

FRP/鋼あるいはステンレス鋼によるラップ接合の疲労特性

Fatigue properties of FRP/steel or stainless steel lap joints

木嶋 健*

Takeshi Kishima

*独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ (〒305-0821 茨城県つくば市南原 1-6)

FRPs are composite materials with high-corrosion resistance and going to be widely applied to infrastructure. Application of FRPs to infrastructure requires joints of FRPs and ordinary members. The aim of this study is to obtain the fatigue properties of FRP/steel or stainless steel lap joints experimentally. Lap joints are adhesively double lap joints, adhesively bolted double lap joints and adhesively single lap joints. Experimental results show that the fatigue properties depend on the surface condition of attached plate, joint type and bolt clamping force. Both surface roughness and bolt clamping force can improve the fatigue strength due to prevention of fatigue crack growth.

Key Words: fatigue properties, lap joints, surface condition, bolt clamping force

キーワード：疲労特性，ラップ接合，表面状態，ボルト軸力

1. はじめに

沿岸地域の構造物は海塩の影響による厳しい腐食環境にあり，防食対策にかかる費用は膨大なものとなっている．このため，耐食性に優れた構造物の構築技術の一つとして，耐塩害性能に優れた新しい構造材料を導入する方法が求められている．現在，FRP をはじめとする耐食性に優れた複合材料が土木構造物へ広く導入されているが，導入にあたっては複合材料同士あるいは鋼材等の一般土木材料と複合材料との間に接合部が必要となる．接合部は力学上の最弱箇所となる可能性が高く，長期供用性の観点からは耐久性を確保することが重要である．本論文は，複合材料に FRP を用いたラップ接合を対象に，疲労特性を長期耐久性の指標として実験的に検討したものである．

2. 引張疲労試験

2.1 接合試験体

疲労試験の対象とした接合試験体は，供試体に FRP，添接板に鋼材や冷間圧延ステンレス鋼板を用いたラップ接合である．ラップ接合の形式は，ダブルラップ接着接合，ボルト併用ダブルラップ接着接合，シングルラップ接着接合の 3 種類とした．供試体とした FRP は，ガラス繊維に E-Glass，マトリックス樹脂に不飽和ポリエステル

ルを用いた引抜成形 GFRP 積層材である．GFRP 積層材の積層構成は CSM/Rov/CSM の 3 層構成である．また，添接板とした鋼材は SS400，冷間圧延ステンレス鋼板は SUS316L である．

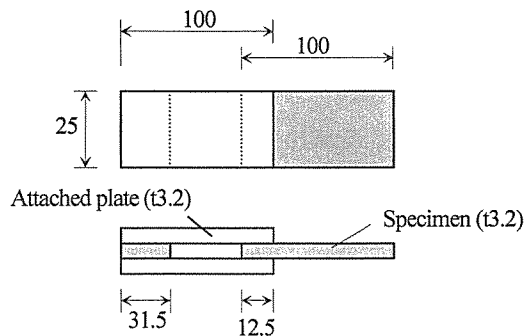
試験体の概要は図-1 の通りである．試験体の諸元は，静的試験や疲労試験の JIS や ASTM に準拠して設定した．供試体と添接板は，2 液性のエポキシ樹脂接着剤で接着した．ボルトは M5 ボルトとし，10Nm のトルクを加えた．また，ボルト軸力はリラクセーションにより経時的に減少するため，疲労試験の前にボルト軸力の再導入を数回繰り返す，可能な限り影響を回避した．

2.2 試験方法

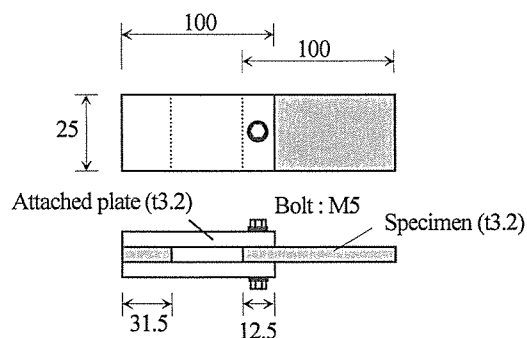
疲労試験は，JIS K 6864「接着剤—構造用接着剤の引張せん断疲れ特性試験方法」に準拠して行い，最小荷重を 0kN とした片振りの引張試験とした．また，載荷周波数は 5Hz であり，最大 600 万回まで繰り返し載荷した．疲労強度は，載荷重と静的最大荷重の比をパラメータとして，破壊に至るまでの載荷回数で評価した．疲労試験では，図-1 に示す試験体の両側を引張した．

疲労試験では，添接板の表面状態や接合形式が疲労強度に及ぼす影響を検討する．添接板の表面処理は，①アセトン脱脂，②アセトン脱脂およびサンドペーパー処理，の 2 種類，FRP の表面処理はアセトン脱脂の 1 種類とした．なお，無処理の添接板表面は，SS400 や SUS316L で

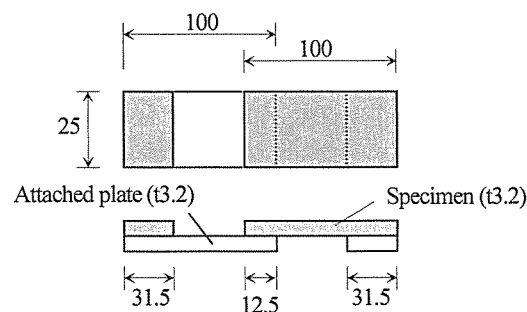
最も一般的な形態とした。目視観察によると、SS400 の表面は、凹凸がほとんど確認できない平面状態であった。また、SUS316L の表面は、JIS G 4305 で規定される「No. 2B」であり、SS400 以上に凹凸のない平面状態であると判断された。



(a) ダブルラップ接着接合



(b) ボルト併用ダブルラップ接着接合



(c) シングルラップ接着接合

図-1 接合試験体の概要

試験ケースは、ラップ接合の各形式に対して表-1 の通りであり、SS400 ではアセトン脱脂、SUS316L ではサンドペーパー処理を基本とした。これは、①添接板の表面状態が SS400 と SUS316L の間で大きな差異がないこと、②ステンレス鋼板は、炭素鋼にニッケル、クロム、モリブデン等を少量添加した材料であり、材質の違いが接着強度に及ぼす影響はほとんどないと考えられること、等による。

表-1 疲労試験のケース

Joint type	Specimen	Attached plate	Surface treatment	
			Acetone	Acetone Sandpaper
Double Lap	FRP	SS400	○	—
		SUS316L	○	○
Bolted Double Lap	FRP	SS400	○	—
		SUS316L	—	○
Single Lap	FRP	SS400	○	—
		SUS316L	—	○

3. 表面状態の影響

3. 1 ダブルラップ接着接合

図-2 は、ダブルラップ接着接合を対象に、アセトン脱脂した SS400 とサンドペーパー処理した SUS316L の疲労強度を比較したものである。図では、縦軸を載荷重と静的最大荷重の比、横軸を載荷回数としている。また、図には、試験結果の対数回帰曲線と決定係数も表示している。両者の回帰曲線は決定係数が高く、疲労強度をほぼ近似すると判断される。図-3 は試験体の破壊状況を示したものである。試験体は、添接板と接着剤の界面ではなく、FRP で破壊することが確認される。

図-2 の疲労強度を比較すると、SUS316L が SS400 を上回る傾向にある。一方、静的最大荷重の設定は、別途実施した 5 個の試験体による静的試験の結果に基づいた。これによると、静的最大荷重は SS400 が SUS316L を上回っており、両者が等しいと仮定した場合には、疲労強度の差異がほとんどなくなる。静的最大荷重のデータ数やばらつきを考慮すると、表面状態による疲労強度の差異は、静的最大荷重の設定が大きな要因であったと判断される。

回帰曲線の決定係数を比較すると、SS400 が SUS316L より低く、SS400 の疲労強度がばらつく結果となっている。図-3 によると、SS400 と SUS316L は共に FRP で破壊するが、添接板と接着剤の界面で疲労き裂が進展している場合には、破壊時での FRP の応力状態は変化すると考えられる。また、界面での疲労き裂の進展が試験体により異なる場合には、破壊時での FRP の応力状態も同様

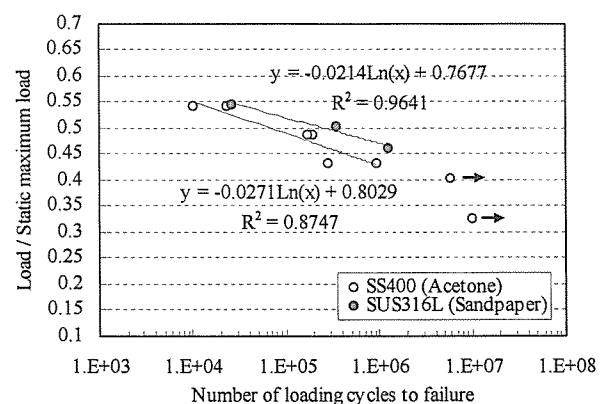
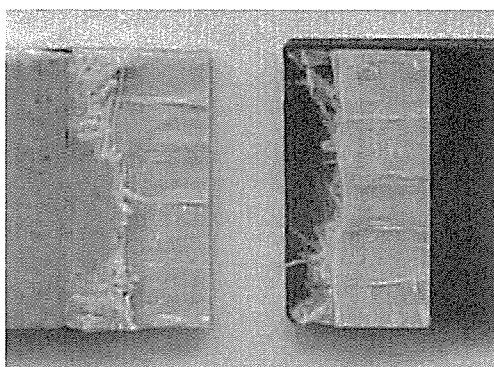
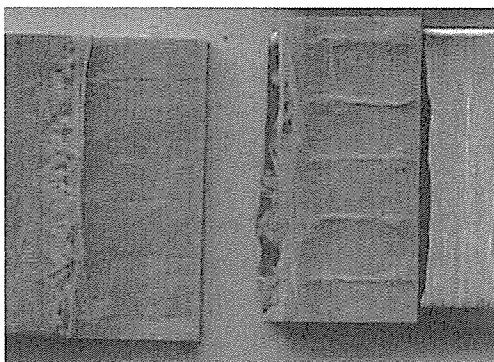


図-2 ダブルラップ接着接合の疲労強度



(a) SS400 (アセトン脱脂)



(b) SUS316L (サンドペーパー処理)

図-3 ダブルラップ接着接合の破壊状況

となるため、疲労強度の試験結果は結果的にばらつくことになる。

図-4 は、SUS316L の疲労強度を、表面処理方法の違いで比較したものである。図には、試験結果の対数回帰曲線と決定係数も表示している。アセトン脱脂した試験体の回帰曲線は決定係数が高く、サンドペーパー処理した試験体と同様に、疲労強度をほぼ近似すると判断される。図-5 はアセトン脱脂した試験体の破壊状況を、静的破壊の状況と併せて示したものである。試験体は、静的試験では FRP で破壊するが、疲労試験では、サンドペーパー処理と異なり、添接板と接着剤の界面で破壊することが確認される。

図-4 の疲労強度を比較すると、サンドペーパー処理がアセトン脱脂よりも大きいことが確認される。アセトン脱脂した試験体の表面は平面状態であり、サンドペーパー処理した試験体よりもせん断抵抗が小さい。そのため、添接板と接着剤界面での疲労き裂は、アセトン脱脂の方がサンドペーパー処理よりも進展しやすいと考えられる。アセトン脱脂した試験体は、FRP ではなく添接板と接着剤の界面で疲労き裂が進展して終局することから、結果的にサンドペーパー処理した試験体より低い载荷重で疲労破壊する。

回帰曲線の決定係数は表面状態によらず非常に高く、疲労強度のばらつきは見られない。これは、アセトン脱脂した試験体でも、界面での疲労き裂の進展が試験体により大きく変化しないことを意味する。アセトン脱脂し

た試験体の表面は平面状態であり、せん断抵抗が極めて小さい。従って、せん断応力による疲労き裂の進展速度も極めて速いと考えられる。一方、初期き裂の発生自体は確率的であることから、き裂発生時の载荷回数も確率的となる。き裂の進展速度が速い場合には、き裂発生時の载荷回数のばらつきが修正されないため、結果的に疲労強度もばらつくと考えられる。アセトン脱脂した試験体の結果は逆の傾向を示しているが、データ数が少ないこともあり、明確な判断は困難である。

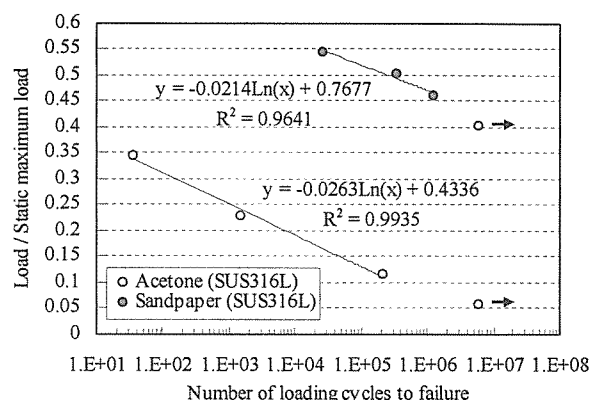
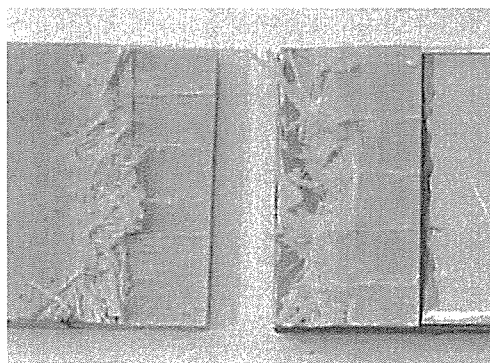
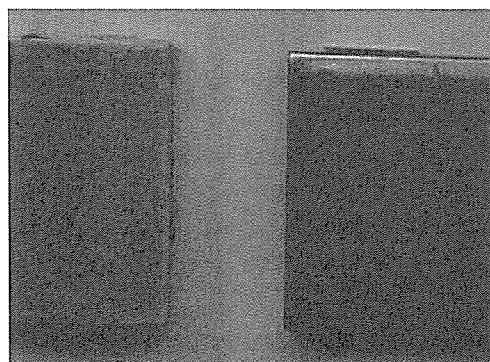


図-4 表面状態が疲労強度に及ぼす影響



(a) 静的破壊の状況



(b) 疲労破壊の状況

図-5 アセトン脱脂した SUS316L の破壊状況

3. 2 ボルト併用ダブルラップ接着接合

図-6 は、ボルトを併用したダブルラップ接着接合を対象に、アセトン脱脂した SS400 とサンドペーパー処理し

た SUS316L の疲労強度を比較したものである。図には、対数回帰曲線と決定係数も表示している。両者の回帰曲線は決定係数が高く、ダブルラップ接着接合と同様に、疲労強度をほぼ近似すると考えられる。図-7 は試験体の破壊状況を示したものである。試験体は、ダブルラップ接着接合と同様に、添接板と接着剤の界面ではなく、FRP で破壊することが確認される。

ラップ接合の破壊は、接合端でのせん断応力と剥離応力の合力で評価される。ボルト軸力を加えた場合には、ボルト軸力による材厚方向の応力が剥離応力を減少させるため、接合端ではせん断応力が支配的となる。また、添接板と接着剤の界面でせん断応力による疲労き裂が進展する場合には、FRP と添接板との相対的な位置関係は変化すると考えられる。添接板が FRP からせん断方向に離反移動すると、接合端でボルト軸力による材厚方向の応力が減少する。この場合には、接合端で剥離応力が大きくなるため、疲労強度は結果的に小さくなる。

回帰曲線を比較すると、SS400 の傾きが SUS316L をやや上回っている。また、決定係数を比較すると、ダブルラップ接着接合と同様に、SS400 が SUS316L より低く、SS400 の疲労強度がばらつく結果となっている。アセトン脱脂した SS400 の表面凹凸は、サンドペーパー処理した SUS316L より小さい。しかし、接着単独の接合とは異なり、ボルト軸力による摩擦力がき裂面に作用するため、界面での疲労き裂の進展は抑制される。界面での疲労き裂の進展は、FRP で破壊する試験体の応力状態にも大きく影響する。添接板が FRP からせん断方向に離反移動する場合には、接合端で剥離応力が増加するため疲労強度は減少する。また、疲労き裂の進展が速い場合には、初期き裂の特性が反映されやすくなるため、結果的に強度がばらつく。SS400 の試験結果では、载荷回数が多い場合に疲労強度の減少やばらつきが見られる。一方、ボルト軸力は、载荷回数が多くなると、ボルトナットの緩みにより減少することが想定される。ボルト軸力による摩擦力は、添接板の表面状態に依存する。表面凹凸が小さい場合には、ボルト軸力の減少による摩擦力の低下は、疲労き裂進展速度の増加に直結すると考えられる。従っ

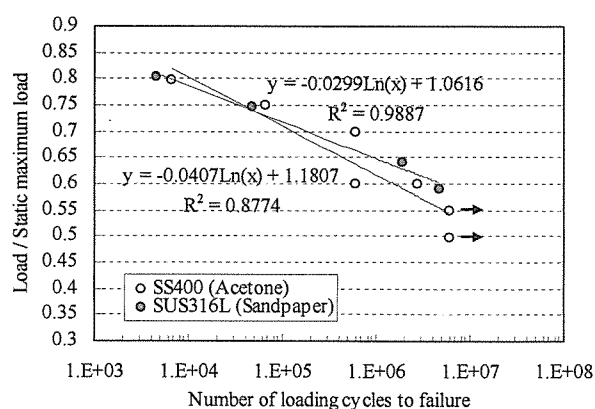
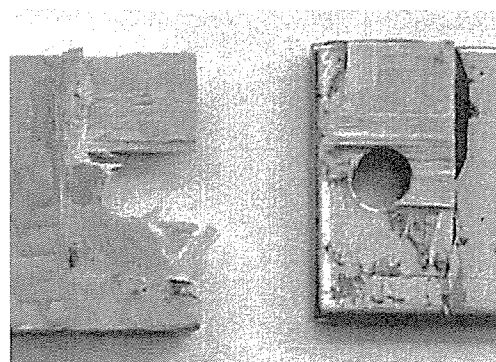
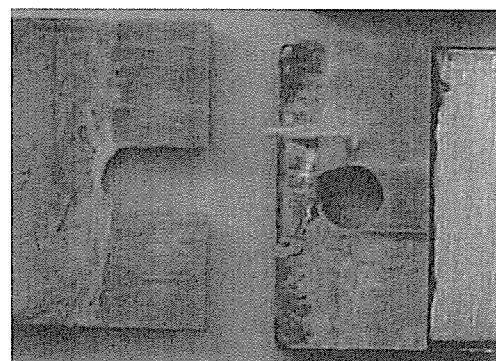


図-6 ボルト併用ダブルラップ接着接合の疲労強度



(a) SS400 (アセトン脱脂)



(b) SUS316L (サンドペーパー処理)

図-7 ボルト併用ダブルラップ接着接合の破壊状況

て、表面凹凸の小さい SS400 では、载荷回数が多い場合に、摩擦力の低下により界面での疲労き裂が速く進展し、結果的に疲労強度の減少やばらつきが生じたと推察される。

3. 3 シングルラップ接着接合

図-8 は、シングルラップ接着接合を対象に、アセトン脱脂した SS400 とサンドペーパー処理した SUS316L の疲労強度を比較したものである。図には、対数回帰曲線と決定係数も表示している。SUS316L の回帰曲線は決定係数が高く、疲労強度をほぼ近似すると判断される。しかし、SS400 の回帰曲線は決定係数が極めて低く、疲労強度を近似していないと判断される。事実、試験結果はランダムに分布しており、荷重比と破壊回数との間に一定の関係は認められない。図-9 は試験体の破壊状況を示したものである。試験体は、SS400 では添接板と接着剤の界面で破壊するが、SUS316L では接着剤と FRP の界面で破壊することが確認される。

添接板と接着剤の界面は異種材料の接合部であるが、接着剤と FRP の界面は同種材料の接合部である。異種材料の接合部は強度が低いと考えられ、微小な変化の影響を受けやすくなると推察される。そのため、初期き裂発生時の载荷回数は、異種材料の接合部で破壊する SS400 の方がばらつくと考えられる。また、破壊面が界面とほぼ一致すると考えられるため、剥離方向への疲労き裂の進展は、抑制要因がほとんどなく、極めて速くなると判

断される。従って、添接板と接着剤の界面が剥離して疲労破壊する場合には、接着剤とFRPの界面が剥離して疲労破壊する場合に比べて、疲労強度がばらつくと考えられる。図-8の試験結果は上記の考察を支持するものであり、異種材料の接合部では、初期き裂の発生は大きくばらつくと判断される。

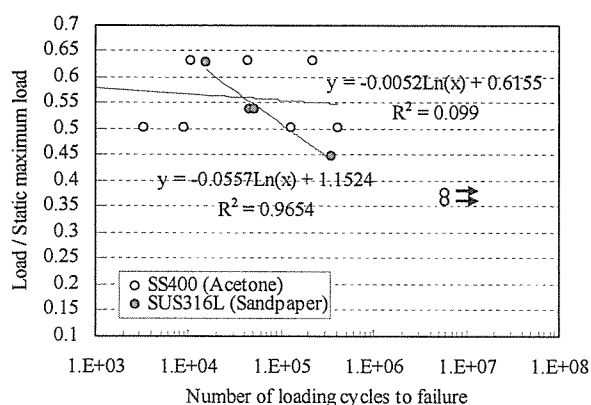
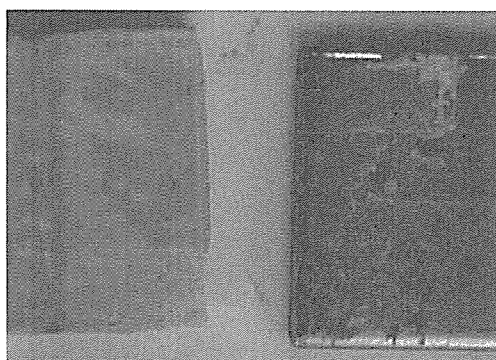
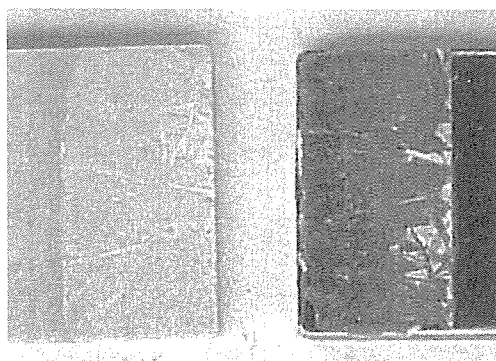


図-8 シングルラップ接着接合の疲労強度



(a) SS400 (アセトン脱脂)



(b) SUS316L (サンドペーパー処理)

図-9 シングルラップ接着接合の破壊状況

4. 接合形式の影響

4. 1 接着方法

図-10は、サンドペーパー処理したSUS316Lを対象に、ダブルラップ接着接合とシングルラップ接着接合の疲労強度を比較したものである。図には、対数回帰曲線と

決定係数も表示している。回帰曲線の傾きを比較すると、シングルラップ接着接合がダブルラップ接着接合を上回っている。载荷重が大きい場合には、シングルラップ接着接合の疲労強度は、ダブルラップ接着接合の疲労強度を上回るが、载荷重が小さい場合には、逆にダブルラップ接着接合の疲労強度を下回る。

接合端の応力状態を比較すると、シングルラップ接着接合は、応力成分の偏在度がダブルラップ接着接合より低い。そのため、各応力成分に対する载荷重と静的破壊荷重の比は、シングルラップ接着接合の方が小さくなる。試験体の疲労強度は、疲労破壊への寄与が大きい応力成分に対して、载荷重と静的破壊荷重の比が大きい場合に低くなると考えられる。従って、载荷重が大きい場合には、シングルラップ接着接合の疲労強度は、ダブルラップ接着接合よりも高くなると判断される。

試験体は、シングルラップ接着接合では接着剤とFRPの界面が破壊するが、ダブルラップ接着接合ではFRPが破壊する。接着剤とFRPの界面は完全な均質状態でないと推察されるため、界面で発生した疲労き裂は界面に沿って進展すると考えられる。この場合には、剥離方向への疲労き裂の進展は、抑制要因がほとんどないと推察され、極めて速いと考えられる。また、せん断方向への疲労き裂の進展は、摩擦力や経路上の障害等の抑制要因が想定されるため、剥離に比べて遅くなると考えられる。载荷重が小さくなると、せん断方向への疲労き裂の進展は抑制要因の影響が大きくなると考えられるため、結果的にシングルラップ接着接合の疲労強度はダブルラップ接着接合よりも低くなると判断される。

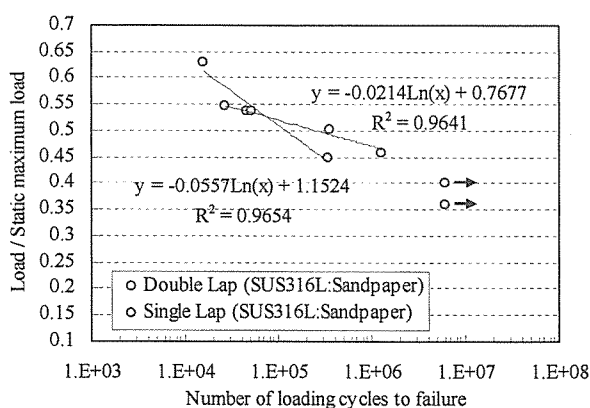


図-10 接着方法が疲労強度に及ぼす影響

4. 2 ボルト軸力

図-11は、サンドペーパー処理したSUS316Lを対象に、ダブルラップ接合の疲労強度を、ボルト軸力の有無により比較したものである。図には、対数回帰曲線と決定係数も表示している。試験結果を比較すると、両者の差は明確であり、ボルトを併用した試験体の疲労強度が大きく上回ることが確認される。接合端の応力状態を比較すると、接着単独の試験体では剥離応力が作用するが、ボ

ルトを併用した試験体では、ボルト軸力による材厚方向の応力が剥離応力を減少させる。しかし、回帰曲線の傾きは比較的近似しており、疲労破壊に寄与する応力成分に大きな差異はなかったと考えられる。試験体は、両者とも添接板と接着剤の界面ではなく FRP で破壊する。ただし、ボルトを併用した試験体では、ボルト軸力による摩擦力が疲労き裂の進展を抑制するため、速度は接着単独の試験体よりも遅くなる。その結果、ボルトを併用した試験体の疲労強度は、接着単独の試験体よりも高くなると判断される。

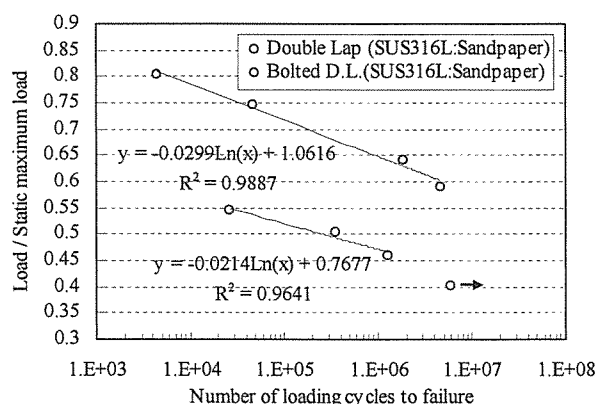


図-11 ボルト軸力が疲労強度に及ぼす影響

5. まとめ

ラップ接合を対象とした疲労試験の結果、添接板の表面状態、接合形式、および、ボルト軸力が疲労特性に大きく影響すると考えられた。本論文の結果をまとめると、以下の通りである。

1) 添接板の表面状態は疲労き裂の進展速度に大きく影響する。FRP で静的破壊するが、添接板と接着剤の界面で疲労破壊する試験体では、疲労強度が大きく低下する。一方、FRP で静的破壊および疲労破壊する試験体でも、界面で疲労き裂が進展する場合には、疲労強度に影響を及ぼす場合がある。また、疲労き裂の進展を抑制する要因がほとんどなく、疲労き裂が速く進展する場合には、初期き裂の特性が疲労特性にそのまま反映されやすくなる。

2) シングルラップ接着接合は、接合端の剥離応力が比較的大きく、ダブルラップ接着接合より応力成分の偏在度が低い。一方、シングルラップ接着接合の破壊面は、FRP と接着剤の界面であるため、剥離方向への疲労き裂の進展を抑制する要因はほとんどない。その結果、疲労強度は、載荷重が大きい場合にはシングルラップ接着接合がダブルラップ接着接合より高くなり、載荷重が小さい場合にはシングルラップ接着接合がダブルラップ接着接合より低くなる。

3) ボルト軸力は、き裂面に作用する摩擦力の増加に寄与する。ボルト併用ダブルラップ接着接合の疲労強度は、疲労き裂の進展が摩擦力により抑制されるため、接着単独の疲労強度より高くなる。また、載荷回数が多い場合にはボルトナットの緩みが想定され、ボルト軸力の減少と共に摩擦力も低下する。界面での疲労き裂の進展速度は、表面凹凸が小さくなるとボルト軸力の影響を受け、結果的に疲労強度の減少やばらつきを伴う。

参考文献

- 1) S. スレッシュ (岸本喜久雄監訳) : 材料の疲労破壊 (第2版), 培風館, 2005.