

© 1986 ISIJ

計装化シャルピー試験による動的弾塑性
破壊靱性の測定精度上の問題点

論文

小林 俊郎*・山本 勇*²・新家 光雄*On Accuracy of Measurement of Dynamic Elastic-Plastic Fracture
Toughness by Instrumented Charpy Test

Toshiro KOBAYASHI, Isamu YAMAMOTO and Mitsuo NIINOMI

Synopsis:

It had been developed in the previous study that dynamic elastic-plastic fracture toughness parameters J_d and T_{mat} could be evaluated from Instrumented Charpy impact test. However, to popularize this method, strict measuring method and judging standard on validity of obtained values must be established. One old and important problem to be clarified is a relationship between an instrumented energy (E_t) obtained from area under a load-deflection curve and a dial reading energy (E_r) calculated from a potential energy of hammer.

The purpose of this study is, therefore, to solve this problem at first and also to clarify the dynamic phenomena accompanying with the measurement of load-deflection curve. It is concluded that the energy condition necessary for test without changing the load-deflection relationship is E_0 (applied energy) $\geq 3E$ (total absorbed energy). This is the necessary condition to evaluate meaningful values of J_d and tearing modulus (T_{mat}). Moreover, it is shown how the vibrational wave superimposes the load-deflection curve analyzing the vibrational mode shape of the hammer.

1. 結 言

小型の試験片で、簡便に金属材料の靱性を評価できる計装化シャルピー試験法は、工業的にも極めて有用であるが、特に前報¹⁾では、簡便かつ正確に動的破壊靱性を測定するシステムの開発に成功し、その有効性を示した。一方、このような動的破壊靱性の評価に当たっては、特に得られる値の有効性の判定基準が必ずしも確立されておらず、静的な試験の場合に比べて明白にすべき点が多くあるのも事実である。今後、このような諸点を明確化してゆくことが、今回開発した動的破壊靱性評価システムを普及させてゆくうえでも重要な課題であるといえよう。

ところで、この測定システムの骨子が弾塑性破壊力学に立脚していることもあり、まず第一に正確な吸収エネルギーの測定、荷重-変位関係の測定が肝要である。しかし、従来よりまず吸収エネルギーの測定自体に問題点が指摘されているのが実情である。すなわち、本法では荷重-変位曲線下の面積から求められる計装エネルギー(以下 E_t) とハンマーの持上角と振上角の差から計算さ

れるダイヤルエネルギー(以下 E_r)により、吸収エネルギーの評価ができるが、 E_t と E_r の値は必ずしも等しくなく、その相関関係は以前から明白ではない²⁾³⁾。従来、 E_t と E_r の相関関係は $E_t < E_r$ となり、そのような関係となる原因として次のようなことが挙げられている²⁾。

1) 通常のシャルピー試験機では、ハンマー重心が撃心からややずれているため、これによるハンマーの縦振動に起因するロス・エネルギー。

2) ゲージに垂直な成分の荷重が検出されないことによるもの。

3) 衝撃初期における、ハンマーと試験片の反発における無接触状態での試験片の振動等によるロス・エネルギー。

ところで、これらのことはハンマーの初速度や破断過程での減速の程度・様相によりすべて変化するものと考えられる。そこで本研究では、第一に、 E_t と E_r の相関関係に影響を及ぼすと考えられるハンマー初速度に着目し、これを種々変え、ハンマーの減速が E_t と E_r の相関関係及び荷重-変位曲線にどのような変化を与える

昭和 60 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 12 月 23 日受付 (Received Dec. 23, 1985)

* 豊橋技術科学大学工学部工博 (Faculty of Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho Tokohashi 440)

*² 豊橋技術科学大学大学院 (現:川崎製鉄(株)) (Graduate School, Toyohashi University of Technology, Now Kawasaki Steel Corporation)

かについて検討した。

ところで、前報で開発した動的弾塑性破壊靱性評価システムでは、材料の破壊靱性評価をき裂進展開始時の破壊抵抗 J_{IC} 、き裂伝播時の破壊抵抗 T_{mat} (Material tearing modulus) という二つの破壊力学パラメータにより行っている。 J_{IC} を求めるにはき裂進展開始点までに試験片に吸収されたエネルギーを知ることが必要であり、一方、 T_{mat} は一つの便法として最大荷重点近傍からの荷重-変位曲線の低下の傾きを使つて求めることができるということを前報で指摘したり、計装化シャルピー試験法により、前述の二つの破壊力学パラメータを精度良く求めるには、まず、衝撃に伴つて発生する振動波や応力波の重畳していない材料の変形・破壊挙動のみを反映している荷重-変位曲線を精度良く測定する必要がある。試験片とタップとが接触することにより、最大荷重点前後までに生じる高周波数の振動波については、移動平均法を用いた振動波消去方法が筆者らの一人により開発され、その有効性はすでに確認されている⁴⁾。しかし、これとは別に最大荷重点以後のき裂伝播過程に低周波数の振動波がゆるやかに重畳する現象も観察されている。その荷重-変位曲線に及ぼす影響や発生原因についてはまだ十分な研究がなされていない。

そこで本研究では第二の目的として、ハンマーの振動を解析し、荷重-変位曲線に重畳している低周波数の振動波について発生原因を明らかにし、次いで、その破壊特性値の測定に及ぼす影響について考察した。

2. 実験方法

2.1 供試材

本研究に使用した供試材は、主に、SS41 鋼、HT80 鋼であり、他に Al2017 合金、Al7075 合金も一部使用した。これらの材料で種々の靱性レベルを得るために、おのおの数種類の熱処理を施した。

2.2 試験片形状

計装化シャルピー試験及び波形解析に用いた試験片は、標準シャルピーV切欠試験片 (10 mm×10 mm×55 mm) である。また、動的破壊靱性試験には、標準シャルピーV切欠試験片のV切欠先端に JSMES001 法に従つて、切欠深さ比 (a/W) が 0.6 となるように疲労予き裂を導入した試験片を用いた。

2.3 計装化シャルピー試験

容量 50 kgfm の計装化シャルピー試験機を用いて、衝撃速度 2.793 m/s, 3.227 m/s, 3.606 m/s, 3.949 m/s, 4.268 m/s, 4.563 m/s, 5.104 m/s で、各衝撃速度について標準シャルピーV切欠試験片を2本ずつ衝撃して荷

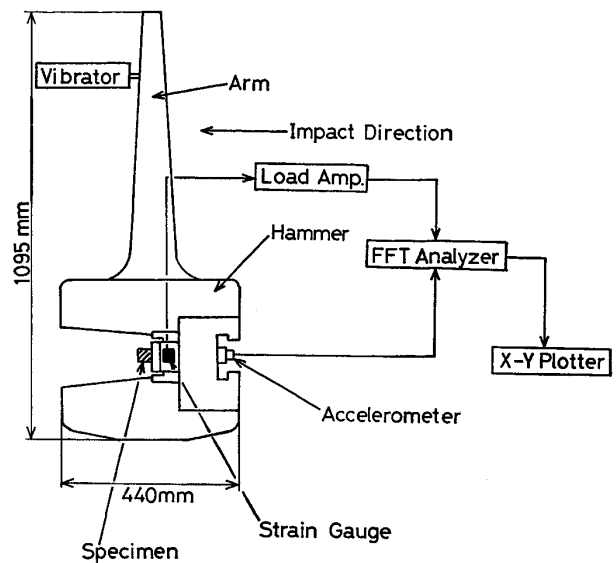


Fig. 1. Vibrational analysis system in instrumented Charpy test.

重-変位曲線を記録し、 E_t 及び E_r を測定した。本研究に使用した計装化シャルピー試験機は、マイクロコンピュータを用いることにより、 E_t や後出する最大荷重点までの吸収エネルギー (E_i)、最大荷重点以後の吸収エネルギー (E_p) 等が数 10 s で測定可能である⁴⁾。本研究では、 E_t としてマイクロコンピュータの計算結果を用いた。一方、 E_r は JIS Z 2242 に基づいて摩擦損失を考慮した式により算出した。

2.4 動的破壊靱性試験

容量 50 kgfm の計装化シャルピー試験機を用いて、衝撃速度 1.249 m/s, 1.615 m/s, 1.906 m/s, 2.166 m/s, 2.793 m/s で、各衝撃速度について疲労予き裂付試験片を2本ずつ打撃して荷重-変位曲線を記録した。供試材としては SS41 鋼未熱処理材を用いた。また、上述の衝撃速度は計装化シャルピー試験の衝撃速度と異なるが、これは SS41 鋼未熱処理材に対して、計装化シャルピー試験とほぼ等しい付加エネルギー割合 E_t/E_0 (E_0 : 付加エネルギー) にするためである。前報に従い記録された荷重-変位曲線に対してコンプライアンス変化率法を適用し、き裂進展開始点を推定した。動的破壊靱性値 J_d は、(1) 式の RICE⁵⁾ の簡便式により算出した。

$$J_d = \frac{2E}{B(W-a_0)} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 B : 試験片厚さ、 W : 試験片幅、 a_0 : 初期き裂長さ、 E : き裂進展開始点までの吸収エネルギー (ただし、コンプライアンス補正を施して、試験片のみに吸収されたエネルギーに修正した⁴⁾) である。

2.5 FFT アナライザーによる波形解析

SS41 鋼未熱処理材、HT80 鋼未熱処理材の標準シャル

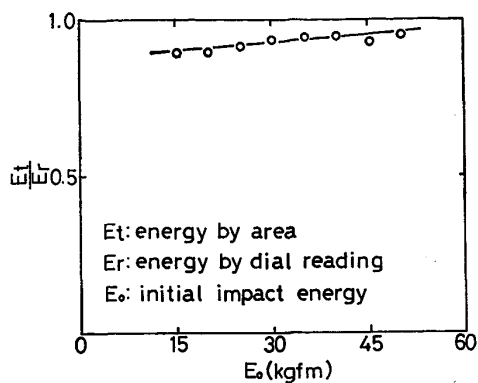


Fig. 2. Relation between (E_t/E_r) and E_0 .

ピーV切欠試験片を容量 50 kgfm の計装化シャルピー試験機を用いて衝撃速度 3.606 m/s, 5.104 m/s で打撃し, FFT アナライザー (Fast Fourier Transformation Analyzer; 小野測器製 CF-500) により, 荷重-時間曲線及び加速度-時間曲線を記録した. その概略図を Fig. 1 に示す. Fig. 1 にあるように, 荷重は計装化シャルピー試験機のタップ先端に貼付されている半導体歪みゲージの出力である. また, 加速度は計装化シャルピー試験機のハンマー背面に装着した加速度計により検出した.

2.6 計装化シャルピー試験機のハンマーの振動解析

計装化シャルピー試験機のハンマー・アーム部に加速度計を装着し, 計装化シャルピー試験機のハンマーを固定した状態で, 先端に加速度計を接続したプラスチックハンマーでハンマー各部を打撃 (ハンマリング) し, ハンマーの固有振動数を測定した.

次に, 得られた固有振動数においてハンマーの振動モード形を測定し, 衝撃負荷中のハンマーの変形挙動を推定した. 振動モード形の推定は以下のように行つた. すなわち, Fig. 1 に示す位置に加振器を磁石で装着し, 各固有振動数でハンマー・アームを加振した. そしてその振幅を加速度計を用いてハンマー・アーム上約 20 mm の間隔ごとに x, y 2 方向から検出し, 振動モード形測定器により変位量に直し, 振動モード形を推定した.

3. 実験結果及び考察

3.1 ハンマー初速度の変化による E_t-E_r 相関関係の変化

Fig. 2 に E_t/E_r と E_0 との関係を示す. E_0 が大, すなわちハンマー初速度が大きく, ハンマー減速が小さいほど, E_t/E_r は 1 に近くなつており, E_t-E_r 相関関係にハンマー減速の影響が明らかに認められる. このような点は, 振り型のシャルピー式衝撃試験では不可避の現象であり, 特に高靱性材料の試験では破断過程での

ハンマー減速に対し十分な配慮が必要である. さらに衝撃に伴う振動波をさける目的で行われる低速衝撃試験の際にも重要となる点である. また, 従来計装化シャルピー試験で $E_t=E_r$ と仮定して荷重校正を行つている例も多いが⁶⁾, 以上のような背景を踏まえて行うことが肝要であり, 注意が必要である.

3.2 ハンマー減速と吸収エネルギーとの関係

W. L. SERVER⁷⁾は, 線形破壊力学の適用範囲内で, 脆性破壊荷重より K_{Ic} を計測するため種々の実験を行つているが, 例えば, ハンマー速度が最大荷重点までに 20% 以上減速しない条件として (2) 式を提案している.

$$E_0 \geq 3W_M \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで, W_M : 最大荷重点までの吸収エネルギーである.

ところで, 筆者らの弾塑性破壊力学を適用し, 延性破壊における J_{Ic} あるいは T_{mat} を計装化シャルピー試験法により求める方法において, (2) 式の W_M を全吸収エネルギー E に変え, ハンマーが試験片が完全破断するまでに 20% 以上減速しない条件を求めると, (2) 式はこのような場合次のようになる.

$$E_0 \geq 2.78E \div 3E \quad \dots \dots \dots (3)$$

つまり弾塑性破壊力学を適用するうえで, ハンマー速度が試験片の完全破断までに 20% 以上減速しない条件式として, (2) 式と同内容の (3) 式が基準となることが導出される. 後述するように, (3) 式が満足される条件で試験を行えば, 得られる荷重-変位曲線に変化が少ないことが明らかになった.

3.3 ハンマー減速による荷重-変位曲線の変化

前述したように, 弾塑性破壊力学に基づいて材料の動的な破壊靱性評価を行うには, 材料の変形・破壊挙動のみを反映している荷重-変位曲線が必要である. そこで, 次にハンマー速度の減少が荷重-変位曲線にどのような影響を及ぼすかを検討した結果を示す.

3.3.1 最大荷重点までの荷重-変位曲線の変化

Fig. 3 に, 各衝撃速度で打撃し, 記録した荷重-変位曲線を示す. ただし, 縦軸の荷重値は移動平均修正された荷重値である. Fig. 3 において, ハンマー初速度の減少に伴い, 最大荷重点までの荷重-変位曲線が変化するのが認められ, 特に (b) で顕著である. これはいわゆる材料本来の歪み速度依存性を反映した結果によるものではなく, 主に後述するように, 衝撃に伴う諸現象を反映した結果によつている. Fig. 4 にハンマー速度の減少に伴う最大荷重点までに吸収されるエネルギー E_i の変化を示す. Fig. 4 から, $V_f/V_0 \geq 0.8$ なる負荷条件 (これは前述したように, $E_0 \geq 3E_i$ に対応する) でシャ

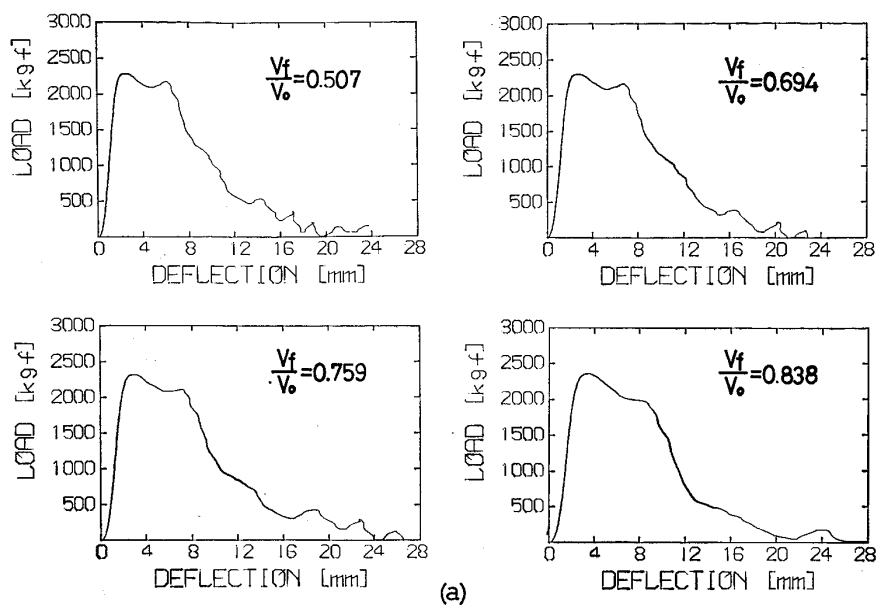


Fig. 3. Load-deflection curves recorded by instrumented Charpy test. (a) HT80, as received.

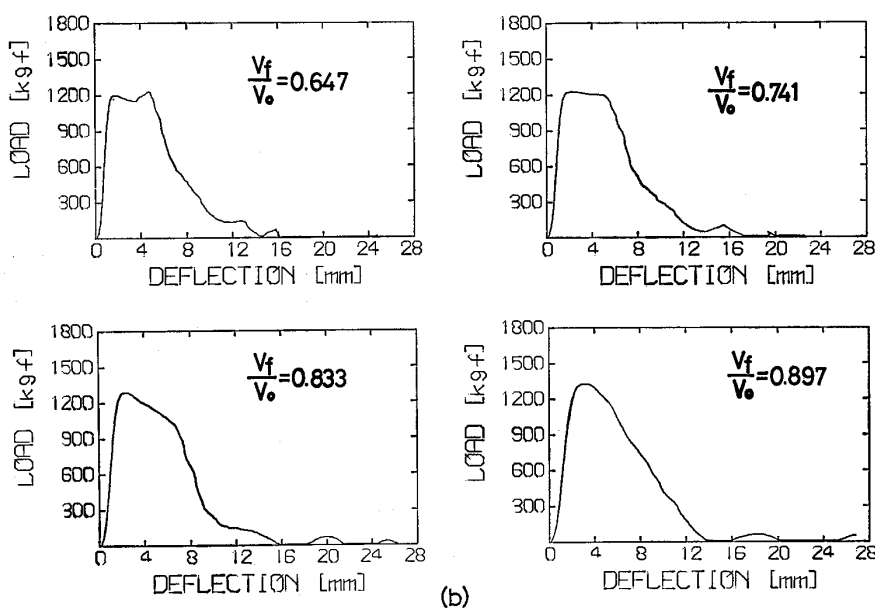


Fig. 3. Load-deflection curves recorded by instrumented Charpy test. (b) SS41, as received.

ルピー試験を行えば、ハンマー速度の減速による最大荷重点前後における荷重-変位曲線関係の変化は無いということが明らかになったといえる。以上のことは、疲労予き裂付試験片を打撃した場合にも当てはまる。

Fig. 5 に、ハンマー初速度を種々変えて打撃した時に得られた動的弾塑性破壊靱性値 (以下 J_d 値) を示す。 J_d 値に明白な変化は認められなかった。前述したように、ハンマー初速度の変化に伴い、最大荷重点までの吸収エネルギーが変化しているため、 J_d 値にも明白な変化が現れるものと予想されたが、最大荷重点までの吸収エネルギーが変化するのは、主に試験機に吸収されるエネルギーが変化するためで、コンプライアンス補正を施し⁴⁾、試験片のみに吸収されたエネルギーに修正したこ

とにより、ハンマー初速度の変化に影響されない J_d 値が得られたものと考えられる。

3.3.2 最大荷重点以後の荷重-変位曲線の変化

Fig. 3 からわかるように、ハンマー初速度が小さくなるにつれて、最大荷重点以後の荷重の再負荷によるピークが変化している。従来、このような最大荷重点以後の伝播過程につき、その波形の詳細を議論した例はほとんど見られない。これは本法による破壊靱性の測定が、線形破壊力学が適用される極めて限られた場合、つまり $K_{I,d}$ の測定のみしか考えていなかったという事実に起因している。一般に、荷重-変位曲線の最大荷重点以後の部分には、ハンマーと試験片とが衝突した時に生じた応力波あるいはハンマー・ロードセル内を伝播・反射し

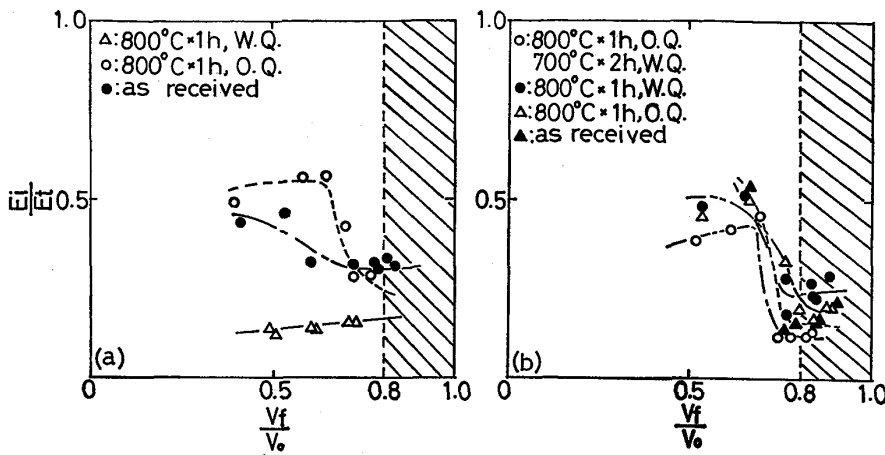


Fig. 4. Effect of hammer speed reduction on maximum load point absorbed energy ratio (E_i/E_t).

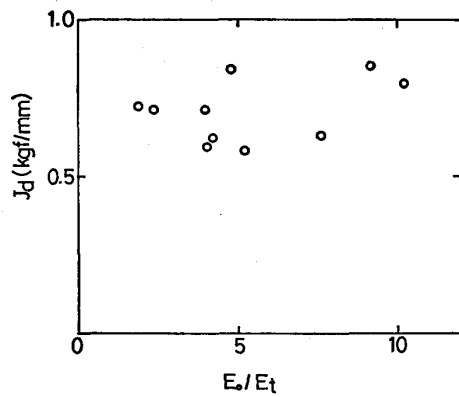


Fig. 5. Effect of applied energy ratio on dynamic fracture toughness values.

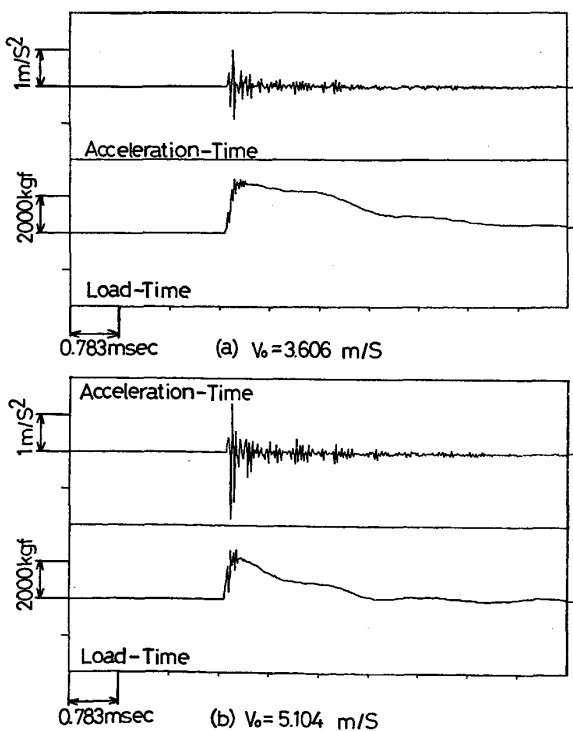


Fig. 6. Curves of load-time and acceleration-time obtained by FFT analyzer (HT80, as received).

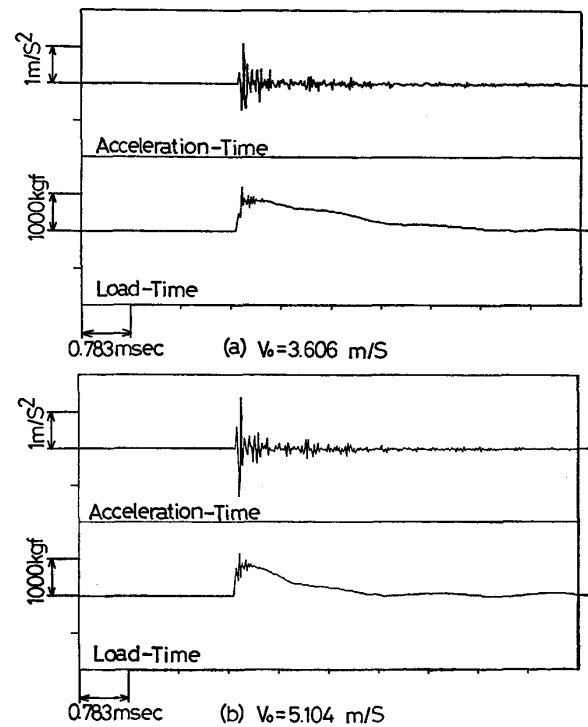


Fig. 7. Curves of load-time and acceleration-time obtained by FFT analyzer (SS41, as received).

た応力波がゆるやかに干渉し、重畳しているものと推定することができる。そこで、ハンマー・ロードセル内を伝播する応力波の影響を調べるために、FFT アナライザーによる波形解析を行った。

Fig. 6, 7 に、FFT アナライザーにより記録された荷重-時間曲線及び加速度-時間曲線を示す。荷重-時間曲線において、最大荷重点まで激しい振動が見られた。これは試験片とハンマーとが衝突する時に生じる慣性効果と、試験片とハンマー、アンビル間の振動によるものである⁴⁾。この二つの現象の影響は、ハンマー・ロードセル内を伝播する応力波を表す加速度-時間曲線においても認められ、衝突による加速後から最大荷重点まで減衰

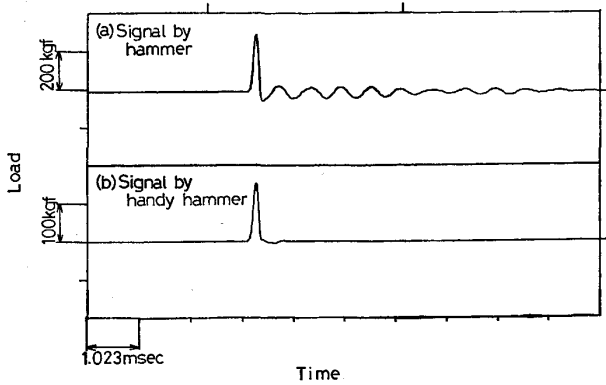


Fig. 8. Load-time curves recorded by FFT analyzer.

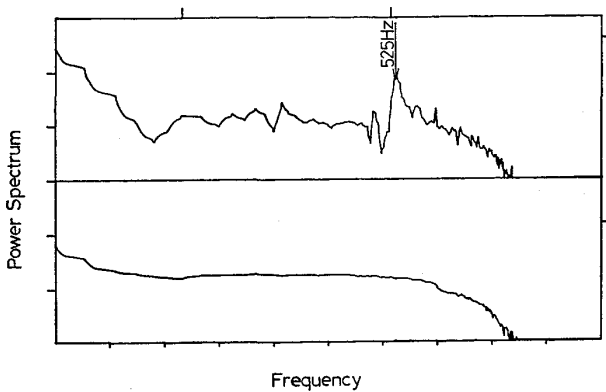


Fig. 9. Power spectra of Fig. 8.

振動を示している。一方、最大荷重点以後、荷重-時間曲線は、長い周期の振動のみのゆるやかな曲線となつていて、一度荷重値が0に落ち込んで試験片が破断したことを示した後、再び上昇するという現象が周期的に見られる。その周期は各試験片ごとに若干の違いがあるが、約 $1600 \mu s \sim 2000 \mu s$ である(振動数に直すと $500 \sim 600 \text{ Hz}$ である)。一方、加速度-時間曲線には、比較的大きな振幅を持つ振動が周期的に現れているのが認められる。これは前述したように、ハンマー・ロードセル内を伝播・反射した応力波が互いに干渉し合ったために生じたものである。前述の試験片の破断後の荷重値の再上昇現象は、ハンマー内に残留している応力波によるものと実験前には予想されたが、Fig. 6, 7 より、荷重値の再上昇と加速度の変化は対応しておらず、荷重値の再上昇が見られる部分に対応する加速度-時間曲線にも明白な変化が無く、かつ両曲線の間に相関性が無いことから、応力波の影響は実際には少ないものといえる。

以上のような荷重-時間曲線及び加速度-時間曲線の挙動は、基本的には、ハンマー初速度あるいは試験片の材質によらず同様である。

3.4 ハンマーの振動解析

Fig. 8 は、プラスチックハンマー先端にロードセル

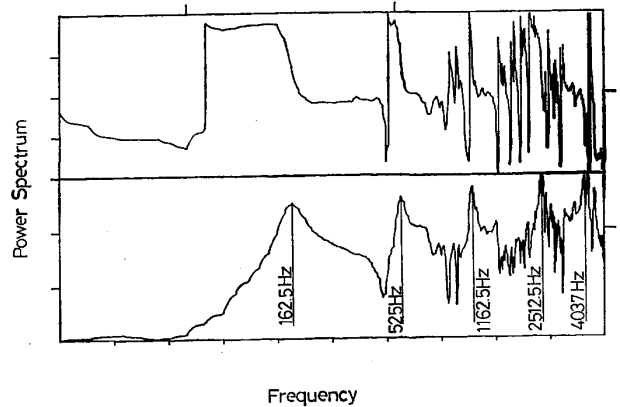


Fig. 10. Vibration spectra of hammer.

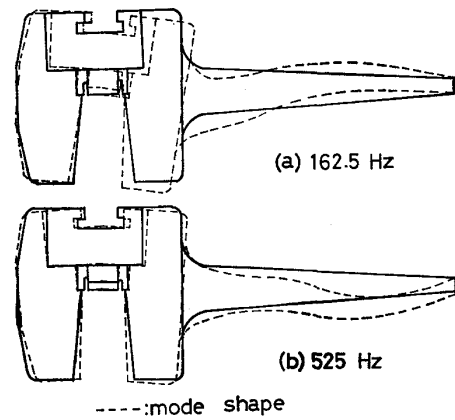


Fig. 11. Vibrational mode shape of hammer.

を接続し、シャルピー試験機のハンマー・タップ先端を打撃した時のハンマー・タップ出力-時間曲線(上部)とプラスチックハンマーのロードセル出力-時間曲線(下部)である。ハンマー・タップ出力-時間曲線には、ロードセル出力-時間曲線には無い振動波が認められる。Fig. 9 は Fig. 8 の周波数分析結果である。525 Hz にピークがある。これより、ハンマー・タップ出力-時間曲線で認められる振動波の振動数は 525 Hz とわかる。これは、3.3.2 で述べた破断後の荷重値の再上昇現象の振動数とほぼ同じ振動数である。Fig. 10 は、シャルピー試験機ハンマーの固有振動数測定結果である。

以上のことより、ハンマー・タップ出力-時間曲線で観察された破壊挙動と、破断後の荷重値の再上昇現象は、ハンマーの固有振動に起因する同一の現象であると推定される。

Fig. 11 は、162.5 Hz, 525 Hz の固有振動数における振動モード形測定結果である。525 Hz の振動をハンマーが受けると、ハンマー・タップ部に貼付された半導体歪みゲージが曲げモーメントを受けるようにハンマー両端部は変形する。このハンマーの変形により生じた曲げモーメントを半導体歪みゲージが検出するために、荷

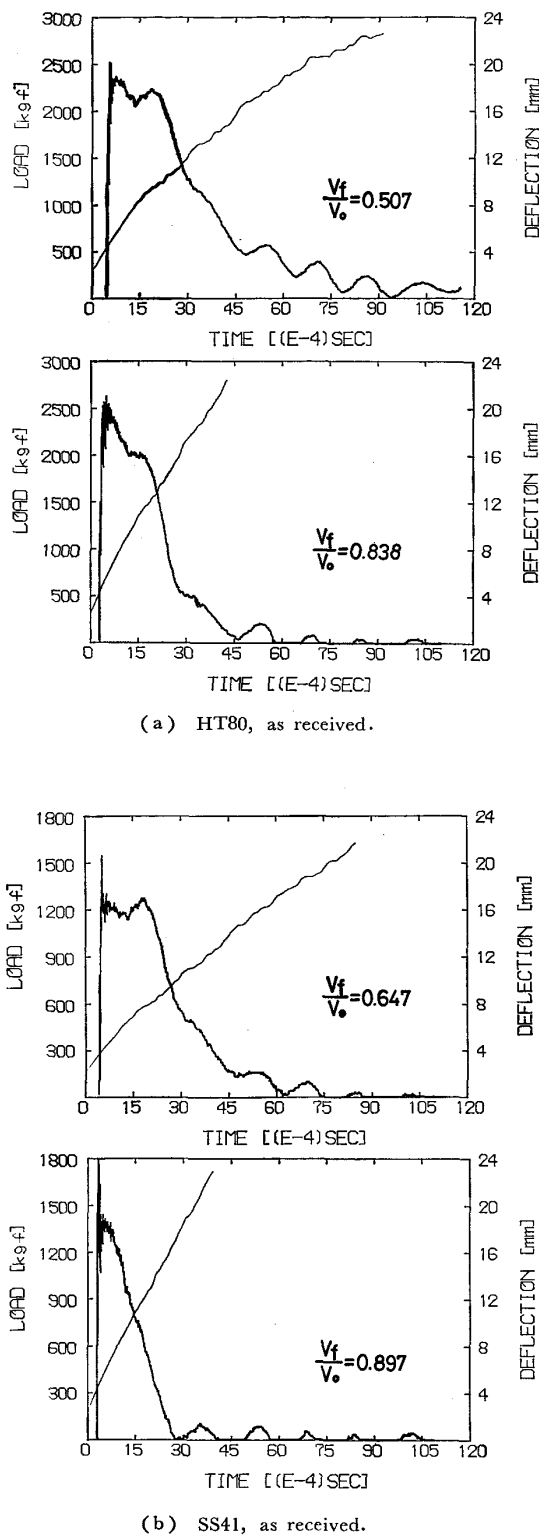


Fig. 12. Curves of load-time and deflection-time recorded by instrumented Charpy test.

重-変位曲線の破断後の部分に周期的な荷重値の上昇が現れたものと考えられる。一方、162.5 Hz では、相対するハンマー両端部は同方向に変形し、そのためにタップに貼付されている半導体歪みゲージは大きな曲げモーメ

ントを受けず、またその他の固有振動数では、ハンマーよりもアームの変形が大きいと、いずれもこれらの固有振動数は、荷重-変位曲線に影響しないものと思われる。

3.5 荷重-変位曲線のき裂伝播過程で見られる再負荷現象について

Fig. 12 は、計装化シャルピー試験により得られた荷重-変位曲線から作成した荷重-時間曲線及び変位-時間曲線である。本研究に使用した計装化シャルピー試験機の演算装置に記憶されている荷重、変位データは、サンプリングタイムごとの離散値であるから、サンプリングタイムがわかれば、荷重-時間曲線あるいは変位-時間曲線に直すことができる。Fig. 3, Fig. 12 で見られるように、最大荷重点以降で、荷重値の停滞あるいは再負荷による小ピークの出現が、特にハンマー速度の減少が著しい時に見られた。き裂伝播抵抗、つまり T_{mat} の測定等を行う場合にはこのような現象を良く理解して行う必要がある。最大荷重点以降で見られる荷重値の停滞あるいは再負荷による小ピークについては、前述したように、ハンマーの固有振動に関する微小変形に起因するが、一種の慣性効果によるものと考えられる。

すなわち、ハンマーと試験片とが衝突した直後に、運動量保存則に基づいて試験片は加速され、試験片とハンマーとの間に無接触状態が生じ、一時的に荷重の低下がもたらされる。これが従来からいわれている荷重-変位曲線の最初の立ち上がりに見られる慣性効果である⁸⁾。しかし、前述の慣性効果はこれとはやや異なり、試験片の加速とその後の高速変形にハンマー減速の影響が加わり、そのために試験片の変形にハンマーが追いつけず、ハンマーと試験片との接触状態が緩和され、一時的に荷重の急低下と再負荷が起こるものと考えられる。これは、Fig. 12 でも小ピークの出現時より、変形速度が低下していることから裏付けられる。またこの時、最大荷重点までに試験機に吸収されたエネルギーが、き裂伝播過程で一気に放出されるのではなく、材料のき裂伝播抵抗とバランスしながら放出と再蓄がくり返されるために、荷重-変位曲線に凹凸が現れることも定性的に説明可能である。

以上のことが、前述の 525 Hz でのハンマーの固有振動による微小変形の影響をより顕著に反映させる結果になっているものと思われる。しかし、前報で述べたように、このような最大荷重点近傍からの荷重降下の傾き(リバウンド・コンプライアンス)から、大体の T_{mat} を推定する場合には前述の(3)式が満足されていれば、傾きの最も急峻な場合、あるいは振動を考慮した平均勾配を用いることで、所期の目的は達成できると考えられ

る。前者の場合には下限側の推定が行われることになる。

4. 結 論

計装化シャルピー試験法により延性破壊過程での弾塑性破壊靱性を正確に測定するうえで、特に重要と考えられる荷重-変位曲線ならびに吸収エネルギー測定上の問題点について検討した結果、次のような結論を得た。

(1) ハンマー初速度が大きく、ハンマー減速の程度が少ないほど、 E_t と E_r の値は近くなる。

(2) $V_f/V_0 \geq 0.8$ なる負荷条件で衝撃試験を行えば、ハンマー減速による最大荷重点までの荷重-変位曲線に変化は無く、ほぼ正確な動的弾塑性破壊靱性値 (J_d) が得られる。

(3) 最大荷重点以後における延性き裂伝播過程での荷重-変位曲線が変化する原因として、ハンマー・ロードセル内を伝播する応力波の影響よりも、ハンマーの固有振動に起因するハンマー自体の変形の影響が大きいことがわかった。

(4) 上述の現象は、試験片の吸収エネルギーが大きく、破断過程でのハンマーの減速が著しい時に再負荷ビ

ークとして現れやすい。この原因は、試験片の持つ慣性にハンマー速度が追いつかず、また試験機からの弾性エネルギーの解放がき裂伝播抵抗に対し十分でない時に現れやすいと考えられ、(2)の $V_f/V_0 \geq 0.8$ の条件がこの点からも必要とされることが明らかとなった。

最後に、本研究での振動解析に対し御指導御助言いただいた豊橋技術科学大学星鉄太郎教授に深謝申し上げます。また材料を御提供いただいた住友金属工業(株)、(株)日軽技研に御礼申し上げます。

文 献

- 1) 小林俊郎, 山本 勇, 新家光雄: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1934
- 2) 梶野利彦, 小林俊郎: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 159
- 3) 石野隼作, 山口幸夫, 樋田並照: 材料試験技術, 29 (1984), p. 243
- 4) 小林俊郎, 松原 等, 上田徹完: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 2216
- 5) J. R. RICE, P. C. PARIS and J. G. MERKLE: ASTM STP 536 (1973), p. 231
- 6) D. R. IRELAND: ASTM STP 563 (1974), p. 3
- 7) W. L. SERVER: Journal of Testing and Evaluation, 6 (1978), p. 29
- 8) 小林俊郎: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 654