

初期界面き裂を有する接合板の界面破壊
(接着層のモードI破壊におけるひずみ速度の影響)

Interface Fractures on Bonded Plates with an Initial Interface Crack.
(The Effect of Strain Rates on Mode I Fracture in the Bonding Layer)

○学 中鶴 章典 (鹿児島大学)
正 有富 正男 (鹿児島大学)

正 小田美紀男 (鹿児島大学)
正 戸谷 眞之 (鹿児島大学)

Akinori NAKATURU, Mikio ODA, Masao ARITOMI, Masayuki TOYA
Kagoshima University, 1-21-40 Korimoto Kagoshima

Key Word: Fracture Toughness, Rate of Stress Intensity Factor, Interface Fracture, Bonded Plates, Dynamic Testing

1. まえがき

接着材で接合された部材の動的界面破壊 (接着層内での破壊) の動的依存性を調べるため、初期界面き裂を有する接合板に静的および動的負荷を与え、その接合板を破壊し、破壊靱性値 K_{Ic} と応力拡大係数の時間変化率 dK_I/dt の関係を調べる。また、広範囲の dK_I/dt を得るために、静的、自由落下式および空気銃式実験装置を用いて、三点曲げおよび一点曲げ試験を行っている。応力拡大係数は、き裂近傍にひずみゲージを貼付し、そのひずみゲージにより得られたひずみの値から算出している。¹⁾

2. 実験

2.1 試験片

Fig.1 に使用した試験片を示す。この試験片は、2枚のアルミ合金板 (Al2017) をエポキシ樹脂系接着剤で接着している。また、予き裂を確保するために、厚さ 0.08mm のテフロンテープを接合面に挿入している。初期き裂長さは 25mm、試験片の厚さは 5mm である。また、Table1 に使用したアルミ合金の機械的性質を示す。

応力拡大係数を測定するために、き裂近傍にひずみゲージを貼付している。ひずみゲージで測定されたひずみは、以下の式を用いて、応力拡大係数に変換する。

$$K_I = E \sqrt{\frac{8}{3} \pi r \cdot \epsilon_g} \quad (1)$$

ここで、 E は縦弾性係数、 r はき裂先端からひずみゲージ中心までの距離、 ϵ_g はひずみゲージによって得られたひずみである。接着面に沿って複数枚のひずみゲージを添付する事により、き裂の伝播速度を測定する。¹⁾

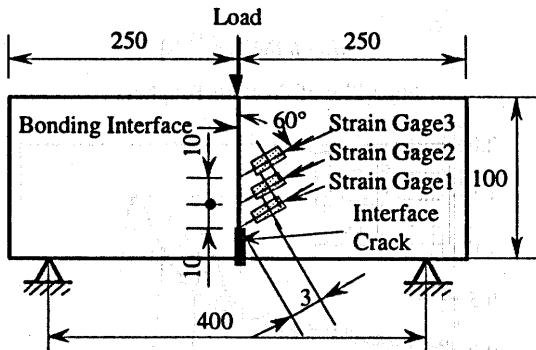


Fig.1 Specimens

Table 1 Mechanical Properties in the Aluminum Alloy

Young's Modulus	Density	Poisson's Ratio
73.5 [GPa]	2700 [kg/m ³]	0.33

2.2 実験装置

広範囲の dK_I/dt を得るために、Fig.2 と Fig.3 に示すような4種類の実験装置を用いている。それぞれの名前を簡易的に動的実験 A、B、C、D とする。動的実験 A、B および C、D は、衝撃棒をそれぞれ自由落下および空気圧で加速する。動的実験 A、D は、衝撃棒を直接試験片に衝突させて試験を破壊し、動的実験 B、C は、衝撃棒を入力棒に衝突させ、その衝突で発生した応力波を入力棒を通して試験片に伝え、試験片を破壊する。動的実験 A では、衝撃棒は直径 10mm、長さ 1m のアルミ合金丸棒を用いている。動的実験 B では、衝撃棒は直径 10mm、長さ 250mm および 500mm のアルミ合金丸棒を用い、入力棒は直径 10mm、長さ 1m のアルミ合金丸棒を使用している。動的実験 C では、衝撃棒と入力棒はステンレス製で、直径は 20mm、長さはそれぞれ 300mm、1.5m のものを用いている。動的実験 D では、衝撃棒は直径 20mm、長さ 100mm のステンレス丸棒を用いている。また、自由落下式実験は 3 点曲げ、空気銃式実験は 1 点曲げで実験を行っている。

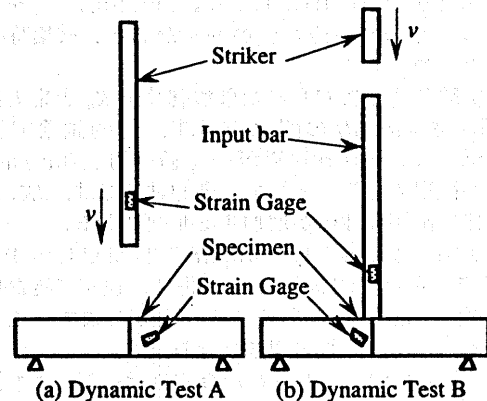


Fig.2 Experimental Setup for Drop Weight

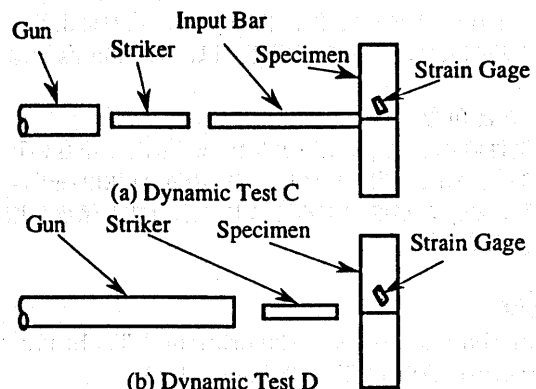


Fig.3 Experimental Setup for Air Gun

それぞれの実験の特徴は、入力棒を用いる場合は、試験片と入力棒が接しているため、衝撃棒を直接試験片に衝突させるより、片当りが少ない実験ができる。また、空気銃式は、自由落下式より衝撃棒を高速にできる。入力棒を用いた場合は、入力棒内を伝播する応力波を弾性限度以下にしなければならないので、衝撃棒を試験片に直接、衝突させた方が、高速変形の実験ができる。以上より、Table 2に示す変位速度で実験を行った。

Table 2 Range of Displacement Speed

	Displacement Speed (Striker Speed) [m/s]	dK/dt [MPa m ^{1/2} /s]
Static Test	$8.33 \times 10^{-6} \sim 8.33 \times 10^{-3}$	$10^{-2} \sim 10^2$
Dynamic Test A	0.3 ~ 2.5	$10^4 \sim 10^5$
Dynamic Test B	1.0 ~ 5.4	$10^4 \sim 10^5$
Dynamic Test C	6 ~ 12	$10^5 \sim 10^6$
Dynamic Test D	12 ~ 100	$10^6 \sim 10^7$

3. 実験結果

Fig. 4に実験によって得られた応力拡大係数 K_I の時間変動を示す。破壊靱性値 K_{IC} は、応力拡大係数の最大値であり、応力拡大係数の時間変化率 dK_I/dt は、応力拡大係数と時間軸との傾きである。

Fig. 4(a)は、静的3点曲げ試験によって得られた結果である。破線は、実験で得られた荷重を破壊力学ハンドブックなどに記載されている式²⁾より応力拡大係数に変換し、実線は、ひずみゲージの応答より応力拡大係数を求めている。この二つの線を比べると、良く一致しており、ひずみゲージによる測定の有効性がわかる。Fig. 4(a), (b)を見ると、変位速度（衝撃棒の速度）が速くなると、破壊時間が早くなることわかる。

Fig. 5に実験によって得られた破壊靱性値 K_{IC} と応力拡大係数の時間変化率 dK_I/dt の関係を示す。静的試験では、 dK_I/dt に関係なく、破壊靱性値が一定値（約1.7MPa m^{1/2}）であることが観察できる。そして、動的試験では、 dK_I/dt が増加するに伴い破壊靱性値が増加する傾向にある。

5種類の実験装置で得られた dK_I/dt を Table 2に示す。これより、静的試験と動的試験Aとの間に、測定できない領域（ $10^2 \sim 10^4$ MPa m^{1/2}/s）があることがわかります。この領域を測定することが、今後の課題となります。

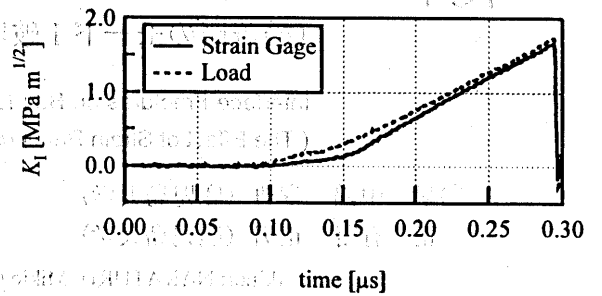
Fig. 6に接着面の沿って貼られたひずみゲージにより測定された応力拡大係数を示す。Gage1の最大値はき裂が進展した事を意味し、Gage2および3の最大値は、き裂が10mm、20mm進展した事を意味する。これにより、き裂の位置と時間より、き裂の伝播速度は、約640m/sとなる。

4. あとがき

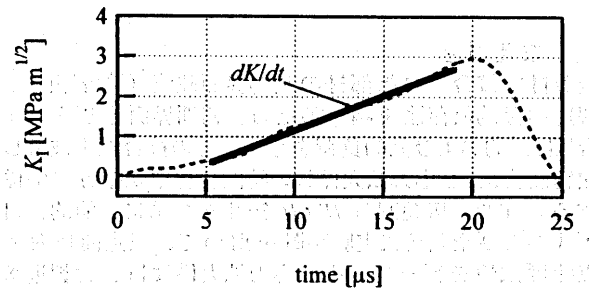
破壊靱性値は、 dK_I/dt が 10^2 MPa m^{1/2}/sより小さい時、一定値（約1.7MPa m^{1/2}）となり、 dK_I/dt が 10^4 MPa m^{1/2}/sより大きい時、 dK_I/dt が増加するにつれて応力拡大係数が増加する傾向にある。

参考文献

- Jonathan S Epstein, Experimental Techniques in Fracture, John Wiley & Sons, 1993
- 例えば、矢川元基、破壊力学、培風館、1988



$K_{IC}=1.66 \text{ MPa m}^{1/2}$, $dK_I/dt=10.56 \text{ MPa m}^{1/2}/\text{s}$
(a) Static Test (Displacement Speed: 100 mm/min)



$K_{IC}=3.08 \text{ MPa m}^{1/2}$, $dK_I/dt=1.74 \times 10^5 \text{ MPa m}^{1/2}/\text{s}$
(b) Dynamic Test C (Striker Speed: 6.5 m/s)

Fig. 4 Experimental Results

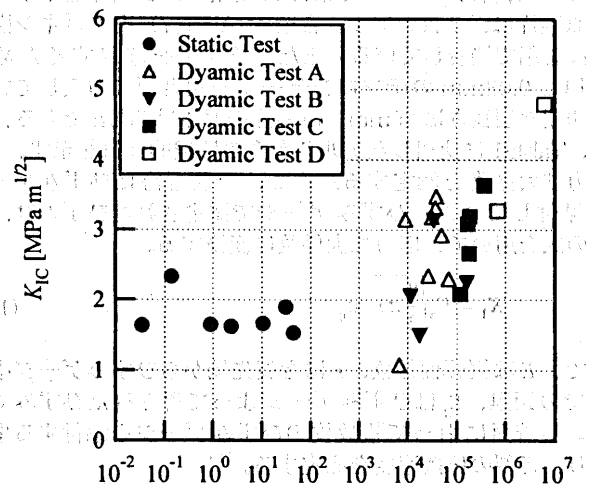
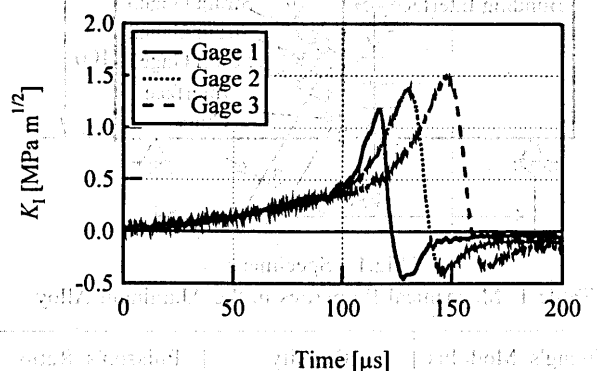


Fig. 5 Plot of Fracture Toughness



Dynamic Test C (Striker Speed: 1.4 m/s)
Fig. 6 Experimental Results