of $0.60\sigma_{NB}$.

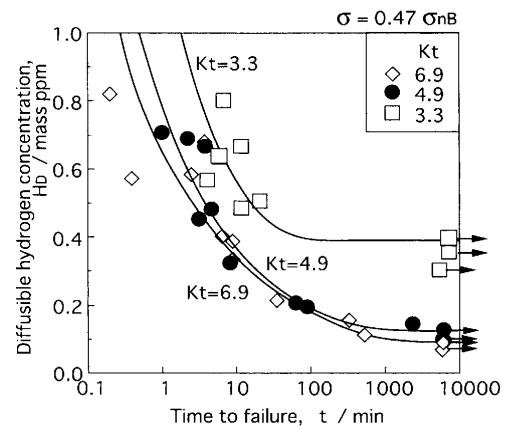


Fig. 6. Effect of stress concentration factor (=Kt) on H_D-t curves at applied stress of $0.47\sigma_{NB}$.

さは35~53 μmであった。

3. 実験結果

3.1 水素割れ感受性に及ぼす応力集中係数および荷重応力の影響

Fig. 5, Fig. 6に拡散性水素量-破断時間曲線（以降 H_D-t 曲線と表記する）に及ぼす応力集中係数Ktの影響を示す。

Table 2に各試験条件での破断が起こらなかった最多の鋼中平均水素量である限界拡散性水素量（以降Hcと表記する）を示す。負荷応力が $0.60\sigma_{NB}$ の条件(Fig. 5)では、Ktが大きくなるにつれて、 H_D-t 曲線は低水素量側へシフトしたが、Kt=4.9と6.9では結果に大きな差が見られなかった。Table 2からもわかるように、HcはKtが大きくなるにつれて小さくなるが、Kt=3.3以上でその減少量が急激に小さくなった。一方、負荷応力が $0.47\sigma_{NB}$ の条件では、Kt=4.9と6.9のHcの差はTable 2より0.04 ppmと小さいが、Kt=3.3と4.9でのHcの差は0.26 ppmと大きかった。負荷応力が $0.60\sigma_{NB}$ の条件では、Kt=3.3と4.9のHcの差は0.03 ppmと小さかったことから、Hcが大きく変化するKtの値が負荷応力に依存することがわかる。

Fig. 7にKt=4.9の条件での H_D-t 曲線に及ぼす負荷応力の影響を示す。負荷応力が高いほどHcは減少するが、 $0.47\sigma_{NB}$ 以上でHcの減少量が非常に小さくなった。また、負荷応力が低下するにつれて、短時間領域での H_D-t 曲線の傾きが大きくなった。この傾向は、Kt=3.3および6.9の条件においても同様であった。

Fig. 8に負荷応力とHcの関係をまとめて示す。負荷応力が高いほどHcは減少し、負荷応力が大きくなるとHcの減少量は急激に小さくなった。同一負荷応力条件で比較すると、HcはKtが大きい程少なくなり、あるKt以上でHcの減少量が非常に小さくなった。例えば、負荷応力 $0.60\sigma_{NB}$ の条件では、Ktが4.9と6.9のときのHcがそれぞれ0.11 ppmと0.09 ppmでありその差は非常にわずかになった。本論文中に示す水素割れ感受性試験結果はすべて一覧表として付録に附記する。

なお、破面観察の結果、すべての破断試験片のき裂発生部には粒界割れが認められ、本研究の範囲では破壊様式に大きな変化はみられなかった。

3.2 集積拡散性水素量と最大応力による水素割れ感受性の評価の検討

野末が提言した試験片内の静水圧応力最大点へ集積した集積拡散性水素量（以降Hc*と表記する）と試験片内の最大応力（以降 σ_{max} と表記する）をパラメータとした鋼材の水素割れ感受性の評価について検討する。

Hc*は式(2)^{26,29,30})により求めた。

$$Hc^* = Hc \times \exp \left\{ \frac{-\Delta\sigma_p \Delta V}{RT} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ΔV は鋼中の水素のモル体積変化で $2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$ 、 R は気体定数、 T は試験温度（本実験では300K）、 Hc は限界拡散性水素量である。試験開始前に試験片内で均一化された水素は、応力負荷後に静水圧応力の高いノッチ底に集積するが、直径10mmの試験片胴体部分の水素濃度の変化は無視できると考えた。そのため、 $\Delta\sigma_p$ はノッチ底断面の静水圧応力最大値と試験片胴体部分の静水圧応力

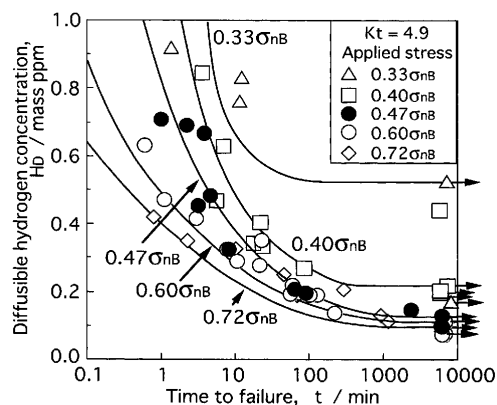


Fig. 7. Effect of applied stress on H_D-t curves for Kt=4.9.

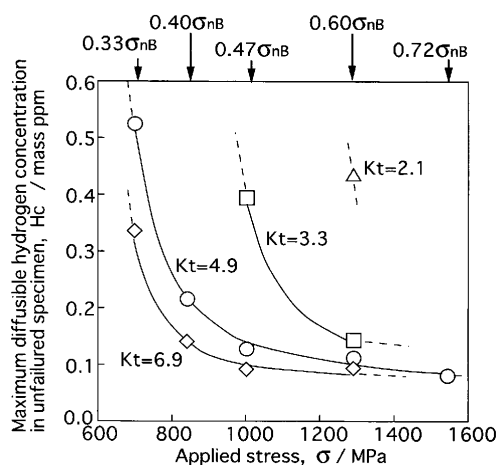


Fig. 8. Effect of Kt and applied stress on Hc.

(ノッチ底断面から上下に20mm離れた場所の中心部分の静水圧応力とした)の差とした。静水圧応力 $\sigma_p = (\sigma_r + \sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz})/3$ の値はFEM解析により求めた。Fig. 9に水素割れ感受性試験片のノッチ底断面の静水圧応力および引張軸方向の応力の計算結果の一例を示す。負荷応力が大きい程、またKtが大きい程、ノッチ底近傍の静水圧応力と軸方向応力ともに大きかった。また、Ktが大きい程、最大応力点がノッチ底に近くなった。

Fig.10にHcとHc*の関係およびそのKt依存性を示す。Hcに対するHc*の比すなわち水素集積率は2.0倍から5倍程度であり、Ktが大きいほど高くなった。これはFig. 9からもわかるように、Ktが大きい程 $\Delta\sigma_p$ が大きくなることに起因している。Fig.11に試験片内の最大応力 σ_{max} とHc*との関係およびそのKt依存性を示す。Ktが同一の条件では σ_{max} が高いほどHc*が少なく、 σ_{max} が同一の条件ではKtが大きい程Hc*が多かった。Fig.12に野末の結果²⁶)と本研究の結果を比較して示す。Fig.12で注目すべきことは、本研究の結果は同一材料より得た値であるにも関わらず、データの幅が野末の結果とほぼ一致したことである。これらFig.11, Fig.12に示した結果は、最大応力 σ_{max} と最大集積拡散性水素量Hc*による水素割れ感受性の一義的な評価は

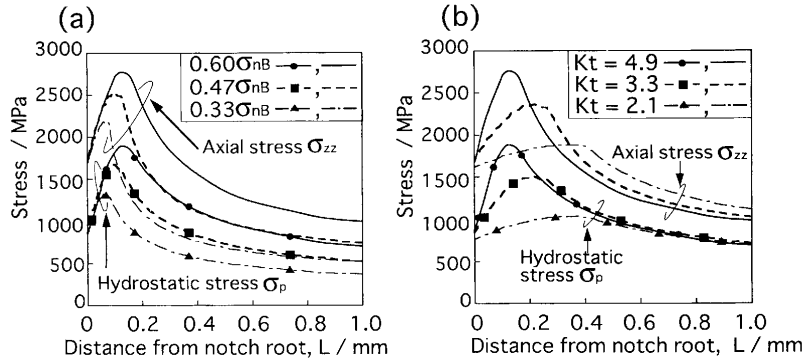


Fig. 9. Effect of (a) applied stress ($Kt=4.9$) and (b) Kt (applied stress= $0.60\sigma_{nB}$) on distribution of hydrostatic stress and axial stress. Without solid mark: Axial stress σ_{zz} ; With solid mark: Hydrostatic stress σ_p .

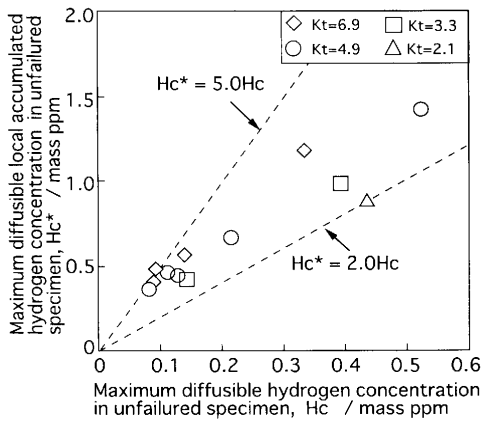


Fig. 10. Relationship between Hc and Hc^* .

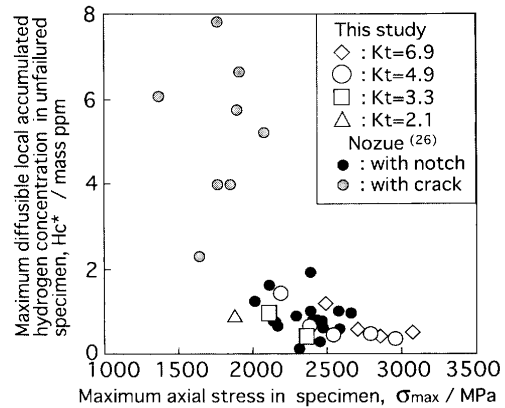


Fig. 12. Comparison between present results and Nozue's results (ref. 26).

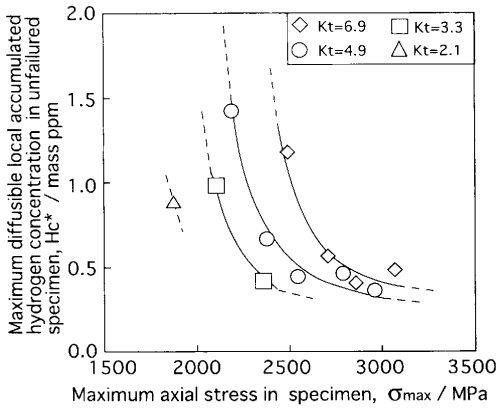


Fig. 11. Relationship between σ_{max} and Hc^* .

できないことを示している。

4. 考察

水素割れ感受性が部材形状や負荷応力によらず一義的に評価できれば、数少ない試験条件での結果から、実部品の材料の使用可否を推定することが可能となる。著者らは遅れ破壊は局所的に集積した水素により引き起こされると考えており、野末の提案した集積拡散性水素量 Hc^* が環境

条件を示すパラメータになり得ると考えている。一方、力学条件を示すパラメータとして、最大応力 σ_{max} をとって評価を試みたが、Fig.11に示したように Hc^* と σ_{max} の関係は Kt によって変化し、一義的な評価ができないことが明らかとなった。本章では Hc^* と σ_{max} の関係が Kt によって変化した理由を考察し、水素割れ感受性を一義的に評価するための力学的パラメータの検討に必要な要因を抽出する。

遅れ破壊のき裂発生には静水圧応力が最大となる地点だけでなく、その周囲の比較的応力が高い領域が関与している可能性が考えられる。その場合、応力の高い領域が広い程き裂発生の可能性が大きくなり、 Hc^* は小さくなる（水素割れが生じ易くなる）と推測される。

Fig.13に σ_{max} が等しく Hc^* の異なる2条件の試験片ノッチ底断面の応力分布を示す。図に示すように両者の応力分布は大きく異なり、 Kt が小さい条件の応力分布は Kt の大きい場合よりもなだらかな応力分布を呈し、応力の高い領域が広がった。 Hc^* は、高応力領域の広い $Kt=4.9$ の条件の方が $Kt=6.9$ の条件よりも小さかった。このことから、水素割れ感受性の評価には、応力分布形状を考慮することが重要であると考えた。

そこで、試験片の直径および負荷応力を調整し、ノッチ

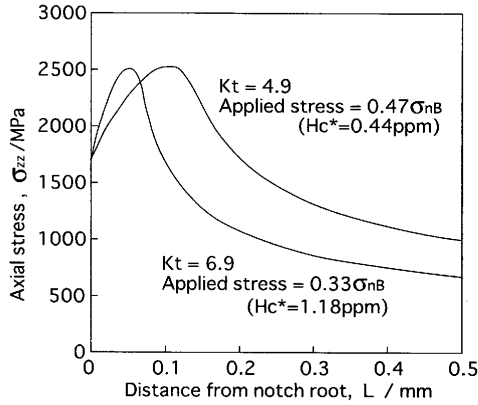


Fig. 13. Distribution of axial stress for specimens with different Kt at load levels giving the same maximum stress σ_{max} .

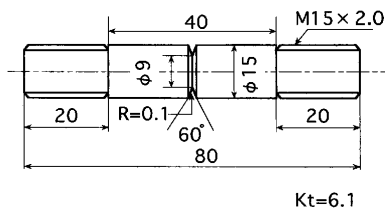


Fig. 14. Specimens used for hydrogen embrittlement tests. Diameter of specimen = 15mm. (unit: mm)

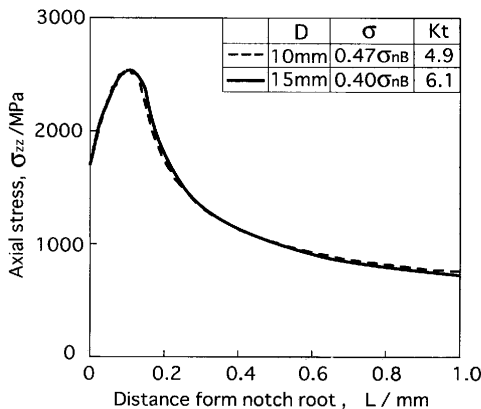


Fig. 15. Distribution of axial stress near the notch root in two kinds of specimen with different Kt.

底近傍の応力分布を同一にした条件（直径10mm, Kt=4.9で負荷応力 $0.47\sigma_{NB}$ の条件と直径15mm, Kt=6.1で負荷応力 $0.40\sigma_{NB}$ の条件）で水素割れ感受性試験を行った。Fig.14に直径15mmの試験片形状を示す。両条件でのノッチ底断面の応力分布は、Fig.15に示すようにほぼ一致した。ノッチ底近傍の応力分布が水素割れ感受性を支配しているならば、応力分布が同一の条件では H_D-t 曲線が一致することが期待される。

Fig.16に両試験条件で得られた H_D-t 曲線を示す。 H_D-t 曲線はほぼ一致している。さらに、(2)式の指数項で与えられる水素集積率は両条件で3.5倍（直径10mm）と3.6倍（直径15mm）であり、両条件で Hc^* もほぼ一致することがわかる。この結果は、応力分布が水素割れ感受性を支配

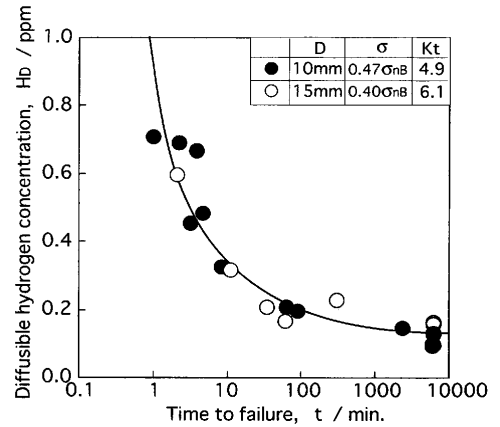


Fig. 16. Effect of specimen diameter on the H_D-t curves.

し、力学条件を示すパラメータを検討する際に応力分布を考慮することが非常に重要であることを示している。

本報では、FEM解析は3次元軸対象モデルを用い、ノッチ底断面における応力分布と水素集積に関する議論を行った。今後は、ノッチ底近傍における応力分布を考慮した力学条件を示すパラメータの検討を行う。

5. 結言

高強度マルテンサイト鋼の実環境での遅れ破壊発生の有無を予測できる評価法の確立を目指し、同一材質の鋼（引張強さを1400MPaに調整したSCM440鋼）を用いて応力集中係数および負荷応力を種々変化させた13条件の遅れ破壊試験を行い、拡散性水素量(H_D)-破断時間(t)曲線を求めた。得られた試験結果を基に、高強度マルテンサイト鋼の水素割れ感受性の評価パラメータについて、局所集積拡散性水素量と局所応力に注目して検討を行った。得られた知見は以下のとおりである。

(1) H_D-t 曲線の傾きは負荷応力が大きいほど小さくなった。さらに、負荷応力および応力集中係数が大きいほど、限界拡散性水素量(Hc)は減少した。しかし、 Hc の負荷応力と応力集中係数への依存性は一定ではなく、負荷応力と応力集中係数がそれぞれある値以上になると Hc の減少率が非常に小さくなる傾向にあった。

(2) 実験結果を基に、試験片内の引張軸方向最大応力(σ_{max})と最大集積拡散性水素量(Hc^*)を求めたところ、両者の関係は一つの曲線にのらず、応力集中係数が大きいほど高 σ_{max} および高 Hc^* 側に移行する傾向が認められた(Fig.11)。この結果より、 σ_{max} と Hc^* による水素割れ感受性の一義的な評価はできないことが示された。

(3) 試験片直径を変化させて試験片内のノッチ底近傍の応力分布を同一にした場合、 H_D-t 曲線および Hc^* は一致した。これより、水素割れ感受性を一義的に評価する応力パラメータを検討する際には、応力分布を考慮することが

重要であることを指摘した。

本研究を遂行するにあたり、多くのご助言をいただきました日本鋼管(株)白神哲夫准主幹研究員、住友金属工業(株)櫛田隆弘博士、新日本製鐵(株)山崎真吾主任研究員に深く感謝いたします。また、本研究結果の考察に際し、ご助言いただきました大阪大学南二三吉助教授に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) T.Tsumura, F.Nakasato, T.Ueda and N.Murai: *Sumitomo Met.*, **40** (1988), 19.
- 2) N.Bandyopadhyay, J.Kameda and C.J.McMahon, Jr.: *Metall. Trans. A*, **14A** (1983), 881.
- 3) T.Tsumura and H.Ohtani: *Sumitomo Met.*, **42** (1990), 40.
- 4) K.Fukui and T.Kaneko: Proc. 8th Int. Cong. on Heat Treatment of Materials, ed. by I.Tamura., Japan Technical Information Service, Tokyo, (1992), 183.
- 5) F. Nakasato and F. Terasaki: *Tetsu-to-Hagané*, **61** (1975), 856.
- 6) J. Watanabe, K.Takai and M.Nagumo: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 947.
- 7) T.Shiraga, N.Ishikawa, M.Ishiguro, E.Yamashita and S.Mizoguchi: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1646.
- 8) 白神哲夫, 石川信行: 遅れ破壊解明の新展開, 材料の組織と特性部会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1997), 105.
- 9) T.Kimura, Y.Kurebayashi and S.Nakamura: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1642.
- 10) H.Matsumoto, F. Nakasato, N.Kuratomi, T.Kushida and T.Tsumura: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1602.
- 11) K.Takai, J.Seki, E.Sakita and K.Takayama: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 67.
- 12) K.Kawasaki, T.Chiba and T.Yamazaki: *Tetsu-to-Hagané*, **74** (1988), 342.
- 13) 高橋稔彦: 金材技研ワークショップ概要集, 金属材料技術研究所, つくば, (1996), 1.
- 14) 中里福和: 自動車用材料シンポジウム~高強度化の限界を探る~, 日本鉄鋼協会・自動車技術会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1993), 64.
- 15) T.Tarui, S.Yamasaki, M.Tateyama, T.Takahashi and Y.Noguchi: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1291.
- 16) S.Yusa, T.Hara, K.Tsuzaki and T.Takahashi: *Proc. of JSME Annual Meeting*, **3** (1999), 271.
- 17) S.Yusa, K.Tsuzaki and T.Takahashi: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 567.
- 18) 松山晋作: 遅れ破壊, 日刊工業新聞社, 東京, (1989), 159.
- 19) T.Haruna and T.Shibata: *Materia Jpn.*, **36** (1997), 311.
- 20) Fédération Internationale de la Précontrainte: *Rep. Prestressing Steel*, **5** (1980) Sep., 1.
- 21) T.Kushida, N.Kuratomi, T.Kudou, H.Matsumoto and F.Nakasato: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1598.
- 22) 櫛田隆弘: 東京大学大学院工学研究科博士論文, (1997), 89.
- 23) S.Yamasaki and T.Takahashi: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 454.
- 24) A.R.Troiano: *Trans. Am. Soc. Met.*, **52** (1960), 54.
- 25) S.Yamasaki and T.Takahashi: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 460.
- 26) 野末 章: 遅れ破壊解明の新展開, 材料の組織と特性部会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1997), 197.
- 27) 西田正孝: 応力集中 (増補版), 森北出版, 東京, (1973), 619.
- 28) R.E.Peterson: *Stress Concentration Design Factors*, John Wiley & Sons, Inc., New York, (1953), 34.
- 29) J.O'M.Bockris, W.Beck, M.A.Genshaw, P.K.Subramanyan and F.S.Williams: *Acta Metall.*, **19** (1971), 1209.
- 30) J.P.Hirth: *Acta Metall.*, **26** (1978), 1795.

