低温繰返衝撃におけるき裂伝ばについて*

永 井 欣 一**

On the Propagation of Crack under Repeated Impact at Low Temperature

by

Kin-ichi NAGAI

(Faculty of Engineering, Hiroshima University)

The lengths of cracks which were propagated under the repeated impact bending energy of 20 kg-cm and 50 kg-cm at -40°C , -18°C , and 0°C were measured. The results obtained are as follows:

- (1) The lengths of cracks are exponential functions of repeated number, and their cyclic speeds are almost similar at respective temperature.
- (2) In case of impact energy of 20 kg-cm at 0°C and 30°C , the "hesitation period" appears at the initial stage of propagation by the effect of residual compressive stress, but disappears at lower temperature.
- (3) The cracks under repeated impact at low temperature propagate with a similar tendency to those of fatigue at room temperature which have been observed by numerous investigators.
- (4) In case of impact energy of 50 kg-cm at -18°C and -40°C , the cleavage fracture occurs in a few repeated number. The growth of weak cracks are observed prior to the cleavage fracture.
- (5) The plastic energy, which is consumed by the growth of the crack prior to the cleavage fracture, is proportional to the length itself.

(Received Jan. 13, 1961)

1. 緒 言

軟鋼が低温において比較的小さい衝撃荷重を繰返えし受ける場合は常温疲労と類似な傾向で破断し、また大きい衝撃荷重を受ける場合は比較的短寿命でぜい性破壊を起こし、へき開破断する場合のあることを既に報告した¹⁾²⁾。したがって、低温において繰返衝撃を受ける際に生ずるき裂の発生および進展の状況が衝撃エネルギーの大きさ、試験温度等によって相違するものと想像される。

本研究においては、き裂の発生、進展から破断までの状況を観察し、上記の二つの場合におけるき裂の伝ばについて考察した。

2. 試 験 方 法

使用した鋼材は焼ならした SS 41 リムド鋼厚板で、

その化学成分および機械的性質を Table 1 に示す¹⁾。試験片の形状、試験方法、および冷却方法等は先報と同じである。試験片の寸法を Fig. 1 に示す。また試験機は松村式繰返衝撃試験機を使用し、試験機に取り付けられた試験片にあらかじめ 30 分以上所定の温度にしたアルコールをかけ試験片自体を所定の温度に保った後試験を開始した。試験温度は 0 、 -18 、 -40°C の 3 種で、また採用した衝撃エネルギーは 20 kg-cm および 50 kg-cm である。

Fig. 1 Size of specimen

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of specimen

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Mn/C	Heat treatment	Yielding point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Breaking stress on final area (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Impact* value (kg-m/cm ²)
0.19	0.08	0.62	0.011	0.021	3.263	Normalized from 900°C	38.1	42.5	81.2	32.0	62.0	10.0

* Impact value express the absorbed energy in standard key-hole Charpy test at 18°C

繰返衝撃によって試験片の受ける弾性エネルギーを各繰返数における衝撃直後のハンマのはね返り高さを測ることによって求めた。すなわち、Fig. 2 に示すように、試験機のハンマ回転軸に取り付けた鏡に光を当て、衝撃直後の軸の回転角 θ を測定し、 θ よりハンマのはね返り高さを求めた。弾性エネルギーはこのハンマのはね返り高さにハンマの重量 6.25 kg を乗じて得る。

繰返衝撃によって切欠底部に発生するき裂の深さは、各回の衝撃後に試験片を試験機より取り出し、その両側面に現われたき裂の垂直深さを読取顕微鏡で測長した。なお、き裂深さとしては両側面に現われたそのの平均値を採った。き裂深さの測定中は試験片の温度を所定の試験温度に保つことができなかったで、でき

Fig. 2 Measuring apparatus

 Fig. 3 Relation between elastic energy and repeated number under impact energy $20 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

 Fig. 4 Relation between elastic energy and repeated number under impact energy $50 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

るだけ測定時間を短くするよう努めた。測定後は再び試験片を所定の温度にした後繰返衝撃試験を続行した。き裂深さの測定中における試験片の温度上昇は $5\sim 8^\circ\text{C}$ であった。所定の温度で連続的に衝撃試験を行なったときの破断繰返数と上記のき裂測定中に温度上昇を伴う場合の破断繰返数はほぼ一致していた。よってき裂測定中のこの程度の温度上昇はき裂の進展

 Fig. 5 Length of crack remaining before fracture under impact energy $20 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

 Fig. 6 Length of crack remaining before fracture under impact energy $50 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

にあまり影響を及ぼさないと考えられる。

3. 試 験 結 果

Fig. 3 および Fig. 4 に衝撃エネルギー $W=20\text{ kg}\cdot\text{cm}$ および $50\text{ kg}\cdot\text{cm}$ を繰り返し受けるときの弾性エネルギーと繰返数の関係を両対数座標で示す。破線は与えられる衝撃エネルギーを表わす。各試験温度において初期の段階における繰返数と弾性エネルギーは両対数目盛でほぼ直線関係にある。そうして各温度におけるこの直

線関係はほぼ平行しており、低温であるほど弾性エネルギーは大きい。弾性エネルギーと繰返数の関係はある繰返数においてこの直線からはずれ始め、破断直前において弾性エネルギーは急激に減少する。この直線からはずれ始める時期は Fig. 5 および Fig. 6 に示すき裂の進展から知れるようにはばき裂の発生時である。 $W=20\text{ kg}\cdot\text{cm}$ の場合における上記の直線関係は弾性エネルギーがほぼ一定であるのに対し、 $W=50\text{ kg}\cdot\text{cm}$

Photo. 1 Microphotograph showing initial propagation of crack under $20\text{ kg}\cdot\text{cm}$, 0°C

Photo. 2 Microphotograph showing initial propagation of crack under $20\text{ kg}\cdot\text{cm}$, -18°C

の場合は直線的に減少している。また $W=50 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ における -18°C および -40°C の場合は弾性エネルギーの急激な減少をみないでぜい性破壊を起こし、へき開破断した。なお、試験機等に伝って消失するエネルギーの影響は上記したように各試験温度における弾性エネルギーの減少がほぼ同じ傾向をもつことを考慮すれば、あまり大きくないものと思われる。よって本研究においてはこの消失エネルギーの影響を考えないこととする。

Fig. 5 および Fig. 6 は $W=20 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ および $50 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ の場合のき裂深さ l と繰返数の関係を対数目盛でそれぞれ示したものである。図中 tension side と記した点は試験片の側面において第 1 回目の衝撃により引張りを受ける側に現われるき裂を、compression side は圧縮を受ける側に現われるき裂を表わす。各試験温度においてき裂は compression side より tension side にいくぶん早く発生する。そうしてき裂の定常的

N=87

N=7

N=101

N=41

N=401

N=77

Photo. 3 Microphotograph showing initial propagation of crack under $20 \text{ kg}\cdot\text{cm}$, -40°C

Photo. 4 Microphotograph showing initial propagation of crack under $50 \text{ kg}\cdot\text{cm}$, 0°C

に進展する段階においては D.E. Martin³⁾ らが示した指数関係

$$l = \alpha N^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

が成立し、各試験温度におけるその進展速度はほぼ等しい。W=20 kg-cm における 30°C および 0°C の場合の tension side に生ずるき裂に N.S. Hunter⁴⁾ が両揺り疲労き裂において示した *hesitation period* が初期進展時に現われている。この *hesitation period*

は石橋教授⁵⁾の示したように、圧縮残留応力の影響によってき裂先端の引張応力が軽減され、その結果き裂の進展が一時停滞するとして説明できる。しかしより低温になると圧縮残留応力は小さくなり、*hesitation period* は現われない。なお W=50 kg-cm における -18°C および -40°C の場合においてもへき開破断をする以前に 0.1 mm に達しない浅いき裂の進展がみられる。

Photo. 5 Microphotograph showing initial propagation of crack under 50 kg-cm, -18°C

Photo. 6 Microphotograph showing initial propagation of crack under 50 kg-cm, -40°C

Photo. 1~3 に $W=20$ kg-cm の場合, Photo. 4~6 に $W=50$ kg-cm の場合の各温度において tension side に発生するき裂の初期進展時の顕微鏡写真をそれぞれ示す. $W=20$ kg-cm の場合におけるき裂発生時期は低温であるほど遅く, $W=50$ kg-cm の場合は反対に早くなっているようである.

4. 試験結果の考察

繰返衝撃によって生ずるき裂は切欠底部および発生き裂の先端に微小な塑性域が先行し, その塑性域に衝撃荷重を繰返し受けついに発生, 伝ばすると考えられる. したがってき裂の発生, 伝ばの機構を力学的に考察するためには切欠きおよびき裂先端の塑性域の大きさ, 塑性域におけるひずみの振幅, 繰返荷重の下における破壊条件等を知る必要がある. しかし, 現段階においてこれらの条件を理論的に求めることはほとんど不可能である. 河本教授らはさきに疲労き裂の進展について上記の条件にある仮定を設け, そのき裂深さと繰返数の関係を導いた. 本研究においてはこの概念を応用し, 実験的に求めた弾性エネルギーよりき裂深さと繰返数の関係を理論的に求めることとする. Fig. 7 は弾性エネルギー W_0 と繰返数の関係を示したものである. 実線は破断時を, 破線はき裂発生時を表わす. 破断時およびき裂発生時における W_0 と N は対数目盛でほぼ直線関係にある. そこで, 各試験温度におけるき裂発生時と破断時のこの直線関係がそれぞれ平行すると仮定すれば, き裂発生から破断までの繰返数 N_p は

$$N_p = A W_0^B \quad (2)$$

で与えられる. ここに A および B は Fig. 7 に示す W_0 - N 曲線の定数であって, 各試験温度における値を Table 2 に示す. き裂深さ l を有する試験片の弾性エネルギーを W_e とすれば

$$W_e = \xi W_0 \quad (3)$$

で表わされる. ξ は Fig. 3 および Fig. 4 に示す弾性エネルギーの減少率を示す. いま, δ_0 をき裂の底部から疲労効果を受け始める結晶粒までの距離とし, き裂は

Fig. 7 Relation between elastic energy and repeated number. The full lines are the cycles at fracture and the dotted lines the cycles at initiation of crack

この δ_0 の長さで段階的に進行すると仮定する. また圧縮側のき裂は圧縮に完全に抵抗するとし, 引張側に深さ l のき裂があるときの弾性応力の分布を Fig. 8 に示す一様曲げと考えれば, 深さ l のき裂を有する場合の弾性エネルギー W_e と平滑材の弾性エネルギー W_1 の比は $W_e/W_1 = 1 - (l/h)$ で与えられる. よって $l = z\delta_0$ のき裂を有する場合は

$$W_e = \eta W_1 (1 - (z\delta_0)/h) \quad (4)$$

となる. ここに η は実際の応力分布と Fig. 8 に示す分布の相違に対する修正係数を表わす. (3) および (4) 式を (2) 式に代入し, き裂発生から l まで進展する間の繰返数 N_{pl} と l の関係を求めれば,

$$N_{pl} = A W_1^B \frac{\eta^B}{\xi^B \delta_0^B} \sum_{z=1}^l \left(1 - \frac{z\delta_0}{h}\right)^B \approx A \frac{W_1^B \eta^B}{\xi^B \delta_0^B} \int_0^l \left(1 - \frac{\delta}{h}\right) d\delta$$

となる. 上式における W_1 は平滑材の弾性エネルギーであるが, 本研究に使用した試験片は切欠きを有しているので $W_0 = W_1/\zeta$ で表わされる. ここに ζ は切欠係数に相当する係数を意味する. よって,

$$N_{pl} = A \cdot \frac{W_0^B}{\xi^B} \cdot \frac{\eta^B \zeta^B}{\delta_0^B} \cdot \frac{h}{B+1} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{l}{h}\right)^{B+1} \right\} \quad (5)$$

上式を用い, 繰返数比 N_{pl}/N_p とき裂深さの試験片半深に対する比 $l/(h/2)$ の関係を $W=20$ kg-cm については Fig. 9 に, $W=50$ kg-cm については Fig. 10 にそれぞれ実線で示す. 実験値は Fig. 5 および Fig. 6

Fig. 8 Stress distribution on the crack propagation section

Fig. 9 Relation between cyclic ratio and ratio of crack-length to half-depth of specimen estimated from formula (5), under impact energy 20 kg-cm

に示す tension side と compression side に進展するき裂深さの平均を示す。なお、Fig. 9 および Fig. 10 の実線は W_0 および m を Fig. 3 および Fig. 4 より、 A および B を Fig. 7 よりそれぞれ求め、(5)式に代入し、 $\eta^B \zeta^B / \delta_0$ を実験値にほぼ一致するように定めて示したものである。各条件における $\eta^B \zeta^B / \delta_0$ の値を Table 2 に示す。このようにして求めた計算値は実験結果とよく一致する。このことより、低温繰返衝撃によって発生するき裂は従来多くの人によって観察された常温の疲労き裂とほぼ同じ傾向で進展すると考えられる。Fig. 10 はへき開破断する以前に進展したき裂を示す。Photo. 5 および Photo. 6 に示すへき開破断に先行するき裂と Photo. 1~4 に示すすべり破損を示すき裂の進展状態の相違はほとんど認められず、このき裂が低温ぜい性を促進すると解される。

次に、上記のへき開破断に先行するき裂の成長に費される仕事量について考察してみる。試験片に与えられる衝撃エネルギーは Fig. 11 に示すように、き裂発生前においては塑性たわみに要するエネルギーと弾性エネルギーに、またき裂発生後はそれらのエネルギーとき裂の成長に費される仕事量に分けて考えることができる。へき開破断に先行するき裂は既に述べたように試験片の深さに比べて非常に浅い。したがって、き裂発生後

における塑性たわみに要するエネルギーは Fig. 11 に点線で示すように発生前の延長として考えることができ、き裂成長に費される仕事量は斜線を施した部分のエネルギーで与えられる。このようにして求めたき裂の成長に要する仕事量 W' と繰返数の関係を Fig. 12 に示す。 W' と N は指数関係にあり、

$$W' = \delta N^{\gamma} \tag{6}$$

で与えられる。 $W = 50 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ で -40°C および -18°C の場合における上式の指数 γ の値と既述したき裂深さ l と N の指数関係(1)式の α の値は Table 3 に示すようにほぼ等しい。これは、へき開破断に先行するき

Fig. 11 a: Impact energy given
b: Elastic energy
c: Plastic energy due to the deflection
d: Initiation of crack
e: Elastic energy
f: Surface energy of crack boundary

Fig. 10 Relation between cyclic ratio and ratio of crack-length to half-depth of specimen estimated from formula (5), under impact energy $50 \text{ kg}\cdot\text{cm}$

Fig. 12 Relation between surface energy W' on the boundary of crack growing before brittle fracture and repeated number

Table 2 Values of coefficients in formula (5)

Test temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Impact energy ($\text{kg}\cdot\text{cm}$)	Elastic energy ($\text{kg}\cdot\text{cm}$)	A	B	$\eta^B \zeta^B / \delta_0$
0	20	12.5	3.499×10^5	-2.147	0.8582
-18	20	12.7	2.528×10^6	-2.870	1.175
-18	50	29.4	2.528×10^6	-2.870	0.04791
-40	20	12.8	2.589×10^7	-3.776	1.475
-40	50	30.6	2.589×10^7	-3.776	0.03725

Table 3 Values of α and γ

Impact energy ($\text{kg}\cdot\text{cm}$)	Test temperature ($^{\circ}\text{C}$)	α	γ
50	-18	2.927	3.011
50	-40	2.963	3.061

裂の成長に要する仕事量がそのき裂深さにほぼ比例することを示している。

5. 結 論

以上の実験結果を要約すれば次のようになる。

(1) 繰返衝撃によって生ずるき裂の定常的に進行する段階においてはき裂深さと繰返数は指数関係にあり、その進展速度は各試験温度においてはほぼ等しい。

(2) 30°C および 0°C において衝撃エネルギー $20\text{kg}\cdot\text{cm}$ を繰返し受けるときは、き裂の初期進展時に圧縮残留応力の影響による hesitation period が現われるが、低温においては現われない。

(3) き裂深さとき裂発生時からの繰返数の間には (5) 式に示す関係が成立する。

(4) 低温繰返衝撃によって発生するき裂は常温の疲労き裂と同じ傾向で進展する。

(5) -40°C および -18°C において衝撃エネルギー $50\text{kg}\cdot\text{cm}$ を繰返し受けるときは、短寿命でぜい性破壊を起こし、へき開破断した。この場合においても破断以前に非常に浅いき裂の進展がみられる。

(6) このへき開破断に先行するき裂の成長に要する塑性仕事量はそのき裂深さに比例する。

終りに、この実験遂行にあたって種々御指導にあずかった広島大学遠藤教授に慎んで謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 遠藤, 永井, 材料試験, 8, 65, 31 (1959)
- 2) 遠藤, 永井, Proc. 2nd. Jap. Cong. Test. Mat., 44 (1959)
- 3) D.E. Martin & G.M. Sinclair, Proc. 3rd U.S. Nat. Cong. Appl. Mech., 595 (1958)
- 4) N.S. Hunter, W.G. Fricke, 60th Annual Meet. of ASTM, (1957)
- 5) 石橋, 材料試験, 5, 36, 540 (1956)
- 6) 河本, 西岡, 機械学会論文集, 19, 83 (1953)

金 属 材 料

繰返塑性ひずみの下における金属材料の安定について (The Stability of Metals under Cyclic Plastic Strain) L. F. Coffin, J. Basic Engg., Ser. D, Trans. ASME, Vol. 82, 671 (Sep. 1960)

本研究の目的は著者がさきに常温において純 Al に対する繰返定ひずみ疲労試験 (Trans. AIME, Vol. 215, 794, 1959) を行なった際試験片に生ずる平均応力が試験片に不安定変形を起こす原因になっていることを指摘したと関連して、繰返しひずみと平均応力とが組み合わされた条件下における金属材料の変形挙動を実験的に論じようとしたものである。実験は 2S-Al を用いて試験片 (試験片は大曲率半径を有する) に繰返軸荷重を与えて試験片の最小断面部分の横ひずみについて定ひずみ振幅 $\Delta\epsilon_d$ と繰返数 N に対して直線

的に増加する平均ひずみ ϵ_m ($N=1$ におけるひずみを ϵ_m とする) を組み合わせることにより、(i) flow stress は $\Delta\epsilon_d$ の増加とともに simple tension の場合よりも減少し、 $\Delta\epsilon_d/\epsilon_m=3$ で著しく減少すること、(ii) fracture ductility は $\Delta\epsilon_d/\epsilon_m$ により simple tension の場合よりかなり増加することを見出している。なお、炭素鋼(焼なまし), Nickel A, 347 不銹鋼, 24ST Al 合金に対しても 2S Al ほど顕著でないが同一の傾向のあることを指摘している。また、上述の試験片においてその試験片末端付近の直径が繰返しひずみとともに増加する理由をその部分と最小断面部分における応力とひずみの関係から説明を行ない、かかる変形の不安定性が平均応力、したがって $\Delta\epsilon_d$ に影響されることを指摘している。 (大南正瑛)