

令和 4 年 8 月 30 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15215

研究課題名（和文）凹凸形状クラックアレスターを有する接着接合継手の接着はがれ進展挙動予測

研究課題名（英文）The estimation of disbond behavior of adhesively-bonded joints with the crack arrester of a convex/concave shape

研究代表者

安岡 哲夫（Yasuoka, Tetsuo）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員

研究者番号：80746735

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、接着接合部の接着層におけるき裂進展をアレストする目的で、被着材表面に矩形の凹凸形状を形成することを提案し、この凹凸形状が二重片持ち梁試験片のき裂進展抵抗を増加させることを解析的および実験的に明らかにした。き裂が凹凸形状周辺に達すると、接着層では応力分布が変化し、被着材ではひずみエネルギーが蓄積され、それらはき裂先端の応力集中を低減させ、結果としてき裂進展抵抗増加をもたらした。凹凸形状がき裂進展経路を遮らない場合でも、き裂進展がアレストされた点は注目される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脱炭素社会実現のため、航空機の二酸化炭素排出削減が求められている。その実現のアプローチは様々にあるが、機体軽量化による燃費性能改善は1つの手段である。近年は複合材適用により機体軽量化が進んでいるが、更なる軽量化達成にはボルトやリベットを使用しない継手構造の適用が不可欠である。接着接合継手はそれを実現できるが、クラックアレスター技術の構築が未解決課題である。本研究はこの課題解決に資するものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, a rectangular convex/concave shape formed on adherend surfaces for the purpose of arresting crack growth in bondline of adhesively bonded joints was proposed, and it was analytically and experimentally revealed the convex/concave shape increased crack propagation resistance for double cantilever beam specimens. When the crack reached around the convex/concave shape, the stress distribution in the bondline changed and strain energy was accumulated in the adherend, which dispersed the stress concentration at the crack tip, resulting in increase of the crack propagation resistance. It is noteworthy that the crack growth was arrested even when the convex/concave shape did not interrupt the crack path.

研究分野：接着接合、破壊力学、複合材料、航空機構造

キーワード：クラックアレスター VCCT き裂進展解析 DCB試験 接着接合

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 航空機構造に CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer、炭素繊維強化ポリマー) の適用が一般化する中、熱膨張の観点で CFRP と相性が良く、かつ強度の高いチタン合金 (Ti-6Al-4V) が継手金具として多用されている。現在、CFRP 部材とチタン合金金具の継手はボルトやリベットによる機械締結継手が適用されているが、エポキシ樹脂等の接着剤を用いた接着接合継手にする事で、表面平滑化による空力特性向上や、応力集中低減、継手軽量化を達成することができる。しかしながら、航空機構造に接着接合継手を適用する場合、レギュレーション⁽¹⁾上、接着はがれが生じてもそれが一定以上に拡大しないようクラックアレスターを有する構造としなければならず、接着接合継手実現の障壁となっている。

(2) クラックアレスターの適用方法として、ファスナ (ボルト、リベット) を用いる方法^(2, 3)、炭素繊維で接着層を補強する方法⁽⁴⁻⁶⁾、被着材に突起を設ける方法⁽⁷⁻⁹⁾、接着層内に異なる剛性の材料を設置する方法⁽¹⁰⁻¹²⁾等が提案されている。これらのうち、ファスナを用いる方法は既に実用化されているが、穴を開けるため接着接合の利点が減少するという問題がある。また、その他の方法は、製造の複雑さや工程コストの問題から、実用化には至っていない。そのため、より簡単に、より低コストで製造できる革新的なクラックアレスターが求められている。

(3) 著者らは、被着材 (チタン合金を想定) に接着層厚さ (0.24mm 程度) より小さい寸法の凹凸形状を形成し、これが簡便かつ低コストなクラックアレスターとしてき裂進展を阻害できる可能性があると考えた。このような微細な凹凸形状は、精密加工やレーザー照射表面処理によって形成が可能である。しかしながら既往の研究では、凸形状または凹形状のクラックアレスターを適用した接着接合構造に関して、そのき裂進展の挙動 (クラックアレスト性) や、クラックアレストのメカニズムについて説明するものはない。そこで本研究では、これらについて有限要素法を用いて解析的に評価を実施するとともに、実験的な検証を行った。

2. 研究の目的

(1) 本研究ではチタン合金基材の接着接合継手を考え、チタン合金基材に部分的に凸形状または凹形状を形成し、その周辺領域におけるき裂進展挙動を明らかにし、クラックアレスト性について評価することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) クラックアレスト性に影響する因子として、材料の特性 (物性値)、試験片の形状および寸法、き裂進展経路、破壊モードがあげられる。実際の航空機構造における接着接合継手の形態は様々ではないが、本研究ではひとまずこれらの因子を固定して検討を進めた。

(2) 材料は、被着材としてはチタン合金 (Ti-6Al-4V) を、接着剤としてはエポキシ系フィルム接着剤 (AF163-2M) を想定した。試験片形状はモード I の単一モードで考え、ASTM D5528 に準拠した DCB (Double cantilever beam) 試験片の形状および寸法を図 1 に示す。初期き裂長さは 50mm とし、接着層厚さは 0.24mm である。凹凸形状は初期き裂先端前方 5mm の位置から開始するように設置した。凹凸形状の高さは 0.08mm であり、長さは 0.2mm を標準の寸法とし、1.2mm まで変化させて検討した。

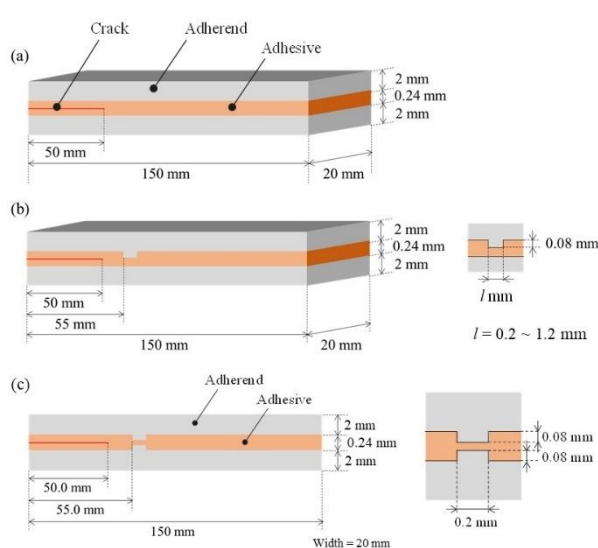


図 1 評価対象とした試験片の形状および寸法。
(a)凹凸形状なし、(b)片面に凸 (凹) 形状を形成、(c)両面に正対して凸 (凹) 形状を形成。

(3) 上述した試験片について、解析的検討を行った。解析は汎用有限要素解析ソフトウェア ABAQUS を使用し、2 次元モデルで解析を行った。要素タイプは 4 節点平面ひずみ要素 (CPE4) とした。き裂先端前方での接着層要素サイズ (厚さ方向) は 0.02mm とし、接着層の大きさに比べて十分小さくメッシュを切っている。被着材を弾塑性体、接着剤を弾性体とし、仮想的な開口法

(Virtual Crack Closure Technique、VCCT)を用いてき裂進展解析を行った。き裂進展経路は接着層の中心を通り、凸形状周辺では凸形状のそばを通過し進展する。境界条件としては試験片右端中央部を固定し、左端上下にそれぞれ最大 10mm ずつ強制変位を与え、DCB 試験を模擬した。き裂進展抵抗の評価パラメータとして、次式で表される DCB 試験片のエネルギー解放率を「見かけの破壊靱性」と定義し、使用した。

$$G_I = \frac{3P\delta}{2ab} \quad (1)$$

ここで、 P は外力、 δ は開口変位、 a はき裂長さ、 b は試験片幅である。見かけの破壊靱性は、自由界面(き裂面)形成に必要なエネルギー、弾性ひずみエネルギー、塑性散逸エネルギーを含んでおり、き裂進展抵抗あるいは破壊抵抗を意味する。

(4) 上述した試験片について、実際に試験片を作成し、き裂進展試験を行ってき裂進展抵抗を評価した。試験片寸法は同じであるが、接着層厚さは製作の都合上 0.48mm となっている。片面に凸形状を形成したもの、両面に正対して凸形状を形成したものの 2 種類を製作した。凸形状(長さ 0.2mm × 高さ 0.08mm)は精密加工により形成し、オートクレーブプロセスにより試験片を製作した。ねじ式試験機を用いて DCB 試験を行い、き裂開口に伴う荷重—変位を取得するとともに、き裂進展量をクラックゲージで計測した。

4. 研究成果

(1) 片面に凸形状を形成した場合の解析結果について、荷重—変位線図を図 2 に示す。き裂の開始により荷重が低下した後再び荷重が上昇し、やがて最大値を取った後に荷重が急低下する様子が観察された。この上昇の度合いは、凸形状の長さが長いほど大きくなった。またき裂進展に伴う見かけの破壊靱性の変化について図 3 に示す。見かけの破壊靱性は、き裂進展開始直後はおおよそ一定となっているが、凸形状が近づくとき急上昇した。この上昇の度合いは、凸形状の長さが長いほど大きくなっていった。言い換えると、凸形状の存在によってき裂進展抵抗が増加するということであり、クラックアレスト性があるということが出来る。一方、片面に凹形状を形成した場合については、クラックアレスト性は確認できるものの、見かけの破壊靱性の上昇度合いは凸形状に比較すると小さかった。

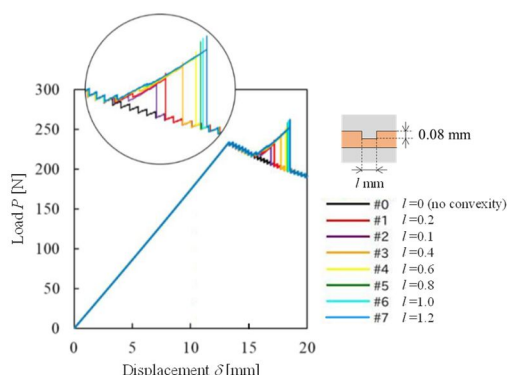


図 2 解析結果の荷重—変位線図

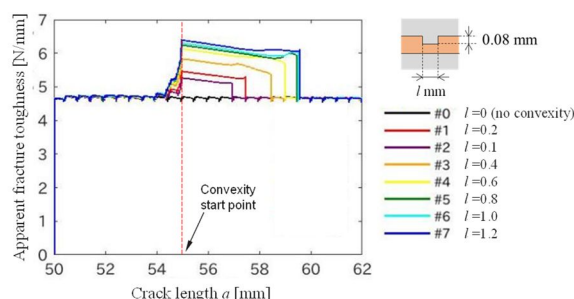


図 3 き裂進展に伴う見かけの破壊靱性

(2) 本成果で注目すべき点は、破壊モードの変化がないにもかかわらず、き裂進展抵抗が増加している点である。すなわち、き裂が直線であり蛇行していない、またき裂進展経路上に障害物がないにもかかわらず見かけの破壊靱性が向上していた。この理由について、解析結果を詳細に評価し説明した。すなわち、凸形状の存在によって接着層内の応力分布が変化し、それによってき裂先端の応力集中が低減したこと、凸形状に起因して剛性変化や応力集中が生じることで被着材にひずみエネルギーが蓄積され、き裂面形成に分配されるエネルギーが減少したこと、この 2 点によりき裂進展抵抗が増加したことを確認した。

(3) 両面に正対して凸形状を形成した場合の解析結果について、き裂進展に伴う見かけの破壊靱性の変化を図 4 に示す。凸形状を片面のみに配置した場合と比べ、正対して配置すると見かけの破壊靱性が大幅に向上する結果となった。

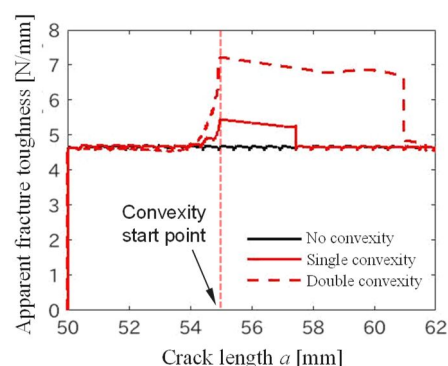


図 4 両面に凸形状を形成した場合(破線)と片面のみ形成の場合(実線)の見かけの破壊靱性。

(4) 片面のみ凸形状を形成した試験片について、DCB 試験結果を図 5 に示す。変位 0.8mm で接着界面の破壊が生じ、荷重低下するとともに、その後き裂の成長が確認された。凸形状がなければ、き裂発生後は徐々に荷重低下するはずだが、凸形状によるき裂進展抵抗の効果により、荷重が上昇している。き裂が凸形状位置（き裂長さ 55mm の位置）に達すると、一気にき裂進展が進む点も解析結果と同じであった。また両面に正対して凸形状を形成したものは、片面のみ形成のものより大きな荷重まで耐えることができ、解析結果と定性的に合致した。

(5) 以上より、提案する凸形状クラックアラスタについて、解析的、実験的にその有効性を示すことができた。

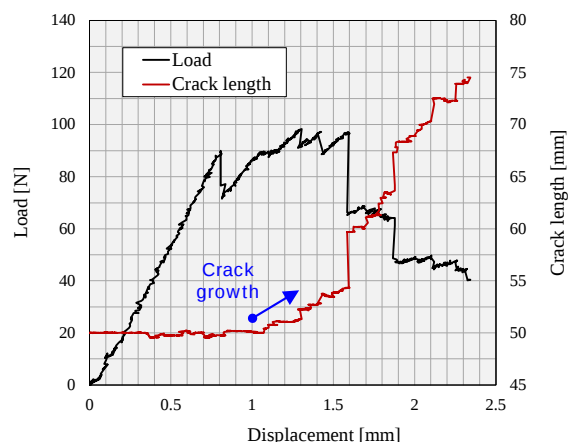


図 5 片面のみ凸形状を形成した場合の荷重—変位線図（黒線）とき裂進展量（赤線）。

<引用文献>

- (1) 国土交通省航空局，耐空性審査要領，第 II 部 3-10-3-1
- (2) Moroni, F., Pirondi, A., "Technology of Rivet: Adhesive Joints", In Hybrid Adhesive Joints, da Silva, L. F. M., Pirondi, A., Öchsner, A., Eds.; Springer: Berlin, 2011; Vol. 6, 79-108.
- (3) Floros, I., Tserpes, K., "Numerical Simulation of Quasi-static and Fatigue Debonding Growth in Adhesively Bonded Composite Joints Containing Bolts as Crack Stoppers", The Journal of Adhesion, 97(7), 2021, 611-633.
- (4) Matsuzaki, R., Shibata, M., Todoroki, A., "Reinforcing an Aluminum/GFRP Co-cured Single Lap Joint Using Inter-adherend Fiber", Composites, Part A, 39(5), 2008, 786-795.
- (5) Kruse, T., Körwien, T., Heckner, S., Geistbeck, M., "Bonding of CFRP Primary Aerospace Structures-Crackstopping in Composite Bonded Joints under Fatigue", Presented at the 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, Jul 19-24, 2015; Paper 2219-1.
- (6) Minakuchi, S., "Fiber-reinforcement-based Crack Arrestor for Composite Bonded Joints", Presented at the 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, Jul 19-24, 2015; Paper 2118-4.
- (7) Parkes, P. N., Butler, R., Meyer, J., de Oliveira, "A. Static Strength of Metal-composite Joints with Penetrative Reinforcement", Composite Structures, 118, 2014, 250-256.
- (8) Graham, D. P., Rezai, A., Baker, D., Smith, P. A., Watts, J. F., "The Development and Scalability of a High Strength, Damage Tolerant, Hybrid Joining Scheme for Composite-Metal Structures", Composites, Part A, 64, 2014, 11-24.
- (9) Tu, W., Wen, P. H., Hogg, P. J., Guild, F. J., "Optimisation of the Protrusion Geometry in Comeld™ Joints", Composites Science and Technology, 71(6), 2011, 868-876.
- (10) Hirose, Y., Hojo, M., Fujiyoshi, A., Matsubara, G., "Suppression of Interfacial Crack for Foam Core Sandwich Panel with Crack Arrestor", Advanced Composite Materials, 16(1), 2007, 11-30.
- (11) Löbel, T., Holzhüter, D., Sinapius, M., Hühne, C., "A Hybrid Bondline Concept for Bonded Composite Joints", International Journal of Adhesion and Adhesives, 68, 2016, 229-238.
- (12) Schollner, M. J., Kosmann, J., Völkerink, O., Holzhüter, D., Hühne, C., "Surface Toughening - A Concept to Decrease Stress Peaks in Bonded Joints". The Journal of Adhesion, 95(5-7), 2019, 495-514.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hirakawa Rio, Yasuoka Tetsuo, Mizutani Yoshihiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Crack-arresting behavior of adhesively bonded joints with a single rectangular convex/concave shape formed on adherend surfaces	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Adhesion	6. 最初と最後の頁 1～26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00218464.2022.2088282	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 安岡哲夫，平川璃織，水谷義弘
2. 発表標題 凸形状を利用した接着接合継手のクラックアレストコンセプト
3. 学会等名 第63回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安岡哲夫
2. 発表標題 航空機複合材構造の接着接合技術
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平川璃織，安岡哲夫，水谷義弘
2. 発表標題 クラックアレスターを用いた接着接合継手の破壊制御
3. 学会等名 第12回日本複合材料会議（JCCM-12）
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 水谷義弘, 平川璃織, 安岡哲夫
2. 発表標題 水素用複合圧力容器の健全性保証のための非破壊検査・モニタリングに関する一考察
3. 学会等名 第12回日本複合材料会議 (JCCM-12)
4. 発表年 2020年～2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------