

# 計装化シャルピー衝撃試験における計測荷重に及ぼす 衝撃刃形状と歪ゲージ貼付位置の影響

小林 俊郎\*・大谷 昌弘\*<sup>2</sup>・森田 繁樹\*・戸田 裕之\*

Effects of Striker Shape and Attached Position of Strain Gage on Measured Load in Instrumented Charpy Impact Test

Toshiro KOBAYASHI, Masahiro OTANI, Shigeki MORITA and Hiroyuki TODA

**Synopsis :** Instrumented Charpy impact test is widely used for the evaluation of toughness of many kinds of materials such as steel, aluminum alloys, polymers and ceramics with small scale specimens. In the test, therefore, it is important to record an accurate impact load. Generally, one can obtain measured load in the instrumented Charpy impact test by multiplying the output signal from strain gage attached to the instrumented striker by load-calibration factor assuming a liner relationship between the strain gage signal and applied load. Although JIS or ISO describes about the instrumented striker, amplifier, data processing parameter and etc., detailed method on load measurement is hardly described in any standard.

In the present study, two types of striker were used. The strain gages were attached to 4 positions in each striker. Instrumented Charpy impact test was carried out using these strikers in order to investigate the effect of gage position on actual impact load. By the finite element analysis, the effect of the strain gage position on the measured load was also investigated. As the result, it became clear that the accurate impact load was not measured around the end of slit which was introduced to release the constraining effect of deformation of the gage position from surrounding hammer; the effect of the vibration of the hammer appeared strongly around this position. However, it was possible to prevent the effect of such vibration by attaching the gage away from such position.

**Key words :** instrumented Charpy impact test; absorbed energy; instrumented striker; FEM; strain gage.

## 1. 緒言

計装化シャルピー衝撃試験法は、得られる荷重-時間あるいは荷重-変位曲線から様々な動的破壊挙動の評価が可能である。適用される試験片は、サイズ、材質ともに多岐にわたっており<sup>1-5)</sup>、試験法が比較的容易であるなどの利点から広く普及している。また、本試験法はISOやJISなどによって規格化されており、それらの規格では、計装化シャルピー衝撃試験法に関する様々な点について規定されている<sup>6-10)</sup>。しかしながら、規定されていない点も数多く残されている。荷重値の計測については、衝撃刃に貼付された歪ゲージによって行う方法が規定されており、前報<sup>11)</sup>では、荷重校正試験時に材質や試験片寸法の影響が現れることを明らかにした。また歪ゲージ貼付位置の影響もあることが示唆された。

一方、ISO<sup>6)</sup>では、様々な衝撃刃形状や歪ゲージ貼付位置を推奨しており、歪ゲージ貼付位置については、経験的に11~15 mmとしているものの明確な根拠については記述されていない。JIS<sup>7)</sup>では、歪ゲージ貼付部分の衝撃刃形状や歪ゲージ貼付位置は記載されていない。このように、荷重計測に直接影響すると考えられる計装化衝撃刃形状や歪ゲージ貼付位置などについてほとんどの規格で明確にされ

ていないのが現状である。

そこで、本研究では、4ヵ所に歪ゲージを貼付した2種類の計装化衝撃刃を試作した。この計装化衝撃刃を用いて、計装化シャルピー衝撃試験で計測される荷重値に及ぼす衝撃刃形状および歪ゲージ貼付位置の影響について調査した。また、有限要素法解析により、計装化衝撃刃が動的な荷重を受ける際の歪の時間変化を調査し、計測される荷重値に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

## 2. 実験および解析方法

### 2.1 計装化シャルピー衝撃試験

計装化シャルピー衝撃試験は、新たに試作した計装化衝撃刃の交換が可能である容量100 Jの多目的計装化シャルピー衝撃試験機を用いて行った。本研究に供した材料は、6061-T6 Al合金である。試験片形状は、標準シャルピーV切欠き試験片とした<sup>12)</sup>。試験片支点間距離は40 mmとし、負荷速度は、すべての試験片に対し標準のフルブローである4.5 m/sとした。

Fig. 1は、計装化衝撃刃の模式図である。試験に用いた計装化衝撃刃は、歪ゲージの感度向上や保護を考慮し、経験的に歪ゲージを貼付する部分をくりぬき薄くした、一般

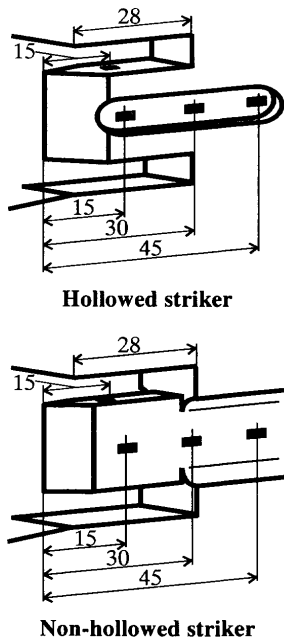


Fig. 1. Schematic illustration of instrumented striker for instrumented Charpy impact test (mm).

に用いられているくりぬき式衝撃刃、およびくりぬき部分を無くすことで荷重較正試験時の荷重較正用試験片の厚さや材質の影響を受け難くした非くりぬき式衝撃刃<sup>13)</sup>である。荷重は、それぞれの計装化衝撃刃について、刃先から15, 30, 45 mmの計装化衝撃刃左右側面および刃先から15 mmの計装化衝撃刃上下に貼付した半導体歪ゲージ（以下、歪ゲージ貼付位置は15, 30, 45 mmおよびupperとする）とそれぞれ2枚のダミーゲージにより構成されたブリッジ回路<sup>14)</sup>により検出した電圧値に、あらかじめそれぞれの位置で求めておいた荷重較正值を乗じることにより求めた。

変位は、ハンマー回転軸に装着されたポテンシオメータにより検出した電圧値に、あらかじめ求めておいた変位較正值を乗じることにより求めた。荷重および変位値のサンプリング時間は、 $2 \mu\text{sec}$ とした。また、計装化衝撃刃には深さ28 mmの切り込みを導入し、ゲージ貼付部が周りの拘束より解放されて弾性応答が良好になるようにした。この結果、15 mmでは切り込み底部から離れ拘束を解放した状態、30 mmでは切り込み底部直下、45 mmでは切り込みが無く拘束されている状態の3種類の条件において試験したことになる。

2.2 ローブロー計装化シャルピー試験

実際に試験片に負荷された荷重値と計装化衝撃刃に貼付した歪ゲージから求めた荷重値を比較するため、試験片を弾性変形範囲内で打撃するローブロー計装化シャルピー試験を行った。

本研究に供した材料は、6061-T6 Al合金である。試験片形状は、 $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$ の無溝試験片とした。試験片支点間距離は40 mmとし、負荷速度は試験片の塑性変形防止を考慮し、 $0.254 \text{ m/s}$ とした。試験に用いた計装化衝撃刃は、

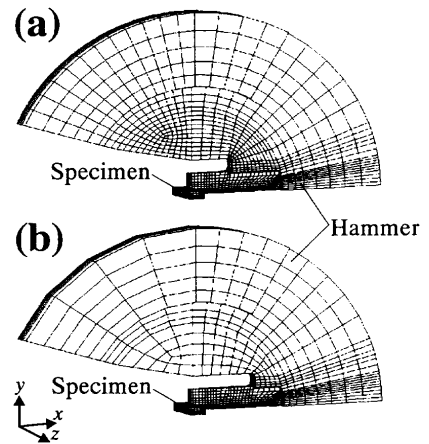


Fig. 2. (a) Finite element model of Charpy hammer with specimen for low blow instrumented Charpy test. (b) Finite element model by introducing deep cutting slit.

非くりぬき式衝撃刃である。荷重は、15, 30, 45 mmおよびupperのそれぞれの歪ゲージ貼付位置において2.1節と同様の方法により求めた。実際に試験片に負荷された荷重は、打撃方向と反対側の試験片背面中央部に貼付した箔歪ゲージにより求めた<sup>15)</sup>。まず、インストロン万能試験機を用いて試験片を弾性限内で静的に3点曲げ負荷し、その際の荷重値 $P$ および試験片に貼付した歪ゲージと2個の固定抵抗および1個の可変抵抗により構成されたブリッジ回路からの出力電圧 $V_S$ の関係から、(1)式に従い荷重較正值 $C_S$ を求めた。

$$C_S = \Delta P / \Delta V_S \dots\dots\dots (1)$$

ローブロー計装化シャルピー試験時の $V_S$ に $C_S$ を乗じることで、実際に試験片に負荷された荷重値を決定した。また、計装化衝撃刃に貼付されたそれぞれの歪ゲージおよび試験片に貼付された歪ゲージによる荷重値のサンプリング時間は、 $2 \mu\text{sec}$ とした。

2.3 過渡応答有限要素法解析

計装化シャルピー衝撃試験によって、計装化衝撃刃に貼付されたそれぞれの歪ゲージ貼付位置から得られた荷重-変位（時間）曲線の違いを調査するために、過渡応答解析を行った。過渡応答解析は、時間に依存する荷重を負荷した構造物の動的応答（変位、歪、応力、力）を解析することができる。しかし、実際に試験片を破断させる計装化シャルピー衝撃試験を解析することは非常に困難である。そこで、2.2節で行ったローブロー計装化シャルピー試験の過渡応答解析を行い、それぞれの歪ゲージ貼付位置での歪の時間変化を調査した。

2.3.1 解析モデル

Fig. 2(a)は、計装化シャルピー衝撃試験機のハンマーと無溝試験片の有限要素モデルである。Fig. 2(b)は、切り込み深さと歪ゲージ貼付位置30 mmの差が、Fig. 2(a)のモデ

ルの切り込み深さと歪ゲージ貼付位置 15 mm の差と等しくなるように Fig. 2(a) のモデルを修正し、深さ 43 mm の切り込みを導入した場合の計装化シャルピー衝撃試験機のハンマーと無溝試験片の有限要素モデルである。これより、切り込み深さと歪ゲージ貼付位置との関係を調査した。

本解析では、モデルは非くりぬき式衝撃刃とし、ハンマーアームが無いものと仮定した上で、左右および上下の対称条件を利用して、3次元1/4モデルとした。解析モデルの要素は、3次元8節点6面体ソリッドとした。計装化衝撃刃先端と無溝試験片が接触する部分および歪ゲージの貼付位置に相当する部分近傍は、特に要素サイズが密になるようにモデルを作成した。また、計装化衝撃刃先端と無溝試験片が接触する部分には、一つの接触節点 M と三つの節点から構成される標的面からなる3次元4節点の接触要素を配置させた<sup>11)</sup>。解析モデルの総要素数は5668、総節点数は6298である。また、切り込みを深く導入した解析モデルの総要素数は4372、総節点数は4716である。

### 2.3.2 解析条件

本解析で使用したモデルの材料特性は、文献値より以下のように設定した。無溝試験片はアルミニウム合金とし、ヤング率は70 GPa、密度は2699 kg/m<sup>3</sup>とした。ハンマーおよび計装化衝撃刃は鋼とし、ヤング率は210 GPa、密度は7870 kg/m<sup>3</sup>とした<sup>16,17)</sup>。ポアソン比は、すべて0.3とした。本解析では、ローブロー計装化シャルピー試験の性質上、計装化衝撃刃と無溝試験片間に接触が生じる。接触状態の判定および接触面の摩擦については、前報<sup>11)</sup>と同様の方法により計算した。法線方向の力に対する接触剛性 $K_n$ は、(2)式から決定した。

$$K_n = fEh \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $f$ は係数であり、収束時間と食い込み量の関係から $f=10$ とした。 $E$ は接触する二つの物体のうち低い方のヤング率、 $h$ は接触長さであり、3次元では、接触面積の平方根で表される。接触面における摩擦は、弾性クーロン摩擦に従うものと仮定した。これは二つの物体間の接線方向に発生する摩擦力 $F_s$ は、法線方向の力 $F_n$ に比例する値を越えないとするものであり(3)式により表される。

$$|F_s| \leq -\mu F_n \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\mu$ は摩擦係数であり、動摩擦を考慮する場合、静摩擦係数 $\mu_s$ /動摩擦係数 $\mu_d$ で与えられる。本解析では、文献値より $\mu_s=0.61$ 、 $\mu_d=0.47$ (鋼とアルミニウムの接触)とした<sup>18)</sup>。また、弾性クーロン摩擦モデルでは、固着状態とすべり状態の両方を定義できる。固着域は接線方向の力に対する接線剛性 $K_s$ を持つ弾性域として取り扱われる。本解析では計装化衝撃刃と試験片との間に相対的なすべりは容易に生じないものと仮定し、 $K_s=K_n/100$ とした。なお、収束計算は、ニュートン・ラプソン法により行った。

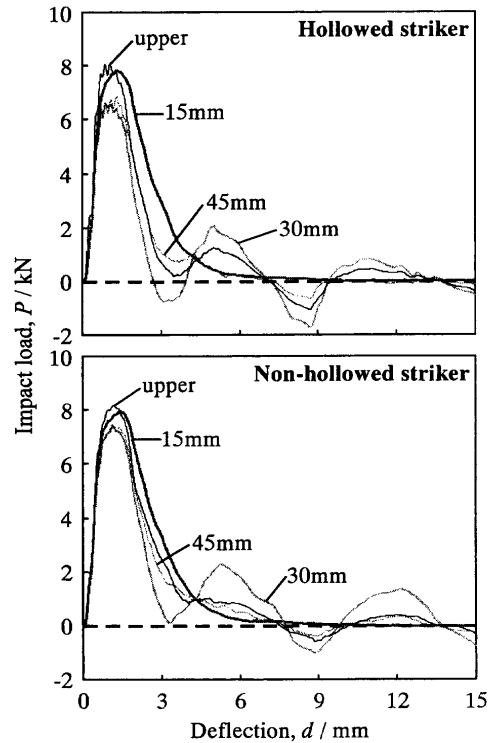


Fig. 3. Typical load-deflection curves recorded from specified strain gage positions in hollowed and non-hollowed strikers for the V-notched 6061-T6 Al alloy Charpy specimen.

試験条件と同様に、試験片の支点間距離40 mmに相当する位置の節点を負荷方向(x軸方向)に対して拘束した。また、ハンマーは厳密には振り子運動をするが、試験片の弾性限内における変形は微小であるため、直線運動と仮定した上で、ハンマーおよび計装化衝撃刃のすべての節点に対して負荷方向(x軸方向)に初速度0.254 m/sを与えた。

## 3. 結果および考察

### 3.1 計装化シャルピー衝撃試験結果

Fig. 3は、くりぬき式および非くりぬき式衝撃刃を用いて行った、6061-T6 Al合金の計装化シャルピー衝撃試験結果である。図は、それぞれの歪ゲージで記録した荷重-変位曲線の原波形に重畳する鋸歯状の振動波を除去した<sup>19)</sup>修正波形である。この図から明らかなように歪ゲージ貼付位置の違いで、計測される荷重値は大きく異なる結果となった。15 mmでは、荷重の立上がりから最大荷重を経て立下がるまで振動が無い滑らかな波形である。一方、30, 45 mmおよびupperでは、除荷時に強く振動している。この傾向は、30 mmで最も顕著に現れた。

このことから、歪ゲージ貼付位置の違いは、計測される荷重値に大きく影響を及ぼすことが確認された。一方、衝撃刃形状の違いで比較した場合、非くりぬき式衝撃刃はくりぬき式衝撃刃に比べ、30, 45 mmおよびupperから得られる荷重-変位曲線の振動がわずかながら小さくなった。し

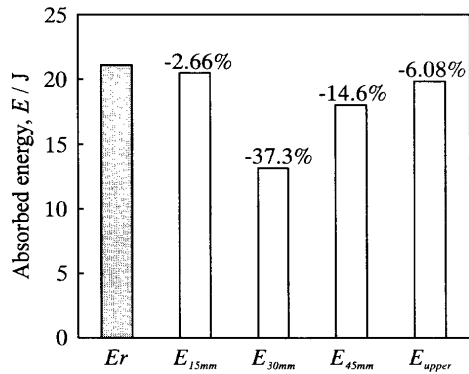


Fig. 4. Comparison of dial energy,  $E_r$  with absorbed energies,  $E_{15\text{mm}}$ ,  $E_{30\text{mm}}$ ,  $E_{45\text{mm}}$  and  $E_{\text{upper}}$  calculated from load-deflection curves recorded from specified strain gage positions in non-hollowed striker for V-notched 6061-T6 Al alloy specimen.

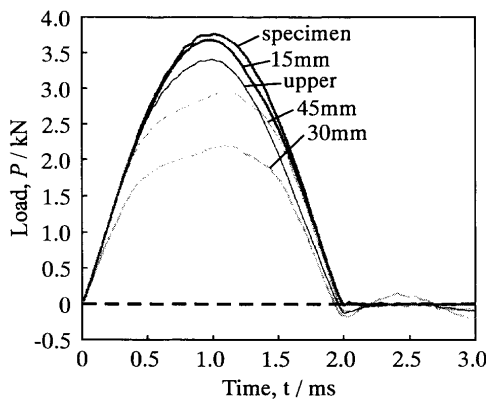


Fig. 5. Typical load-time curves recorded from specified strain gage positions in non-hollowed striker and specimen for low blow instrumented Charpy test of the unnotched 6061-T6 Al alloy specimen.

かしながら、その傾向はそれほど顕著ではない。従って、くりぬき式と非くりぬき式の衝撃刃形状の違いは、計測される荷重値にほとんど影響を及ぼさないことが判った。

Fig. 4は、6061-T6 Al合金の指針エネルギー  $E_r$  と非くりぬき式衝撃刃のそれぞれの歪ゲージから得られた計装化エネルギー  $E_{15\text{mm}}$ ,  $E_{30\text{mm}}$ ,  $E_{45\text{mm}}$  および  $E_{\text{upper}}$  の比較を示す。棒グラフ上に記載した数値は、指針エネルギーを基準とした計装化エネルギーの変化率である。なお、指針エネルギーは JIS Z 2242<sup>20)</sup> に従い、ハンマーの持上げ角度と振上がり角度から算出した。また、計装化エネルギーは JIS B 7755<sup>7)</sup> に従い、荷重の立上がりから最大荷重値の2%になる点の荷重-変位曲線下の面積から算出した。指針エネルギーに対する計装化エネルギーの減少率は、15, 30, 45 mm および upper でそれぞれ 2.66%, 37.3%, 14.6% および 6.08% となり 15 mm の位置で最も指針エネルギーに近い値となった。このことから、歪ゲージ貼付位置 15 mm が最も妥当な値を計測していることがわかる。

### 3.2 ローブロー計装化シャルピー試験結果

Fig. 5は、6061-T6 Al合金のローブロー計装化シャルピー試験における非くりぬき式衝撃刃に貼付されたそれぞ

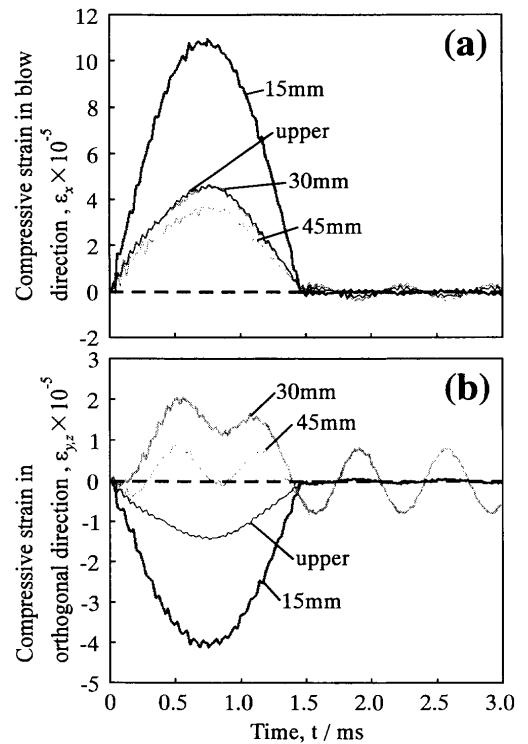


Fig. 6. Change in compressive strain with respect to time for specified strain gage positions in FEM analysis. (a) Compressive strains along the direction of blow ( $x$ -direction). (b) Compressive strains, orthogonal to the direction of blow for 15, 30, 45 mm and upper positions, respectively, in  $y$  and  $z$ -directions.

れの歪ゲージ、および試験片に貼付された歪ゲージより得られた荷重-時間曲線である。ローブロー計装化シャルピー試験においても、歪ゲージ貼付位置の違いで計測される荷重値は大きく異なる結果となった。

15 mm では、ローブロー計装化シャルピー試験特有の対称楕円形の波形を示しているのに対し、30 mm および 45 mm では、非対称な波形となっている。さらに、実際に試験片に負荷された荷重値と比較して、15 mm で計測された荷重値が、実際の荷重値に最も近い値となった。その差は最大でも 0.2 kN である。一方、30, 45 mm および upper で計測された荷重値は、15 mm で計測された荷重値よりもさらに低い値を示し、除荷後も、計装化シャルピー衝撃試験と同様の振動が認められる。従って、歪ゲージ貼付位置 15 mm が真の荷重値を計測するのに適していることが確認された。

### 3.3 過渡応答有限要素法解析結果-計測荷重に及ぼす歪ゲージ貼付位置の影響

Fig. 6(a)は、ローブロー計装化シャルピー試験の過渡応答解析におけるそれぞれの歪ゲージ貼付位置に対する荷重方向(歪ゲージ長さ方向 ( $x$ 軸方向))の圧縮歪の時間変化である。また、Fig. 6(b)は、荷重方向に対して垂直方向(歪ゲージ幅方向 (30, 45 mm では  $y$  軸方向, upper では  $z$  軸方向))の圧縮歪の時間変化である。15 mm では、荷重方向の圧縮歪は、ローブロー試験特有の対称楕円形の波形を

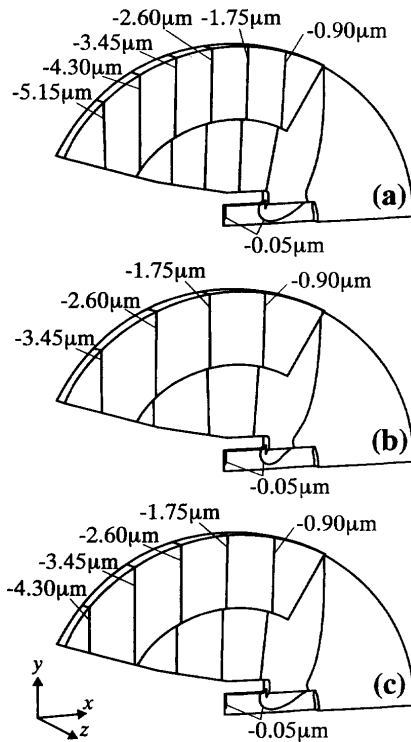


Fig. 7. Contour maps of  $y$ -direction displacement of the hammer (a) at 0.512 msec, (b) at 0.902 msec and (c) at 1.118 msec.

示している。また、垂直方向歪は、負荷方向の圧縮歪の時間変化に対応して引張歪となって変化している。一方、30 mm や 45 mm では、垂直方向に圧縮歪が生じ、強く振動した波形となっている。そのため、30 mm や 45 mm では、垂直方向の圧縮歪の増加に伴い負荷方向の圧縮歪は低下し、非対称な波形となったと考えられる。

Fig. 7は、Fig. 6(b)において30および45 mmの垂直方向の圧縮歪が最大となる時間(a)、その後、圧縮歪が低下し谷の値を示す時間(b)およびさらに圧縮歪が上昇し第2ピークとなる時間(c)におけるハンマーの $y$ 軸方向変位のコンター図である。(a)では切り込み部上部のハンマー先端側に近づくにつれて $y$ 軸方向マイナス側に大きく変動している。(b)ではその変動は緩和され、(c)では再び変動している。このハンマーの振動現象は、Fig. 6(b)における30 mm および45 mmの歪変化に対応している。

Fig. 8は、ハンマーの切り込み部先端の節点における $y$ 軸方向変位の時間変化である。この図とFig. 6(b)を比較して明らかなように、30 mm および45 mmの垂直方向歪は、ハンマーがマイナス側に変動した場合圧縮歪となり、ハンマーがプラス側に変動した場合引張歪となっており、ハンマーの $y$ 軸方向変位が示す振動現象と垂直方向歪の時間変化は対応している。これらの結果および以前にも報告している結果<sup>21)</sup>より、計装化衝撃刃が動的な荷重を受けた場合、切り込み底部近傍の30 mm および拘束されている45 mmでは、ハンマーの振動による力の影響を受けるため、垂直方向に圧縮歪が生じ、振動した波形となることが明らかと

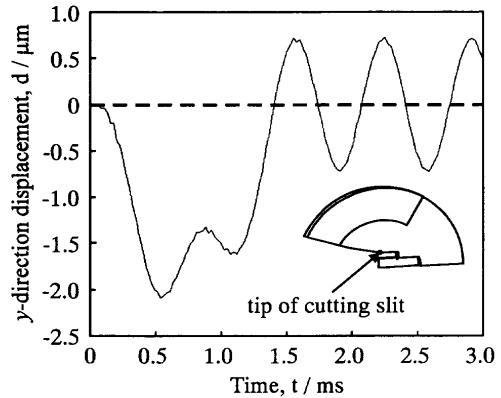


Fig. 8. Variation of  $y$ -direction displacement at the tip of cutting slit with respect to time upon impact.

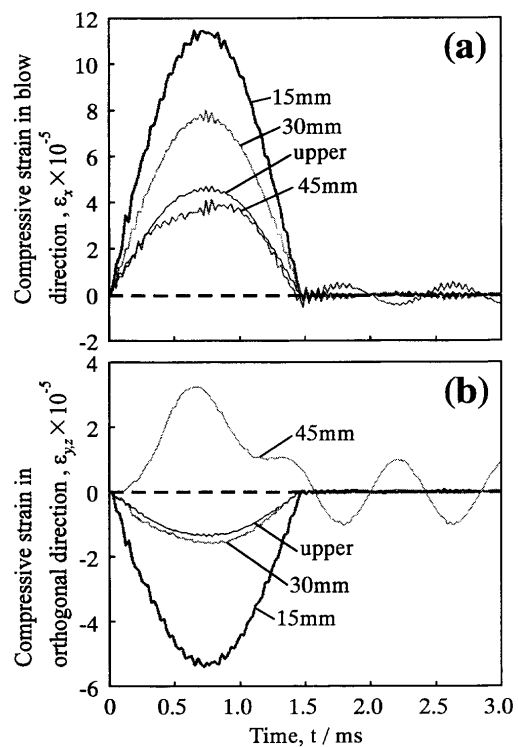


Fig. 9. Change in compressive strain with respect to time for specified strain gage positions in FEM analysis. (a) Compressive strains along the direction of blow ( $x$ -direction). (b) Compressive strains, orthogonal to the direction of blow for 15, 30, 45 mm and upper positions, respectively, in  $y$  and  $z$ -directions.

なった。

Fig. 9(a), (b)は、切り込みを深く導入し、30 mmの位置の拘束状態を解放して切り込み底部からの距離を遠くしたモデルの、負荷方向および垂直方向の圧縮歪の時間変化である。15, 30 mm および upper では、切り込み底部からの距離が離れることで、負荷方向の圧縮歪の波形は対称楕円形となっている。垂直方向歪は、負荷方向の圧縮歪の変化に対応して引張歪となって変化している。このことから、ハンマーの振動による影響を受けていないことがわかる。一方、切り込み底部直下の45 mmでは、ハンマーの振動の影響を強く受けるため、垂直方向歪は圧縮歪となり、負荷方向の

圧縮歪は低下し、非対称な波形となっている。従って、切り込み底部近傍および切り込みの無い拘束された位置では、ハンマーの振動の影響を強く受けるが、切り込み底部からの距離が離れ拘束が解放された位置では、ハンマーの振動の影響を回避できることが明らかとなった。

一方、実際の計装化シャルピー衝撃試験において計測される荷重値  $P$  は、歪ゲージの抵抗変化によって生じるブリッジ回路の出力電圧  $V$  の変化に荷重較正值  $C$  を乗じることで求められる。対辺2アクティブ法の  $V$  は、(4)式で与えられる<sup>22)</sup>。

$$V = \frac{R_A R_D}{(R_A + R_D)^2} \frac{2\Delta R_A}{R_A} e \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $R_A$  は衝撃刃の左右または上下の対称面に貼付された歪ゲージの抵抗値、 $R_D$  はダミーゲージの抵抗値であり、 $e$  は印加電圧である。つまり  $V$  は、衝撃刃に貼付された歪ゲージの抵抗変化  $\Delta R_A/R_A$  のみに依存する。 $\Delta R_A/R_A$  は(5)式によって与えられる<sup>22)</sup>。

$$\frac{\Delta R_A}{R_A} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、固有抵抗変化率  $\Delta \rho/\rho$  は、半導体歪ゲージの場合、(6)式で与えられる。

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = C_p \sigma \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $C_p$  は歪ゲージの感度軸方向に応力  $\sigma$  を加えたときの比例定数である。また、 $l$  は歪ゲージ長さ、 $A$  は歪ゲージの矩形断面積であり、歪ゲージ幅  $b$  と厚さ  $t$  の積で与えられる。 $t$  は微小であることを考慮すると、 $A=b$  となり、(5)式に代入して整理すると  $\Delta R_A/R_A$  は、(7)式で与えられる。

$$\frac{\Delta R_A}{R_A} = (C_p E + 1) \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta b}{b} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $E$  は半導体材料のヤング率である。(7)式より、 $\Delta R_A/R_A$  は、 $\Delta l/l$  で表される負荷方向の歪変化と  $\Delta b/b$  で表される負荷方向に対して垂直方向の歪変化によって支配される。

(7)式の第1項と第2項を比較した場合、第1項は第2項に比べ、数十倍も大きく、第1項の影響が支配的である<sup>22)</sup>。そのため、第2項は無視され、 $\Delta R_A/R_A$  は、 $\Delta l/l$  で表される負荷方向の歪変化のみに依存することとなる。切り込み底部近傍の歪ゲージ貼付位置 30 mm, upper および拘束を解放していない 45 mm では、ハンマーの振動の影響を受けるため  $\Delta l/l$  は低下し、 $\Delta R_A/R_A$  も低下する。そのため、 $V$  も低下し、最終的に  $P$  も低下する。従って、ローブロー計装化シャルピー試験において 30 mm, 45 mm および upper で計測

した荷重値は、実際に試験片に負荷された荷重値に比べ、低い値となったことが説明できる。また、 $\Delta l/l$  の波形がそのまま  $P$  の波形に反映されるため、30 mm および 45 mm では、非対称な波形となったことが説明できる。

以上の結果より、切り込み底部近傍に歪ゲージを貼付した場合、ハンマーの振動の影響を強く受けるために、正確な荷重値を計測することはできないことが判った。そのため、試験機を製作する際、歪ゲージ貼付位置には細心の注意が必要であり、歪ゲージは、ハンマーの振動の影響を受けない程度に切り込み底部から十分離れた拘束状態を解放した位置に貼付する必要がある。

#### 4. 結言

計装化シャルピー衝撃試験における計測荷重に及ぼす衝撃刃形状および歪ゲージ貼付位置の影響について調査し、その結果についてローブロー計装化シャルピー試験および過渡応答有限要素法を用いて解析した。

(1) 計装化シャルピー衝撃試験結果より、くりぬき式と非くりぬき式の衝撃刃形状の違いは、計測荷重値にほとんど影響しないが、歪ゲージ貼付位置の違いは計測荷重値に大きな影響を与える。

(2) 計装化シャルピー衝撃試験結果より、6061-T6 Al 合金の指針エネルギーを基準とした計装化エネルギーの減少率は、歪ゲージ貼付位置 15, 30, 45 mm および upper でそれぞれ 2.66%, 37.3%, 14.6% および 6.08% となり、歪ゲージ貼付位置 15 mm が、最も指針エネルギーに近い値となった。

(3) ローブロー計装化シャルピー試験結果より、歪ゲージ貼付位置 15 mm で計測される荷重値は、実際に試験片に負荷された荷重値に非常に近い値となる。

(4) 解析結果より、切り込み底部近傍ではハンマーの振動の影響を強く受けるため、正確な荷重値を計測できない。しかし、切り込み底部から十分離れた拘束が解放された位置に歪ゲージを貼付することでハンマーの振動の影響を回避でき、正確な荷重値を計測できることが判明した。

#### 文 献

- 1) N.Sugiura, E.Isobe, I.Yamamoto and T.Kobayashi: *ISIJ Int.*, **35** (1995), 419.
- 2) M.Yamashita, U.K.Viswanathan, I.Yamamoto and T.Kobayashi: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 1133.
- 3) M.F.Hafiz and T.Kobayashi: *Z. Metallkd.*, **89** (1998), 445.
- 4) T.Higashihara, T.Murakami, I.Yamamoto and T.Kobayashi: *J. Mater. Sci. Soc. Jpn.*, **33** (1996), 193.
- 5) T.Kobayashi, I.Yamamoto and M.Niinomi: *JTEV*, **21** (1993), 145.
- 6) ISO/CD 14556: Steel-Charpy V-notch pendulum impact test—Instrumented test method, ISO/TC 164/SC 4P/N191 (rev.2), (1998).
- 7) JIS B 7755: 金属用衝撃試験機—計装化装置, 日本規格協会, 東京, (1993).
- 8) JIS B 7756: 高分子材料用衝撃試験機—計装化装置, 日本規格協会, 東京, (1993).

- 9) ASTM Draft 7: Proposed ASTM Standard Method for Instrumented Impact test of Metallic Materials, ASTM, West Conshohoclen, (1998).
- 10) ESIS Draft 10: Proposed ESIS Instrumented Charpy-V Impact Method, ESIS, London, (1994).
- 11) T.Kobayashi, N.Inoue, A.Sakaguchi and H.Toda: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 78.
- 12) JIS Z 2202: 金属材料衝撃試験片, 日本規格協会, 東京, (1980).
- 13) M.Otani, T.Kobayashi, H.Toda and N.Inoue: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 607.
- 14) T.Kobayashi and M.Niinomi: *J. Mater. Test. Res. Assoc. Jpn.*, **1** (1986), 45.
- 15) S.Venzi, A.H.Priest and M.J.May: *ASTM STP*, **466** (1969), 165.
- 16) 技術資料金属材料の弾性係数, 日本機械学会, 東京, (1980).
- 17) 新版鉄鋼便覧改訂第5版, 日本鉄鋼協会編, 丸善, 東京, (1975).
- 18) L.S.Marks: *Mechanical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill Book Co., York, (1951).
- 19) T.Kobayashi, H.Matsubara and Y.Ueda: *Tetsu-to-Hagané*, **67** (1981), 2216.
- 20) JIS Z 2242: 金属材料衝撃試験方法, 日本規格協会, 東京, (1993).
- 21) I.Yamamoto and T.Kobayashi: *Int. J. Pressure Vessels Piping*, **55** (1993), 295.
- 22) 高橋 賞, 河井正安: 新版ひずみ測定入門, 大成社, 東京, (1998).