

# AE法と有限要素解析による 高強度鋼溶接部の低温割れ評価

白岩 隆行  
東京大学

## 1 はじめに

近年、鋼構造物や輸送機器の軽量化のために高強度鋼の需要が高まっている。高強度鋼の溶接においては、信頼性の観点で大きく2つの課題が残されている。ひとつは溶接継手の疲労強度が母材よりも著しく低いこと、もうひとつは水素感受性が高く、溶接部において低温割れ（水素誘起割れ）が起きうることである。低温割れに対する実用的な予防策は、溶接前に予熱を与えることで水素拡散を促進させ、局所的な水素の集積を防ぐことである。一方で、過剰な予熱は製造コストの観点から望ましくないため、低温割れを防ぐための限界予熱温度の予測が必要である。炭素当量を用いた限界予熱温度決定法では、十分な予測精度が得られないため、近年、数値解析手法により水素拡散挙動を計算する試みが行われている<sup>1)</sup>。

き裂の生成・進展のメカニズムを解明するには、溶接直後から時間変化する応力場・水素濃度分布の定量的解析に加えて、低温割れの動的評価が必要である。低温割れに関連した実験・計測技術としては、X線回折による残留応力計測や、昇温脱離ガス分析法（TDS）による水素の定量解析がある。き裂観察は、主に溶接後の割れ率計測が行われており、き裂の生成と成長をその場計測する手法は多くない。そこで本研究では、材料中の微視割れにともなう弾性波を計測する手法であるアコースティック・エミッション（AE）法に注目した。AE法による低温割れが生じた時刻や位置を特定し、有限要素法（FEM）によりその時刻・位置における応力状態や、水素濃度を評価することで、低温割れ生成のクライテリオンを導出できるのではないかと考えた。

## 2 研究方法

980MPa級炭素鋼について、熱処理条件や水素チャージ条件の異なる引張試験片を準備した。SSRT（Slow Strain Rate Tensile）試験中のAE信号を計測することで、き裂発生時の応力を決定した。また、き裂発生時の

応力ひずみ分布・水素濃度分布を、有限要素解析により計算した。具体的には、有限要素解析ソフトウェアAbaqusを使用して、伝熱・水素拡散・応力場解析を行った。初期水素濃度には各試験において、昇温脱離ガス分析（TDS）により計測したものをを用いた。水素拡散係数は温度と塑性ひずみの関数<sup>2)</sup>として定義し、計算ステップごとに更新した。以上のようにして、SSRT試験から得られた低温割れクライテリオンの妥当性を評価するために、より実用的な状況を想定して、同じ980MPa級炭素鋼のy型溶接割れ試験中のAE信号を解析した。

## 3 主な研究成果

SSRT試験中のAE計測結果の一例を図1に示す。振幅が75dB以上、発生位置が試験片中心から±3mm以内のAE信号を検出することで、すべての水素チャージ条件下において、き裂発生時の応力を決定することができた。SSRT試験は水素ぜい化に関する研究で広く実施されているが、最大応力を評価指標として採用することが多い。実際には、最大応力よりもやや低い応力でき裂が生成することが示された。安全側の評価を行うためには、最大応力を用いるのではなく、き裂発生応力を用いて破壊のクライテリオンを評価することが適切であると

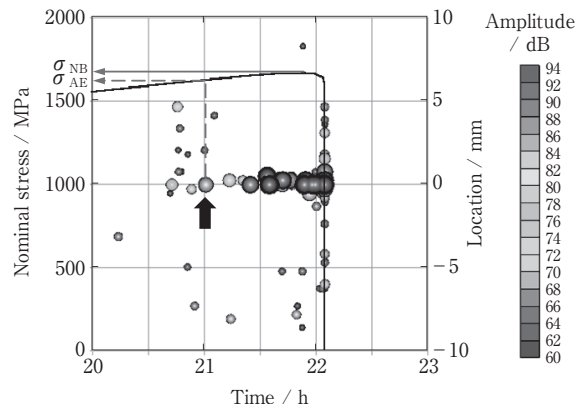


図1 AE計測によるき裂発生応力評価

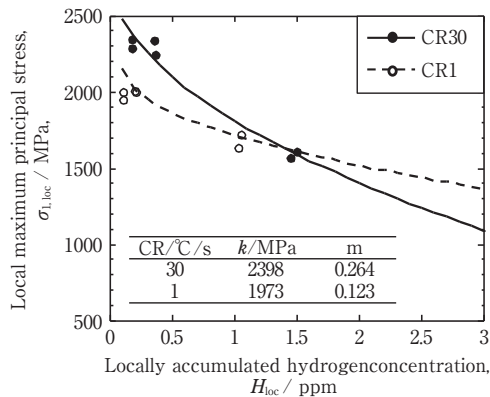


図2 低温割れのクライテリオン (限界曲線)

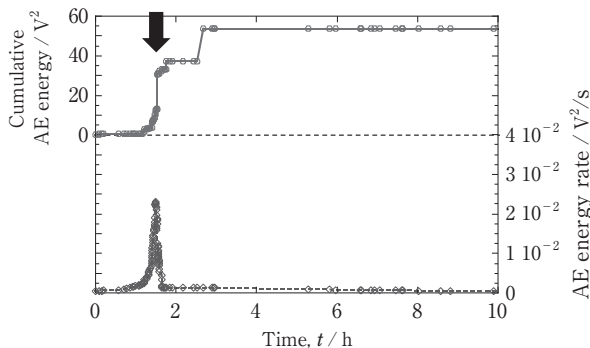


図3 y型溶接割れ試験中の低温割れ検出

考える。

FEMにより、SSRT試験中のき裂発生時の局所最大主応力 $\sigma_{1,loc}$ と局所水素濃度 $H_{loc}$ を解析し、低温割れのクライテリオン (限界曲線) を導出した。関数の形は先行研究<sup>3)</sup>を参考にして下式を用いた。

$$\sigma_{1,loc} = kH_{loc}^{-m}$$

ここで $k$ 、 $m$ は定数である。得られた限界曲線を図2に示す。以上のように、AE計測により低温割れのクライテリオンを同定する手法を提案した。

提案手法により得られた限界曲線の妥当性を検証するために、y型溶接割れ試験中のAE解析を行った。図3に示すように、溶接体であっても、AEを計測することで低温割れの発生時刻を高精度に同定できることが示された。また紙面の都合上、結果を省略するが、累積AEエネルギーから割れ率を推定できることもわかった。さらに、相変態を考慮した、伝熱-水素拡散-応力場の有限要素解析を行い、き裂発生箇所 (図4のAの場所) における局所応力と局所水素濃度を計算した。計算された応力・水素濃度が図2の限界曲線を越えた時刻は、図3の低温割れ検出時刻とほぼ一致した。以上から、限界曲線を用いて溶接体の低温割れを予測できることが示された。一方で、溶接体の表面における水素放出特性はまだまだ明らかではないため、より高精度に予測するために

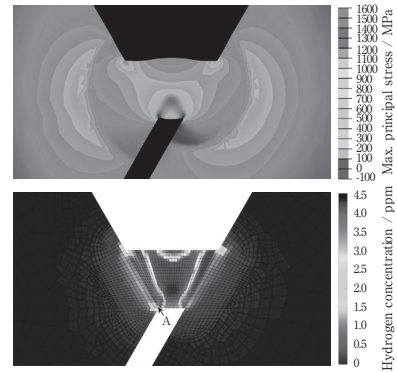


図4 y型溶接割れ試験の主応力、水素濃度分布

はFEMにおける水素拡散の境界条件を適切に決定することが課題である。

## 4 おわりに

環境問題の解決のためには、より環境負荷の小さい持続可能なエネルギーシステムに移行すること、そしてエネルギー効率のよい移動体の普及が急務であろう。持続可能なエネルギーとしては、太陽光、風力、地熱、水力、バイオマスなどが挙げられるが、いずれも自然界のエネルギーを利用したものであり、水素ぜい化が問題となる。例えば、水力発電の水圧管 (ペンストック) や洋上風力発電では高張力鋼が使用されており、水素侵入による遅れ破壊が問題となる。エネルギー効率のよい移動体としては、電気自動車やハイブリッド車の普及が見込まれるが、ここでも高強度鋼溶接部の低温割れは大きな課題のひとつである。本研究ではAE計測により、簡便かつ高精度に低温割れを評価できる手法を提案した。

提案手法は、AEセンサをマグネットで試験体に取り付けるだけで簡単に実施でき、試験体を切断・観察することもなく、非破壊で低温割れの発生時刻や割れの程度 (割れ率) を、定量評価できる。またここで得られた限界曲線を用いれば、材料や構造体の形状、溶接条件を変えたときに低温割れが発生するかどうかを数値解析により予測できる。本研究では、980 MPa級高張力鋼を対象に解析を行ったが、ステンレス鋼など他の材料にも適用可能である。ただし材料ごとに課題が生まれる可能性があるため、今後は幅広い材料や環境において提案手法の有効性と限界を明らかにすることが必要になるだろう。

## 参考文献

- 1) 三上欣希, 川邊直雄, 石川信行, 望月正人, 溶接学会論文集, 34 (2016), 67-80.
- 2) T. Kasuya, A. T. Yokobori, G. Ozeki, T. Ohmi, M. Enoki, ISIJ international, 61 (2021), 1245-1253.
- 3) M. Wang, E. Akiyama, K. Tsuzaki, Mater. Sci. Eng. A 398 (2005) 37-46.