

低繰返し数領域の衝撃疲労試験機の製作と炭素鋼の 低繰返し衝撃疲労挙動について

宮野 泰治・安藤 正昭

Manufacturing of Impact Fatigue Testing Machine and Impact Fatigue Behavior of Carbon Steel in Low Cycle

Taiji MIYANO and Masaaki ANDO

(1992年10月30日受理)

Impact fatigue testing machine have been made to investigate characteristics of impact fatigue strength in low cycle impact ($1 \sim 10^3, 10^4$ repetition number). Machine performance and characteristics of wave-form generated by various load was examined, on the basis of the data, repeated impact tension test were conducted on carbon steel (S35C) under 10^3 repetition.

The results obtained are summarized as follows:

- (1) Examination confirm that testing data are reproducible and stable, remaining improvements on a few points.
- (2) Impact load value generated by testing machine depend on impact velocity and dropping weight, including problems of assessment on impact load in connection with deformation of test piece.
- (3) Under the condition of low temperature (-55°C), impact fatigue strength of notched specimen have a tendency to be lower than that at room temperature for large impact value of fracture repetition less than 100.
- (4) Relationship between average plastic deformation per impact and fracture repetition number provide linearity on a log scale.

1. 緒 言

寒冷地で使用される機械や構造物の破壊を考える際、低温ぜい性との関係で、低温の影響による衝撃疲労挙動の問題は無視出来ないものと思われる。

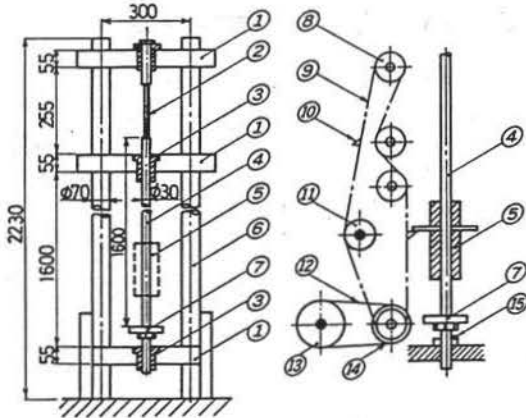
著者らは、これまでに、衝撃疲労の基礎的研究と同時に衝撃疲労に付随する低温下での挙動を調べることを目的として、 $4 \times 10^3 \sim 10^6$ 回程度の繰返し衝撃引張試験を行い得る試験機を製作し、二、三の実験結果を報告してきた^{1),2)}。その結果によれば、炭素鋼における、 5×10^3 回以上の衝撃回数での疲労試験では、(正弦波荷重の場合の寿命上昇率よりは小さいが、)低温(-55°C)による寿命上昇傾向が認められた²⁾。

しかし、破面形態には低温ぜい性の影響が大きく表れているので、さらに少数回の低繰返し数領域の

衝撃疲労になれば、低温下では、Vノッチシャルピ一試験³⁾、あるいは、Vノッチ試験片の単一衝撃引張試験⁴⁾にあらわれるような低温ぜい性の特性が、優性に表れてくることも考えられる。

そこで、極く少数回の衝撃回数で破壊するような衝撃条件のもとでの強度特性の研究を対象とする、1回から $10^3 \sim 10^4$ 回程度までの低繰返し数領域の衝撃引張試験を行い得る試験機を新たに製作した。

本報告は、製作した試験機の性能および発生される荷重波形特性、荷重評価の問題点等の検討と、炭素鋼試験片による衝撃回数 10^3 回までの繰返し衝撃引張試験を行った結果に関するものである。以下にその大要について報告する。



① Cross yoke ② Specimen ③ Guide cylinder (brass)
 ④ Guide ⑤ Drop weight (Steel pipe) ⑥ Strut
 ⑦ Circular plate ⑧ Sprocket wheel ⑨ Chain
 ⑩ Pawl ⑪ Tension wheel ⑫ V belt ⑬ Varying
 Speed Motor ⑭ Pulley ⑮ Limit switch

図1 試験機の概略

2. 衝撃疲労試験機の構造および特性

2・1 試験機の原理および構造

製作した試験機の概略図を図1に示す。この試験機の衝撃荷重発生機構は、剛性の大きい支柱と铸铁性のクロスヨークで支えられている丸棒により案内される円筒重錘を、ローラチェーンにより所定の高さまで持ち上げ、自然落下させて、丸棒下端のフランジに衝突させるものである。

丸棒の周囲は十分に広く開放されており、重錘の重量の変換および衝撃速度の変化が広範囲に取れ、294Jのシャルピー衝撃試験機に相当する衝撃エネルギーを与えることも可能で、単一衝撃引張破断の実験も行い得る。また、試験片取付け部分は上方に配置され、試験片の荷重波形検出や、低温あるいは高温等のふん囲気装置の設置を容易に行い得るスペースが確保されている。

衝撃繰返し装置は、図に示すように、変速モータにより駆動されるローラチェーンの2ヶ所に設置されているフックにより円筒重錘を所定の高さから自然落下させるものである。試験片が破断するとリミットスイッチによりモータが停止する。

また、円筒重錘からフックを外す中間スプロケットホイールは、任意の位置に変化させることが出来るように構成されている。

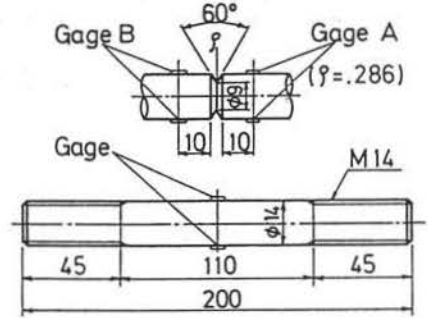
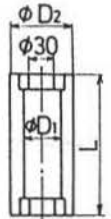


図2 試験片の形状寸法

表1 重錘の種類

W (kgf)	L (mm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)
3.00	200	40.0	64.7
5.95	400	40.0	64.7
6.05	200	40.0	81.5
12.10	400	40.0	81.7



2・2 試験機の特長

本試験機を用いて疲労試験を行うに先立ち、実際に試験機により得られる衝撃荷重波形と、円筒重錘、試験片、衝撃速度との定性的な関係や、荷重評価の問題点等を検討するため、二、三の実験を行った。

試験片は、図2に示す二種類の形状寸法を有するS15C材である。平滑試験片はその中央部の対称位置にゲージ長さ2 mmの2枚のひずみゲージ(共和製;KFC-2-C1-11)を、また、環状V溝切欠き試験片は切欠き部の上下10 mmの対称位置に、同様のゲージを2枚ずつ接着し、シグナルコンディショナを介してデジタルストレージスコープにより衝撃荷重波形を検出した。

円筒重錘には表1に示す鋼製の4種類のものを使用し、手で所定の高さから自然落下させた。

実験結果より、本試験機で得られる荷重波形は十分に再現性があり安定していることが確認された。

観測された波形の一例を図3に示す。図の(a)と(b)は時間軸のスケールが異なるものである。

荷重波形の一般的な特性を定性的に述べると、同一の重錘と試験片のもとでは、波形の山のピーク値は、重錘の落下高さすなわち重錘の衝突速度(衝撃速度)に対応して変化するが、時間軸に対する波形の形態はほぼ同じ様相を呈していた。すなわち、波形の山の高さは衝撃速度に依存し、時間軸上の形態は重錘と試験片の形状寸法諸元に依存するようであった。

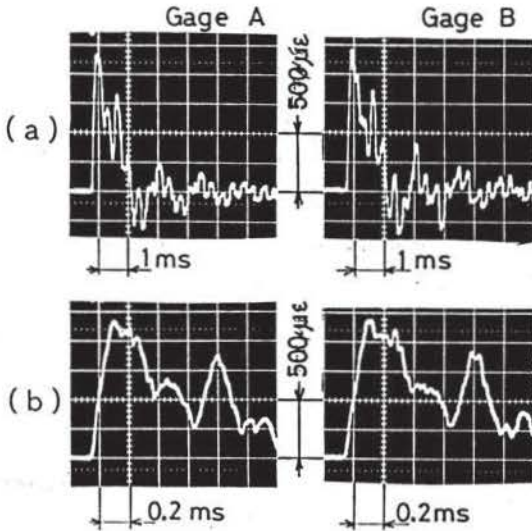


図3 衝撃荷重波形 (切欠き材)

($W = 5.95 \text{ kgf}$, $L = 400 \text{ mm}$, $V = 1.98 \text{ m/s}$)

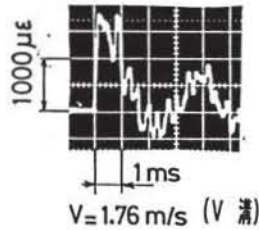
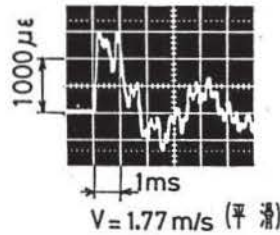


図8 繰返し衝撃試験の荷重波形

環状V溝切欠き部の上下で観測される波形を対比してみると、図3にみるように、細部の形態は多少異なるが、山の最大ピーク値はほぼ同じ値を示していた。したがって、力の釣合いが成立していると仮定すると、ゲージAまたはゲージBのどちらか一方の波形を検出すると、切欠き底断面に作用する最大衝撃荷重が推定出来ると考えられた。

いま、波形の山の最大ピーク値に相当するひずみを弾性ひずみと仮定して最大荷重 P を算出する。ただし、仮定が成立する衝撃条件下では P は最大荷重を表すが、ピーク値が弾性ひずみと大きく逸脱するような衝撃条件のもとでは、 P は実際の荷重でなくて、単にひずみの最大ピーク値を定量的に表した量ということになる。

このような意味を持つ P と衝撃速度 $V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ (h : 落下高さ, g : 重力加速度) の関係を、重錘の種類をパラメータにとって、図4および図5に示した。

図よりも、同じ衝撃速度でも重錘重量 W が大きくなると P が増大していることが分かる。同じような落下重錘式の試験機による茶谷ら⁵⁾や内田ら⁶⁾の場合によれば、 P は円筒重錘の横断面積にのみ依存し、長さや重量には関係しないことが報告されているが、低繰返し数域を対象とした実験条件の本試験機では、明らかに、 P には重錘重量も影響していることが認められる。

つぎに、重量は近い値で、横断面積と長さで代表

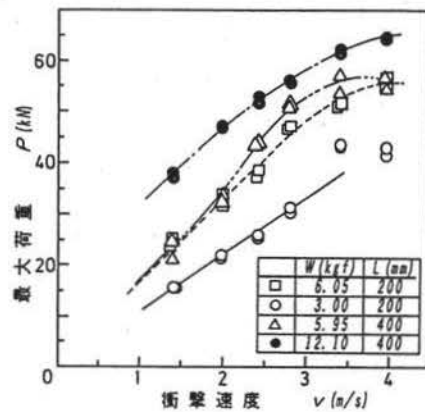


図4 衝撃速度と最大荷重 (平滑材)

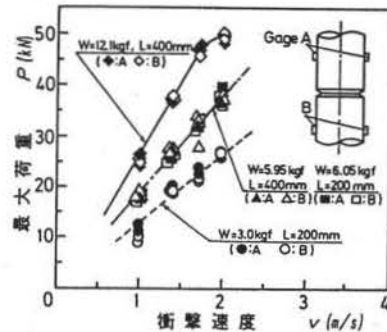


図5 衝撃速度と最大荷重 (切欠き材)

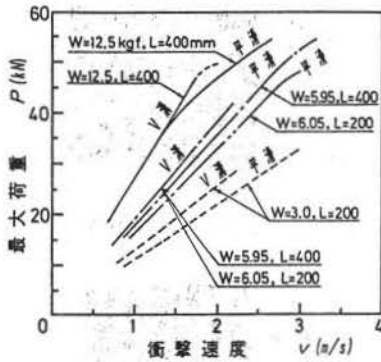


図6 衝撃速度と最大荷重の関係

される形状が大きく相違している、5.95 kgf と 6.05 kgf の重錘の場合に注目して見ると、環状 V 溝切欠き試験片 (図5) では、P と V の関係に、これら両者の差異は明瞭に表れない。平滑試験片 (図4) でも、若干の差異は認められるが大差はない。以上の結果から、本試験機では、P への重錘の影響は、重錘の長さや横断面積の形状寸法より重量自体に依存していることが推察される。

図6は、図4と図5の結果をまとめて示したものである。これより、等しい衝撃条件であっても、切欠きを有すると P は大きくなることが認められる。これは、切欠き部の形状に伴う応力波の伝ば機構の影響であると考えられる。

各重錘のもとで、V が小さい間は、P と V は比例する。V が大きくなると P と V の比例関係は成立しなくなり、P の増大率は鈍る傾向が見られる。

P が弾性応力波の伝ばに伴うものであれば、P と V は正比例する⁷⁾ので、比例関係が成立している間は、P を実際の最大荷重として評価できる。

本試験機では、重錘の落下高さを h、衝撃速度を V とし、次式により衝撃最大荷重 P を求めることができる。

$$P = x \cdot \sqrt{2gh} = x \cdot V \quad (1)$$

ここで、x : 重錘重量 W と試験片形状に依存する実験定数

しかし、大きな衝撃エネルギー (重錘重量と落下高さの積)のもとでは、試験片に塑性変形が生じ、剛性が変化していることが考えられる。P と V の比例関係が失われる範囲では、ひずみゲージが示すひずみ値の取り扱い方法や剛性変化に伴う応力波の伝ば挙動も考慮した、P の評価法を今後検討しなければならない。

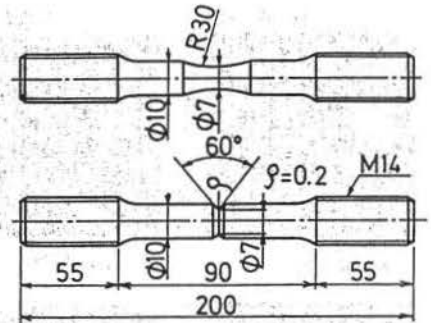


図7 繰返し衝撃引張試験片の形状寸法

表2 化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S
0.360	0.254	0.677	0.021	0.016

表3 機械的性質

熱処理	上降伏点 MPa	下降伏点 MPa	引張強さ MPa	伸び %	絞り %
—	399	381	615	31.0	54.9
860°C 1時間 真空焼鈍	342	326	551	34.5	52.2

3. 繰返し衝撃引張試験の実験方法

3.1 供試材および試験片

前章に述べた試験機により、低繰返し数領域の衝撃引張疲労試験を行った。

本実験に用いた試験片は、数回から10³回程度の衝撃引張回数で破断させることを考慮して、市販の直径22 mmの機械構造用炭素鋼 S35C 材丸棒から、図7に示した形状寸法に機械加工したものである。環状 V 溝切欠き部の応力集中係数は $\alpha = 4.07^{8)}$ であり、円弧切欠き部では $\alpha = 1.05^{9)}$ である。したがって、以下には円弧切欠き試験片を平滑材とみなして検討を行うことにした。これら試験片は、860°C、1時間の真空焼きなましを施してから実験に用いた。供試材の化学成分および機械的性質は表2および表3に示すとおりである。

3.2 実験方法

円筒重錘は、2章で述べた5.95 kgfのものに、繰返し装置のフックを受ける鉤を取り付けて使用した。その重量は7.13 kgfである。

実験結果の整理に用いた衝撃速度 V および衝撃エネルギー U は次式(2)、(3)によって算出した。

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2)$$

$$U = W \cdot h / A_0 \quad (3)$$

ここに、 h ：落下高さ、 W ：重錘重量
 g ：重力加速度

A_0 ：試験片最小断面部の原断面積

衝撃荷重波形の検出方法は2章と同様である。ただし、2章での検討結果に基づき、本実験では、全試験片とも切欠き部下側10 mmの対称位置に接着した2枚のひずみゲージから検出している。

衝撃時の最大荷重 P は、波形の最大ピーク値に相当する検出ひずみ ε_C から次式(4)で算出した。

$$P = \varepsilon_C \cdot E \cdot A_C \quad (4)$$

ここに、 E ：試験片の縦弾性係数

A_C ：ゲージ接着部の試験片断面積

低温での試験は、図1に示されている試験片取付け部分のクロスヨーク間に、試験片を囲む恒温そうを設置し、その中に一定加圧装置により液体窒素を噴霧させ、試験片表面温度が -55°C に保持されるようにして行なった。温度の検出と制御信号用にはC-C熱電対を使用した。所定の温度に達してから10分間以上経過した後に実験を開始したが、実験中の試験片表面温度は $-55 \pm 6^{\circ}\text{C}$ の範囲に変動しており、恒温そうには改良の余地が残った。

疲労によって生じた変形量として、試験片の最小断面部の直径の変化量を測定した。いま、試験片最小断面部の原直径を d_0 、疲労過程中または疲労破断後の最小断面部の直径を d_m とすれば、体積不変の仮定を用いることにより、この最小断面部に生じた塑性ひずみ ε_P とその対数ひずみ $\bar{\varepsilon}_P$ は、次式(5)、(6)で算出される。

$$\varepsilon_P = (d_0/d_m)^2 - 1 \quad (5)$$

$$\bar{\varepsilon}_P = \ln(1 + \varepsilon_P) \quad (6)$$

特に、室温での平滑材の試験では、ノギスにより試験中の試験片直径を、試験機に取りつけたままの状態にて測定し、疲労過程中的 $\bar{\varepsilon}_P$ の挙動を調べた。

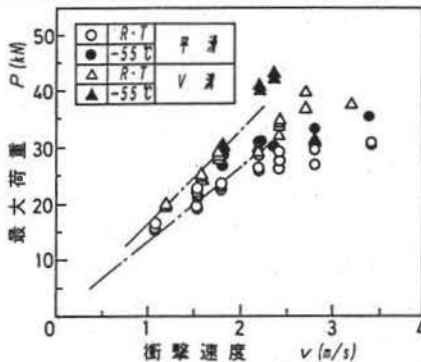


図9 衝撃速度と最大荷重の関係

4. 繰返し衝撃引張試験の実験結果および考察

4.1 荷重波形と最大荷重

試験片で観測された荷重波形の例を図8に示す。2章の場合と、試験片や重錘の諸元が変わっているため、波形の形態は、前述の図3と少し異なっているが、波形特性の定性的な傾向は2章と同様であった。なお、波形の形態には、低温の影響は認められなかった。

疲労過程途中に、試験片で検出された波形の山の最大ピーク値の変動を観察すると、破断寿命の長いほう（衝撃エネルギーが小さいほう）では、一般に変動が少なく、破断間際にピーク値が減少して行く傾向がみられた。それに対し、破断寿命の短いほう（衝撃エネルギーが大きいほう）では、疲労過程の初期に一旦上昇し、その後、減少を続けて行くような傾向がみられた。また、寿命の短いものほど、変動が激しく複雑で、変動幅も大きくなるようであった。このような挙動は、後述する疲労過程中的塑性変形の挙動と関連する現象と考えられる。

式(4)により求められた最大荷重 P と衝撃速度 V の関係を図9に示す。ただし、この P は2章で考察されたような意味を持っている。図中の各記号のプロット点は、一本の試験片において破断にいたるまでの疲労途中で測定された結果を示しており、図からも衝撃速度の大きい（衝撃エネルギーの大きい）ほうは P の変動が大きいことが推察される。また、データ数は少ないが、 V の大きいほうでは、同じ V でも低温のほうが P がやや大きくなる傾向がみられる。図9にみる P と V の傾向の定性的な関係は、2章で述べた図6の傾向と一致しているため、最大荷重の評価の問題点や式(1)の適用条件も前述の考察のとおりとなる。

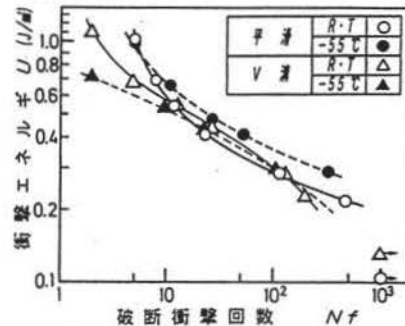


図10 衝撃エネルギーと破断衝撃回数との関係

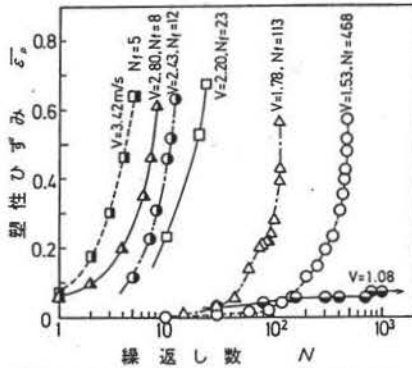


図11 繰返し衝撃引張りにおける塑性ひずみ (平滑材, 室温)

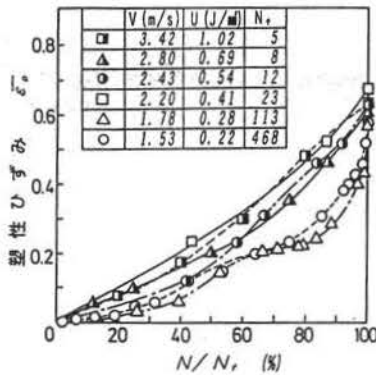


図12 相対繰返し数比 (N/N_f) と塑性ひずみとの関係 (平滑材, 室温)

4・2 衝撃エネルギーと破断強度

本実験のように、弾性範囲内の衝撃から逸脱するような衝撃条件をも含む場合、結果を一様に衝撃荷重すなわち応力で評価することは、前述したように現段階では困難であるので、衝撃エネルギーUにより衝撃疲労強度の特性を検討した。

図10に、式(3)によるUと破断衝撃回数N_fの関係を示す。室温下での切欠き材と平滑材の強度を比較すると、高いU側では平滑材が強く、低いU側では逆に切欠き材のほうが強い。こうした現象には、後述する切欠きの有無による変形能も原因していると考えられる。

つぎに、低温-55℃での強度特性をみると、切欠き材の場合、N_f < 100のUではすでに低温での強度は低下傾向にあり、低温ぜい性の特性が優位に表れていた。平滑材では、N_f > 5のUのほうでは、(正弦波荷重等のような衝撃でない場合と同様の) 低温による強度上昇効果がまだ認められる。しかし、N_f < 5で破断する高いUになれば、強度が逆点す

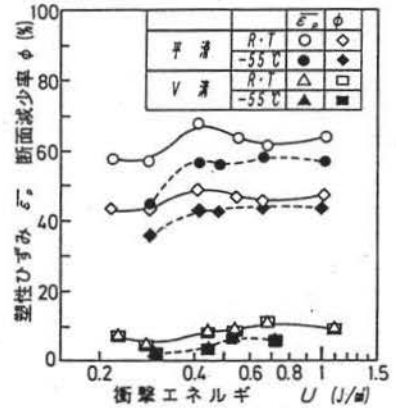


図13 繰返し衝撃引張破断の断面減少率と塑性ひずみ

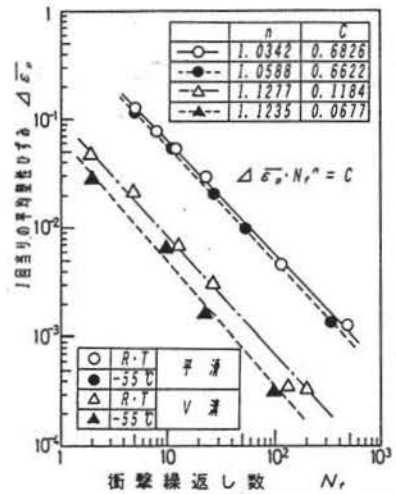


図14 破断衝撃繰返し数と衝撃1回当たりの平均塑性ひずみの関係

るような傾向がみられる。

4・3 繰返し衝撃による変形

試験片の最小断面部に生じた塑性変形量を、前述の式(5), (6)により、対数ひずみε_pで表した。

平滑材について、室温下の衝撃引張の繰返しに伴うε_pと衝撃回数Nの関係を図11に示す。この図の横軸を、破断回数N_fに対する相対繰返し数比N/N_fで整理し直したものを図12に示す。図12より、衝撃エネルギーが大きく、少ないN_fで破断する場合は、衝撃の一回毎に急激に変形し、ε_pがほぼ一様な割合で増加し破断に至っているが、N_fが100を越えるような繰返し衝撃では、初めゆるやかに増大し、N/N_f = 60~80%程度のところで一時加工硬化した後再び増加がおり、破断直前で急激に増大すること

が分かる。

切欠き材、または低温の場合の $\bar{\epsilon}_p$ の進展挙動は調べていないので、破断時の断面減少率 ϕ や $\bar{\epsilon}_p$ で、各衝撃条件の変形挙動を比較した。図13にその結果を示す。平滑材は大きい変形を伴って破断しているのに対し、切欠き材は切欠きによる変形拘束の影響によりかなり変形量が小さくなっている。また、低温下では室温の場合より変形量が低下し、衝撃エネルギーが小さくなると、変形量はやや減少するよう傾向がみられる。

破断時の $\bar{\epsilon}_p$ を N_f で除して衝撃1回当たりの平均塑性ひずみ $\Delta\bar{\epsilon}_p$ と定義し、 $\Delta\bar{\epsilon}_p \cdot N_f^n$ 関係を示したのが図14である。図の結果より、 n 、 C を定数として、次式が成立している。

$$\Delta\bar{\epsilon}_p \cdot N_f^n = C \quad (7)$$

n はどの場合にも殆ど変わらず1.0~1.13の範囲にあり、 C に切欠き等の試験片形状や試験温度の影響が含まれているようである。前述の図15の結果での $N_f < 100$ の場合のように、 $\bar{\epsilon}_p$ が一樣な割合で増加して破断にいたるような場合であれば、一回当たりの塑性ひずみから、式(7)により衝撃疲労寿命の推定が可能である。

5. 結 言

1回から $10^3 \sim 10^4$ 回程度の、極めて少ない衝撃回数で破断するような衝撃疲労強度特性の研究を対象とした、低繰返し数域の衝撃試験機を製作し、試験機の性能、荷重波形特性と荷重評価の問題点等を検討した。続いて、炭素鋼試験片(S35C)の 10^3 回以下の繰返し衝撃引張試験を行った。得られた主な結果はつぎのとおりである。

(1) 試験機は、若干の改良点や衝撃荷重の評価等に問題点を残すものの、十分に再現性があり安定した試験を行い得ることが確認された。

(2) 荷重波形の山の高さは、重錘の衝突速度(衝撃速度)と重量に依存し、波形の時間軸に対する形態は、重錘の形状と試験片の形状の諸元に依存するようであった。

(3) 荷重波形の山の最大ピーク値と衝撃速度は、試験片の塑性変形が小さい範囲では比例関係にある

が、塑性変形が大きくなると比例関係は成立しなくなる。前者の場合は、弾性的取扱により最大ピーク値から、実際の衝撃荷重を算出できるが、後者の場合、現段階では荷重の評価は困難である。

(4) 衝撃エネルギー U (重錘重量と落下高さの積を試験片の横断面積で除したもの)で衝撃疲労強度を評価すると、切欠き材の場合、 N_f (破断寿命) < 100 の U では、低温(-55°C)での強度が低下していた。平滑材は、 $N_f > 5$ の U のほうでは低温による強度上昇効果が認められたが、 $N_f < 5$ になる U になると逆に低下するよう傾向がみられた。

(5) 繰返し衝撃引張による変形量は、平滑材のほうが切欠き材よりもかなり大きい。また、低温では室温の場合よりも変形量が低下する。

(6) 一回当たりの平均塑性ひずみ(対数ひずみ) $\Delta\bar{\epsilon}_p$ と破断衝撃回数 N_f の関係は次式で近似された。

$$\Delta\bar{\epsilon}_p \cdot N_f^n = C$$

指数 n は衝撃試験条件に依存せずほぼ一定であり、切欠き形状や試験温度の影響は C に含まれるようであった。

終わりに、本研究を行うにあたり、試験機製作に協力をいただいた本校文部技官奈良勝敏氏、杉沢久雄氏と実験に協力を頂いた当時学生草野友人、初沢誠、工藤 真、佐藤 仁の諸君に深く感謝申しあげます。

参 考 文 献

- 1) 宮野, 秋田高専紀要, 22, 1 (1987)
- 2) 宮野, 安藤, 杉沢, 秋田高専紀要, 26, 1 (1991)
- 3) たとえば, 金沢, 日本機械学会誌, 66, 535, 1114 (1968)
- 4) 斎藤, 宮野, ほか2名, 秋田高専紀要, 19, 1 (1984)
- 5) 茶谷, ほか2名, 日本機械学会誌, 73, 622, 1508 (1970)
- 6) 内田, ほか3名, 材料, 27, 303, 1171 (1978)
- 7) たとえば, 茶谷, 機械の研究, 41, 5, 613 (1989)
- 8) 西田, 応力集中, 森北出版, 105 (1971)
- 9) 日本材料学会編, 金属材料強度試験便覧, 養賢堂, 289 (1977)