

混合 Mode I + II 荷重下における接着継手疲労き裂伝ば挙動

Fatigue crack growth behavior in adhesive joints under mixed-mode I / II loading

航空宇宙工学コース

材料強度学研究室 1255039 長谷川 剛

1. 緒言

近年、輸送機器分野では環境負荷低減を目的に、高機能材料を適材適所に用いるマルチマテリアル化が推進されている。マルチマテリアル化では、異種材料同士の接合が必要不可欠であり、これに接着接合が使用されることが多い。

一方、機械の破壊は約 80% が、疲労破壊が原因と言われている⁽¹⁾。疲労破壊はき裂の発生、成長および最終破壊といった経緯をたどる。疲労破壊に対する材料の寿命を予測するには、疲労き裂伝ば寿命を推定することが重要である。接着継手を有する機械、構造物では、複雑な荷重下でのき裂の伝ば寿命推定法が十分確立されているとは言い難い。

そこで、本研究では接着継手の Mode I, Mode II, および Mixed-Mode I+II 荷重下における疲労き裂伝ば試験を行い、疲労き裂の伝ばと破壊力学パラメータの関係を調査した。また、き裂の変形モードの違いによるき裂伝ば挙動と微視的な破面様相との関係についても検討を行った。

2. 材料および実験方法

2.1 試験片

本研究ではアルミニウム合金 A2017 を被着体として、エポキシ樹脂 2 液型構造用接着剤 (HUNTSMAN Corporation, Araldite2011) により接着した接着継手を作製した。表 1 に A2017 と Araldite2011 の機械的特性を示す。

Table. 1 Mechanical properties

	A2017	Araldite2011
Ultimate strength [MPa]	396	23.6
Yield strength [MPa]	298	
Young's modulus [GPa]	68.9	0.93
Poisson's ratio [-]	0.35	0.33
total Elongation [%]	19.5	19.7

接着剤は主剤と硬化剤を質量比 5 : 4 で混合し、真空減圧脱気法により 30 分間脱泡した。その後、エメリー紙 #500 で機械研磨を施した被着体の接着面に塗布した。接着厚さをテフロンシート及び治具を用いることで 0.2mm に制御しつつ、70°C, 1h で加熱硬化させ接着継手を作製した。本研究で用いた接着継手試験片の形状および寸法を図 1 に示す。対象とした変形モードは図 2 に示す Mode I, Mode II および Mixed-Mode I + II である。Mode I, Mixed-Mode では図 1-(a) に示す試験片を、Mode II では図 1-(b) に示す試験片を用いた。

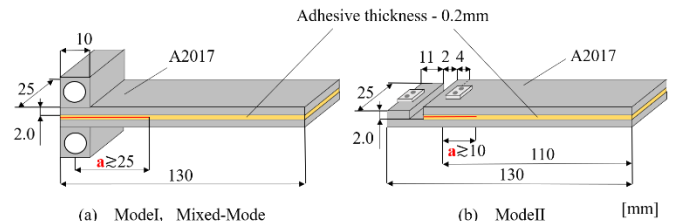


Fig. 1 Adhesive joints specimen

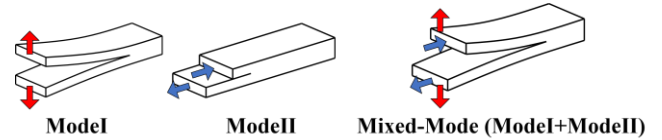


Fig. 2 Different modes of fracture

2.2 実験方法

Mode I では 2 重片持ちはり (Double Cantilever Beam) による DCB 試験, Mode II では端面切り欠き曲げ (End Notched Flexure) による ENF 試験, また Mixed-Mode (Mode I + Mode II) では混合モード曲げ (Mixed-Mode Bending) による MMB 試験を用いた。図 3 に MMB 試験の概略図を示す。

疲労き裂伝ば試験には油圧式疲労試験機 (島津製作所, EHF-F1) を用いた。試験条件は、繰返し速度 5.0Hz, 応力比 0.05, 正弦波, 荷重制御 (Mode I, Mode II, Mixed-Mode) および変位制御 (Mode I) とした。ENF, MMB 試験の支点間距離は 120mm とし, MMB 試験では Mode I と Mode II によるエネルギー解放率範囲がほとんど等しく ($\Delta G_I / \Delta G_{II} \approx 1$) なるようにジグを設定した。

き裂の長さの測定は、読み取り顕微鏡を用いて力学的に行った。MMB 試験では、ジグの荷重成分を力学的に分離し、Mode I 成分の ΔG_I と Mode II 成分の ΔG_{II} を計算し、全エネルギー解放率範囲 $\Delta G_{total} = \Delta G_I + \Delta G_{II}$ を用いた。

試験終了後、走査電子顕微鏡 (以下 SEM) による破面観察を行った。

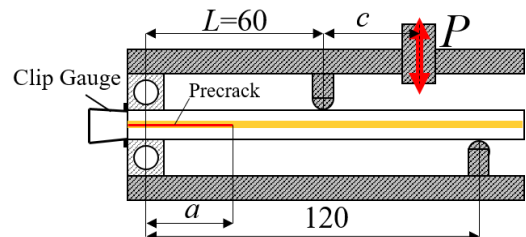


Fig. 3 Experiment equipment of MMB test

3. 実験結果

3.1 Mode I, Mode II き裂伝ば挙動

DCB および ENF で得られたき裂伝ば速度 da/dN とエネルギー解放率範囲 $\Delta G_I, \Delta G_{II}$ の関係を図 4 に示す。Mode I, Mode

IIにかかわらず多くの材料の疲労き裂伝ば挙動に見られるような、指数測が成立する事がわかった。

図4のMode I #1のみ伝ば速度が遅くなっているのは、複雑な破面を形成したためではないかと考えられる。Mode Iのエネルギー解放率範囲の下限値 $\Delta G_{I,th}$ を、 da/dN が $10^{-8}m/cycle$ ときの ΔG_I と定義したとき、 $\Delta G_{I,th}$ が $20[J/m^2]$ となった。

Mode IIのエネルギー解放率範囲 ΔG_{II} が $100[J/m^2]$ 以下で伝ば速度 da/dN にばらつきがみられた。Mode Iとは異なるが、き裂の伝ば位置による影響が da/dN が $5 \times 10^{-7}m/cycle$ 以下で顕著に表れると考えられる。Mode IIのエネルギー解放率範囲の下限値 $\Delta G_{II,th}$ を、 da/dN が $10^{-8}m/cycle$ ときの ΔG_{II} と定義したとき、 $\Delta G_{II,th}$ が $100[J/m^2]$ となった。

Mode IとMode IIのき裂伝ば挙動では、伝ば速度に関してMode IがMode IIより相対的に速く、Mode IIがよりき裂の伝ば抵抗に強いことが明らかとなった。

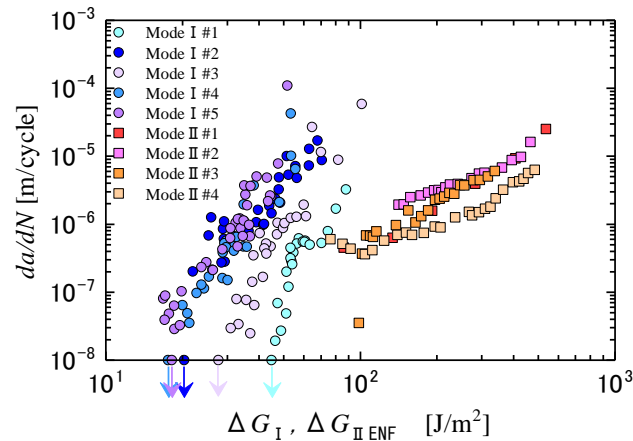


Fig. 4 Relationship between da/dN and ΔG_I , ΔG_{II}

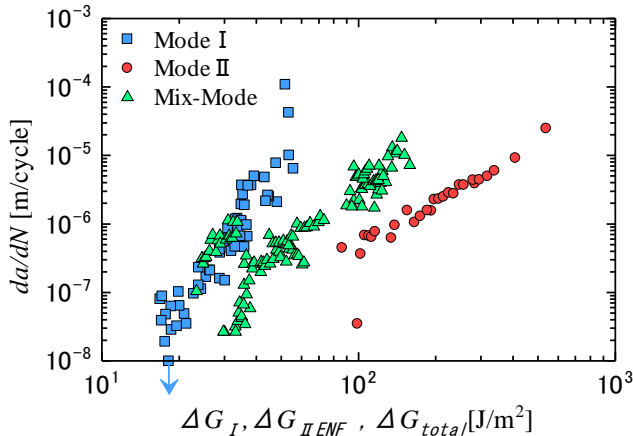


Fig. 5 Relationship between da/dN and ΔG_I , ΔG_{II} , ΔG_{total}

3.2 Mixed-Mode き裂伝ば挙動

DCB, ENF および MMB 試験で得られた da/dN とエネルギー解放率範囲 ΔG_I , ΔG_{II} , ΔG_{total} の関係を図5に示す。Mixed-Modeでは1つの試験片から得られる ΔG の範囲が狭いため8本の試験片から幅広いものをプロットしている。

Mixed-Modeではばらつきが大きく、 da/dN が $10^{-6} \sim 10^{-7}m/cycle$ の間で da/dN が ΔG に依存しないように見受けられる領域があった。Mixed-Modeはジグの設定でモ

ード比を($\Delta G_I/\Delta G_{II} \approx 1$)としているが、1つの試験を行った際、き裂が進むにつれMode II成分と比べるとMode I成分が低くなる傾向を示した。すなわち試験片の開口量が、き裂が進むにすれ想定している開口量より少ないものとなりモード比が $\Delta G_I/\Delta G_{II} \approx 1$ ではなく、1以下となっていると考えられる。 da/dN が ΔG に依存しないように見受けられる領域では、測定されたエネルギー解放率範囲が低く、モード比の差によって異なる伝ば速度を示していると考えられる。

3.3 破面観察

き裂伝ば試験後の破面をSEMで観察した一例を変形モードごとに図6に示す。矢印はき裂の伝ば方向を示す。

Mode Iでは、被着体のアルミニウム合金に施した機械研磨の溝の痕が接着剤の表面に明瞭に観察された。Mode IIでは、被着体のアルミニウム合金に施した機械研磨の溝の痕が、せん断によって摩擦で平滑化されていると思われる様相であった。Mixed-Modeでは開口と同時にせん断の影響を受け、Mode IとMode IIの破面が混在した粗い破面となった。このことからき裂の変形モードが微視的破面に影響を与えることが考えられる。

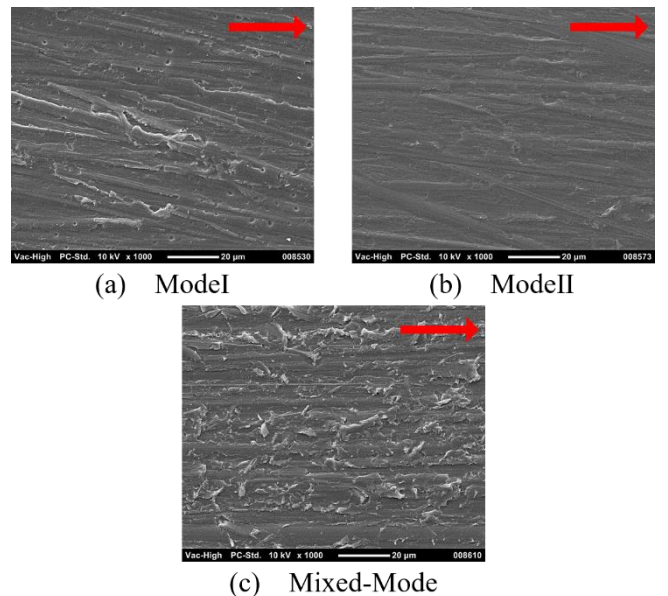


Fig. 6 Observations of fracture surface

4. 結言

- (1) Mode IとMode IIの da/dN とエネルギー解放率範囲 ΔG の関係には指数測が成り立つことが確認できた。
- (2) Mixed-Modeでは、モード比を($\Delta G_I/\Delta G_{II} \approx 1$)に制御する事が難しく、 da/dN が ΔG に依存しないように見受けられる領域があった。Mixed-Modeのき裂進展抵抗は、Mode Iより相対的に高くMode IIより相対的に低いものとなった。
- (3) 破面の結果、き裂の変形モードの違いによって微視的な破壊形態が変化する事がわかった。Mixed-ModeではMode IとMode IIの破壊形態の特色を併せ持つ破壊形態となった。

文献

- (1) 西田新一, “溶接構造物の疲労破壊と疲労強度因子(1)”, 溶接学会誌, 第62巻, 第8号(1993), pp. 595-598