

討15 疲労き裂伝播特性におよぼす、材料の強度および介在物の影響

川崎製鉄(株)技術研究所 ○ 成本朝雄 小林邦彦
田中康浩 工博 船越督己

1 緒言

近年、鋼構造物の Failure safe 設計の立場から、疲労き裂伝播に関する研究が盛んに行なわれている。疲労き裂伝播速度は Paris の式 $da/dN = C (\Delta K)^m$ でよく表わされることが知られており、材料定数 C 、 m に関するデータが各所で求められている。また、疲労き裂伝播に関する理論式も多く提案されており、 m として 2 または 4 が求められている場合が多い。実験的には、 m は 2 ~ 4 程度の値が得られている場合が多いが、7 程度の大きな値も報告されている。材料定数 C 、 m に影響する因子としては、強度、靱性、残留応力、温度、雰囲気などが考えられ、Ritchie¹⁾ は静破壊靱性値 K_{Ic} と m によい相関があることを報告している。しかしながら、 K_{Ic} と m の相関は、疲労破面に脆性破面（静的破面）が現われることによるものであり、純粹な疲労破壊にのみついて考えれば K_{Ic} の影響はないと考えることもできる。Gurney²⁾ は m と降伏応力 σ_y との間によい相関があることを示しているが一般には、多くの材料についてこのような整理を行なうと、ばらつきが大きく必ずしもよい相関が得られないようである。しかしながら、上述のような靱性の影響等を考慮して整理すればこのばらつきが小さくなる可能性が充分ある。ここでは、いくつかの因子のうち σ_y がもっとも基本的な因子であり、他の諸因子によってこの基本特性がみかけ上変化するという観点に立ち、当所でこれまでに得られた資料を基に、³⁾ 強度、介在物による剥離破面（静的破面）についてその影響を個別に調べ、若干の考察を加えた。

2 供試材および実験方法

材料定数と強度との関係を調べるために SM41 ~ HT100 までの 7 鋼種について、疲労き裂伝播試験を行なった³⁾。また、Z 方向疲労における介在物と C 、 m の関係を調べるために、S 含有量を、0.004 ~ 0.025 wt.% の範囲で変えた 5 種の SM50 を用いて試験を行なった。⁴⁾

3 実験結果および考察

3.1 材料の強度と C 、 m について

図 1 に各種溶接構造用鋼について得られた疲労き裂伝播速度を示す。いずれの鋼種も Paris の式でよく整理できており、 ΔK の小さい範囲で鋼種間の差が大きく現われている。しかしながら ΔK が $100 \text{ Kg/mm}^{3/2}$ 程度になると、鋼種間の差はあまり顕著でない。高張力鋼と軟鋼のこのような差は、くり返し加工硬化、軟化現象あるいは、低サイクル疲労試験で求められている $\epsilon_{pa} - N_c$ 曲線の差などに基因するものであり、切欠感受性の差と同様のものであると考えられる。すなわち、き裂先端におけるくり返し塑性歪は、静的な場合に比べ高張力鋼では増加し、軟鋼では減少する方向にある。 $\epsilon_{pa} - N_c$ 曲線から推定すると、 ϵ_{pa} の小さい領域では同一 ϵ_{pa} レベルで比較すると軟鋼の方が N_c が大きい。これらの差によって低 ΔK 領域で軟鋼の疲労き裂伝播速度が遅くなっていると推察される。

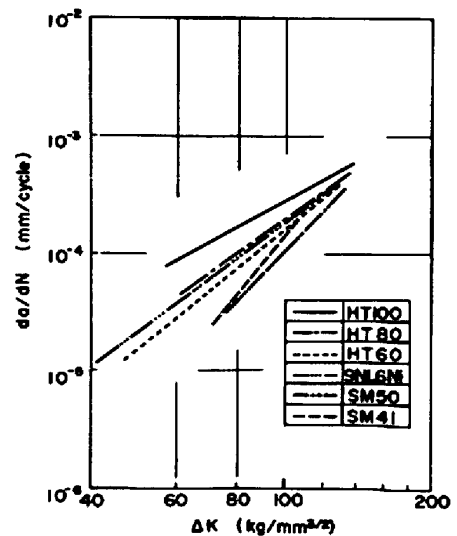


図 1 各種溶接構造用鋼の疲労き裂伝播速度

材料定数 m と降伏応力 σ_y との関係を図 2 に示す。同図には、図 1 で得られた結果の他に、低温で脆性破面が現われる場合、後述する介在物の剝離破面が現われる場合および粒界剝離破面が現われる場合¹⁾の結果を黒丸印で示した。図 1 の実験で得られた疲労破面にも、 ΔK のごく小さい領域で粒界破面が観察された例があるが、 ΔK が増大すると消失することからこれは静的破面ではないと考えられる。静的破面が現われる場合は、 m の値が大きく σ_y と一定の相関がみられないが、これらの点を除けば、 σ_y と m の間には直線状のよい相関が認められる。

このことから、疲労き裂伝播特性は、 σ_y によって基本的に支配されていると考えることができる。

3、2 Z方向疲労の C, m におよぼす介在物の影響

S 含有量の異なる SM50Z 方向疲労き裂伝播速度を図 3 に示す。S 含有量が 0.01 wt.% 以下の 3 鋼種はほとんど同様の結果となっているが、0.018 wt.% と 0.025 wt.% の材料では疲労き裂伝播速度が速くなっている。 m の値は図 4 に示すように S 含有量によって変化しており、S 含有量の増加とともに m が大きくなっている。これらの破面を SEM で観察すると、鋼 D, E は通常の疲労破面と同様の形態であるが、鋼 A, B, C には写真 1 に示すように、偏平な MnS の剝離破面が見られる。

MnS 介在物の剝離部分では、疲労き裂は何ら抵抗を受けることなく進展すると考えられ、見かけの疲労き裂伝播速度は速くなる。剝離破面の部分をさらに詳しく観察すると、剝離破面の手前に tear line が見られる。このことは、主き裂が介在物に近づくと、介在物から主き裂に向かって逆向きにき裂が発生、伝播して主き裂と合体したことを物語っている。したがって、この逆向きに進展した領域も、みかけの疲労き裂伝播に対して実質的には何ら抵抗していないと見なすことができる。介在物と、このように明らかに逆向きに進展した領域の面積率を、有効介在物面積率 A (%) とする。図 5 に多数の SEM 写真から測定した A と ΔK の関係を示す。同じ ΔK で比較すると、S 含有量が多いほど A が大きくなっている。また、 ΔK の増大とともに A が

増大している。これは、主き裂先端で高応力になる領域が拡大し、剝離破壊し得る介在物が増すことと、逆向きに進展する領域が増大することによるものと考えられる。主き裂と同じ方向に進展する領域においては、介在物のない材料と同じき裂伝播特性を示すものと仮定すれば、介在物のある材料の疲労き裂伝播速度は (1) 式で表わさ

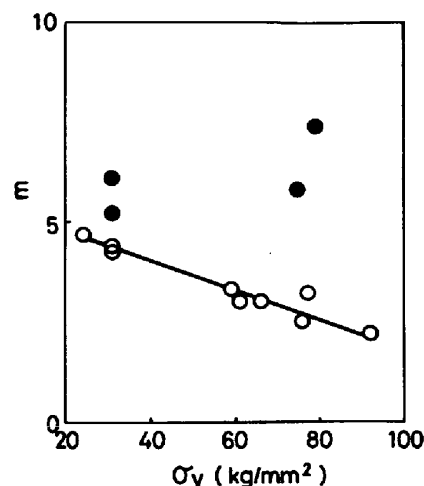


図 2 m の降伏応力依存性

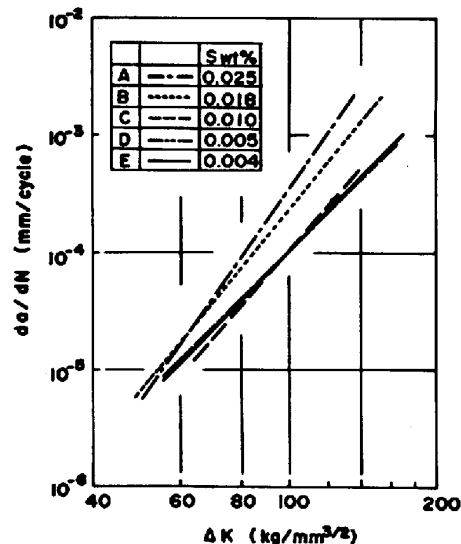


図 3 S 含有量の異なる SM50Z 方向疲労き裂伝播速度

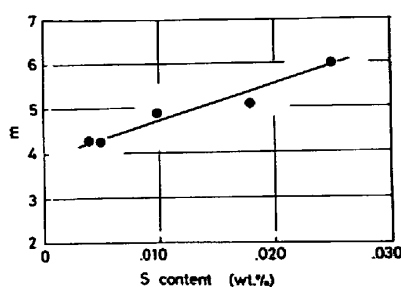


図 4 S 含有量による m の変化

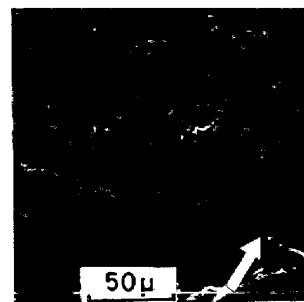


写真 1 介在物の剝離破面

れる。

$$\frac{da}{dN} = \frac{100}{100-A} \left(\frac{da}{dN} \right)_n \dots\dots (1)$$

ただし、 $(da/dN)_n$ は剥離破面がない場合の疲労き裂伝播速度であり、本実験においては鋼D、Eの疲労き裂伝播速度で代用できる。(1)式を用いて推定した疲労き裂伝播速度と実測値の比較を図6に示す。両者はかなりよく一致しており、図3でみられた結果をよく説明することができる。すなわち、高S含有鋼で疲労き裂伝播速度が速くなるのは介在物の剥離破面が現われることによるものであり、 m が大きくなるのは、 A が ΔK 依存性を有することによるものである。また、通常の疲労破面の部分では、降伏応力によって定まる疲労き裂伝播特性を示し、D、E鋼と本質的な差はないと見なせる。他の静的破面(例えば脆性破面)が現われた場合も全く同様の現象が報告されている^{1) 5)}。鋼A、Bの高 ΔK 領域(高 da/dN 領域)では実測値の方が速いようである。ことような場合は、主き裂前方の直列な複数個の介在物からき裂が発生することも考えられ、主き裂と同じ方向に進展した領域でもみかけ上抵抗とならない場合があること、また、先行き裂と主き裂の相互作用による応力拡大係数の増大などの影響があるためと考えられる。

4. まとめ

鉄鋼の疲労き裂伝播特性におよぼす強度と介在物の影響を調べてつぎの結果を得た。

- 1) 疲労き裂伝播速度式における材料定数 m は、基本的には、降伏応力 σ_y によって支配されていると考えられる。
- 2) Z方向疲労で介在物の剥離破面が現われると、疲労き裂伝播速度は加速される。
- 3) この効果は破面上で観察される有効介在物面積率 A でよく説明でき、 A が ΔK 依存性を有するため m が増大する。したがって、剥離破面の出現による疲労き裂伝播特性の変化はみかけ上の現象であると言える。

参考文献

- 1) R. O. Ritchie and J. F. Knott, Acta Met., vol. 21 (1973), 639
- 2) T. R. Gurney, Welding Institute. Res. Rep., E18/12/68 (1968)
- 3) 成本. 田中. 船越., 川崎製鉄技報, vol. 6 No. 1 (昭49-1), 38
- 4) 小林. 成本. 船越., 日本材料強度学会講演論文集, (1976), 45
- 5) T. Y. Shih and T. Araki., Trans. I S I J, vol. 13, (1973), 11

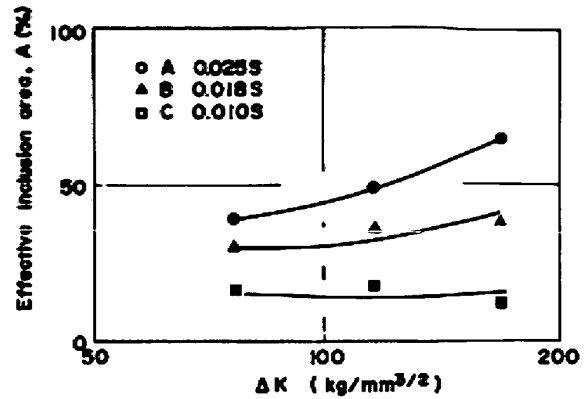


図5 有効介在物面積率Aの測定結果

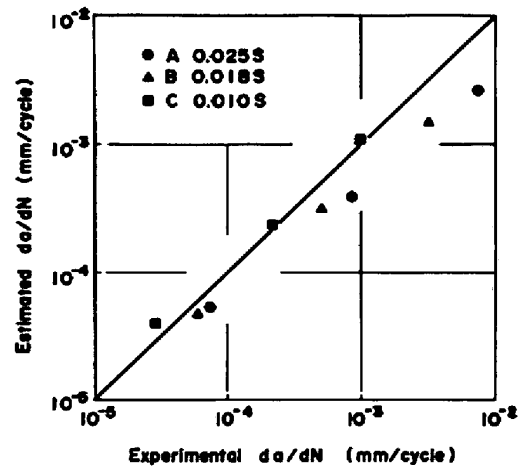


図6 有効介在物面積率Aから推定した疲労き裂伝播速度と実測値の比較