

落錘式衝撃試験機と試験法の開発

大山博史*・宮野泰治

Development of Falling Weight type Impact Testing Apparatus and the Testing Method

Hiroshi OHYAMA and Taiji MIYANO

(1995年11月30日受理)

The testing method and apparatus of falling weight type impact test were developed in order to investigate characteristics of strength of materials under various impact conditions. A new measuring method provide kinetic energy at the moment when specimen is fractured completely.

Impact tension test were conducted on carbon steel (S35C) by using this apparatus and testing method, machine performance and reliability of this testing method were examined. Subsequently characteristics of impact strength of this specimen have been discussed.

The summary of the result is : This apparatus and the testing method have been found to furnish almost satisfactory results concerning its simplicity of operation and accuracy. Hereafter this apparatus is improved a little, it is expected that detailed discussions about characteristics of impact conditions are carried out by using this testing method.

1. 緒 言

材料の衝撃に対する強さは、試験片の形状、大きさ、荷重の種類、衝撃速度などによって著しく異なる。しかし、工業材料の衝撃試験として一般的に行われている、シャルピー衝撃試験とアイゾット衝撃試験では、材料の靱性や脆性を判定することを目的としており、試験片形状や試験方法も規定されているため、試験結果は材料の耐衝撃性の比較には役立っても、その結果を形状や大きさの異なる実際の機械部品の衝撃に対する強度判定の資料としては利用しにくい。このため、実際のな衝撃強度設計の資料として役立つデータが得られる材料の衝撃試験あるいはこの方面の研究は重要不可欠な課題になっていると思われる。

本研究は、多様な目的に応じた衝撃条件を与え得る試験機と試験法の開発を行い、衝撃荷重の種類(引張、圧縮、曲げ、ねじり)や衝撃速度の大小、試験片形状、切欠きの鋭さ、高・低温の温度条件等と材料の衝撃強度との関係を明らかにしようとするこ

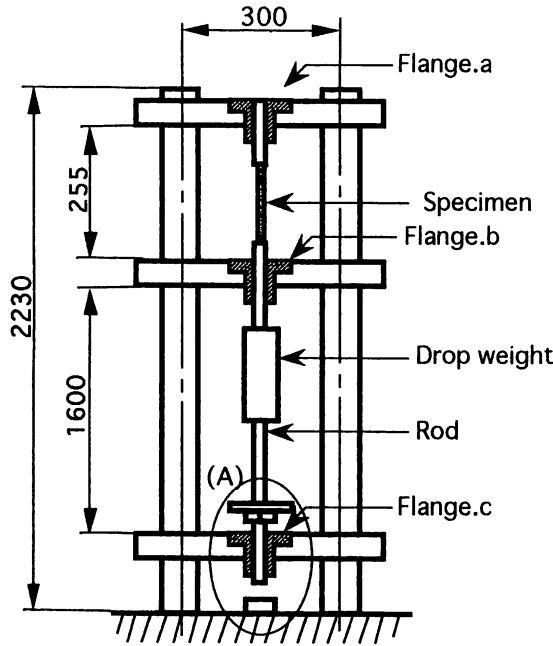
を目的として、試験片形状やポテンシャルエネルギー、温度条件等を諸因子とした衝撃引張強度の検討が可能な落錘式試験機を製作し、試験片の破断エネルギーを計測する一方法を提案して、実験を行ったものである。以下にその概要について報告する。

2. 衝撃試験機と実験方法

2・1 落錘式衝撃試験機について

自作した試験機の概略図は図1に示す。剛性の大きい支柱と鋳鉄製のクロスヨークで支えられている鋼製丸棒により案内される円筒重錘を、所定の高さから落下させて、丸棒下端のフランジに衝突させ、丸棒上端に取り付けられた試験片を破断させるもので、基本的には以前に製作された低繰返し領域衝撃疲労試験機¹⁾の繰返し装置を取り外したものに相当している。この方式では、試験片部に、重錘が接触せず周囲も広いスペースが確保されているので、高温あるいは低温雰囲気装置の設置は容易であり、試験片の破壊挙動の観測等にも好都合である。衝撃エネルギーは重錘の交換と落下高さを変えて選択されるが、重錘をバネにより強制落下させれば、さらに広

* 秋田高専専攻科学生



(A)部詳細

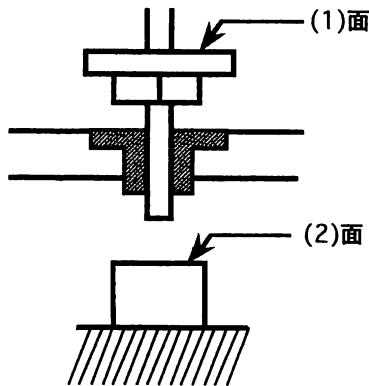


図1 試験機の概略

範囲にわたって変えることが可能となる。

2・2 破断エネルギーの計算法

本試験機による試験片破断の模式図を図2に示す。図より破断エネルギーの計算式を導出する。

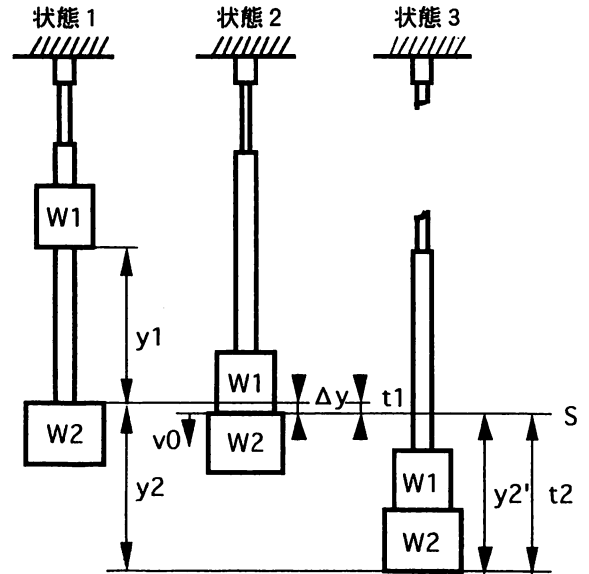
この系の有するポテンシャルエネルギーは基準をS面にとると、

$$W_1(y_1 + \Delta y) + W_2 \Delta y$$

である。また、基準面Sにおける運動エネルギーは、重力加速度を g とすると、

$$\frac{1}{2} \left(\frac{W_1 + W_2}{g} \right) v_0^2$$

となる。このとき、破断エネルギーを U とし、空気抵抗、摩擦等のロスを見ればエネルギー保存則より、



- w1 : ハンマー重量
- w2 : ガイド重量
- y1 : W1、W2間の距離
- y2 : ハンマー衝突後の移動距離
- y2' : 切断後の自由落下距離
- Δy : ハンマー衝突時の試験片の伸び
- t1 : ハンマー衝突から切断までに要する時間
- t2 : 自由落下時間
- v0 : 切断時の速度
- S : 基準面

図2 試験片破断の模式図

次式が成り立つ。

$$W_1(y_1 + \Delta y) + W_2 \Delta y = \frac{1}{2} \left(\frac{W_1 + W_2}{g} \right) v_0^2 + U$$

これより U は次式(1)により算出される。

$$U = W_1(y_1 + \Delta y) + W_2 \Delta y - \frac{1}{2} \left(\frac{W_1 + W_2}{g} \right) v_0^2 \quad (1)$$

式(1)において W_1 、 W_2 、 y_1 、 y_2 および g は既知であるから、測定すべき量は v_0 、 Δy である。

ここで、

$$y_2' = y_2 - \Delta y = v_0 t_2 + \frac{1}{2} g t_2^2$$

$$v_0 = \frac{(y_2 - \Delta y) - \frac{1}{2} g t_2^2}{t_2} \quad (2)$$

となるため、 Δy 、 t_2 を測定すれば、式(1)、(2)より U を求めることができる。

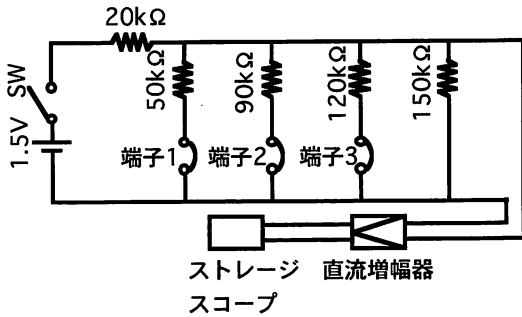


図3 落下時間測定回路

2・3 落下時間計測方法

前節で述べた、 U を計算する式(1), (2)に用いる Δy , t_2 の計測方法について以下に述べる。

2・3・1 測定回路 図2における距離 y_2 を重錘が落下する時間 (t_1+t_2) を測定するために、図3に示すような測定回路を製作した。図中の端子1, 2, 3はシャープペンシルの芯(抵抗値 約 2Ω)で構成されており、各端子が切れる毎の電圧変化はほぼ同じ値になるように設計されている。

これら端子を、図1のA部詳細に示す(1)面および(2)面に設置し、その切断による電圧変化をストレージスコープに記録して (t_1+t_2) を測定する。なお、このとき試験機全体が導体であれば、試験機自体が測定回路に組み込まれるので、図1に示すフランジb, cをアクリル材で製作するなどの絶縁対策がとられている。

以下にこの測定回路の原理を説明する。オームの法則より、この回路の電流 I は

$$I = \frac{E}{R} = \frac{E}{20\text{ k}\Omega + R_x}$$

ここに、 E は電源電圧 (1.5 V), R は回路の全抵抗, R_x は並列部の抵抗である。

出力電圧 E_0 は、

$$E_0 = I \cdot R_x$$

$$\therefore E_0 = \frac{E \cdot R_x}{20\text{ k}\Omega + R_x}$$

となる。

【端子1, 2, 3が全閉の時】

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{50\text{ k}\Omega} + \frac{1}{90\text{ k}\Omega} + \frac{1}{120\text{ k}\Omega} + \frac{1}{150\text{ k}\Omega}$$

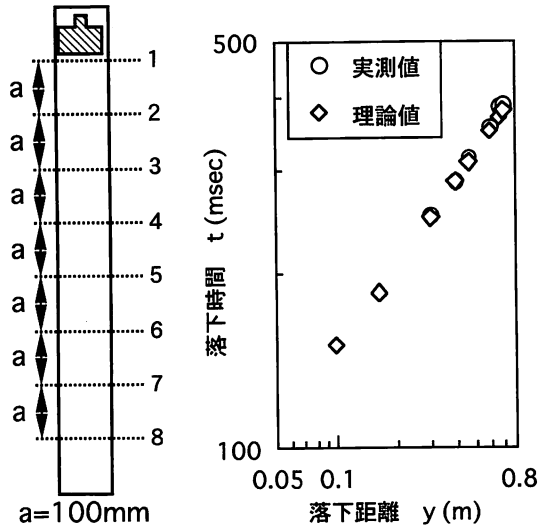
$$R_x = 21.7\text{ k}\Omega$$

よって出力 E_0 は、

$$E_0 = \frac{21.7\text{ k}\Omega}{20\text{ k}\Omega + 21.7\text{ k}\Omega} \cdot 1.5\text{ V} = 0.78\text{ V}$$

となる。

平成8年2月



(a) 検証装置 (b) 落下距離と落下時間の関係

図4 本試験とシャルピー試験の結果

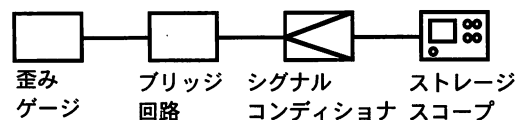


図5 試験片破断時間測定システム

以下同様に、

【端子1が開いた時】

$$R_x = 38.3\text{ k}\Omega, \quad E_0 = 0.99\text{ V}$$

【端子1, 2が開いた時】

$$R_x = 66.7\text{ k}\Omega, \quad E_0 = 1.15\text{ V}$$

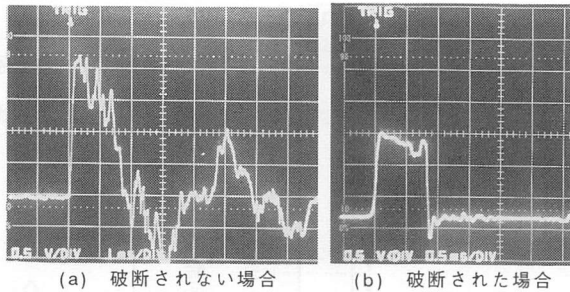
【端子1, 2, 3が開いた時】

$$R_x = 150\text{ k}\Omega, \quad E_0 = 1.32\text{ V}$$

となる。以上のように、端子がひとつ開く度に出力電圧が約0.2 V上昇する。

このシャープペンシルの芯による測定の信頼性については、図4(a)に示す装置を用いて以下のようにして確認した。すなわち、図の2~8の間の任意の2地点に図3の測定回路に接続させた芯を各1本ずつ設置し、斜線部で示す錘を1から落下させて芯を切断し所要の落下時間を測定した。その結果は、図4(b)に示すように、実測値と理論値がほとんど一致しているので、上記の測定方法は十分信頼できるものと推察される。

2・3・2 破断時間 t_1 と Δy 図2に示す t_1 は試験片の破断時間に、 Δy はその間の試験片の伸びに相当している。ここで、 t_1 は試験片に歪みゲージを貼付してその衝撃荷重波形を図5に示すようなシステムにて計測した。



(a) 破断されない場合 (b) 破断された場合

図6 破断時間 t_1 の測定例

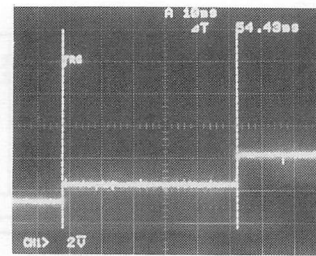
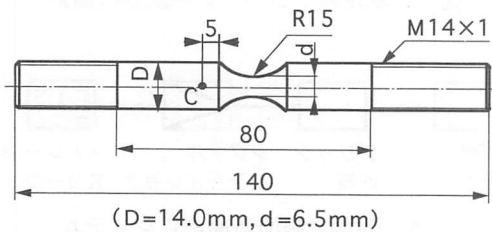


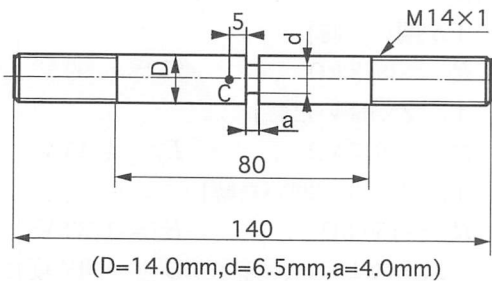
図7 落下時間 t_2 の測定例

表1 化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.35	0.25	0.75	0.026	0.017	0.11	0.6	0.12



(a) R Notch



Notch detail

(b) U Notch

図8 試験片

いま、重錘がフランジに衝突して試験片に衝撃荷重が加わった際、観測される荷重波形は、試験片が破断されないときは図6(a)のように波形が持続するのに対し、破断したときは図6(b)のように破断と同時に消滅する。よって、この波形の立ち上がりと消滅の間の時間を破断時間 t_1 として計測した。

また、 Δy には破断後の試験片を突き合わせて測定した伸びを用いた。

2・3・3 自由落下時間 t_2 2・3・1節で述

べたように図1の(1)面と(2)面に設置されたシャープペンシルの芯の切断から、ストレージスコープにより図7に示すような波形が観測される。この波形の二つの立ち上がり部分の間の時間は(1)面と(2)面の間の重錘 W_1 と丸棒部分 W_2 の落下時間である。この時間から2・3・2節に述べたようにして計測された t_1 を差し引くと、試験片破断後の自由落下時間 t_2 となる。

2・4 試験片

表1に示す科学成分を有する市販の直径16 mmの炭素鋼 S35C 材丸棒から、図8に示すような2種類の形状の試験片を製作して実験に用いた。

試験片の破断時間 t_1 を計測するための歪みゲージ(共和製;KEC-2-C1-11)は、図に示すCの位置に貼付した。

3. 実験結果および考察

本試験機とその試験方式の性能を検討するために、2・4節で述べた試験片を用いた試験を行った。その結果、重錘の自然落下高さは最大で1 m位であるため、ポテンシャルエネルギーや衝突速度の範囲は限られているが、ばね等で重錘を強制落下させる装置等を設置すれば、より広範な試験条件が得られることが期待され、十分に有効性のある試験法であることが確認された。

また、低温下の試験も、試験片およびその掴み具装置を覆う図9に示すような発砲スチロール製の槽を取り付け、その中に液体窒素を噴霧させることにより、正確な試験片温度の設定のもとで、容易に実験を行え得ることが確認された。

以下に、実験範囲内で得られた衝撃強度特性について述べる。

図10に、Rノッチ試験片の場合のポテンシャルエネルギー U_0 と破断エネルギー U の関係を示す。破断が

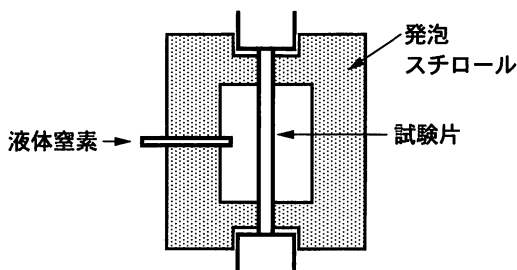


図9 低温槽

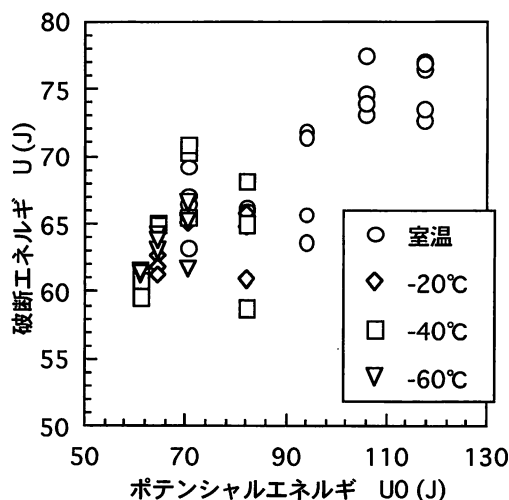


図10 ポテンシャルエネルギーと破断エネルギーの関係 (R Notch)

可能である U_0 は室温では70 J 付近であるが、低温ではそれ以下の60 J 付近でも破断し得た。低温での実験データは少なく室温の場合と対比できるのは U_0 が70 J ~ 80 J だけであるが、温度条件による明瞭な差異は認められなかった。各温度の場合とも U_0 の増加に伴い U は上昇するようであるが、踊り場も存在し(70 J ~ 90 J)、室温では106 J 以降に再び踊り場が確認される。120 J 以降についても、 U の上昇が続くのか、飽和するのかは、現段階では不明である。

図11に試験片の破断部の局所歪み ϵ の様相を、図12にその歪み速度 $\dot{\epsilon}$ の様相について、 U_0 との関係で表わした。

ここで、 ϵ は破断部の原直径を d_0 、破断後の直径を d として、体積不変の仮定を用いることにより得られる次式で算出したものである²⁾。

$$\epsilon = \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 - 1 \quad (3)$$

また、 $\dot{\epsilon}$ は ϵ を破断時間 t_f で除したもので、衝撃開始から破断までの歪みの平均速度である。

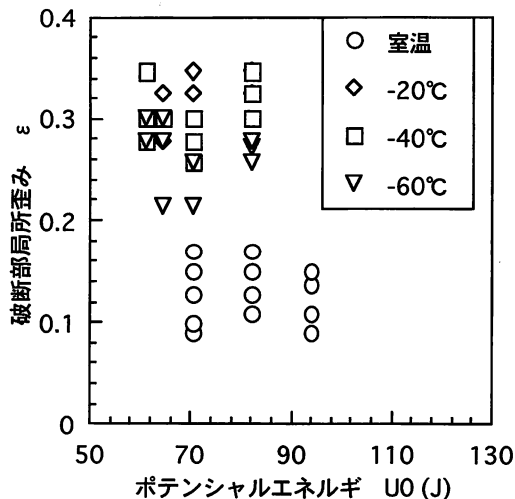


図11 ポテンシャルエネルギーと破断部局所歪みの関係 (R Notch)

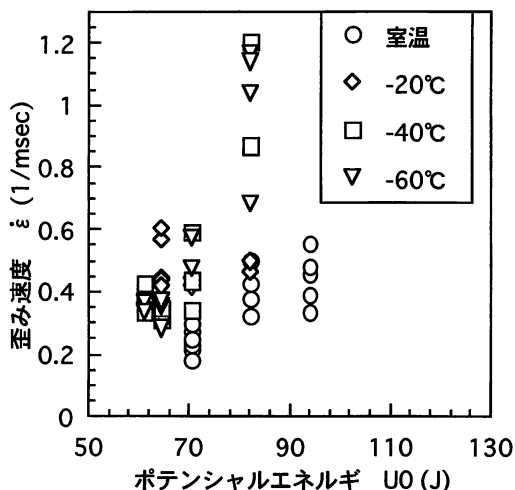


図12 ポテンシャルエネルギーと歪み速度の関係 (R Notch)

図11, 12から明らかなように、 ϵ および $\dot{\epsilon}$ は低温側が室温側より大きくなっている。特に、図11の結果については、試験片材料は bcc 金属に属す故、低温下では脆性度を増し変形量は減少するであろうという予想とは全く逆の結果を示すものであった。そこで、この実験結果については以下のような推察を試みた。図11で示される ϵ の大きい領域は、図12にみられるように歪み速度が大きいので、降伏点の上昇が予想される。その上に、低温状態でもあるので、降伏点の上昇は十分に予想される³⁾。したがって、低温側では、降伏点の上昇に伴い切欠き脆性の度合いが増し⁴⁾、破断の際に吸収されたエネルギーの大部分は、切欠き部に集中して、破断部付近の変形に費やされたものと考えられる。それに対し、

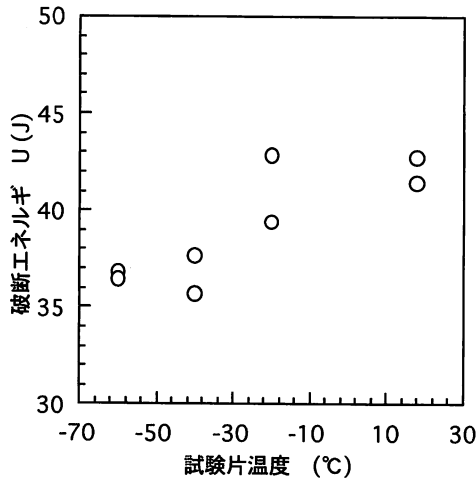


図13 破断エネルギーと温度の関係 (U Notch)

室温側では吸収されたエネルギーが切欠き部以外の部分の弾性変形、塑性変形にもかなり費やされるものと考えられる。以上のような現象が図11に示された結果であると考察した。これらについては、今後、より詳細な実験を行って検討する予定である。

図13は、U ノッチ試験片における破断エネルギーの温度依存性を表わしたものである。図より -20°C \sim -30°C 付近に低温脆性への遷移の存在が確認される。この温度は、シャルピー試験による炭素鋼の遷移温度とだいたい一致する⁵⁾。

図14は、本試験と、JIS 3号試験片によるシャルピー試験の結果を比較したものである。これを見るとシャルピー試験での U はほぼ一定値をとっているのに対し、本試験の場合は、 U に U_0 の依存性が確認される。これは、試験片形状、衝撃荷重形態等の衝撃条件の差異に起因したものであると思われる。

4. 結 言

(1) 試験片形状やポテンシャルエネルギー、試験温度等を変えて、多様な目的に応じた衝撃条件を与え得る落錘式の衝撃試験機を製作し、試験片に吸収されたエネルギー(破断エネルギー)を計測する一方法を提案した。

(2) 本試験方式の有効性を検討するために、炭素鋼(S35C)試験片を用いて実験を行った。その結果、試験機にばねによる重錘の強制落下装置等の若干の改良を加えれば、今後この試験方法により、衝撃強度特性に関わる諸因子について、より詳細な検討を

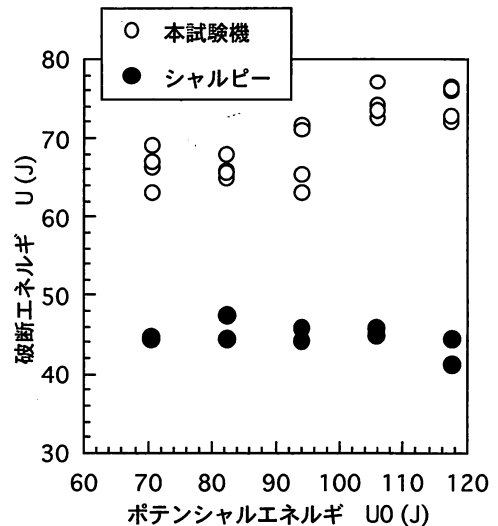


図14 本試験とシャルピー試験の結果

行え得ることが期待された。

(3) 実験範囲内では、試験片の破断エネルギーは、ポテンシャルエネルギーの増加とともに上昇と踊り場を繰り返すような挙動を呈した。また、温度による差異は明瞭ではなかった。しかし、試験片を破断せしめるに必要なポテンシャルエネルギーの下限は、室温より低温のほうが低くなっていた。

(4) 切欠きの鋭いU ノッチ試験片での実験では、 -20°C \sim -30°C 付近に低温脆性の遷移温度の傾向がみられた。この結果はシャルピー試験の実験結果と大体一致している。

(5) ポテンシャルエネルギーと破断エネルギーの関係の傾向は、本試験の場合とシャルピー試験の場合とは全く異なっていた。これは、試験片形状や、荷重形態等の差異によるもので、衝撃条件により衝撃強度特性が異なることを示唆するものと考えられる。

参考文献

- 1) 宮野, 安藤, 秋田高専紀要, 28, 1 (1993)
- 2) 益田, 室田, 工業塑性学, 養賢堂, 8 (1981)
- 3) John Wulff 編, 永宮監訳, 機械的性質, 岩波書店, 125 (1967)
- 4) 横堀, 材料強度学, 技報堂, 120 (1995)
- 5) 中川, ほか 3 名, 材料試験方法, 養賢堂, 188 (1968)