接着継手の混合モード破壊基準†

結 城 良 治* 鄭 南 龍**
石 川 晴 雄*** 中 野 禪****

Mixed Mode Fracture Criteria on Adhesive Joints

by

Ryoji YUUKI*, Nam-Yong CHUNG**, Haruo ISHIKAWA***
and Shizuka NAKANO****

This study investigates the problem of applying fracture mechanics to evaluation of the strength of adhesive joints, focusing on mixed mode fracture criteria. Various types of adhesive joint specimens with a crack in an adhesive layer were prepared for the static tests and fatigue tests. The adherend was acryl plate and epoxy plate and the adhesive was cemedine 1500 and EP-007. The energy release rates G_I and G_{II} for various adhesive joints were analyzed by FEM and modified virtual crack extension method. Comprehensive mixed mode conditions from pure mode I to nearly pure mode II were realized in this study. The fracture toughness results obtained showed a mixed mode fracture criterion peculiar to adhesive joints, which can be characterized by G_I and G_{II} . It was found that the fatigue crack growth rate in various adhesive joints can be well characterized by the total energy release rate range ΔG_T . Therefore, different approaches are necessary for the fatigue crack growth and fracture toughness of adhesive joints under mixed mode conditions.

Key words : Adhesive joint, Fatigue crack growth, Cyclic debonding, Fracture toughness, Mixed mode crack, Energy release rate, Fracture mechanics

1 緒 言

構造用接着剤の発展に伴い、構造の合理化および軽量化を目的として接着継手が各種分野に適用されつつあるが、接着継手・構造の設計および強度評価にはまだ多くの課題が残されている。従来、接着継手の強度評価法として公称応力基準が用いられてきたが、この強度評価法は継手形状・負荷形式の異なる場合に適用できず、また接着界面端の局所応力やひずみを用いる評価法も提案されているが、その点の応力特異性の問題もあり、定量的評価法に至っていないのが現状である。

最近、接着継手の強度評価法として、破壊力学を用いた評価法が注目されている。^{1)~8)}すなわち、接着継手の強度は接着界面ないし接着層内のき裂の発生・成長過程により決まり、これを破壊力学的に評価・解析し、定量的評価法を確立しようとするものである。しかし、接着継手中のき裂は一般に混合モードとなり、その破壊力学パラメータの評価・解析に困難を伴い、また混合モード破壊基準も明確ではないのが現状である。

本研究では接着継手の混合モード破壊基準に焦点を

あて、混合モード状態が広範囲に異なる各種の接着継手の静的破壊試験および疲労き裂伝ば試験を行ない、接着継手特有の混合モード破壊基準について検討した。

2 実験方法

2・1 被着材と接着剤

本研究ではき裂が直接観察できる透明材料のアクリル樹脂とエポキシ樹脂を被着材として採用した。また接着剤として2液混合タイプのエポキシ系接着剤セメダイン 1500 と EP-007 を使用した。被着材および接着剤の機械的性質を Table I に示す。主材と硬化剤（いずれもポリアミド）の混合比は 1:1 とした。

Table I. Mechanical properties of adhesives and adherends.

Mechanical properties Specimen materials		Young's modulus E MPa	Poisson's ratio ν	Tensile strength σ_t MPa
Adherends	Acryl	2941.2	0.345	61.8
	Epoxy	2431.4	0.34	61.5
Adhesives	Cemedine 1500	2058.8	0.4	
	EP-007	1127.5	0.41	

† 原稿受理 平成元年11月4日 Received Nov. 4, 1989

* 正 会 員 東京大学生産技術研究所 東京都港区六本木, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Roppongi, Minato-ku, Tokyo

** 崇田大学校 韓国ソウル市, Soong Jun University, Seoul, Korea

*** 正 会 員 電気通信大学 調布市調布ヶ丘, University of Electro-Communications, Chofugaoka, Chofu

**** 機械技術研究所 つくば市並木, Mechanical Engineering Laboratory, Namiki, Tsukuba

Fig. 1. Shapes and dimensions of various adhesive joints.

2・2 試験片の作成

本研究では Fig. 1 に示す 5 種類の接着継手試験片を用意した。いずれも被着材は同一として、純粋モード I となる DCB 継手から、混合モードとなる SLJ 継手、CLS 継手さらにモード II が支配的となる TCLS 継手、CS 継手を試験に供した。

各試験片の接着は被着材と所定の寸法に機械加工後、接着面を # 1000 のエメリーペーパーで十分研磨し、アセトンで洗浄後、水洗いして乾燥し、上述の接着剤を用いて加圧力および接着厚さが一定となるように接着治具に固定したまま電気炉内で 60°C、2 時間硬化処理を行った。

各試験片の予き裂導入に際しては接着層の厚さを一定に保つため、試験片の両側にテフロンシートをはさみ接着した。各試験片の接着層の厚さはアクリルの場合 0.1 mm、エポキシの場合約 0.02 mm とした。

2・3 試験方法

静的試験はき裂を入れた各種継手を変位速度 0.2 mm/min で引張り、荷重-荷重点変位を記録した。き裂の成長を確認した後、除荷を行ない、き裂長さを測定し、再び負荷を行ない一つの試験片でき裂長さの異なる多数の破壊じん性値を得た。また疲労試験は変位制御下で応力比 $R=0.1$ 、周波数 3 Hz で行なった。き裂長さの測定は目視で行なった。また、各試験片につき、き裂長さを変化させ、荷重-荷重点変位の測定によりコンプライアンスを計測した。

3 破壊力学パラメータの評価法

接着継手のき裂の破壊力学パラメータとしてエネルギー解放率 G がよく用いられる。 G は次式のようにコンプライアンスの実測から実験的に求められる利点がある。

$$G_T = G_I + G_{II} = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{dC}{da} \quad (1)$$

ここで P は負荷荷重、 B は板厚、 a はき裂長、 C はコンプライアンスである。全エネルギー解放率 G_T はコンプライアンスの変化率を実測することにより求められる。しかし、モード I およびモード II に対応する G_I と G_{II} の分離評価には特別の工夫が必要となる。本研究ではこの分離評価に FEM 解析を援用することにした。

まず接着層中に各種の長さのき裂を想定し、FEM 弾性解析を行ない、著者らが開発した改良仮想き裂進展法の基づくパソコン用ポストプロセッサ CRACK

/PC を用いて効率のかつ精度良く G_I および G_{II} を計算した。Fig. 2 は Fig. 1 に示した各種継手試験片（被着材はアクリル、接着剤はセメダイン 1500）について解析により求めた G_I/G_{II} の比を示す。純粋モード I となる DCB 継手に加え、試験片形状を工夫することにより広範囲な混合モード状態が実現できることが分かる。特に CLS にテーパをつけた TCLS-B、C タイプの試験片では純粋モード II に近い状態であることが分かる。

本研究では G_T はコンプライアンスの測定から実験的に求め、混合モードクライテリオンを考える場合には G_I と G_{II} の分離評価が必要となり、この分離には解析から求めた G_I/G_{II} の比を利用することにした。¹⁾

4 破壊じん性と混合モードクライテリオン

4・1 DCB 試験片の場合

Fig. 2. Numerical results of G_I/G_{II} for various adhesive joints.

まず純粋モード I となる DCB 試験片の静的な破壊じん性の実験結果を Fig. 3, 4 に示す. Fig. 3 は被着材がアクリルの場合, Fig. 4 はエポキシの場合であるが, いずれの場合も広範囲のき裂長さに対して, ばらつきは大きいもののほぼ一定の特性を示していると考えられる. 接着剤はいずれの場合も同一のセメダイン 1500 を用いたが, 破壊じん性の平均値はアクリルの場合 13.7 N/m, エポキシの場合 134.0 N/m となり, 1 オーダーほどの相違があることが注目される.

4・2 SLJ試験片の場合

つぎに混合モードとなる SLJ 試験片の破壊じん性の実験結果を Fig. 5 に示す。この場合前述のように解析から得られた G_I/G_{II} の比を用いて、 G_I と G_{II} を分離して示した。この場合もクリティカルな G_c および G_{Ic} 、 G_{IIc} はき裂長さの変化によらずほぼ一定となり、破壊力学パラメータとして G の有効性が確認できた。

Fig. 3. Fracture toughness values of acrylic DCB adhesive joints.

Fig. 4. Fracture toughness values of epoxy DCB adhesive joints.

Fig. 5. Fracture toughness values of acrylic SLJ adhesive joints.

Fig. 5 はアクリルを被着材としてセメダイン 1500 で接着したものであるが、同一材および同一接着剤の Fig. 3 の DCB の結果と比較して、両者の G_{Ic} はほぼ同一レベルにあり、この両者の結果のみを見る限り、破壊じん性に及ぼすモード II 成分の寄与は極めて小さく、モード I 成分にのみ支配されているように見える。実際、筆者らの前報¹⁾や複合材料のデイルミネーションに関する Rybichi¹¹⁾らもこのような結論を導いている。なお、エポキシについても SLJ を用いた試験を行なったが、すべて母材側で破壊し、データが得られていない。

4・3 各種継手の混合モード破壊基準

Fig. 6 は Fig. 1 に示したすべての継手について破壊じん性の各モード成分値 G_{Ic} , G_{IIc} で整理した結果を示す。SLJ よりさらにモードⅡ成分が大きい CLS, TCLS, CS 継手では G_{Ic} が低下し、接着継手固有の G_{IIc} に収束する傾向がある。この G_{IIc} 値は G_{Ic} の 3 ~ 4 倍となり、この結果は一般に接着ははく離に弱く、せん断に強いことと対応する。

従来せん断荷重を代表する試験として SLJ タイプが主に用いられていたが、SLJ だけでは不十分であり、広範囲な混合モード状態を実現して初めて、接着継手の混合モード破壊基準が明らかになった。¹²⁾

Fig. 6 はアクリルのセメダイン 1500 接着の結果であるが、被着材を同一として、接着剤をやや弱い EP-007 に変え行なった結果を Fig. 7 に示す。破壊じん性値は低下しているが混合モード破壊基準としては同一の傾向が得られた。

なお、本研究では破壊はモード成分によらず、すべ

Fig. 6. Mixed mode fracture toughness for various adhesive joint (Cemadine 1500).

Fig. 7. Mixed mode fracture toughness for various adhesive joint (Cemadine EP-007).

て接着界面に沿って進行した。

5 静的破壊の混合モード破壊基準の検討

5・1 混合モード破壊基準の定式化

以上の接着継手の破壊じん性の結果から、混合モード破壊基準として定式化すると以下の2通りの方法が考えられる。純粋モードIの破壊じん性値を G_{Ic}^* 、純粋モードIIのそれを G_{IIc}^* とすると、

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}^*}\right)^2 + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}^*}\right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

で表わすことも可能である。しかし、Fig. 6の結果から G_I が支配的な領域も存在し、次のような2パラメータ、2クライテリオンも考えられる。

すなわち、 G_I が支配的な領域では、

$$G_I \geq G_{Ic}^* \quad (3)$$

また G_{II} が支配的な領域では、

$$G_r = G_I + G_{II} \geq G_{IIc}^* \quad (4)$$

となる考え方も成立する。試みに Fig. 6 の結果を G_r

で再整理すると Fig. 8 となり、 G_{II}/G_I が大きくなると一定ないし飽和する傾向がうかがえる。2つの考え方を図示すると Fig. 9 となり、どちらが良いかは今後の詳細かつ系統的な検討を必要とする。

5・2 均質材の混合モード破壊基準との比較

均質材中の混合モードき裂のクライテリオンについてすでに多くの説があるが、一般に $\sigma_{\theta \max}$ クライテリオンが良く用いられる。均質材中の混合モードき裂は屈折し、その破壊じん性はモードIの破壊じん性に支配されていると考えられている。一方接着継手では混合モードでも接着層のない界面を直線的に進展するため、均質材とは全く異なるクライテリオンが必要となる。

試みに Fig. 9 に均質材のクライテリオンも併記した。一般に接着界面の破壊じん性・抵抗は均質母材のそれより小さく、それ故接着界面に沿ってき裂が進展しやすい。接着が強く、被着材単体の強度が小さい場合に

Fig. 8. Relation between critical total energy release rate and G_{II}/G_I .

Fig. 9. Mixed mode fracture criteria for adhesive joints.

は、モード I では接着層をき裂が進展するが、混合モードになると被着材側へき裂が進展することも生じ得る。実際、本研究でもエポキシ材をエポキシ系接着剤で接着すると、DCB ではアクリルに比べて大きな G_{Ic} 値が得られたが、SLJ や他の継手では母材で破壊した。同様な現象は FRP の接着継手の実験でもしばしば見られる。このような場合、Fig. 9 のように接着継手および均質材の破壊じん性の混合モードクライテリアを同一図上にプロットすれば、母材破壊が接着界面破壊かを容易に判定できるものと思われる。

6 混合モード疲労き裂伝ば特性

Fig. 1 に示す各種継手の疲労き裂伝ば試験も併せて

実施した。アクリルを被着材とし、セメダイン 1500 および EP-007 の接着継手の疲労き裂伝ば速度を全エネルギー解放率範囲 ΔG_T で整理した結果を Fig. 10, 11 に示す。混合モード比が異なる継手のデータが ΔG_T で統一的に評価できることが分かる。すなわち、接着界面に沿う疲労き裂伝ば速度 da/dN は、次式で表すことができることが明らかになった。^{6), 12), 13)}

$$da/dN = C(\Delta G_T)^m \quad (5)$$

上式の材料定数 C , m は継手形状・寸法に依存しない接着界面固有のき裂伝ば抵抗を示すものと考えられる。また、 da/dN を ΔG_I や ΔG_{II} でも整理してみたが、継手形状により全く異なった特性となった。Fig. 11 から分かるように EP-007 の方が伝ば抵抗が弱い。一般に接着界面の疲労き裂伝ば速度は母材より早く、かつ m が大きい傾向にある。Fig.

12 は DCB 接着継手のエポキシ材の疲労き裂伝ば特性の一例を示す。この場合、界面破壊、擬集破壊、被着材破壊と破壊形態が変化する現象が生じたが、それぞれの破壊については ΔG_T で特性づけられると思われる。またこの現象は、界面・被着材・被着材の伝ば抵抗がこの場合あまり差がないことに起因するものと考えられる。

また接着継手の混合モード破壊基準は、静的破壊と

Fig. 10. Mixed mode fatigue crack growth properties of various adhesive joints (Acryl, Cemedine 1500).

疲労破壊で全く異なることが明らかとなった。

7 結 言

接着継手の強度を破壊力学的に評価する際, 特に重要と考えられる混合モード破壊基準について検討し, 以下の主な結論を得た。

(1) 接着継手の形状を工夫し, 広範囲な混合モード状態を実現し, 各種継手の静的破壊実験を行った。接着継手特有の混合モード破壊基準を明らかにした。

(2) 接着継手の破壊力学パラメータ G_I , G_{II} の評価法として FEM 解析を援用し, G_I/G_{II} の比を用いて分離評価する方法を提案した。

(3) 静的破壊の混合モード破壊基準として, 2 パラメータ, 2 クライテリオンの定式化を提案した。また均質材のクライテリオンを同一図に表示し, 母材破壊か接着界面破壊かを簡便に判定する方法を示した。

(4) 接着継手の静的破壊と疲労破壊とは全く異なる混合モード破壊基準が必要となることを明らかにした。接着継手の混合モード疲労き裂伝ばは全エネルギー解放率範囲 ΔG_T で統一的に評価で

Fig. 12. Fatigue crack growth of DCB adhesive joint (Epoxy, Cemedine 1500).

Fig. 11. Mixed mode fatigue crack growth properties of various adhesive joints (Acryl, Cemedine EP-007).

きた。

(平成元年 9 月 27 日 第 5 回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 鄭 南龍, 結城良治, 石川晴雄, 中野 禪, 日本機械学会論文集, A-54, 1895 (1988).
- 2) G. G. Trantina, J. Compos. Mater., **6**, 371 (1972).
- 3) S. Mall, M. A. Rezaizadeh and G. Ramamurthy, Trans. ASME, J. Eng. Mater. and Technol., **109**, 17 (1987).
- 4) R. A. Everett, NASA TM-84504, National Aeronautics and Space Administration (1982).
- 5) T. R. Brussat and S. T. Chiu, Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol., **100**, 39 (1978).
- 6) S. Mall and W. S. Johnson, ASTM STP 893, 322 (1986).
- 7) C. Lin and K. M. Liechti, J. Adhes., **21**, 1 (1987).
- 8) S. Mall and K. T. Yun, J. Adhes., **23**, 215 (1987).
- 9) 石川晴雄, 中野 禪, 結城良治, 鄭 南龍, 日本機械学会論文集, A-55, 937 (1989).
- 10) CRACK/PC マニュアル (1989) CRC (株)
- 11) E. F. Rybichi, T. D. Hernandez, Jr., J. E. Deibler, R. C. Knight and S. S. Vinson, J. Compos. Mater., **21**, 105 (1987).
- 12) 鄭 南龍, 結城良治, 石川晴雄, 中野 禪, 日本機械学会論文集, A-55, 1984 (1989).
- 13) 北條正樹, C. G. Gustafson, 田中啓介, 林 龍一, 材料, **36**, 222 (1987).