衝撃力による鋼材内のき裂成長開始* (静的予荷重および温度の影響)

前 川 一 郎**, 田 辺 裕 治**

The Growth of a Crack in Steel Due to Impact Tension (The Effect of Static Pretension and Temperature)

by Ichiro MAEKAWA and Yuji TANABE

The purpose of this paper is to ascertain the mechanical condition and the microstructural aspect of a crack growth in structural steel when an impact load is imposed on it. Impact tensile experiments were carried out using precracked specimens at 77 K. And the effect of superposition static pretension was also examined at room temperature and 77 K. The effect of static and impact stresses on crack growth is discussed, based on the stress intensity factor $(K_I)_{pre}$ and the dynamic stress σ_{cd} at the moment of precrack growth. The summation of both effects is expressed by D_I , and it increased with the increase of $(K_I)_{pre}$ when static prestress was applied at room temperature. On the other hand, D_I decreased with the increase of $(K_I)_{pre}$ when static prestress was applied at 77 K. In addition, when only an impact load was applied to a specimen, D_I was smaller for shorter length specimens and for larger values of a/W , where a and W are the precrack length and the half width of a specimen, respectively. The size of the plastic region near the precrack tip was measured after fracture, and was independent of the loading type and about three times the grain diameter. The distribution of dislocations near the precrack tip by TEM was observed after fracture. This results showed the different aspects for impact fracture and impact fracture under static pretension.

Key Words: Fracture, Impact Load, Static Load, Steel, Temperature, Stress Waves, Plastic Region, Electron Microscope Observation

1. 緒 言

近年の機械の高能率化・高速化に伴って、安全設計のためには衝撃荷重に対する材料の強度評価法の確立がますます急務になってきている。また機械稼動時においては不意の衝撃荷重により破壊が起こる場合もあり得ることであり、このような破壊挙動に対しても基礎的知見を得ていく必要があると考えられる。近年、機械構造物の破壊に対しては先在き裂がその引き金になるとする破壊力学の発展により、き裂の成長および伝ばに対する力学的条件の研究が進み成果を挙げてきている。衝撃荷重による破壊に対してもその手法が取り入れられ、き裂先端の力学的特異性を表す動的応力拡大係数 $K(t)$ の解析およびこれと対応して動的破壊じん性 K_{Id} の評価に関する実験的研究が行われている⁽¹⁾。この $K(t)$ の算出にあたっては荷重条件ならびに境界条件が簡単化されているが、構造物においては境界での複雑な応力波の反射・透過挙動が起こるため実際の適用にあたってはこのことについての検討が必要と考えられる。また K_{Id} は $K(t)$ に基づいて決定さ

れるので組織敏感なき裂先端微小領域内の現象を反映して材質的諸因子の影響を受け、破壊条件を表すパラメータとして用いるにはそれらとの関連性を明らかにする必要があると考えられる。そこで著者らは⁽²⁾先に炭素鋼の予き裂付き試験片を用いて低温下での衝撃引張破壊実験を行い、力学的には応力波形の特性を表すパラメータによって検討し、材質的には電顕および X 線による破面観察ならびに転位分布の観測等を行って考察した。その結果、破壊時における衝撃荷重と静荷重の関係を明らかにした。また衝撃破壊では予き裂先端での転位分布も含めた微視的変形挙動が静荷重による破壊の場合とは異なっていた。本報ではさらに破壊時における衝撃荷重と静荷重の关系到及ぼす静荷重用時の温度の影響について考察した。そしてさらに予き裂先端での塑性域大きさや微視組織に注目してその両荷重による破壊特性についての検討を行った。

2. 実 験 方 法

供試材は市販の SS 41 帯板材である。図 1 に試験片の形状寸法を示す。前報同様に破壊に及ぼす衝撃応力の波動効果を明らかにするために、試験片長さ l は同図に示す 3 種類のものを用いた。試験片は切欠きから疲労予き裂を導入後、923 K で 1 時間保持の真空焼な

* 昭和 61 年 4 月 1 日 第 63 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 60 年 10 月 21 日。

** 正員、東北大学工学部 (〒980 仙台市荒巻字青葉)。

ましを行ったのち実験に供した。焼なまし後の供試材の機械的性質を表1に、顕微鏡組織を図2にそれぞれ示す。平均結晶粒径は10 μm であった。

実験装置ならびに実験方法の詳細は前報⁽²⁾と同様である。試験片は衝撃荷重によりあるいは静荷重に衝撃荷重を重ねて作用させて破断させた。破断時の荷重条件はき裂成長開始点の応力で表すことにし、静荷重および衝撃荷重に対応してそれぞれ静的破壊応力 σ_{cs} 、衝撃破壊応力 σ_{cd} と呼ぶことにした。 σ_{cs} はばねの伸びから換算して求め、 σ_{cd} は切欠きから15 mm離れた試験片中央上にひずみゲージを貼ってそれより得られたひずみ波形から求めた。また実際の破断条件として σ_{cs} と σ_{cd} の和をとり実破壊応力 σ_{cf} とした。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊特性に及ぼす温度の影響 圧力容器の耐圧試験に関連する問題として、低温で破壊じん性試験を行う際に予荷重履歴が破壊じん性 K_c に影響を及ぼすことが報告されている^{(3)~(5)}。本報では破壊に対する衝撃荷重と静荷重との関係およびその関係に及ぼす温度の影響を明らかにするため、静荷重を与える際の温度を変えて実験を行い検討してみた。

室温で静荷重を与えた後液体窒素で77 Kに冷却し衝撃破断させた場合をケース1、77 Kで静荷重を与えた後ただちに衝撃破断させた場合をケース2として結果を図3に示す。いずれの試験片長さに対してもケース1では σ_{cs} の増加に伴い σ_{cf} も増加するが、ケース2では逆に減少している。またケース2ではケース1に比べて全体的に σ_{cf} が大きくなっている。これは図中のき裂長さ比 a/W 値 (a : 予き裂長さ, W : 試験

片半幅) に示すように、導入した予き裂長さが両者で異なっておりケース2のほうが短かったためと考えられる。そこでこの関係を定性的に明らかにする都合上、静的破壊応力 σ_{cs} を応力拡大係数 $(K_I)_{pre}$ に換算し⁽⁶⁾ また衝撃破壊応力 σ_{cd} も同様な表式として $\sqrt{\pi a}$ との積に置き換えて $D_f = (K_I)_{pre} + \sigma_{cd}\sqrt{\pi a}$ とし、図3を整理し直してみたものを図4に示す。厳密に言えば σ_{cd} を応力拡大係数に換算することには緒言で述べたように問題がある。また同図には室温と77 Kでの静荷重のみによる場合の実験結果もそれぞれ $(K_c)_{R.T.}$, $(K_c)_{77K}$ として示した。

ケース1では各試験片長さとも D_f は $(K_c)_{R.T.}$ に漸近する形で $(K_I)_{pre}$ の増加に伴い増加している。ケース2では D_f は試験片長さによらず $(K_c)_{77K}$ に漸近する形で $(K_I)_{pre}$ の増加に伴って減少しており、ケース1とは逆の傾向にある。また両ケースともS試験片の結果のばらつきが大きい。これは試験片長さが短いために多数の反射応力波により測定される応力波形が複雑になったためと考えられる。

さらに両ケースの相反する特性の差は $(K_I)_{pre} \geq 3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ で現れているのでこの点につき走査電頭

図2 供試材の顕微鏡組織

表1 供試材の静的機械的性質 (室温)

Yield Strength σ_{ys}	Tensile Strength σ_B	Elongation ($GL=50\text{mm}$) $\delta\%$	Reduction of Area $\psi\%$
264 MPa	315 MPa	40.6	34.8

図1 試験片

図3 σ_{cs} と σ_{cf} との関係

よる破面観察を行って検討してみた。その破面写真例を両ケースの L 試験片について図 5 (a), (b) に示す。予き裂先端の試験片厚さ中央付近を撮影したものであるが (a) のケース 1 では予き裂とへき開破面との間にストレッチゾーン状のものが存在している。この結果は $(K_I)_{pre} \geq 3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ における他のケース 1 の試験片について同様に見られたが、ケース 2 では (b) に示すようにそのストレッチゾーン状のものは観察されなかった。このことからケース 1 では室温で静荷重を与えたことにより予き裂先端が鈍化し続いて与えられる衝撃荷重による応力集中を緩和するが、ケース 2 ではこのような応力集中の緩和は起こりにくいと考えられ、その結果上述のような両ケースの特性が得られたものと考えられる。

さらに図 4 で $(K_I)_{pre} \leq 3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ について見ると両ケースとも試験片長さ l の短いものほど D_f が小さい傾向にある。特に $(K_I)_{pre} = 0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の衝撃破壊の場合にその傾向が著しい。これは前報における衝撃破壊応力 σ_{cd} の試験片長さ依存性と同様になっている⁽²⁾。さらにケース 2 のほうがケース 1 より全体的に D_f は大きくなっている。これはき裂長さ比 a/W により予き裂先端における弾性応力波の回折ならびに散乱による応力集中への寄与が異なり、 a/W 値が大きいものほどその効果が大きくなるためと考えられる。このように衝撃破壊の場合には一定荷重であっても波動の効果のため試験片長さ l やき裂長さ比 a/W により強度が異なってくる場合があるのでこの点留意すべき特性である。

以上のように衝撃荷重と静荷重とが重畳して作用する場合の破壊特性は静荷重を与える時の温度が異なると大きく異なることがわかった。特にここでは低温で静荷重を与えた場合に強度が低下しており、安全工学

図 4 D_f と $(K_I)_{pre}$ との関係

上注意が必要である。

ところで上に述べたように衝撃荷重による破壊パラメータを $\sigma_{cd}\sqrt{\pi a}$ にとると応力波の特性を含めることができず試験片長さやき裂長さ比の影響が現れた。したがって強度に対する静荷重と衝撃荷重との力学的等価性を定量的に議論する際に問題となる。一方、強度は微視的レベルでの材料挙動により決定されると考えられるので破壊パラメータについては巨視的な力学的解析による検討だけではなく材質の見地からも検討していく必要があると考えられる。また微視的な立場から検討を進めて巨視的な力学的特性を理解することは、特に本報におけるような静荷重と衝撃荷重といった力学的には異なる形の荷重による破壊についての知見を得るためには有効であると考えられる。そこで両荷重の力学的等価性に対して考察を行っていくために透過電顕による諸観察を次に行ってみた。従来、疲労⁽⁷⁾や動的破壊じん性試験⁽⁸⁾において衝撃荷重と塑性域を関連させた考察が行われており、また前報の結果ではぜい性破壊であっても衝撃荷重と静荷重とでは予き裂先端の微視的変形挙動が異なっていたことから本報では予き裂先端の塑性域大きさや微視組織に注目して考察を行った。ここではケース 1 の試験片について観察を行った結果について述べる。

3.2 予き端先端のすべり線および転位

3.2.1 予き裂先端の塑性域大きさの測定 塑性域内でのすべり線や転位の観察を行うには塑性変形の

図 5 破面の SEM 写真例 (L 試験片)

生じている範囲を求めておくことが必要である。またこのことは微視組織と巨視的力学量との関連性を検討する上でも重要である。そこでまず破断した試験片の表面での予き裂先端の塑性域大きさを測定した。試験片は図3において示したケース1の $\sigma_{cs}=0$ MPaの衝撃荷重だけを受ける場合と $\sigma_{cs}=77$ MPaの衝撃荷重と静荷重の重畳した荷重を受ける場合とを取り上げた。まず硬度測定による塑性域大きさの実測を試みた⁽⁹⁾。本実験のようにぜい性破壊を起こしている場合には塑性変形域はごく破面近くに限定されるため超微小硬度計(荷重10 gf, 荷重時間20 s)を用いて測定した。本硬度計による圧痕の大きさは約 $10 \times 10 \mu\text{m}$ であったのでほぼ1結晶粒大きさ単位での硬度測定ができたものと考えられる。各試験片長さについて測定したその結果を図6, 図7に示す。測定は図中に示す X, d 方向に沿って行った。硬度の測定値 H_v は試験片により若干異なるので試験片ごとに破断の前後で硬度変化のない破面から2 mm離れた点での値 $(H_v)_{d=2.0}$ で規準化し、 $\Delta H_v = H_v / (H_v)_{d=2.0}$ として示してある。この ΔH_v の急増点 $d = d_p$ が塑性域大きさ d_p に対応すると考えられる。図6に示す衝撃のみによる破断の場合には $d_p \leq 100 \mu\text{m}$ 、図7の重畳荷重による破断の場合には $d_p \leq 50 \sim 150 \mu\text{m}$ と推定できる。しかし荷重形式による塑性域大きさの明りょうな差は見られない。また ΔH_v の急増点もあまり明りょうではないためこの方法だけから d_p を正確に決定するのは困難であると考えられる。そこで次に塑性域の平面的な広がりも含めて破面近傍を精度よく観察測定できる方法として干渉顕微鏡を用いた測定を行ってみた。

図6, 図7で硬度測定を行ったのと同じ試験片表面の破面近くで干渉顕微鏡写真を撮影し塑性域の大きさを測定した。図8にその写真例を示す。図中に示すように試験片表面の凹凸により干渉じまが屈曲するので

破面からその屈曲点までの距離 $d = d_{pi}$ を測定して塑性域大きさ d_{pi} とした。また予き裂先端から X 方向への距離による変化を見るために $X=0.05$ mm, $X=0.3$ mmの2箇所測定した。その結果を試験片長さ l に対して整理してみたものを図9に示す。全体的に干渉顕微鏡による d_{pi} は硬度測定による d_p の約1/3程度となっている。これは破面縁では著しい塑性変形を受け凹凸も激しいことを意味しており、この部分で干渉じまの変化が特に明りょうに現れたためと考えられる。衝撃のみによる破断の場合には試験片長さ l が長いものほど d_{pi} は大きくなりその傾向は予き裂先端からの距離 X が大きいほど著しい。重畳荷重の場合には試験片長さや距離 X によらず $d_{pi} \approx 30 \mu\text{m}$ でほぼ一定となっている。しかし衝撃のみによる破断の $X=0.3$ mmの場合を除いて $25 \leq d_{pi} \leq 35 \mu\text{m}$ の範囲にあり塑性域大きさは荷重形式や試験片長さによらずほぼ一定とみなしてよいと考えられる。この結果は衝撃速度が2 m/s程度のものであり、また重畳荷重による破断試験片は $\sigma_{cs}=77$ MPaの1種類に測定を限ったが、 σ_{cs} の大きさによっては予き裂先端の鈍化の影響が現れ塑性域大きさにも影響すると考えられるので、今後さらに高速でのかつ σ_{cs} を広範囲に変えて検討を行うことが必要であろう。一方、衝撃のみに

図7 ΔH_v の測定結果 ($\sigma_{cs}=77$ MPa)

図6 ΔH_v の測定結果 ($\sigma_{cs}=0$ MPa)

図8 干渉顕微鏡写真例

よる破断の $X=0.3\text{ mm}$ の結果は予き裂先端より少し離れた所のものであるので進展き裂の影響を受け、試験片長さによりその進展速度が異なったためと考えられる。すなわち進展き裂先端の応力場はき裂進展速度の影響を受けこの場合も応力波の挙動を考慮する必要がある⁽¹⁰⁾ので、この点についても今後さらに検討を加えたい。

以上のことから本実験範囲では塑性域大きさは荷重形式や試験片長さによらずほぼ一定で2~3結晶粒大きさ程度であると考えられる。このように巨視的な量としての塑性域大きさは衝撃荷重による破壊の場合も重畳荷重による破壊の場合も同一で一つの破壊パラメータになり得るが強度は組織敏感な物性であり微視組織に基づく考察が必要である。そこで次に試験片表面

の塑性域内のすべり線の観察を行った。

3・2・2 破面近傍のすべり線 破面縁から二段レプリカ法により試料を作製して透過電顕写真を撮影した。その結果を図10に示す。(a)~(c)は衝撃のみによる破断、(d)~(f)は重畳荷重による破断の場合である。いずれもすべり線は破面から d 方向に $10\text{ }\mu\text{m}$ 程度の範囲内で観察された。(a)~(c)では概して平行で段差の小さなすべり線となっている。(d)~(f)では段差の大きなすべり線の中に細かなすべり線が見られるが、これは(a)~(c)との比較から、最初の静荷重により段差の大きなすべり線が生じ続いて与えられた衝撃荷重により細かいすべり線が生じたものと考えられる。また(a)~(c)ではすべり線の間隔は試験片長さの短いものほど小さい傾向が見られるが(d)~(f)では試験片長さによるすべり線間隔の差は明りようでない。

このようにすべり線の形態から見ると荷重形式により若干の差が見られた。このような差異には材料内部の転位分布が影響を及ぼしていると考えられるので次に破面直下の転位分布についての観察を行ってみた。

3・2・3 転位分布形態の観察 破断した試験片の予き裂先端破面から薄膜試料を作製して透過電顕写真を撮影した。その結果を図11に示す。ここでは衝撃のみによる破断については M 試験片に対して、重畳荷重による破断については L 試験片を観察したが、後者の場合には図9に示した塑性域大きさも図10に示したすべり線の形態も試験片長さによる差異があまりないので荷重形式による転位分布の相違を考察するには

図9 干渉顕微鏡による塑性域大きさの測定結果

図10 破面近傍のすべり線

図 11 破面直下の転位分布形態

問題がないと考えた。予き裂先端に近い(a), (c)の転位分布について見ると(a)は網目構造, (c)は平行で比較的一様な分布となっておりそれぞれ前報における衝撃引張りおよび静引張りの結果と対応している⁽²⁾。このことから本実験範囲における重畳荷重による破断の場合には静荷重作用後与えられる衝撃荷重は転位分布にあまり影響を及ぼさないものと考えられる。次に予き裂先端から離れた(b), (d)について見ると両者に顕著な差はなく転位も予き裂先端に比べて少なくなっており, 予き裂先端に比べてよりぜい性的な破壊が起こったものと考えられる。以上のように荷重形式による転位分布の相違は予き裂先端に限られて現れており, 重畳荷重による破断では静荷重による破断の転位分布に類似していた。この結果は衝撃速度の大きくない破面直下のものなので今後はさらに高速荷重の場合や深い場所に対する研究が望まれる。

4. 結 言

以上の結果をまとめると次のようになる。

(1) 衝撃荷重と静荷重とが重畳して作用する場合の破壊特性は静荷重を与える時の温度が異なると異なり, 強度を表すパラメータとして D_f を用いて検討した結果, 77 K で静荷重を与えた場合には静荷重の増に伴い D_f が低下した。

(2) 衝撃のみによる破壊の場合には一定荷重下でも試験片長さ l やき裂長さ比 a/W により D_f が異なり, l の短いほどまた a/W の大きいほどその値が低下した。

本実験の衝撃速度は比較的低速であったため, より高速の場合には様相が必ずしも同一でなくなることも考慮して微視的観察を行った結果, 本実験範囲では

(3) 塑性域の大きさは荷重形式や試験片長さには関係せずほぼ一定で破面から 2~3 結晶粒大きさ程度に達していた。

(4) 破面近くの試験片表面ですべり線の観察を行った結果, 衝撃のみによる破断では平行で段差の小さなすべり線が見られ, 重畳荷重による破断では段差の大きなすべり線の中に細かいすべり線が見られた。

(5) 破面直下の転位分布形態を観察した結果, 荷重形式による分布の相違は予き裂先端で現れており, 衝撃のみによる破断では網目構造に, 重畳荷重による破断では静荷重による場合に類似した平行で比較的一様な分布となっていた。

終わりに本研究には昭和 59 年度文部省科学研究費の御援助をいただいた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 国尾・中沢・林・岡村, 破壊力学実験法, (昭 59), 112, 朝倉書店。
- (2) 前川・ほか 4 名, 機論, 52-473, A (昭 61), 249。
- (3) 越賀, 日本造船学会論文集, 127 (昭 45), 239。
- (4) 金沢・ほか 4 名, 日本造船学会論文集, 129 (昭 46), 237。
- (5) 中村・ほか 3 名, 機論, 47-416, A (昭 56), 416。
- (6) 文献(1)の 240 ページ。
- (7) 田中・ほか 2 名, 機講論, No. 820-12 (昭 57-10), 272。
- (8) 酒井・ほか 2 名, 機論, 50-460, A (昭 59), 1972。
- (9) 越智・ほか 3 名, 材料, 33-371 (昭 59), 1012。
- (10) 青木, 材料, 33-365 (昭 59), 229。