

鋼／アルミ合金異種材接着における接合部疲労強度
に対する被着体材料および板厚の影響調査

Investigation of the Effects of Adherend Material and Thickness on the Fatigue Strength of Adhesive Bonded Joints with Dissimilar Materials (Steel/Aluminum Alloy)

山本 耕平

本報は、公益社団法人 自動車技術会 2023年自動車技術会 春季大会 学術講演会予稿集に掲載された論文を同会の許可を得て転載したものです。本論文の著作権は公益社団法人 自動車技術会に属し、無断複製・転載を禁じます。

要旨

接着接合は異種材料の接合に適しており、その疲労強度の把握は重要な課題である。本報では、鋼材とアルミ合金板を被着体とした異種材接着接合部の静的強度および疲労特性を調査する。また、試験結果と数値解析結果を比較し、現象を分析の上で数値解析により得られた指標による整理を試みた。

Abstract

Adhesive bonding is suitable for dissimilar materials joining, and understanding its fatigue strength is an important topic. In this paper, static strength and fatigue properties of adhesive bonded joints with dissimilar materials using steel plate and aluminum alloy plate are investigated. After comparing test results and numerical analysis results and analyzing phenomena, attempts are conducted to clarify phenomena by using numerical analysis parameters.

1 まえがき

近年、カーボンニュートラルへの取組みが加速しており、走行時のCO₂排出量削減の一手段として、車両軽量化の重要性が高まっている。車体においては、軽量材料を適材適所に使用するマルチマテリアル化が進んでおり、材料の溶融および塑性変形を必要としない接着接合は、マルチマテリアル化に適した接合技術である。これまで、(公社)自動車技術会 疲労信頼性部門委員会の接合構造疲労評価ワーキンググループでは、接着接合の疲労特性は接着層の主応力と主応力角度で整理できることを示すとともに^{[1][2]}、箱型試験片や、実構造を模擬する簡易試験片を用いた新しい評価手法の提案^{[3][4]}、接着接合に特有な経時劣化現象を調査してきた^{[5]-[8]}。近年では、被着体としてアルミ合金板を対象として調査した^{[9]-[12]}。さらに、鋼板とアルミ合金板の異材組合せでの疲労特性の調査を進めている^{[13][14]}。

本報では、前報^[14]で提案されたラップシエ試験片を用いて、被着体が鋼板とアルミ合金板の異種材組合せにおける疲労特性を調査する。破壊形態を分析するとともに、数値解析によって得られた接着層応力および応力拡大係数により疲労試験結果を整理し、これまで検討された被着体材料が単一の場合と比較し、考察する。

2 実験方法

2-1. 供試材

被着体は590MPa級冷延鋼板(以下590材)およびT4処理された6000系アルミ合金板(以下6022材)である。接着剤は、既報^{[9]-[13]}で用いた表1に示す機械的特性を有するエポキシ系構造用接着剤を使用した。

表1 Mechanical properties of adhesive

Young Modulus [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
4.5	34	2

2-2. 試験方法

前述の被着体ならびに接着剤を用いて、接着範囲からの被着体の突き出し量が5mmのラップシエ試験片(以下、Type A)と突き出し量が0mmのラップシエ試験片(以下、Type B)を作製した。試験片の形状および寸法を図1に示す。被着体の材質と板厚の組み合わせ、接着層の厚さを表2に示す。

Type Aは、同種材を接着した試験片3仕様を作製した。6022材 t2.3同士を接着した試験片(以下、Type A-A23A23)と590材 t1.6同士を接着した試験片(以下、Type A-S16S16)は、曲げ剛性が等価となる仕様である。6022材 t1.6同士を接

着した試験片(以下、Type A-A16A16)は、前述の2仕様よりも曲げ剛性を低くした仕様である。

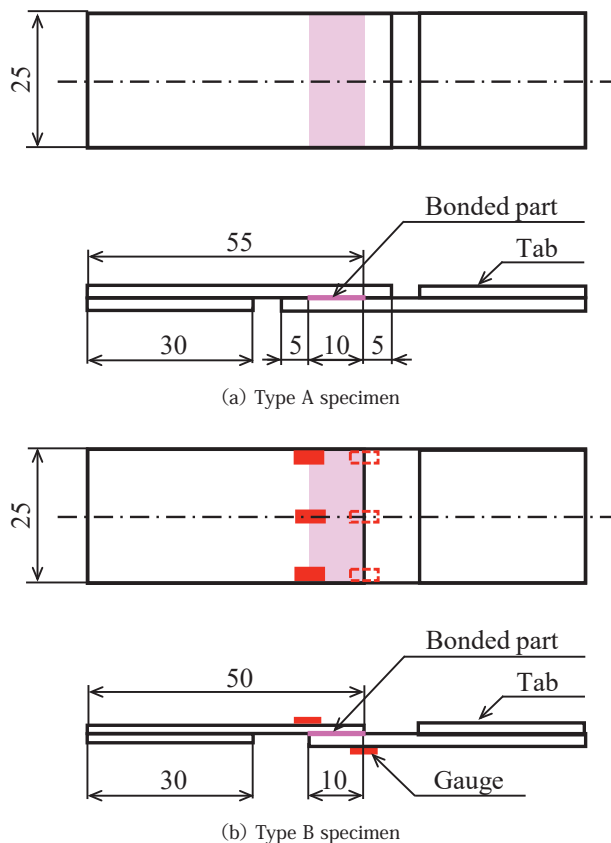


図1 Specimen configuration

表2 Thickness of adherends and adhesive in specimens

Type	Series	Adherend material and thickness [mm]		Adhesive thickness [mm]
		Upper plate	Lower plate	
Type A	A23A23	6022 t=2.3	6022 t=2.3	0.15
	S16S16	590 t=1.6	590 t=1.6	
	A16A16	6022 t=1.6	6022 t=1.6	
Type B	A23S16	6022 t=2.3	590 t=1.6	0.23
	A16S16	6022 t=1.6	590 t=1.6	
	A23A23	6022 t=2.3	6022 t=2.3	

Type B は、異種材を接着した試験片2仕様と、同種材を接着した試験片1仕様を作製した。6022材 t2.3と590材 t1.6を接着した試験片(以下、Type B-A23S16)は、被着体の曲げ剛性が等価となる仕様である。6022材 t1.6と590材 t1.6を接着した試験片(以下、Type B-A16S16)は、Type B-A23S16に対して6022材の板厚を薄くして、曲げ剛性を低下させた仕様である。6022材 t2.3同士を接着した試験片(以下、Type B-A23A23)

は、Type B-A23S16に対して曲げ剛性が等価となる仕様である。

疲労試験には油圧サーボ式強度試験機(858 Mini Bionix、MTS 製)を用いた。応力比(試験力比)は $R=0.1$ 、周波数は $f=10\text{Hz}$ 、打ち切り回数は 10^7 回とした。試験環境は実験室環境(室温: $23\pm 3^\circ\text{C}$ 、相対湿度: $50\pm 5\%$)とした。

疲労試験機への試験片の取り付けは、異種材組み合わせの試験片の場合は590材を試験機の下側側に、6022材を上方側に取り付けた。

3 実験結果

3-1. 疲労試験

疲労試験の結果を図2に示す。縦軸は最大試験力、横軸は破断までの繰返し数である。

曲げ剛性を等価にした試験片4仕様 Type A-A23A23(○)、Type A-S16S16(○)、Type B-A23S16(●)、Type B-A23A23(●)の破断寿命はほぼ同等であった。

異種材を接着した試験片 Type B-A23S16と Type B-A16S16(▲)を比較すると、破断までの繰返し数が約 10^5 回の試験片においては破断寿命に差があるが、 4×10^5 回を超える試験片の破断寿命はほぼ同等であった。

疲労試験を行った試験片の中で最も曲げ剛性が低い Type A-A16A16(□)は、破断寿命が低い結果となった。

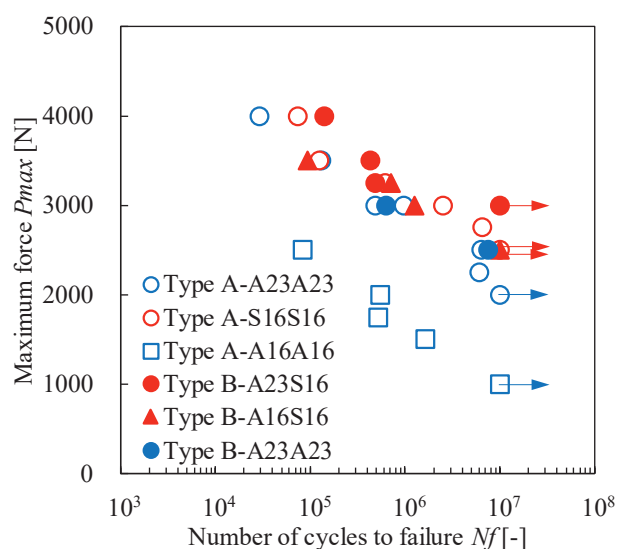


図2 Fatigue test result

3-2. 観察結果および考察

疲労試験後の Type B 試験片の外観を図3に、接着層の破断面の写真を図4に示す。

異種材を接着した Type B-A23S16 は、590材の接着範囲全域に接着剤が残存しているが、6022材の接着範囲には広範囲に金属光沢が見られる。この金属光沢面を拡大観察すると、薄く接着剤が残存していることから、薄層凝集破壊が生じていたと考えられる。接着層端部には、帯状に接着剤が残存しており、破断面には既報^[10]と同様な鱗状模様が確認された。接着層中央の接着剤残存部の破断面は、ブロック状のラフ模様を呈しており、前報^[14]の静的試験を実施した試験片の破断面と同じ様相であることから、接着層中央が最終破断面であると考えられる。

Type B-A16S16 の破断面の様相は、Type B-A23S16 と同様である。

6022材同士を接着した Type B-A23A23 は、上板、下板ともに広範囲に金属光沢が見られる。金属光沢面には薄く接着剤が残存しており、薄層凝集破壊が生じていたと考えられる。

図4(a)のBで囲んだ接着層端部の拡大写真を図5に示す。図中の高さ約0.3mm、幅0.1と0.3mmの帯状の接着剤残存部は、前報^[14]に示されている接着層のはみ出しである。接着層の破断面は、この帯状部と被着体の接点から発生している。

図6に疲労き裂進展の模式図を示す。き裂は Type A、Type B ともに接着層で発生していた。前述の帯状はみ出しが存在する Type B 試験片は、図6(a)に示すように、応力集中部となる帯状部と被着体の接点を起点として、逆側の被着体に向けてき裂が進展し、その後、被着体の界面近傍を接着層中央に向けて進展したと考えられる。

下板側に帯状はみ出しがない Type B-A16S16 シリーズの一試験片 ($P_{max}=3500N$, $N_f=94577$) は、接着層端部の応力集中部が異なるために、図6(b)に示すように、破壊の起点は Type A と同じ位置となっていた。

Type A 試験片は、既報^[10]と同じく、被着体との界面近傍を起点として接着層中央に向けてき裂が進展したと考えられる。

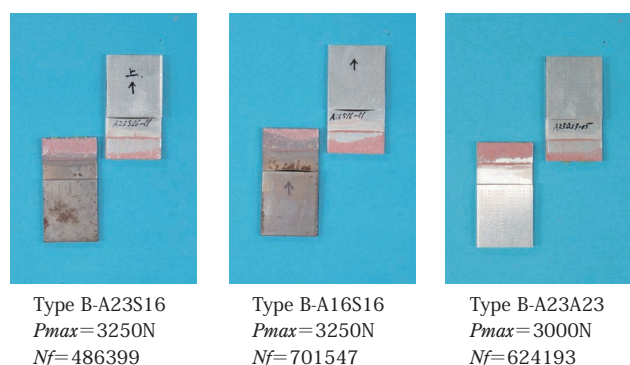
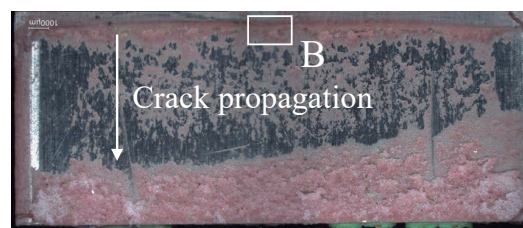
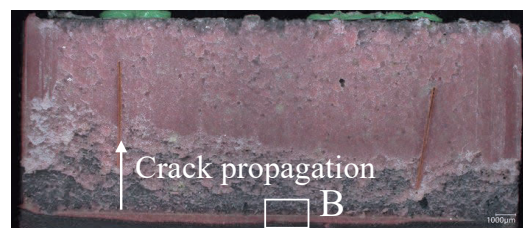


図3 Type B specimens after fatigue tests

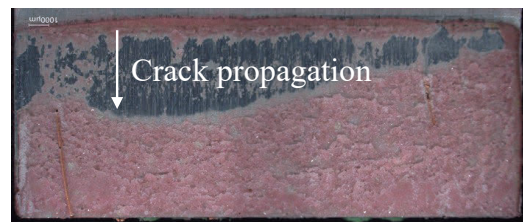


Upper plate(6022 aluminum)



Lower plate(590 steel)

(a) Type B-A23S16 ($P_{max}=3250N$, $N_f=486399$)



Upper plate(6022 aluminum)



Lower plate(590 steel)

(b) Type B-A16S16 ($P_{max}=3250N$, $N_f=701547$)



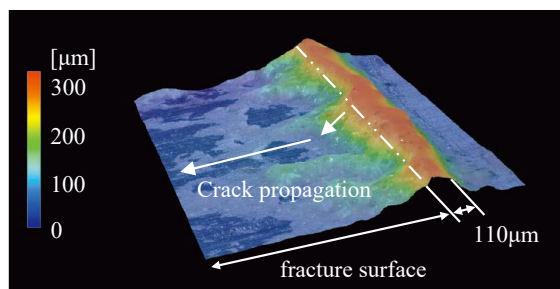
Upper plate(6022 aluminum)



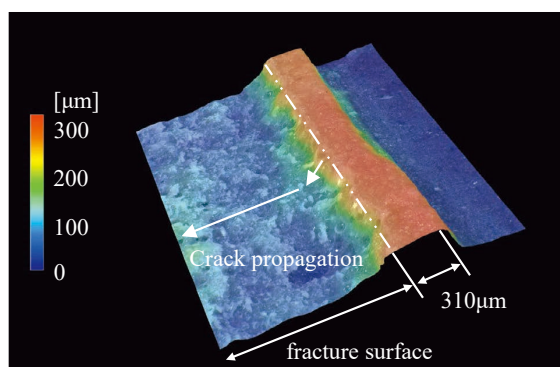
Lower plate(590 steel)

(c) Type B-A23A23 ($P_{max}=3000N$, $N_f=624193$)

図4 Fracture surface of type B



(a) Upper plate (6022 aluminum)



(b) Lower plate (590 steel)

図5 Magnified image of the region B in 図4(a)

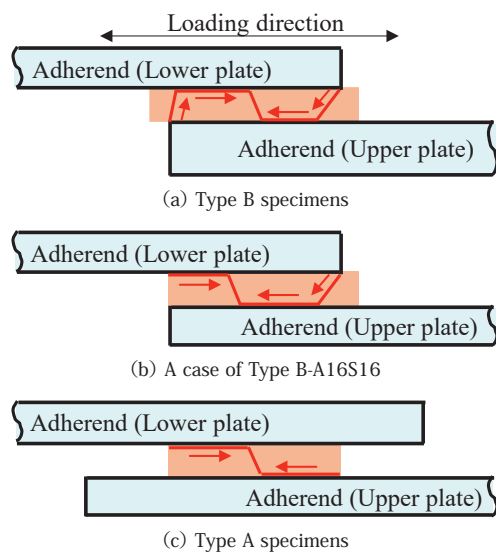


図6 Fatigue failure process

4 数値解析

4-1. 非線形解析

本節では、材料非線形性を考慮した有限要素解析を実施し、接着層への影響を確認する。

Type B-A23S16の非線形解析モデルを図7に示す。試験片のチャック部を剛体要素で拘束し、試験機に取り付けた状態での下方側を完全固定、上方側に荷重を負荷した。試験片に貼り

付けられたひずみゲージは、膜要素を多点拘束を用いて被着体に接続してモデル化し、被着体のひずみの再現性を確認した上で、解析を実施している。

Type B 試験片の負荷荷重と接着層ひずみの関係を図8に示す。図より、Type B-A23S16とType B-A23A23は、負荷荷重が3500N 以下の範囲においておおむね弾性挙動を示していることから、図2より 10^5 回を超える範囲において、次節の接着層端部応力と応力拡大係数による疲労試験結果の整理が可能だと考えられる。

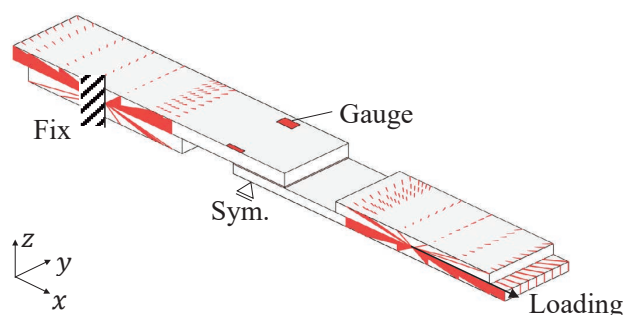


図7 FE model

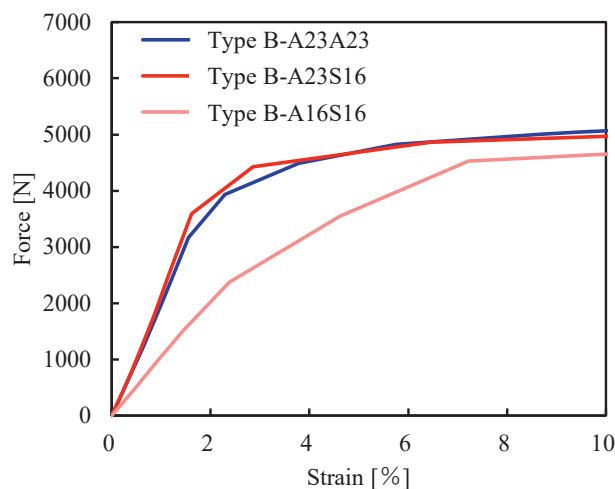


図8 Relationship between loading force and adhesive strain

4-2. 接着層端部応力による整理

既報^[9]のFEM 解析を用いた検討では、ラップシヤ試験片の接着層端部の主応力角度は、被着体の剛性および板厚によらず概ね一定となることが確認されている。既報^[11]では、最大主応力を用いて疲労試験結果を整理しており、被着体の材質が同じであれば、板厚の異なる試験片でも同等の応力-寿命関係となることが確認されている。そこで、図9、図10に示す2次元 FE モデルの接着層端部要素の最大主応力を計算し、疲労試験結果を整理した結果を図11に示す。Type B 試験片の最

大主応力は、表3に示すように接着層のはみ出し有無による差は小さいため、接着層のはみ出し量を試験片の平均値0.3mmとした2次元モデルの計算結果を使用して、疲労試験結果を整理している。

6022材 t2.3同士を接着した Type A-A23A23と Type B-A23A23は、同等の応力－寿命関係となった。6022材 t1.6同士を接着した Type A-A16A16は、Type A-A23A23と Type B-A23A23と比較して、時間強度に差が見られる。

590材と6022材の異種材を接着した Type B-A23S16と Type B-A16S16は、破断までの繰返し数が 4×10^5 回を超える試験片の破断寿命はほぼ同等であったが、主応力で整理すると一本の線図にまとまらない。

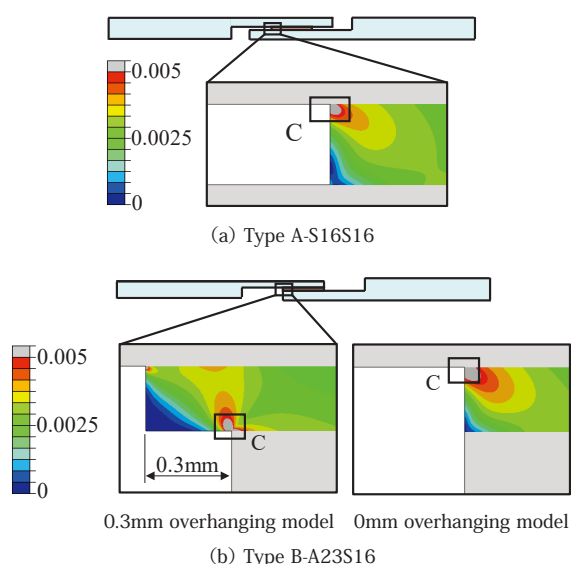


図9 Equivalent strain distribution in adhesive

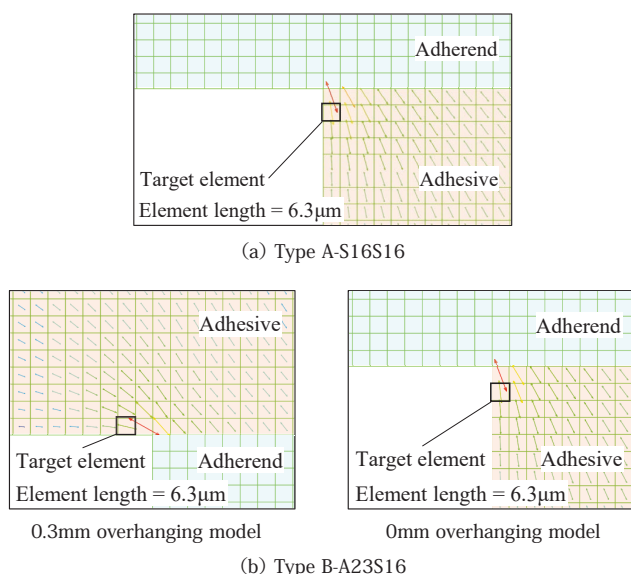


図10 Principal stress of the region C in 図9

表3 Principal stress of target element under 1000N load

Type	Series	Adhesive overhang [mm]	Principal stress [MPa]
Type B	A23S16	0.3	51
		0	49
	A16S16	0.3	63
		0	59
	A23A23	0.3	66
		0	60

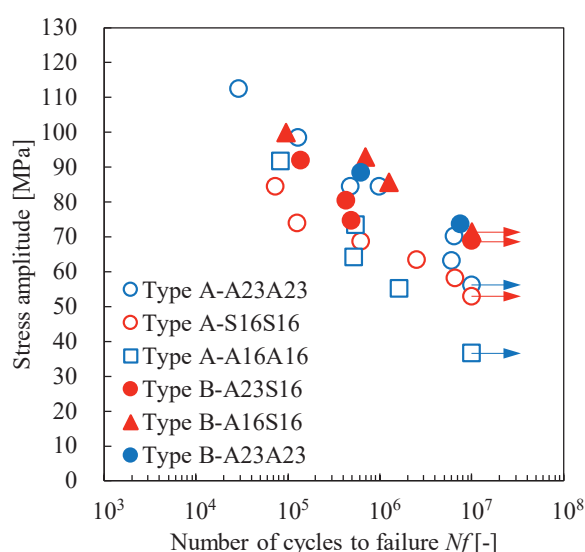


図11 Relationship between fatigue life and major stress at adhesive

4-3. 応力拡大係数による整理

接合部の疲労強度は破壊力学パラメータを用いて整理できると期待される^{[15][16]}。既報^[11]では、接着層端部に微小な初期き裂を導入したFEモデルを用いて応力拡大係数を計算し、疲労寿命と応力拡大係数範囲の関係を整理している。その結果、被着体の材質が同じであれば、板厚の異なる試験片でも一本の線図にまとめることが確認されている。そこで、図12に示す接着層内に初期き裂を導入した2次元FEモデルを用いて応力拡大係数を計算し、疲労試験結果を整理した。き裂先端近傍は2次の四辺形特異要素を用いて同心円状にモデル化し、計算には汎用有限要素ソルバAbaqusを使用した。疲労寿命と応力拡大係数範囲の関係を図13に示す。Type B試験片の応力拡大係数は、表4に示すように接着層のはみ出し有無による値の差は小さいため、はみ出し量を試験片の平均値0.3mmとしたFEモデルの計算結果を使用した。

6022材同士を接着した試験片は、前節の接着層端部応力での整理結果と同様に、曲げ剛性が等価である Type A-

A23A23と Type B-A23A23は同等の応力－寿命関係に整理できたが、曲げ剛性を低くした Type B-A16A16は時間強度が低くなり、一本の線図にまとまらない。

590材と6022材の異種材を接着した Type B-A23S16と Type B-A16S16は、前節の接着層端部応力による整理結果と同様に、破断までの繰返し数が 4×10^5 回を超える試験片の破断寿命はほぼ同等であったが、応力拡大係数で整理すると一本の線図にまとまらない。

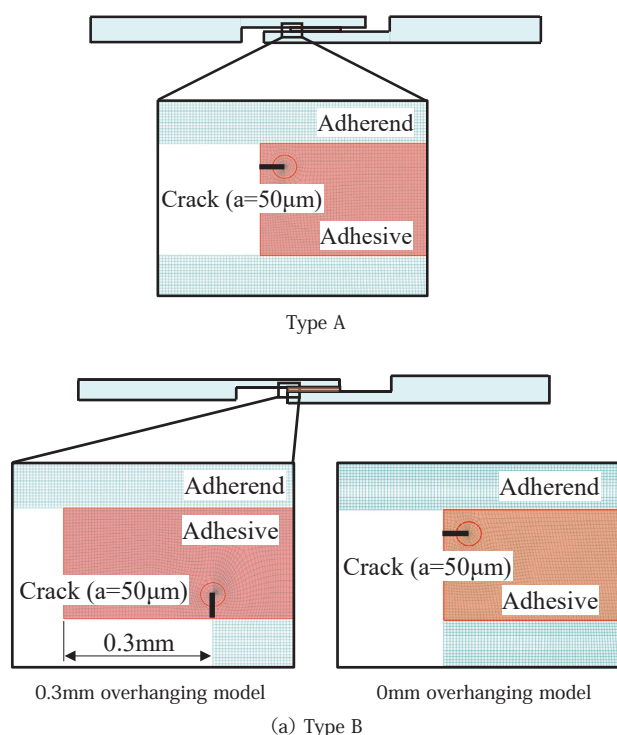


図12 Crack-tip model with crack-length 0.05mm

表4 Stress intensity factor under 1000N load

Type	Series	Adhesive overhang [mm]	Stress intensity factor[MPa・mm ^{1/2}]
Type B	A23S16	0.3	6.64
		0	6.97
	A16S16	0.3	8.22
		0	8.14
	A23A23	0.3	8.63
		0	8.01

接着層端部応力と応力拡大係数を用いて、疲労試験結果の整理を試みたが、被着体の材質が同じでも曲げ剛性が異なる試験片は、一本の線図にまとまらなかった。原因として、被着体剛性の界面強度への影響や、被着体の曲げ変形時の非線形性の影響などが考えられる。

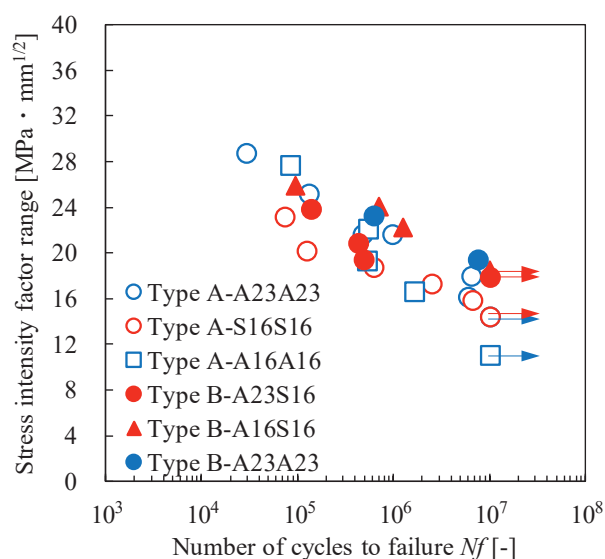


図13 Relationship between fatigue life and the stress intensity factor range

5 まとめ

本報では、鋼板とアルミ合金板の同種材接着に加えて、異種材接着の疲労特性を調査した。また、試験結果と数値解析結果を比較し、整理を試みた。以下に得られた知見を示す。

- (1) 今回使用した被着体の材質と板厚の組み合わせにおいて、曲げ剛性を等価にした試験片は、ほぼ同等の破断寿命となった。
- (2) 異種材を接着した Type B-A23S16と Type B-A16S16 は、破断までの繰返し数が 4×10^5 回を超える試験片の破断寿命は、ほぼ同等であった。
- (3) 接着層端部応力もしくは応力拡大係数を用いて、疲労試験結果をおおむね整理できた。ただし、今回評価した仕様の中で曲げ剛性を低くした Type A-A16A16と Type B-A16S16は、被着体の材質が同じ仕様と一本の線図にまとまらなかった。

■謝辞

本研究は(公社)自動車技術会疲労信頼性部門委員会の活動として行われ、各委員・メンバーの方々の貴重なご助言やご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

■参考文献

- [1] 梅村俊文ほか：構造用接着における接合疲労強度－継手種類による強度調査結果－，自動車技術会シンポジウム講演論文集，No. 01-08，p. 47-51 (2008)
- [2] 覚前正博ほか：構造用接着における接合疲労強度－車体

構造への適用に向けた応力解析－，自動車技術会シンポジウム講演論文集，No. 01-08，p. 52-57(2008)

[3] 花井洋志ほか：構造用接着における接合強度調査と応力解析，自動車技術会シンポジウム講演論文集，No. 07-10，p. 45-50(2010)

[4] 進祐一郎ほか：車体構造における接着接合部の疲労強度およびその影響調査，自動車技術会シンポジウム講演論文集，No. 08-15，p14-19(2015)

[5] 山本研一ほか：構造用接着の吸水劣化現象の調査，自動車技術会シンポジウム講演論文集，No. 07-10，p58-63(2010)

[6] 小林敏雄ほか：車体における接着接合部の経年劣化による影響調査，自動車技術会学術講演会前刷集，No. 76-14，p. 21-24(2014)

[7] 清水誠吾ほか：接着接合部疲労強度に対する経年劣化の影響調査，自動車技術会学術講演会講演予稿集，20175320(2017)

[8] 樋江井守ほか：接着接合部疲労強度に対する経年劣化の影響調査，自動車技術会シンポジウム講演論文集，No. 7-17，p. 47-55(2017)

[9] 清水寛文ほか：接着接合強度に対する被着体および接着層の影響調査(第1報)－接着層応力分布の解析による考察－，自動車技術会学術講演会予稿集，20215258(2021)

[10] 小熊博幸ほか：接着接合強度に対する被着体および接着層の影響調査(第2報)－静的強度と疲労強度の実験による考察－，自動車技術会学術講演会予稿集，20215259(2021)

[11] 河村拓昌ほか：接着接合強度に対する被着体および接着層の影響調査(第3報)－数値解析を用いた疲労試験結果の分析－，自動車技術会学術講演会予稿集，20215260(2021)

[12] 巽明彦ほか：接着接合における疲労破壊メカニズムの考察，自動車技術会シンポジウムテキスト，20214954(2021)

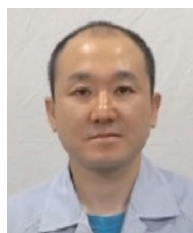
[13] 川邊直雄ほか：Fe/Al 異材接着における被着体剛性の影響，自動車技術会シンポジウムテキスト，20214955(2021)

[14] 島崎敦至ほか：接着接合試験片疲労強度に対する接着端部形状の影響調査，自動車技術会シンポジウムテキスト(2023)(投稿中)

[15] 結城良治ほか：スポット溶接継手の疲労強度の破壊力学的解析・評価，機械学会論文集 A 編，Vol. 51，No. 467，p. 1772-1779(1945)

[16] 結城良治ほか：接着継手の疲労強度の界面破壊力学による評価，材料，Vol. 41，No 467(1992)

■著者



山本 耕平

Kouhei Yamamoto

技術・研究本部

技術開発統括部

先進プロダクト開発部