鋼のおくれ破壊におよぼす鋼中の水素拡散の影響 (第1報)*

—水素拡散距離の変化とおくれ破壊との相関性—

大西 巖** 菊田米男** 荒木孝雄** 中谷兼武** 藤井俊英**

Effect of the Diffusivity of Hydrogen in Steel on the Delayed Fracture of Steel (Part 1)*

—Relation among applied stress, diffusivity of hydrogen and delayed fracture of Steel—

by Iwao Onishi**, Yoneo Kikuta**, Takao Araki**, Kanetake Nakatani** and Toshihide Fujii**

Abstract

Hydrogen embrittlement of steel has been treated as one of the phenomena of the delayed fracture. In this case, the applied stress and the behavior of hydrogen in steel have a great importance.

In the previous studies, the behavior of hydrogen in steel has been examined by the experiments of hydrogen permeability through the steel membrane and hydrogen occludability in steel at room temperature. On the other hand, authors have investigated the relation between the applied stress and the fracture time of hydrogenated steel.

In the present paper, an effect of the behavior of hydrogen on the phenomena of the delayed fracture was examined by using Constant Load Rupture testing. The tensile specimens were hydrogenated by cathodic method under constant load. The relation among the applied stress, the diffusion distance and the fracture time was examined.

The results obtained are as follows;

The square of hydrogen diffusion distance and the fracture time of specimen are linearly related. Therefore, diffusion of hydrogen in steel is thought to depend upon Fick's law, as authors described previously, and the diffusion coefficient of hydrogen in HT-80 steel is in the order of $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm²/sec in this experimental condition.

Moreover, in the case of C.L.R. testing, if the specimens are applied with a stress, varying the diffusion distance of hydrogen, the concentration of hydrogen in the fracture part of specimens would be always constant and the difference of fracture time would depend upon the time when hydrogen is segregated to the same concentration through various distances of diffusion.

1. 緒 言

ある応力負荷状態にある鋼の水素ぜい化は、遅れ破壊現象として現われる場合が多い。この現象は一般に冶金学的因子、力学的因子、および水素因子によって決定づけられる。

特に冶金学的因子に関しては、別報において、陰極電解定荷重試験 (C.L.R. Test) により、水素ぜい化との関連性について、また、水素因子に関しては陰性電解法による鋼の透過能、収蔵能実験から鋼中の水素の挙動について、実験究明してきた。この場合鋼中の水素の拡散は

Fick の法則に支配されることが確められ、かつ鋼中の水素の拡散係数は $D=10^{-7} \sim 10^{-6}$ cm²/sec の範囲内にあることが確められた。

本研究は C.L.R. Test により、鋼中の水素の挙動と遅れ破壊との関係を定量的に把握せんとしたものである。定荷重下の鋼の水素われ発生は負荷応力とわれ発生点における水素濃度によって決定されるものであると考えられ、それゆえ、定荷重下において試片のわれ発生時間、破断時間と水素の拡散現象との関連性について実験研究を行ったものである。

2. 実験方法

実験に供した材料は市販80キロ級高張力鋼で、その化学組成は、C 0.10%, Si 0.24%, Mn 0.74%, P 0.015%,

* 原稿受付 昭和44年4月7日 (44年度春季全国大会にて発表)

** 正 員 大阪大学工学部 Member, Welding Dpt. of Osaka Univ.

S 0.015%, Ni 0.83%, Cr 0.60%, Mo 0.48%, V 0.051%, Cu 0.30%, B 0.0026% であり, その機械的性質は引張強さ 79.2 kg/mm², 降伏応力 74.2 kg/mm², 断面収縮率 68.0% を有するものであった。

実験にあたって, 破壊現象と水素の拡散挙動との関連性を把握する目的で, 水素の拡散距離を制御するため, われ発生点を人為的に試片に位置づけねばならず, 筆者らはその目的でわれ発生点として丸棒引張り試片に2種の円周切欠きを付した。前述の鋼材の圧延方向から, Fig. 1 のごとくC型およびD型の2種の切欠きを有する丸棒引張り試片を作製した。2種の試片とも, 平行部直径 8 mm, 切欠き尖端半径 0.07 mm と同一のものであり, 切欠き深さはC型では 1 mm, D型では 2 mm であり, 2最小断面直径はC型 6 mm, D型 4 mm である。これら種の試片の切欠き引張り強さ (N.T.S.) はC型 120 kg/mm², D型 160 kg/mm² であった。

Fig. 1 Specimens.

以上の2種の試片は, 人為的なわれ発生点である切欠き部と, 水素収蔵源である電解部分との距離を制御する目的で, Fig. 2 のごとく切欠き部を中央にそれぞれ所定

Fig. 2 Specimen types used in this experiment.

の中で切欠き部を電解液と絶縁した。L-0 は絶縁なしの試片であり, L-1 は切欠き部を中央に巾 1 mm 絶縁, 以下, L-3 は巾 3 mm, L-5 は巾 5 mm, L-7 は巾 7 mm と切欠き部を中央に, それぞれ絶縁し実験に供した。さらに電解表面積を一定にする目的で, チャック部などの不要部をも絶縁した。

実験方法は, 別報¹⁾に記したと同様 C.L.R. 試験機を用い, 所定の応力負荷状態で 40 分以上放置し, しかる後, 5% 硫酸溶液を電解液とし, 0.2 Amp/cm² の電流密度にて電解を開始し, その時刻から破断に至るまでの時間を測定した。

また電解開始から破断に至るまでの過程における, 試片のわれ発生およびわれ伝播による変位挙動をもあわせて測定した。

3. 実験結果

3.1 C.L.R. 試験結果

実験にあたっては前述のごとく, 所定の絶縁を付した試片に, 所定の応力を負荷し, 陰極電解法によって水素を添加し, 破断に至るまでの時間を測定した。Fig. 3, Fig. 4 は負荷応力を縦軸に, 横軸に破断時間 (分) を対数目盛にて図示したものである。

まずC型試片について, 切欠き部が絶縁されておらず直接電解液に接している場合についての負荷応力-破断時間の関係は, Fig. 3 の L-0 の直線であり, この場合の下部臨界応力 (L.C.S.) は 35 kg/mm² であった。また Fig. 3 のごとく, 絶縁巾が 1 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm, と増大することにより, 破断直線は長時間側に移行した。これは水素収蔵源である電解部からわれ発生点の切欠き部までの水素拡散距離の増大によるためと考えられる。また破断直線は実験誤差範囲内ですべてほぼ平行となった。

Fig. 3 Relation between fracture time and diffusion distance of hydrogen under each applied stress by C.L.R. test. (Specimen C).

ここで L-7 の場合はほとんど 10000 分以内の電解時間で実験点が得られず、仮想線として点線で示した。また L-7 のプロット実験点は、切欠きを付しているにもかかわらず切欠き部ではなく電解部で破断した実験点である。この実験点の負荷荷重の平行部えの換算応力値は 60 kg/mm^2 以上となり、同材質の丸棒試片についての C.L.R. 試験の結果の L.C.S. は 55 kg/mm^2 であることを考慮すると、切欠部以外から破断することもあり得ることと考えられる。

Fig. 3 において、L.C.S. は L-0, L-1, L-3, L-5 と絶縁巾の増大により $35, 60, 95, 105 \text{ kg/mm}^2$ と上昇する結果が得られた。

Fig. 4 は D 型試片の実験結果であり、その傾向は Fig. 3 と同一であり、絶縁巾の増大とともに破断直線は平行的に長時間側に移行し、また、L.C.S. も上昇する結果が得られた。

Fig. 4 Relation between fracture time and diffusion distance of hydrogen under each applied stress by C.L.R. test (Specimen D).

3.2 定荷重下における試片の変位挙動

定荷重下にて試片に水素を収蔵せしめることにより

Fig. 5 Relation between displacement by cracking and charging time under each applied stress Specimen D, L-1).

生じる試片の変位挙動を示せば Fig. 5 のごとくであった。Fig. 5 は切欠き深さ 2 mm の D 型試片の L-1 について、負荷力値 $120, 100, 90 \text{ kg/mm}^2$ における試片の変位を測定した結果である。図より明らかなごとく変位はある時間（潜伏期間）を経て現われ、その後階段状の変位期間（われ伝播期間）を経た後に試片は破断に至ることがわかった。潜伏期間は負荷応力値が低くなるにつれ長くなり、われ伝播期間における休止時間は負荷応力の減少とともに長くなることが判明した。

Fig. 6 は D 型試片にて負荷応力 120 kg/mm^2 と一定にし、L-0, L-1, L-3 の場合の試片の変位挙動を示したものである。潜伏期間は絶縁巾の増大とともに長くなり、われ伝播期間の休止時間は絶縁巾の増大とともに長くなることが示された。

Fig. 6 Relation between displacement by cracking and charging time under applied stress (120 kg/mm^2 , Specimen D).

以上の結果より、潜伏期間およびわれ伝播期間における休止時間は、われ発生部あるいはわれ尖端部における水素濃度と深い相互関係を有していると考えられ、われ伝播期間の階段状変位は、典型的な水素の遅れわれ挙動を示しているといえよう。

破断に至るまでにおいて、試片のわれの深さを顕微鏡観察の結果、観察した限りにおいては初期段階においてはわれ深さは浅く、後期になるにつれてわれは深く、内部まで達していることがわかった。これに関して Troiano²⁾ らはわれ尖端部に水素が集積することにより、尖端部のぜい化が促進されるという結果を得ている。

3.3 われ発生時間と破断時間の関係

Fig. 5 のごとく、変位開始時間を、D 型試片の L-1, L-3, L-5 の絶縁状態の試片について各負荷応力について測定した。変位開始時間をわれ発生時間として図示した結果が Fig. 7, Fig. 8 および Fig. 9 であり、ある潜伏期間ののちわれが発生し、その後、Fig. 5 のごとく階

Fig. 7 Relation between crack initiation time and fracture time under each applied stress (Specimen D, L-1).

Fig. 8 Relation between crack initiation time and fracture time under each applied stress (Specimen D, L-3).

Fig. 9 Relation between crack initiation time and fracture time under each applied stress (specimen D, L-5).

段状変位を示して、最終的には有効断面積の減少により破断に至った。

Fig. 7~Fig. 9 を比較すると絶縁巾の増大、すなわち、電解部をわれ発生点から遠ざけることによりわれ開始時間は次第に遅れるが、われ開始直線と破断直線がほぼ平行の関係にあることより潜伏期間の負荷応力依存性

は、破断時間の応力依存性と同一傾向を示すと考えられる。したがって負荷応力とその応力に対するわれ伝播(発生)に必要な臨界水素量との間には密接な関係があると考えられる。

4. 実験結果に対する考察

4.1 水素によるおくれわれに関する考察

4.1.1 おくれわれに対する各因子の関連性

水素ぜい化現象、特に遅れ破壊を決定する因子としては通常次の3因子が考えられる。

- (1) 冶金的因子
- (2) 力学的因子
- (3) 水素的因子

本実験に用いた試片の材質はC型、D型両試片いずれにおいても微視的には均質体ではないが、一応平均的均質体と考えて考察をすゝめる。一方負荷応力の変化および水素の拡散距離の変化により因子(2)と(3)は変化し、その結果が Fig. 3, Fig. 4 の破断直線と考えられる。これらの図における一つの破断直線は因子(2)が大きく作用し、付随的に因子(3)が作用して、負荷応力-破断時間の関係を表していると考えられ、また因子(3)のみの影響により各破断直線は互に平行関係を有して、絶縁巾の増大とともに長時間側への遅れを呈していると考えられる。

しかしこれらの破断直線において、因子(3)の影響のみを把握するためには、因子(1)および(2)を一定にして考えねばならず、それゆえ、同質、同一形状の試片において負荷応力が一定なら、因子(1)および(2)は一定となり破断に至る時間は因子(3)すなわち水素の拡散距離のみの影響と考えられる。

以上の観点からC型試片の実験結果 Fig. 3 においては負荷応力 115, 110, 105 kg/mm² の3段階またD型試片の実験結果 Fig. 4 においては 150, 130, 110 kg/mm² の3段階の場合について水素の拡散距離の尺度として絶縁巾の絶縁巾における破断時間を横軸にて示し、水素の

Fig. 10 Effect of insulated width.

拡散距離と破 2 乗を縦軸に、各断時間との関係を調べたのが Fig. 10 である。

Fig. 10 から各負荷応力下における破断に必要な臨界水素濃度、さらに微視的にはわれ発生点すなわち切欠底部およびすでにわれた部分のわれ先端部の水素濃度について考えてみる必要がある。

4. 1. 2 破断位置への水素の拡散に関する解析

切欠き底部の鋼中の水素濃度を Fick の第 2 法則の近似解から求め、破壊の臨界水素濃度と負荷応力の関係について考察をこころみる。

切欠き底部の理論濃度を求めるにあたって、Fig. 11 ごとき座標を有する模型を考え、この模型の切欠き底部の濃度を次の仮定のもとに解いた。

Fig. 11 Diagram of boundary condition.

- (1) 電解開始と同時に電解表面の水素濃度は瞬間的に一定値（飽和値）になる。
- (2) 試片は半径 a の無限円柱である。
- (3) $z=0, z=l$ 断面の濃度分布を無限円柱の断面濃度 $c(r, t)$ と仮定し、その境界条件を有する一次元方向の拡散と考える。
- (4) $0 < z < l$ 部分の試片表面から水素の逃散はないものとする。

以上の仮定のもとに (r, z) 位置の時間 t における水素濃度を求めた。

円柱座標系の Fick の第 2 法則は

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad (1)$$

D : 水素の鋼中における拡散係数 $\left(\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}}\right)$

r : 半径方向の拡散距離 (cm)

t : 時間 (sec)

C : 水素濃度

で表わされる。次に

境界条件 : $t > 0, r = a$ において $C = 1$

初期条件 : $t = 0, 0 < r < a$ において $C = 0$

以上の条件のもとに (1) 式を解くと

$$C(r, t) = 1 - \frac{2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\alpha_n r)}{J_1(\alpha_n a) \cdot \alpha_n} \exp(-D \alpha_n^2 t) \quad (2)$$

次に $z=0, z=l$ 断面から z 軸方向の一次元拡散の諸条件は、

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (3)$$

境界条件 : $z=0, z=l$ において $C = C(r, t)$

初期条件 : $t = 0$ において $C = 0$

今、上の条件で (3) 式を解くと

$$C = \frac{4D\pi}{l^2} \sum_{m=1}^{\infty} (2m-1) \exp\left(-\frac{D(2m-1)^2 \pi^2 t}{l^2}\right) \times \sin\left(\frac{(2m-1)\pi z}{l}\right) \int_0^t \exp\left(-\frac{D(2m-1)^2 \pi^2 \lambda}{l^2}\right) \times C(r, \lambda) d\lambda \quad (4)$$

ここで切欠き断面位置 $\left(z = \frac{l}{2}\right)$ の濃度を求めるため、さらに $C(r, \lambda)$ に (2) 式を代入すると

$$C = \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1}}{2m-1} \{1 - \exp(-\beta_{2m-1} t)\} + \frac{8}{\pi a} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1}}{2m-1} \frac{J_0(\alpha_n r) \beta_{2m-1}}{J_1(\alpha_n a) \alpha_n (D \alpha_n^2 - \beta_{2m-1})} \times \{\exp(-D \alpha_n^2 t) - \exp(-\beta_{2m-1} t)\} \quad (5)$$

ここで $\beta_{2m-1} = \frac{D(2m-1)^2 \pi^2}{l^2}$

α_n は 0 次の Bessel 関数 $J_0(\alpha_n a) = 0$ を満足する正根である。今、C 型試片の切欠き底部の水素濃度を (5) 式によって求めるために次の値を代入した。

$D = 2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$ (この材の透過能実験より求めた拡散係数)

$a = 0.4 \text{ cm}$

$r = 0.3 \text{ cm}$

$l = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 \text{ cm}$ (絶縁巾)

その結果を図示すれば Fig. 12 のごとく示される。

4. 1. 3 理論解析と実験結果との対比

今 Fig. 12 と、実験結果である C.L.R. 試験による負荷応力—破断時間—水素拡散距離との間の関係を考えてみる。任意の一定負荷応力のもとでは、同一の水素濃度 (C_1) で破断で起ると仮定して、破断時間をそれぞれの電解面とわれ発生点間距離の関係を Fig. 12 から濃度 C_1 に達すまでの時間 t と水素拡散距離 L との関係を求めたのが Fig. 13 であり、ほぼ t と L^2 の間には直線関係が成立することがわかる。

したがって Fig. 10 のごとく、ある負荷応力状態で

Fig. 12 Theoretical hydrogen concentration ($D = 2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$, $a = 0.4 \text{ cm}$, $r = 0.3 \text{ cm}$).

Fig. 13 Relation between square of distance (L^2) and time (t).

の試片の破断時間と絶縁中の2乗の間に直線関係が成立することは、定性的に解析できる。

さらに Fig. 10 において得られた直線関係について、考察してみると (5) 式において水素濃度 (C) の値を決定するのに大きな影響を与える項は

$$\frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1}}{2m-1} \{1 - \exp(-\beta_{2m-1} \cdot t)\} \quad (6)$$

の第1項であり、近似的に C は $\beta_1 \cdot t$ を変数とする関数であるといえ、 $\beta_1 \cdot t$ はフーリエ数と呼ばれ、これを F_1 で表わすと、(5) 式は近似的に

$$C = f(F_1) = f(\beta_1 \cdot t) = f\left(\frac{D\pi^2 t}{l^2}\right) \quad (7)$$

で表わし得る増加関数である。

Fig. 10 のごとく絶縁巾の2乗と破断時間の間に直線関係を有することにより勾配: l^2/t は一定となり、(7) 式において、 F_1 は一定となり C もまた一定になる。すなわち負荷応力を決定すれば、必然的に破壊に必要な水素量が決定され、これと負荷応力との関係については負

荷応力が高い程、直線の勾配 l^2/t が大となり、 F_1 値が小となり、(7) 式より C の値が小さくなる。すなわち負荷応力の増大とともに必要水素量は減少するといえる。

いっぽう Fig. 10 における直線勾配から鋼中における水素の拡散係数のオーダーは次のごとく求めることが可能である。 $\beta_{2m-1} \cdot t$ は指数関数の変数であり、 $\beta_{2m-1} \cdot t$ の第1項 F_1 が実際の数値計算において有効な数値範囲にあるのは

$$0.09 < \beta \cdot t < 5 \quad (8)$$

であり、したがって D の範囲は

$$\frac{0.09 l^2}{\pi^2 t} < D < \frac{5 l^2}{\pi^2 t} \quad (9)$$

と表わされ、Fig. 10 の直線の勾配から D の範囲を計算すると $10^{-7} < D < 10^{-6}$ が得られる。この材の透過実験、さらに既報の拡散係数のオーダーとよく一致しているといえる。

4.1.4 下部臨界応力に関する一考察

前記により、鋼中における水素の挙動は Fick の第2法則によって支配され、これらの事実を C.L.R. 試験によっても定性的把握が可能であることが理解し得るものと思われる。しかし、定性的解析は可能であるが、定量的に実験結果と理論考察を比較することは現段階ではまだ困難と考えられる。その原因として切欠き部の濃度は時間的に変化し、われはその濃度に達すれば伝播し、最終的には有効断面積の減少により破断に至るがいっぽう水素について考えればその濃度は飽和状態である必要はなく、あくまで過渡的過程における現象として把握しなければならぬところに原因があると考えられる。

次に Fig. 3, Fig. 4 においても絶縁巾の増大とともに下部臨界応力値の増大がみられた。水素が長時間にわたって理想的に拡散するならば下部臨界応力は少なくとも、 $L-1$ の値をとるものと考えられるが、1000分以上の電解を行なった場合には、破断に結びつく切欠き部における横われ発生に必要な濃度にまで水素が集積するまでに、電解表面層の化学変化⁴⁾、鋼表面下の水素分子層の形成⁵⁾およびラミネーションに沿う縦われの発生などにより水素拡散が阻害されるためと考えられる。そのため絶縁巾の増大とともに下部臨界応力の上昇がみられると考えられる。

4.2 われ発生までの潜伏期間に関する取扱い

Fig. 10 に示すごとく負荷応力が一定なら絶縁巾の2乗と破断時間との間に直線関係が存在することが示されたが、これと Fig. 7~Fig. 9 とを比較した場合にも同様の関係が存在するものと察せられる。すなわちわれ発生に必要な水素量もまた負荷応力に依存するものと思わ

れる。

さて切欠きを有する試片に外応力が作用した場合、切欠き底部近傍に生じる塑性領域に関しては、Theocaris⁶⁾により平板の場合として示されている。それによれば、塑性領域は負荷応力が増すにしたがって大きくなること示されている。筆者らの実験における負荷応力は全般的にはかなり大きく Theocaris の結果がそのまま適応できるとは思われないが、負荷応力が一定の場合それによって生じる塑性変形の分布は個々の絶縁巾を有する試片では同一とみなし得るものと思われる。そして、水素われを発生するまでの時間はその部分がその応力下における臨界水素量に達するまでの水素の拡散速度に支配されることになる。

前記の (7) 式において、同一応力下で水素われ発生に必要な水素量 C を同一とすれば

$$\frac{Dt}{l^2} = \text{const.} \quad (10)$$

となる。

また拡散係数 D は、一定負荷応力という実験条件の下では大きく変化しないものとして、 D を一定とすれば

$$\frac{t}{l^2} = \text{const.} \quad (11)$$

したがって (11) 式より同一応力負荷状態で絶縁巾の異なった三種の試片における潜伏時間 t_i と水素拡散距離 l との間には

$$\frac{t_{i(L-1)}}{l_{(L-1)}^2} = \frac{t_{i(L-3)}}{l_{(L-3)}^2} = \frac{t_{i(L-5)}}{l_{(L-5)}^2} \quad (12)$$

なる関係があることとなる。

Table 1 は実験結果より得られた $L-1$ 試片の潜伏期間 $[t_{i(L-1)}]$ および試片の水素添加面から切欠き底部までの距離すなわち水素拡散距離 $[l_{(L-1)}]$ をもとにして、(12) 式より計算によって $L-3$ および $L-5$ 試片における $t_{i(L-3)}$ および $t_{i(L-5)}$ を実験結果と比較して示したものであり、解析の簡略化にかかわらず、両者はよく一致しているものと思われる。

Table 1 Comparison of experimental Results and Calculated Results concerning Incubation Time.

L (cm)	0.1	0.3	0.5			
l (cm)	0.206	0.250	0.320			
l^2 (cm ²)	0.0425	0.0625	0.1025			
t_i (min.)						
stress (kg/mm ²)	Fxp.	Exp.	Theor.	Exp.	Theor.	
140	7.5	—	11.0	16.0	18.1	
130	8.4	—	12.4	21.4	20.3	
120	9.5	16.0	14.0	24.0	22.9	
110	10.4	15.6	15.3	32.0	25.1	
100	11.6	20.3	17.1	—	28.0	
90	12.3	20.0	19.8	—	—	

したがって潜伏期間はある負荷応力下において、われ発生に必要な水素が拡散集積するための時間を意味し、換言すればわれ発生までの潜伏期間は水素の拡散に支配されるものとして差支えないと思われる。

4.3 試片の変位挙動に関して

応力負荷状態の試片に水素が拡散することにより、われ発生→階段状の伝播→破断という過程をたどるが低応力負荷の場合伝播に要する臨界水素量は当然多くなると考えられ、そのため伝播から次の伝播までに要する時間は当然長くなることが実験的に把握できた。

試片のわれ伝播と絶縁巾の関係は、絶縁巾が小なら切欠き断面の水素濃度分布 $\partial C/\partial r$ が大となり、また $\partial C/\partial t$ も大となるため伝播から次の伝播までに要する時間は短くなると考えられる。

以上から破壊が水素濃度の時間的変化、濃度勾配、負荷応力との三者間に密接な関係が存在することが確かめられた。

5. 結 論

本研究は、定荷重試験法により鋼中の水素の拡散挙動と水素われとの関係を把握しようとしたものであり、その実験から得られた結論を要約すると次のごとくである。

1) 定荷重実験法においても、水素の拡散現象と水素われとの関係を定性的に把握でき、水素の拡散距離の 2 乗と水素がある濃度レベルに達するに要する時間との間には直線関係を有し、これはフーリエ数で整理できることから、その機構はほぼ Fick の法則にしたがうものと思われる。これらの結果から得られた水素の拡散係数は負荷応力により差異はあるが $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$ の範囲に在ることがわかった。

2) 定荷重試験による鋼の破壊現象は、われ発生→われの階段状伝播→破断の過程をたどり、とくにわれ伝播過程は休止期間を伴う階段状の不連続過程であった。

なおわれ発生および破断に必要な臨界水素量は冶金学的因子が一定なる条件においては、力学的因子と相互的に決定されるものと考えられる。

水素の鋼中における挙動は、水素の鋼中における、透過能、収蔵能実験方法から一般的に追求されていることが多く、本報告のごとく定荷重試験法により、その挙動と破壊現象とを結びつけたことに大きな意義があるものと思われる。

しかし、それらの相互関係は定性的解明に終わってしまったが、これは陰極電解法により水素を鋼中に拡散させる場合、その拡散現象が非常に複雑であるためと考えら

れ今後の問題と考えられる。

なお本研究実施にあたり, 鋼材を富士製鉄および住友金属からいただいた。厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 大西, 菊田, 荒木ら “定荷重下における鋼の水素ぜい化に関する研究” 第2報 溶接学会誌, Vol. 36 No. 8
- 2) A.R. Troiano “The Role of Hydrogen and Other Interstitials in the Mechanical Behavior of Metals”

Trans of A.S.M. Vol. 52 1960 p. 54~78

- 3) L.L.M. Cottrell “Hydrogen Barrier to Welding Progress” Brit. Welding J. April 1954 p. 167~176
- 4) M. Smialowski “Hydrogen in Steel” Pergamon Press
- 5) Erdmann—Jesnitzer “The Diffusion-stop Resulting from the Electrolytic Hydrogen absorption of Armco Iron” Special Report
- 6) P.S. Theocaris, “Combined Photoelastic and Electrical-analog method for Solution of Plane-stress Plasticity Problems” Experimental mechanics Sep., 207~214 (1963)

次 号 予 告

資 料

電子部品の微小溶接について……………柏 原 稔

論文および報告

低真空電子ビーム溶接に関する二, 三の実験……………	{ 橋松大入	本田達福	哉久修定
充填ワイヤの無被包アーク溶接に関する研究……………	{ 岡松	田本宏	寛正
高マンガン鋼のガスシールドアーク溶接 (第1報) ……	{ 安内木	藤田精	一彰登
高張力鋼 (80 kg/mm ²) 級溶接部の応力一ひずみ特性……………	{ 立溝	川越逸	郎淳
溶接熱サイクル再現試験による高温割れの研究……………	{ 田加真山	村藤鍋地	博昇巳彦
高張力鋼の溶接割れ感受性指数について (第2報) ……	{ 伊別	藤所慶	典清

文献紹介

研究速報

賛助員リスト