

インプラント試験における溶接低温割れ発生・伝播挙動の Acoustic Emission 法による研究

片岡 繁夫*・河野 和芳*
片岡 松市*・黒川 常夫**

Acoustic Emission Characteristics during Cold Cracking at Welds by Implant Test Method

by

Shigeo KATAOKA, Kazuyoshi KAWANO, Matsuichi KATAOKA

(Department of Structural Engineering)

Tsuneo KUROKAWA

(Kumamoto Institute of Technology)

In recent years acoustic emission (AE) technique has been increasingly applied for detecting flaws and cracks in material. However, there are at present only a few reports on AE in cold cracking at welds by implant test method.

In this paper, cold crack initiation and propagation behavior from a notch of implant specimen is investigated by AE technique and the fracture phenomenon at cold cracking is discussed in the relation to AE characteristics.

1. はしがき

溶接部に発生する溶接低温割れは、溶接構造物において破壊発生につながる大きな因子となることが推定される。したがって、その安全性に著しい影響を与えることが考えられ、割れの防止を計ることは溶接工学における重要な課題の一つとなっている。近年、使用材料の高強度化・厚板化が進むにつれてその溶接割れ感受性は高まってきており、溶接構造物の安全性確保のため溶接割れの要因を把握し、その防止対策の確立を急ぐ必要がある。

これまで、溶接低温割れに関する研究は数多く実施されてきており、割れの発生に影響する因子は i) 溶

接部の組織 ii) 拡散性水素の存在 iii) 引張り応力の存在などであり、その発生はこれらが同時にある条件下で満たされた場合であることは、よく知られている。また、溶接低温割れ防止の工学的手段についてはかなりの成果が得られているが、溶接低温割れの機構すなわち割れの微視的・金属学的研究などについては十分な成果が得られていないようである。

最近、材料内部の微細な亀裂の発生・伝播挙動の研究にアコースティックエミッション (Acoustic Emission, 以下 AE) 法がよく用いられており、著者らもこれらの研究において非常に有効な手段となり得ることを報告した¹⁾。AE 法を溶接低温割れ試験に適用す

昭和57年3月31日受理

*構造工学科

**熊本工業大学

れば、割れの発生・伝播過程を把握できその機構を理解するうえで有効な情報を得ることが期待される。

本報告は、前述した溶接低温割れの3要因を変化させインプラント (Implant) 型溶接割れ試験²⁾ (以下インプラント試験) を実施するとともに、試験開始から破断までの全過程での AE 発生特性について調査した結果について紹介したものである。すなわち、AE 発生特性に基づき、インプラント試験における溶接低温割れの発生・伝播挙動を把握し、その機構について若干の考察などについて報告する。

2. 試験方法

2. 1 インプラント試験

溶接部の低温割れを再現する試験法は種々提案されているが、本研究においては Grajon が提案したインプラント試験法²⁾を採用し種々の条件下で低温割れを発生させた。インプラント試験機は本研究室で設計・試作³⁾したものをを用いた。

次にインプラント試験法の概略について述べる。Fig. 1 に示すように、円周切欠きを有する丸棒引張試験片 (以下インプラント試験片) を支持板の板厚方向に設けたドリル穴に植め込み、試験片の上端面を含む支持板表面を溶接した後、溶接部の冷却過程で一定引

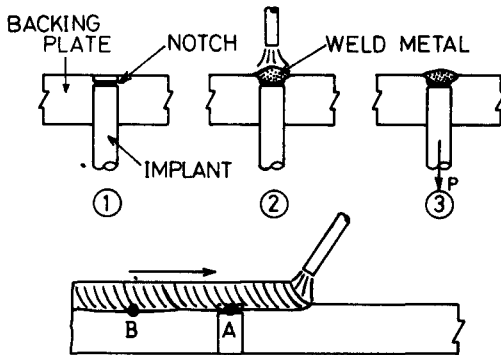


Fig. 1 Implant test method.

張荷重を保持し切欠き部から溶接割れを生じさせ、破断時間を測定するものである。また、インプラント試験片の熱サイクル (Fig. 1 A 点) は支持板の板厚で定まるそれ (Fig. 1 B 点) と同一の熱サイクルを受けることが明らかにされている⁴⁾。したがって、支持板と試験片は同一材料である必要がなく試験材が少なく試験できること、前述した割れの3要素を独立に変化させることができることなど簡単に有効な溶接割れ再現試験法である。

Table 1 Welding conditions.

GRADE	DIAMETER (m.m.)	TRAVEL SPEED (mm/min)	WELDING CURRENT (A.)	ARC VOLTAGE (V.)	HEAT INPUT (J/cm)
D8016	4.0	150	170	25.5	1734.0

本研究において、溶接は D 8016 の被覆アーク溶接棒を用いた手溶接であり、その溶接条件を Table 1 に示す。溶接金属中の拡散性水素量が溶接低温割れにおよぼす影響を調査するため、溶接棒の被覆剤中の水分率を3レベルに変化させた。この場合の溶接金属中の拡散性水素量はそれぞれ 1.0cc/100g (符号 H 1.0cc), 3.7cc/100g (符号 H 3.7cc), 5.0cc/100g (符号 H 5.0cc) であった。これらの値はインプラント試験荷重開始時の溶接金属中の残留水素濃度⁵⁾をグリセリン置換法で測定したものである。溶接後の荷重は、溶接部近傍に溶着させたアルメルクロメル熱伝対 (Fig. 3 参照) により、溶接部の温度が 150°C に冷却したとき開始し、100°C に冷却するまでに所定の荷重になるようにした。なお、熱伝対により測定された溶接部の冷却時間は 800~500°C 間が約 6 秒、500~150°C が約 30 秒程度であった。このようにインプラント試験を実施し溶接低温割れを発生させ、負荷応力 (負荷荷重を切欠き部の断面積で除した値, σ kg/mm²) - 破断時間線図ならびに、割れの発生しない割れ発生限界破断応力 ($(\sigma_{cr})_{imp}$) 値を求めた。この $(\sigma_{cr})_{imp}$ 値は、負荷開始後 24 時間以上保持しても破断の生じない負荷応力の最大値とした。

2. 2 AE 計測法

インプラント試験に適用した AE 測定装置の構成および AE 測定状況を Fig. 2 に示す。溶接による熱から

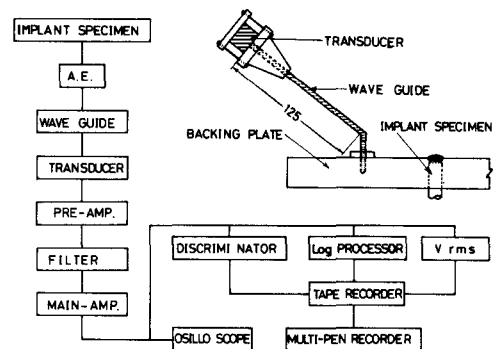


Fig. 2 Block diagram AE measuring system.

保護するためウェーブガイド (Wave Guide) に取りつけてある PZT 系 AE 変換子 (D/E 社製, D/E 9202 型) にて AE 信号を検出し, 差動型プリアンプで 46dB 増幅した。その後 200kHz~1MHz のバンドパスフィルタを通し, さらにメインアンプで 24dB 増幅した。信号処理としては, メインアンプで増幅した AE 信号は計測上のダイナミックレンジ確保するため対数変換アンプを通した後, 時定数 10 μ s で包絡線検波した。AE 信号のピーク値を把握するためこの検波出力をメインアンプ出力のリングダウン (Ring Down) 計数 (Threshold Level 0.36V) および AE 実効電圧 (V_{rms}) 値とともにデータレコーダに記録した。インプラント試験片の破断後データレコーダを再生し包絡線検波した AE 信号のピーク値 (8.0V) を 60dB とし, 振幅比 6dB ごとでの AE 事象累積総数および 2 秒ごとの AE 発生率を把握した。さらに, 各振幅比ごとの差分をとって各レベルでの AE 事象の頻度を計数し AE 事象の振幅分布とした。主として, これらの AE 発生特性よりインプラント試験片の溶接低温割れの発生・伝播挙動の検討を実施した。参考のためオシロスコープにより AE 波形の観察も行った。

なお AE の測定は溶接後 150°C に冷却するまでに溶接スラグを取り除き, 所定の荷重となつてから開始した。ウェーブガイドは Fig.2 のように支持板にネジで固定し, 接着面にはシリコングリスを塗って AE の減衰を少なくした。また, 支持板とインプラント試験機の支持台との間にはアスベストおよびネオプレンシートを挿入して, 溶接熱冷却時の収縮・変形時など両者の間に生じるノイズの軽減を図つた。

2. 3 供試鋼板および試験片

溶接低温割れに及ぼす鋼板の化学成分の影響を調査するため化学組成の大きく異なる 3 種類の鋼材を供試した。供試した鋼板は船体用 50 キロ級高張力鋼板 (NK 規格 D 級鋼板, 板厚 30.0mm, 符号 K5D), LNG 用タンク材として試作された 5.5%Ni 鋼板 (板厚 35.0mm, 符号 5.5%Ni) および, 調質型 80 キロ級高張力鋼板 (板厚 40.0mm, 符号 HT80) である。供試鋼板の化学成分, 炭素当量 C_{eq} 値, 溶接割れ感受性組成 P_{cm} 値および, それらの算出式を Table 2 に示す。インプラント試験片は K5D 鋼板の場合板厚の $\frac{1}{2}t$ 部で, 5.5%Ni 鋼板ならびに HT80 鋼板の場合, 板厚の $\frac{1}{4}t$ 部で圧延方向にそれぞれ採取した。試験片の切欠きは円周切欠きとし, 試験片端面から切欠き底までの距離 N_d は円周切欠き部分の約 2~20% が溶接により溶かされ, 切欠き部が常に溶接ポンドになるように設定した。支持板の板厚は 25.4mm とし K5D 鋼板を供試し, 溶接面の黒皮は機械切削にて削除した。供試したインプラント試験片ならびに支持板の形状を Fig. 3 に示す。なお,

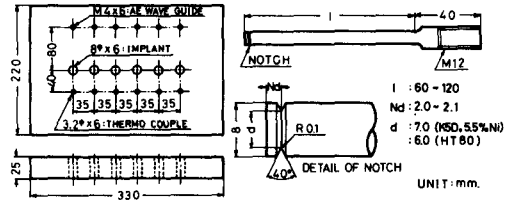


Fig. 3 Shape-of implant test specimen.

試験片ならびに支持板に付着した油脂類など溶接時に水素の発生原因となるようなものは取り除き試験した。

Table 2 Chemical compositions of steel plates.

MATERIAL	PLATE THICKNESS (mm.)	CHEMICAL COMPOSITIONS (%)									Ceq (%)	PCM (%)
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo		
K 5 D	3 0	0.20	0.41	1.38	0.023	0.013	—	—	—	—	0.447	0.283
5.5 % Ni	3 5	0.06	0.21	1.16	0.005	0.003	0.01	5.84	0.64	0.20	0.586	0.268
HT 80	4 0	0.12	0.27	0.75	0.018	0.004	0.24	0.79	0.45	0.42	0.471	0.242

$$Ceq = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \text{ ----- (1)}$$

$$PCM = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \text{ ----- (2)}$$

した後試験片は破断している。また、試験条件などにより、この AE の停止時間ならびにこの後の AE 発生挙動は異なっていた。インプラント試験において発生する AE は溶接低温割れの発生・伝播に起因しているものと考えられるが、負荷直後から溶接割れが発生・伝播するとは考え難く、負荷直後の AE は他の理由で測定されたものと考えられる。そこで、この初期の AE 停止期間中に除荷し試験片の切欠き近傍やその断面を詳細に観察したが、何ら微細な割れは認められなかった。一方、切欠きの無い試験片についてもインプラント試験を実施したところ、負荷の大小、有無にかかわらず前者と同様に負荷後、数分間 AE の発生があった後全く AE は生じておらず、この試験片においても溶接部近傍には全く割れの存在は確認されなかった。さらに、この初期に発生した AE の振幅分布を調査したところ、いずれも同様な AE 振幅分布形状となっていることから、この間の AE 発生原因は同一と考えられる。以上のことから、この負荷直後から数分間計測された AE は、前述したような処置を実施したにもかかわらず、溶接熱による冷却過程で生ずる支持板の収縮・変形時に試験機支持台との間に生ずるノイズによるものと推定される。したがって本研究において、この初期に発生する AE は溶接低温割れに関与するものも幾分あるかもしれないが、原則として除外して検討した。

インプラント試験中に観察された AE は、負荷応力が $(\sigma_{cr})_{imp}$ 以下の試験の場合においても、試験開始後数 10 分および数時間後にも AE が時おり発生しており 24 時間経過後、除荷し溶接部を観察した結果、前述したように切欠きからの微細な割れあるいは、停留した亀裂が存在していたこと、さらにその破面を走査型電子顕微鏡で調査した結果、それが水素脆化破面であったことなどから、試験片における溶接低温割れの発生・伝播挙動を検知していると考えてよい。このようにインプラント試験に AE 法を適用した測定結果の数例を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。これらは AE 振幅の経時変化を示したもので、Fig. 7 には K5D 鋼板において拡散性水素量 1.0cc/100g 一定とし負荷応力を変化させた場合、Fig. 8 には鋼種を変えた場合の例をそれぞれ示す。

以上の AE 測定結果より概略次のことが明らかとなった。いずれの場合も負荷の大小にかかわらず、所定の負荷応力に達した後約 4~13 分経過してから小・中振幅の AE が発生していた。また、破断に至るまでの AE 発生状況は鋼種、拡散性水素量、負荷応力値などで異なっており、その発生は断続的あるいは間欠的

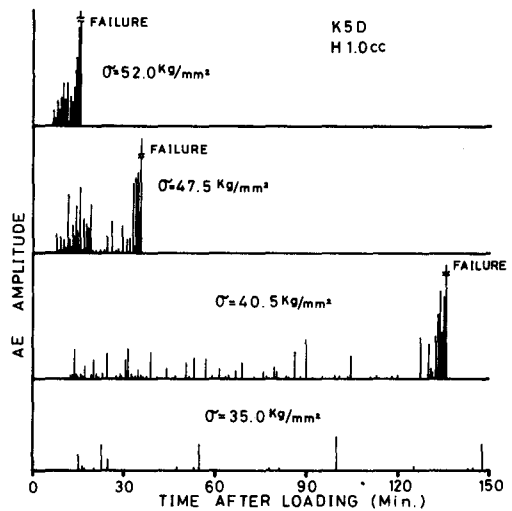


Fig. 7 AE amplitude as function of time during implant test. (K 5 D)

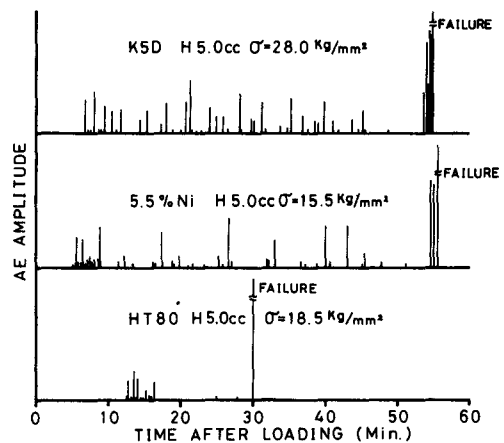


Fig. 8 AE amplitude as function of time during implant test. (H 5.0 cc)

であり、破断前に大振幅 AE が観察された。すなわち、インプラント試験における溶接低温割れの発生は比較的短時間に起き、割れはある潜伏期をもって伝播・停留を繰返し成長する典型的な遅れ破壊現象を呈していた。

3. 3 低温割れの発生・伝播挙動について

以上のインプラント試験に AE 法を適用した結果、AE 発生特性は供試鋼板、拡散性水素量および負荷応力の大きさにより影響を受けることが明らかで低温割れの発生・伝播挙動がそれらによって異なることが明らかである。そこでインプラント試験における割れ過

程を AE 発生測定結果から検討を試みる。

インプラント試験において、試験条件にかかわらず比較的早期に割れの発生が認められ、通常の溶接低温割れ試験法においては拘束応力、 P_{cm} 値、および拡散性水素量がそれぞれ少ない程、割れの発生時期は遅くなる傾向にあることと異なっている。インプラント試験において割れ発生に至るまでの時間が短いことは、平井らが報告⁹⁾しているように溶接部の応力発生過程が他の試験法と異なったためであろう。つまりインプラント試験においては溶接部が 150°C に冷却した時から負荷を開始し 100°C に至るまで終了しているが、RRC 試験、斜め Y 型割れ試験などにおいては、溶接部の冷却に伴って拘束応力が発生し 100°C 以下になってからも溶接部の応力は徐々に増加しつづけており、このように応力発生状況が異なっている。さてインプラント試験における割れの発生であるが、溶接により導入された水素が時間の経過とともに溶接熱影響部に拡散し切欠きの先端近傍に水素が集積し割れ発生に必要な限界水素量に達した場合に生ずると考えられる。しかしながら、この局部水素濃度が極大値に達するまではかなりの時間が必要なことを佐藤らは歪勾配の水素集積モデル¹⁰⁾を用いて報告しており、本インプラント試験の結果と異なっている。このことはインプラント試験において何らかの理由で、切欠部に短時間で割れ発生に必要な拡散性水素が集積したことを意味している。試験片の負荷中に切欠き近傍の変形に従って、水素が転位の移動にともない運ばれてきて試験片切欠き底部に集積され、割れの発生に寄与したと思われる。

更に AE の発生状況から割れの伝播挙動を推定してみる。この AE 発生状況は次の 3 タイプに分類できようである。いずれのタイプも試験開始後、数分間小・中振幅の AE が発生している。一つはこの AE にひきつづき小・中振幅の AE が比較的連続して発生し、ややその活動度が低下した後、破断数分前から中・大振幅の AE の活動が多くなるタイプ (A タイプとする) である。これは割れが負荷後しばらくして一定の速さで伝播しつづければしばらく停留した後、亀裂の成長が著しくなり破断したと考えられる。次は初期の AE が発生し AE の活動が一時的に低下した後、主として中振幅 AE が断続的に発生し破断直前に至って大振幅 AE が観察されるタイプ (B タイプとする) である。この場合試験初期において割れが発生あるいは少し伝播した後、ある潜伏期を経て割れが段階的に成長し限界亀裂長さに達し急速破断したと推定される。3 番目のタイプは初期の AE が発生した後、時間の経過とともにごく小

の振幅 AE が発生し、破断前に中・大振幅 AE が数個発生して破断している (C タイプとする)。これは初期に一定亀裂が発生し潜伏期を経た後、直ちに破断に至っておりこの潜伏期にはほとんど亀裂の伝播はなかったものと見られる。この AE 発生状況から推定されたインプラント試験の低温割れ伝播過程は Fig. 9

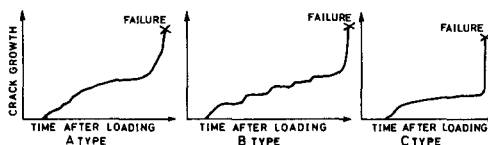


Fig. 9 Schematic diagram of crack propagation.

のように示される。これを別の見方をすれば亀裂の発生・伝播・破断に至るまでは 3 段階あるようである。第 I 段階は微細な割れが発生あるいはゆっくり伝播する Slow Crack Growth 段階、第 II 段階はある潜伏期を経た後、割れが部分的にある大きさで進展する Partially Crack Growth 段階、さらに第 III 段階は割れが材料の靱性値などによって定まる臨界値に達すると不安定に急速に亀裂が成長する Rapid Crack Growth 段階に分類されるようである。

このようにインプラント試験において、溶接低温割れの発生時期は比較的早く、割れの伝播挙動は前述したどのタイプであるか、その挙動にどの段階が明確に現われるかは、鋼板の化学組成、溶接金属中の残留水素濃度および負荷応力値などにより異なっていることが明らかとなった。

そこでこのインプラント試験における溶接低温割れ伝播過程をさらに検討するため AE 発生特性から、AE 事象の振幅分布 (以下 AE 振幅分布) を求めた。この AE 振幅分布は著者らが報告¹¹⁾したように亀裂の伝播挙動を理解する上で有効な手段である。本試験で得られた AE 振幅分布の数例を Fig. 10 に示す。図中 A は K5D 鋼板で拡散性水素量 1.0cc/100g で負荷応力値を変化させた場合の例である。負荷が大きいく程、大振幅 AE の発生が増加しその傾きは緩やかになる傾向にあり、他の鋼種においても K5D 鋼板ほど顕著ではなかったが同様な傾向であった。茂木⁹⁾によればこの AE 振幅分布の傾きは亀裂の停止確率を表すもので、傾きが緩い程亀裂の伝播が容易であることを示している。すなわち、亀裂の伝播速度が速いと見なすことができる。このように傾きが異なっていることから、負荷応力により破壊モードがちがっていることが推定される。こ

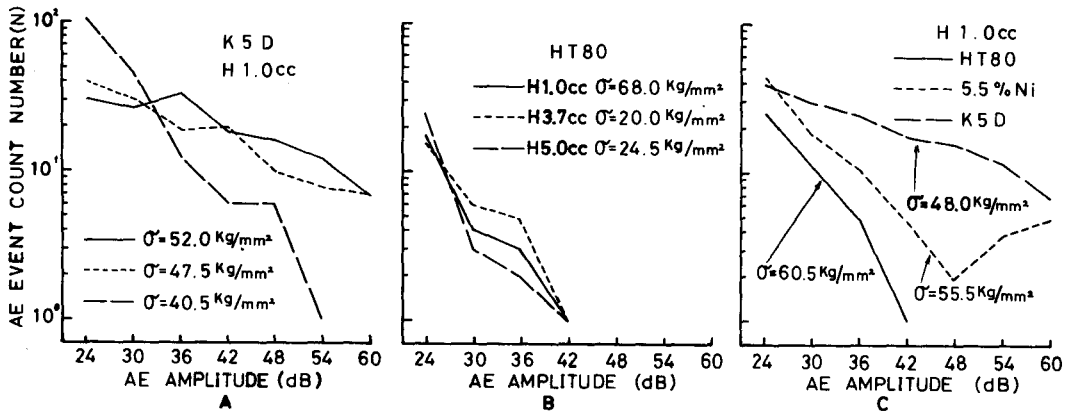


Fig. 10 AE peak-amplitude distribution due to cold cracking.

のことは破断面の走査型電子顕微鏡観察の結果、高応力負荷ほど、延びの少ないディンプル破面が支配的で、低応力になるほど水素の集積に起因する水素凝析開破面および粒界割れ破面が多くなっていったことから裏付けられる。Fig. 10のBにはHT80鋼板において水素量が異なる場合のAE振幅分布の例を示しており水素量の大小にかかわらず同様な傾向である。鋼種によりAE振幅分布の形状は異なるが、他の鋼種においても水素量の違いにある差は認められなかった。このことは同一鋼種ならば断続的な遅れ割れの成長過程において、割れから次の割れまでの潜伏時間が異なっていることを示している。同様なことを坪井らは斜めY型割れ試験⁹⁾において確認している。すなわち、亀裂の先端近傍に水素が拡散・集積して割れの限界水素量に達するまでの時間が異なるだけで、破壊モードには変化がなかったためと推定される。

さらにFig. 10のCには拡散性水素量1.0cc/100g一定とし鋼種を変化させた場合のAE振幅分布の例を示す。負荷応力50kg/mm²前後ならびに破断時間が1時間前後の場合で、鋼種によりAE振幅分布は異なっており治金的な要因で割れの伝播挙動が大きく異なると見られる。K5D鋼板の場合、AE振幅分布はほぼ一直線で傾きの緩やかな分布となっており亀裂の伝播は比較的連続でその生長速度が速かったことが推定される。この伝播挙動は前述したAタイプであり各段階も一様に現われていることが明らかである。5.5%Ni鋼板の場合、負荷応力値、拡散性水素量のいかんにかかわらず、中振幅に変極点をもったAE振幅分布になっている。このことは初期に切欠き近傍に割れが発生した後、比較的大きい割れの伝播、停止を繰返した時大きなエネルギーが解放され大振幅AEの発生が増加し、この

ような分布になったと見られる。一方、5.5%Ni鋼板の破断面を走査型電子顕微鏡で観察した結果、亀裂の伝播、停止を示すTear Ridgeの間隔が長くなっており大きい破面単位で割れが段階的に伝播していたことを示していた。この大振幅AEはTear Ridge間に割れが進展していることを意味していると考えられる。このように、5.5%Ni鋼板における低温割れは段階的に生成しておりBタイプの伝播挙動を示し第II段階が顕著に表われたものである。HT80鋼板の場合、負荷応力値、拡散性水素量にかかわらずAE振幅分布は大中振幅AEの発生はほとんどなく小振幅AEのみで傾きが急な直線である。これは潜伏時間内に割れの伝播がほとんどなく亀裂が伝播し難い状態にあったと考えられる。すなわち、潜伏期に切欠前方にあるいは試験片断面に割れの核および微細なマイクロ割れが発生、破断直前にこれらがいっしょに結合して破断したと考えられる。このことは破断面の走査型電子顕微鏡観察した結果、破断面の垂直方向にマルテンサイトのラス部にそって多くの二次割れが形成されており、これらが亀裂伝播の核になることから容易に推測できる。HT80鋼板の割れの伝播挙動はCタイプで第I段階のみが顕著となっている。

このように溶接低温割れは溶接により導入された水素の拡散・集積に起因する遅れ割れ現象で、この遅れ時間には割れ発生までの時間と割れの伝播・停留を繰返して破断に至るまでの時間の二つを含んでいることが明らかである。また割れの伝播挙動は亀裂先端において割れの限界水素量に達するまでの時間だけでなく、潜伏期にマルテンサイトのラス部など転位密度の高い場所へ水素が集積して割れの進展のための核の成生状態によっても影響されることがAE測定結果からも推

定される。

以上のように、インプラント試験に AE 法を適用すれば、溶接低温割れの発生・伝播挙動を的確に把握できることが明らかになった。

4. 結 言

AE 法を適用して、船体用 50 キロ級高張力鋼板、LNG タンク材である 5.5%Ni 鋼板および調質型 80 キロ級高張力鋼板についてインプラント試験を実施した。これより、溶接低温割れ発生限界応力 (σ_{cr})_{imp} 値と諸要因との関係を調査するとともに、インプラント試験片の破断に至るまでの AE 発生特性を把握し溶接低温割れ発生・伝播挙動を検討し以下の結論を得た。

1) 溶接低温割れ発生限界応力 (σ_{cr})_{imp} 値は鋼板の化学組成および溶接金属の拡散性水素量により大きく影響される。このうち特に拡散性水素量の影響が大きく拡散性水素量を 1.0cc/100g から 3.7cc/100g に増加すると (σ_{cr})_{imp} 値は 1.0cc/100g の場合に比べてその 28~61% 程度に低下している。

2) AE 発生特性から、インプラント試験における溶接低温割れの発生・伝播過程を把握することができる。その発生は比較的早く、伝播過程は鋼板の化学組成、負荷応力および拡散性水素量により異なる。

3) AE 発生特性から溶接低温割れの発生・伝播挙動は大別して 3 タイプに分類でき、その発生から破断に至るまでは 3 段階になっている。

参考文献

- 1) 黒川, 片岡, 河野: “COD 試験の AE 発生特性に関する研究”, 長崎大学工学部研究報告 Vol. 11, p. 51 昭53
- 2) Granjon, H., Debiez, S. and Gaillard, R.: “Implant method at the Institut de Soudure” Metal Construction, Oct. 1973, p. 384
- 3) 山口, 荒木: “インプラント試験による鋼の低温割れの研究” 長崎大学卒業研究論文, 昭56
- 4) Granjon, H.: “The ‘Implant’ method for studying the weldability of high strength steels” Metal Construction, Nov. 1969
- 5) 佐藤, 寺崎, 大熊: “インプラント試験による鋼の低温割れの限界応力と残留水素濃度の関係” 溶接学会誌 Vol. 48, 昭54, No. 4, p. 48
- 6) 平井, 坪井: “インプラント試験における割れ発生, 伝播挙動の AE 測定” 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 24, 昭54, p. 56
- 7) 佐藤, 寺崎, 山下: “単層溶接部の局部集積水素濃度におよぼす溶接諸条件の影響” 溶接学会誌, Vol. 48, 昭54, No. 7, p. 66
- 8) 茂木: “岩石の AE” 日米合同シンポジウム, AE とその構造物の安全性監視への応用, 昭47, p. 1
- 9) 坪井, 平井, 西馬: “Acoustic Emission 法の溶接割れ検出への応用 (第 1 部)” 溶接学会誌 Vol. 45, 昭51, No. 7 p. 60