低炭素鋼における疲労き裂進展の遅延挙動に及ぼす 試験片板厚の影響*

戸 梶 恵 郎** 安 藤 善 司**
今 井 利 雄*** 森 川 邦 彦****

Effect of Sheet Thickness on Retardation Behaviour of Fatigue Crack Propagation of Low Carbon Steel

by

Keiro TOKAJI, Zenji ANDO, Toshio IMAI
(Faculty of Engineering, Gifu University, Gifu)
and Kunihiro MORIKAWA
(Nissan Motors Co. Ltd., Tokyo)

The effect of sheet thickness on the fatigue crack propagation behaviour was studied by using the specimens of low carbon steel with different thickness (2 mm and 8 mm) under the condition of stress ratio $R=0$ and frequency $f=10$ Hz.

Under the constant load-amplitude-tests, the fatigue crack propagation rate was not affected by sheet thickness and the effective stress intensity factor range ratio, U , measured on the specimen surface increased with increasing stress intensity factor range, ΔK .

Both of the specimens indicated the delayed retardation behaviour following a single tensile overload application, and the affected crack length, l^* , in the thin specimen was larger than that in the thick specimen. Retardation behaviour could be classified by the effective stress intensity factor range, ΔK_{eff} .

The midsection of sheet thickness in the thick specimen as well as its surface indicated the same delayed retardation behaviour. It seems that this behaviour depends strongly on the stress state at the crack tip.

The value of l^* was markedly larger than the calculated plastic zone size. However, the hardened zone ahead of the crack tip measured by a micro Vickers hardness tester (25 g) showed a good agreement with l^* .

(Received Mar. 26, 1981)

キー・ワード：低炭素鋼，試験片板厚，疲労き裂進展，遅延挙動，有効応力拡大係数幅

1 緒 言

薄板と厚板あるいは板表面と板厚中央部とでは、き裂先端の応力状態が異なるために疲労き裂進展挙動に差異が生じることが考えられる。実用においては種々の板厚の材料が用いられ、かつ最近のように高強度材料の使用が高まると平面ひずみ状態下でのき裂進展が問題となるから、上述の差異を明確にすることはきわめて重要な課題である。

一定振幅荷重下においては、低強度材である軟鋼ではき裂進展速度に及ぼす試験片板厚の影響はほとんど

現れず¹⁾、またアルミニウム合金や高強度の鋼では板厚の増加に伴い、すなわち平面ひずみ状態が強くなるに伴いき裂進展速度はわずかに高くなることが指摘されている^{2,3)}。このように、一般に一定振幅荷重下では板厚の影響はそれほど顕著には現れないようであるが、一方荷重変動時のような過渡的状态ではその影響が顕著に現れる可能性がある。この点について、最近いくつかの研究が報告されているけれども^{4)~8)}、例えば板表面と板厚中央部における挙動の相違などについては必ずしも明らかにされているとはいえない。

著者らは先に高張力鋼 HT 60 の 2 種類の板厚試験片を用いて、一定荷重試験および単一過大荷重試験を行い、疲労き裂進展挙動に及ぼす板厚の影響および板表面と板厚中央部における差異について明らかにした。

* 原稿受理 昭和56年3月26日
** 正 会 員 岐阜大学工学部 岐阜市柳戸
*** 岐阜大学工学部 岐阜市柳戸
**** 日産自動車(株) 東京都中央区銀座

本研究はそれに続いて, HT60 材とは降伏強度がかなり異なる低強度・高じん性材料である低炭素鋼 S10C を用いて同様の実験を行い, 種々の挙動を明確にするとともに, HT60 材の結果とも比較検討したものである。

2 実験方法

用いた材料は素材厚さ 9 mm の 0.13% C 低炭素鋼板 (S10C) で, その化学成分および機械的性質を Table I および Table II に示す。試験片は前報におけるものと同一であり, 圧延方向と試験片軸とが一致するように機械加工された試験部幅 40 mm の中央切欠き付試験片 (CC 試験片) である。試験片は所定の形状寸法に機械加工後, 表面をエメリー紙で 1000 番まで研摩し, さらにその後 650℃・1 時間の真空焼なましを行い実験に用いた。板厚は 2 mm と 8 mm の 2 種類である。試験には容量 10 トンの電気油圧式引張圧縮疲労試験機を用い, 完全片振り ($R=0$)・繰返し速度 10 Hz で実験を行った。

Table I. Chemical composition of material (%).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.13	0.24	0.42	0.011	0.009	0.01	0.01	0.03

単一引張過大荷重は, 前報の結果と比較するために, 前報と同様に次式のように定義されている。

$$\%O.L. = \{(P_{O.L.} - P) / P \times 100 \quad (1)$$

ここで, $P_{O.L.}$ は過大荷重, P は基準繰返し荷重である。採用した過大荷重は 20%, 30%, 40%, 50% および 75% O.L. の 5 種類であり, $2l=10\text{mm}$ で過大荷重を手動により負荷した。なお, き裂長さの測定, 応力拡大係数の計算およびき裂開口荷重の測定などは前報と同様である。

3 実験結果

3.1 一定振幅荷重下のき裂進展挙動

Fig. 1 にき裂進展速度 dl/dn と応力拡大係数幅 ΔK との関係を示す。いずれの板厚の試験片においても直線関係が成立し, 次のように表される。

$$\text{板厚 } t=2\text{ mm} \quad dl/dn = 9.49 \times 10^{-12} \Delta K^{3.68} \quad (2)$$

$$\text{板厚 } t=8\text{ mm} \quad dl/dn = 1.08 \times 10^{-12} \Delta K^{4.25} \quad (3)$$

Fig. 1 の左図の実線は(2)式, 右図の実線は(3)式であり, また破線は両板厚試験片の結果の比較を容易にするために, $t=2\text{ mm}$ の場合 (左図) には $t=8\text{ mm}$ の結果 (3)式) を, $t=8\text{ mm}$ の場合 (右図) には $t=2\text{ mm}$ の

結果 ((2)式) を示したものである。実線と破線を比較すると板厚の影響が現れているようにみえるが, 実験点に注目すると両試験片の間に問題となるような差異は生じていないことがわかる。

Fig. 2 にピーチマーク法によって測定された板厚試験片 ($t=8\text{ mm}$) の板厚中央部における dl/dn と ΔK との関係を示す。板厚中央部の dl/dn と ΔK との間にも次の関係が成立している。

$$dl/dn = 1.33 \times 10^{-11} \Delta K^{3.62} \quad (4)$$

図中の実線は(4)式であり, 破線は表面の結果, すなわち(3)式である。表面の dl/dn は測定点をプロットしていないので, 一見板厚中央部の方が低い進展速度を示しているような印象を与えるが, Fig. 1 右図と比較してわかるようにほとんど差異はない。

Fig. 3 に有効応力拡大係数幅比 U と ΔK との関係を示す。HT60 材では広範囲の ΔK に対していずれの板厚の試験片も U はほぼ一定 ($U=0.70$) であったのに対して, S10C 材では図からわかるように ΔK の増加に伴い U も増加する。板厚の影響はわずかに存在するようにもみえるが, 両試験片の間で差異がないとみな

Fig. 1. Relations between fatigue crack propagation rate and stress intensity factor range under the constant load amplitude tests.

Fig. 2. Relations between fatigue crack propagation rate within the sheet and stress intensity factor range under the constant load amplitude tests.

Table II. Mechanical properties of material.

Upper yield point σ_{su} (kg/mm ²)	Lower yield point σ_{sl} (kg/mm ²)	Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	Breaking strength on final area σ_T (kg/mm ²)	Elongation ϕ (%)	Reduction of area ϕ (%)
32.6	25.9	40.1	94.6	36	72

Fig. 3. Relation between effective stress intensity factor range ratio and stress intensity factor range under the constant load amplitude tests.

せる程度であるから、以下の整理には図中の実線を用いた。

3・2 単一過大荷重負荷後のき裂進展挙動

Fig. 4 に $t=2\text{ mm}$ および $t=8\text{ mm}$ の両試験片における過大荷重負荷後のき裂進展挙動を示す。縦軸は遅延速度比（この比の値が大なるほど遅延が強く起っていることを示す。 $(dl/dn)d$ ：過大荷重試験におけるき裂進展速度、 $(dl/dn)c$ ：一定振幅荷重試験におけるき裂進展速度）、横軸は過大荷重負荷からの距離である。

Fig. 4. Fatigue crack propagation behaviour after a single tensile overload application.

また、図中の ΔK_1 は過大荷重を負荷する直前の応力拡大係数幅である。本材料は低強度材であり、小規模降伏条件から逸脱しやすいので、この点を考慮して比較的小さい2種類の ΔK を選んだ。いずれの板厚試験片においても、過大荷重負荷後には加速現象を示すが、徐々に遅延速度比は増加（ $(dl/dn)d$ は低下）し、ある程度き裂が進展したのち最大値（ $(dl/dn)d$ は最小値）を示し、その後き裂の進展に伴って小さくなり、 $(dl/dn)c/(dl/dn)d=1$ となる。すなわち、遅延遅延現象を示している。 l^* を過大荷重の影響を受けたき裂長さ、 $[(dl/dn)c/(dl/dn)d]_{\max}$ を遅延の強さの最大値、 l' を $[(dl/dn)c/(dl/dn)d]_{\max}$ までの距離と定義すると、これらの値はいずれの試験片においても、過大荷重の増

加に伴い増加する。 $[(dl/dn)c/(dl/dn)d]_{\max}$ は板厚の薄い試験片の方がわずかに大きいようであり、板厚の影響が現れているが、最も強く板厚の影響が現れているのは l^* であって $t=2\text{ mm}$ の試験片における l^* が $t=8\text{ mm}$ の試験片のそれよりも大きい。以上の実験結果の傾向は、先に報告した HT 60 材の場合と同様である。

Fig. 5. Comparison of fatigue propagation behaviour after a single tensile overload application for S10C with that for HT60.

Fig.5 は S10C 材の遅延挙動を HT 60 材と比較したものである。いずれの荷重条件に対しても、 l^* 、 $[(dl/dn)c/(dl/dn)d]_{\max}$ および l' は S10C 材の方が HT60 材よりもかなり大きい。すなわち、S10C 材の方がより強く、かつ広い範囲にわたって遅延を生じることがわかる。しかし、この比較は同一荷重条件に対するもので、過大荷重負荷直前の ΔK は同一であるけれどもそれによる塑性域寸法は両材料の間で異なるから一般的な比較とはいえないが、たとえば横軸の d を ΔK に基づく静的塑性域寸法で無次元化して比較しても傾向は同じであるから、上述の表現は一般性をもつと思われる。

Fig.6 に l^* と次式によって求められた過大荷重負荷に基づく塑性域寸法 r_p との関係を示す。

$$r_p = 2 \frac{1}{\pi d} \left(\frac{K_{OL}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (5)$$

（平面応力 $d=2$ ，平面ひずみ $d=6$ ）

Fig. 6. Relation between affected crack length and calculated plastic zone size.

Fig. 7. Plastic zone shape generated by a single tensile overload application ($\Delta\sigma=12.0 \text{ kg/mm}^2$, 30%O.L.).

なお, σ_{ys} はここでは静的引張降伏強度 (HT 60 材では $\sigma_{ys}=43.1 \text{ kg/mm}^2$ であるのに対して, S10C 材では $\sigma_{ys}=25.9 \text{ kg/mm}^2$) を用いている. また, 試験片表面における結果はすべて平面応力 $d=2$ で整理し, $t=8 \text{ mm}$ の試験片の板厚中央部における結果 (Fig. 9) は両条件を用いて整理してみた. Fig. 4 で示したように, $t=2 \text{ mm}$ の l^* が $t=8 \text{ mm}$ のそれよりも大きい, いずれの板厚試験片においても r_b とは一致せず, l^* は r_b の増加に伴います r_b よりも大きくなる傾向にある. この l^* と r_b との不一致は本材料が低強度材であるために小規模降伏条件を満足しがたく, (5) 式による r_b が実際に形成された塑性域寸法よりも小さく評価されているためであろう. $t=8 \text{ mm}$ の試験片の板厚中央部における l^* は, 平面ひずみ条件より計算される塑性域寸法よりも著しく大きい (Δ 印) が, 平面応力条件より計算される塑性域寸法に対して整理すると, 表面における結果とほぼ一致する.

Fig. 7 に光を斜方向より照射して得られた過大荷重に基づく試験片表面の塑性域形状を示す. IIT60 材では, 板厚によって異なる形状を示したのに対して, S10C 材では $t=8 \text{ mm}$ の試験片の塑性域が $t=2 \text{ mm}$ の試験片のそれよりもき裂に対してわずかに 45° 方向に広がっているようにみえるが, いずれも平面応力型の塑性域形状を示しているようである. しかし, き裂先端前方のひろがり注目すると, $t=2 \text{ mm}$ の試験片の方が $t=8 \text{ mm}$ の試験片よりも大きい.

Fig. 8 は過大荷重と遅延繰返し数 N_D との関係を示したものである. 同一荷重条件に対して, いずれの板厚の試験片も過大荷重の増加に伴い N_D も増加し,

Fig. 8. Relation between overload and retardation cycles.

$t=2 \text{ mm}$ の試験片の方が大きい N_D を示す.

Fig. 9 に過大荷重負荷後の試験片表面と板厚中央部におけるき裂進展挙動の相違を示す. 過大荷重負荷直後に加速が生じるか否かという点を除けば, 表面はもちろん板厚中央部においても遅れ遅延現象を示している. この挙動は, 板厚中央部では過大荷重負荷直後に遅延現象を示した HT 60 材の結果とは異なるものである. 表面と板厚

中央部における挙動との間の重要な相違点は l^* であり, 板厚中央部における l^* が表面におけるそれよりも大きい. この傾向は HT 60 材においても観察されている.

Fig. 9. Difference in the behaviour between crack propagation on the surface and crack propagation within the sheet.

4 考 察

4.1 一定振幅荷重下のき裂進展挙動に及ぼす板厚の影響

すでに報告したように, HT 60 材においては高 $4K$ レベルで板厚の影響が現れ, $t=8 \text{ mm}$ の試験片の方が高い dl/dn を示した. この点についてき裂先端の応力状態が平面ひずみを満足するための条件式

$$t \geq 2.5(4K/\sigma_{ys})^2 \quad (6)$$

を用いて検討すると, 応力状態の相違がき裂進展速度の差異をもたらしていることが推定され, 巨視的破面観察の結果もこれを支持していた. 本研究における S10C 材に対しても (6) 式によって応力状態を評価することはもちろん可能であるが, Fig. 1 から明らかなように事実上き裂進展速度に及ぼす板厚の影響は存在しないから, (6) 式による評価では説明がつかない. しかし, 巨視的破面観察の結果は $t=2 \text{ mm}$ の試験片では約 $4K=52 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 近傍において引張型からせん断型に変化しており, $t=8 \text{ mm}$ の試験片でも約 $4K=64 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 程度においてせん断縁が生じ始め, 引張型からせん断型に移行していることを示していた. すなわち, いずれの板厚試験片においても, $4K$ のかなりの範囲でせん断型もしくはそれに近い様相を呈しているから, Fig. 1 の結果はこのような破面観察から理解することができる.

4・2 遅延挙動に対する有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} の有効性

Fig. 10 に遅延挙動とそのとき測定された U および残留応力との対応を示す。き裂閉開口挙動は遅延挙動と対応させるために、一定振幅荷重下の有効応力拡大係数幅比 U_c と過大荷重試験におけるそれ U_d との比で示されている。残留応力は過大荷重負荷直後のものであり、その測定はX線応力測定装置により、X線照射面積が過大荷重によって生じた塑性域の大きさを越えないようにして行った（照射スリット直径 0.5mm, 照射面積直径 1.5mm）。いずれの板厚試験片においても、遅延が強くなるに伴い U_c/U_d も増加（ U_d は低下）し、遅延の強さが最大となる点において U_c/U_d も最大（ U_d は最小）となり、その後遅延の強さの低下に伴い低下（ U_d は増加）し、遅延の終了時には $U_c/U_d=1$ となる。明確に遅延挙動とき裂閉開口挙動との対応が認められる。また、残留応力分布との対応を調べると、遅延の強さが最大となる点は圧縮残留応力が極大となる点に、遅延の終了点は残留応力が圧縮から引張に変化する点から引張残留応力が極大を示す点近傍に対応しているようである。この距離はおおよそ r_p と一致しており、 $[(dl/dn)_c/(dl/dn)d]_{\text{max}}$ までの距離は繰返し塑性域寸法とほぼ一致している。

Fig. 10. Correspondence of fatigue crack opening behaviour and residual stress distribution to fatigue crack propagation behaviour after a single tensile overload application ($\Delta\sigma=12.0 \text{ kg/mm}^2$, 30% O.L.).

Fig. 11 は過大荷重試験結果を ΔK_{eff} によって整理したものである。図中の実線は Fig. 1 の結果を ΔK_{eff} で書き直したもので、データは省略し最小自乗法による直線のみを示した。過大荷重試験のデータはいずれの板厚の場合もほぼ一定振幅荷重下の $dl/dn-\Delta K_{\text{eff}}$ 線上に整理され、 ΔK_{eff} が有効であることがわかる。先に報告した HT 60 材の場合は、過大荷重負荷から $[(dl/dn)_c/(dl/dn)d]_{\text{max}}$ を示す点までのデータが ΔK_{eff} で規定される進展速度よりも小さくなり、 ΔK_{eff}

Fig. 11. Arrangement of fatigue crack propagation behaviour after a single tensile overload application by effective stress intensity factor range ($\Delta\sigma=12.0 \text{ kg/mm}^2$, 30% O.L.).

は有効でなかった⁹⁾。このことは、力学的因子以外の他の因子の影響によるものであることを示唆しており、S10C 材の結果も併せて考えると、S10C 材では現れず HT 60 材では現れるような材質に依存する因子の影響と考えられなくもないが現時点では具体的なことは不明である。いずれの材料においても ΔK_{eff} を用いて整理したデータが一つの荷重条件に限られているから、いくつかの他の条件を ΔK_{eff} で整理することによって ΔK_{eff} の有効性の範囲または他の因子の影響が明らかにされるものと思われる。

4・3 遅延挙動に及ぼす試験片板厚の影響および板表面と板内部の挙動の相違

表面で観察される遅延挙動に及ぼす板厚の影響で特に顕著なものは Fig. 4 からわかるように l^* であり、同一過大荷重に対して $t=2 \text{ mm}$ の試験片の方が $t=8 \text{ mm}$ の試験片より大きい l^* を示す。板厚にかかわらず、試験片表面では平面応力状態が満足され、Fig. 7 に示したように過大荷重によって導入された塑性域も平面応力型の形状を示しているけれども、き裂先端前方の塑性域の拡がりには $t=2 \text{ mm}$ の試験片の方が $t=8 \text{ mm}$ の試験片よりも大きい。この塑性域寸法の相違が l^* における相違をもたらしただけのものと思われる。

板表面と板厚中央部における遅延挙動の相違は、過大荷重負荷直後の挙動と l^* であるが (Fig. 9)、いずれも遅れ遅延挙動を示している点では表面と板厚中央部とは差異はない。この点は著者らの HT 60 材の結果や Bernard らの結果⁵⁾とは異っている。これらの結果は、本研究に用いた材料よりも高強度であり、板厚中央部では平面ひずみ状態が支配的（特に Bernard らの結果）になっている。一方、本研究の S10C 材はこれらの材料と比べると著しく低強度であり、板厚中央部においても平面応力状態が支配的であると推定される。以上のことから、板厚中央部において、過大荷重負荷直後に遅延の強さが最大となる場合 (HT60 材や Bernard らの結果) は、平面ひずみ状態が支配的

になるに伴い現れる挙動であると思われる。したがって、板厚が8mmでも実質上板表面と板厚中央部とでは応力状態に差異のないS10C材では、平面応力状態における挙動である遅れ遅延現象がいずれにおいても現れたものであろう。

表面と板厚中央部における l^* の間に差異があり、板厚中央部の l^* が幾分大きい。本研究で用いた材料は低強度材であり、(6)式から理解されるように平面ひずみ状態を満足するためにはかなりの板厚を必要とする。一方、板厚中央部の l^* を平面応力および平面ひずみ条件の両条件から計算される塑性域寸法に対して整理すると、平面応力条件の塑性域寸法に対して整理した方が表面の l^* と r_p との関係に一致する(Fig. 6)。以上のことから、前項でも述べたようにこの材料では過大荷重負荷による塑性域は板厚中央部でも平面応力型であり、板厚中央部は表面よりき裂先端前縁が先行しているから、それに基づいてむしろ板厚中央部の塑性域寸法が表面よりも大きくなっていることが推定される。Fig. 12は過大荷重負荷によって生じたき裂先端前方(き裂線の延長上)の硬化域を軽荷重マイクロビッカース硬さ計(荷重25g)によって測定し、それと l^* との関係を示したものである。図には前報のHT60材について調べた結果も記入してある。板厚中央部の硬化域寸法が表面のそれよりも少し大きく測定され、前述の推論を裏付けている。したがって、 l^* を硬化域寸法 r_p^* に対して整理すると、図に示されているように、いずれの材料の場合も l^* と r_p^* とはきわめてよい一致を示す。

Fig. 12. Relation between affected crack length and measured plastic zone size.

なお、過大荷重負荷直後に表面では加速現象が現れるのに対して板厚中央部では現れないことも表面と板厚中央部との間の相違点であるが、この点については表面と板厚中央部におけるき裂開閉口挙動の差異を調査したり、過大荷重負荷直後におけるフラクトグラフィ的研究から手がかりが得られるものと考えており、別の機会に報告したい。

5 結 言

S10C低炭素鋼の2種類の板厚試験片を用いて、一定振幅荷重試験および単一過大荷重試験を行い、き裂進展挙動に及ぼす板厚の影響および表面と板厚中央部の挙動の相違について検討し、併せて前報のHT60材の結果とも比較検討した。その結果得られた結論は次のようである。

- (1) 一定振幅荷重下のき裂進展挙動には、板厚の影響はほとんど現れない。
- (2) 表面で測定された一定振幅荷重下における U は、HT60材では $4K$ に対して一定($U=0.70$)であったが、S10C材では $4K$ の増加に伴い増加した。なお、板厚の影響は認められない。
- (3) ビーチマークによって測定された一定振幅荷重下の表面と板厚中央部のき裂進展速度の間には、差異は認められない。
- (4) いずれの板厚の場合も、過大荷重により遅れ遅延現象を示す。 l^* は薄い試験片の方が大きく、また N_D は過大荷重の増加に伴い増加し、薄い試験片の方が大きい。さらに遅延はHT60材よりもS10C材で強く起る。
- (5) 遅延挙動を表面で測定された U に基づく ΔK_{eff} で整理すると、一定振幅荷重下の $dl/dn-\Delta K_{eff}$ 線上に整理され、 ΔK_{eff} が有効である。この点はHT60材とは異なるが、さらに検討が必要である。
- (6) 板表面も板厚中央部も遅れ遅延現象を示し、板厚中央部の l^* が表面のそれよりも大きい。これらの挙動は板厚中央部で平面応力状態となることに関連している。
- (7) l^* と塑性域寸法 r_p とは一致せず、 l^* が r_p よりもかなり大きくなる。しかし、硬さ測定によって得られた硬化域寸法 r_p^* に対して整理すると l^* と r_p^* はきわめて良い一致を示す。

最後に、本研究の一部を卒業研究として協力された当時岐阜大学学生三浦岳司君に感謝する。

(昭和55年5月21日 日本材料学会第29期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Frost, N.E., and K. Denton, Journal Mechanical Engineering Science, **3**, 295 (1961).
- 2) Broek, D., and J. Schijve, Aircraft Engineering, November, 31 (1966).
- 3) Heiser, F.A., and W. Mortimer, Metallurgical Transactions, **3**, 2119 (1972).
- 4) Mills, W.J., and R.W. Hertzberg, Engineering Fracture Mechanics, **7**, 705 (1975).
- 5) Bernard, P.J., T.C. Lindley, and C.E. Richards, Metal Science, **11**, 390 (1977).
- 6) Shih, T.T., and R.P. Wei, Journal of Testing and Evaluation, **3**, 46 (1975).
- 7) 松岡三郎, 田中紘一, 神津文夫, 日本機械学会論文集, **45**, 1135 (1979).
- 8) 松岡三郎, 田中紘一, 神津文夫, 日本機械学会論文集, **46**, 379 (1980).
- 9) 戸梶恵郎, 安藤善司, 森川邦彦, 材料, **29**, 808 (1980).