

複合材料に適用する接合構造の長期耐久性に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 20

担当チーム：新材料チーム

研究担当者：西崎 到、木嶋 健

【要旨】

複合材料としてFRP（繊維強化プラスチック）を取り上げ、ラップ形式の接着接合およびボルトを併用した接着接合の強度を実験的に検討した。検討の対象とした接合強度は、静的強度の他、疲労強度や環境劣化強度等の長期強度である。静的試験や疲労試験の結果、接合強度は接合形式や添接板の表面状態の影響を大きく受けることが確認された。さらに、ボルトを併用した接着接合では、静的強度や疲労強度に対するボルト軸力の効果は表面状態により異なることが確認された。また、環境劣化試験の結果、接合強度の劣化は、試験体に含有される水分や外部環境温度の影響を大きく受けることが確認された。

キーワード：FRP、接合、静的強度、疲労強度、環境劣化強度

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物材料を導入することが求められている。現在、FRPを始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接合構造が生じる。接合構造は構造物の最弱箇所となる可能性が高く、長期供用性を考える場合にはその耐久性を確保することが必要である。本課題は、複合材料としてFRPを取り上げ、FRPに適用する接合構造の長期耐久性を把握するため、長期強度に影響する要因を実験的に検討したものである。

2. 研究方法

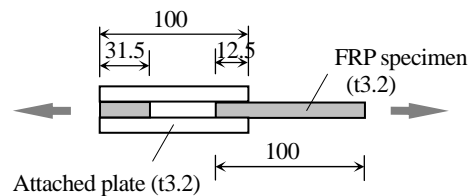
2.1 接合試験体

対象とした接合形式は、ダブルラップ形式の接着接合およびボルト／接着併用接合、シングルラップ形式の接着接合の3種類である。試験体の概要は図-1の通りであり、静的試験、疲労試験、環境劣化試験で適用するJISやASTMに準拠して諸元を設定した。ここで、供試体には不飽和ポリエステルを用いた引抜成形GFRP積層材あるいはステンレス鋼板SUS316L、添接板には鋼材SS400あるいはステンレス鋼板SUS316Lを用いた。なお、SUS316Lは、製法の異なる熱間圧延ステンレス鋼板および冷間圧延

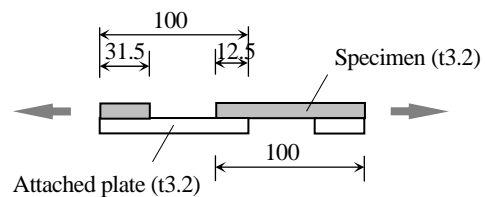
ステンレス鋼板の2種類とした。試験体の種類は、各接合形式に対して以下の通りである。

①ダブルラップ接着接合（3種類）

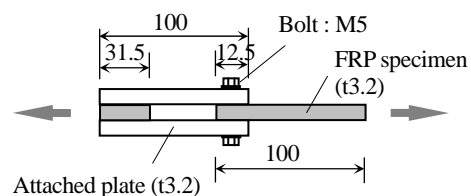
- FRP／SS400
- FRP／熱間圧延 SUS316L
- FRP／冷間圧延 SUS316L



(a) ダブルラップ接着接合



(b) シングルラップ接着接合



(c) ボルト併用ダブルラップ接着接合

図-1 接合試験体の概要

②ボルト併用ダブルラップ接着接合（3種類）

- FRP/SS400
- FRP/熱間圧延 SUS316L
- FRP/冷間圧延 SUS316L

③シングルラップ接着接合（4種類）

- FRP/SS400
- FRP/熱間圧延 SUS316L
- FRP/冷間圧延 SUS316L
- 冷間圧延 SUS316L/冷間圧延 SUS316L

2. 2 静的強度に関する実験

静的引張試験は、長期強度に影響を及ぼすと考えられる要因を、静的強度でも把握することを目的として実施する。ここでは、この様な要因として添接板の表面状態を取り上げ、静的強度に及ぼす影響を検討した。表面処理は、試験体と添接板の双方に実施した。FRPにはアセトン脱脂の1種類、SS400には①アセトン脱脂、②アセトン脱脂+プラズマ処理1秒の2種類、SUS316Lには①アセトン脱脂、②アセトン脱脂+プラズマ処理1秒、③アセトン脱脂+サンドペーパー処理(#80)の3種類とした。ここで、プラズマ処理は1秒間の酸素プラズマ処理とし、キーエンス ST-7000 を用いて行った。本機器は、放電状態とした照射ヘッド内部の電極部分に流れる空気をプラズマ状態とし、活性化したプラズマ粒子を被着材表面に照射するものである。本処理器の取扱説明書や既存研究によると、酸素プラズマ処理の効果は下記の通りと考えられている。

①洗浄効果

表面に付着している有機物（汚れ）とプラズマを結合させることにより、表面を清浄・脱脂する。

②粗面効果

プラズマ粒子が被着材表面を刺激することにより、被着材表面に分子・原子レベルの凹凸が出現する。

③活性効果

プラズマ粒子は、被着材表面の分子結合鎖を分解する。被着材が有機材料である場合には、カルボキシル基(-COOH)、カルボニル基(-C=O)のような官能基を生起させる。上記の官能基はエポキシ樹脂系接着剤との化学結合を引き起こし、接着性能の向上に寄与する。

添接板材料の表面は、SS400 や SUS316L で最も一般的に適用される表面とした。SS400 の表面は、目視からは凹凸がほとんど確認できない平面状態であ

った。また、熱間圧延 SUS316L の表面は、JIS G 4304 で規定される「No.1」であり、SS400 と異なり、目視でも微小な凹凸を確認することができた。一方、冷間圧延 SUS316L の表面は、JIS G 4305 で規定される「No.2B」であり、目視からは SS400 以上に凹凸のない平面状態であると判断された。従って、冷間圧延 SUS316L は、対象とした材料の中で、表面が最も平面状態に近い材料であったと言える。

静的引張試験は、JIS K 6850「接着剤—剛性被着材の引張せん断接着強さ試験方法」および ASTM D 3528 “Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading” に準拠して行った。試験ケースは表-1 の通りである。試験体の数量は、各試験ケースに対して5体とした。なお、ボルト併用ダブルラップ接着接合では、ボルトに10Nmのトルクを加えた。

表-1 静的引張試験のケース

Joint type	Attached plate	Surface treatment		
		Acetone	Acetone Plasma 1sec	Acetone Sandpaper
Double Lap	SS400	○	○	—
	SUS316L (hot roll)	○	○	—
	SUS316L (cold roll)	○	—	○
Bolted Double Lap	SS400	○	○	—
	SUS316L (hot roll)	○	○	—
	SUS316L (cold roll)	○	—	○
Single Lap	SS400	○	○	—
	SUS316L (cold roll)	○	—	○

2. 3 疲労強度に関する実験

疲労試験では、接合形式や添接板の表面状態が疲労強度に及ぼす影響を検討する。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。対象とした試験体は、各接合形式に対して下記の通りである。

①ダブルラップ接着接合（2種類）

- FRP/SS400
- FRP/冷間圧延 SUS316L

②ボルト併用ダブルラップ接着接合（2種類）

- FRP/SS400
- FRP/冷間圧延 SUS316L

③シングルラップ接着接合（2種類）

- FRP/SS400
- FRP/冷間圧延 SUS316L

試験ケースは表-2 の通りである。また、SS400 の表面処理はアセトン脱脂、冷間圧延 SUS316L の表面処理はアセトン脱脂とアセトン脱脂+サンドペーパー処理の2種類とした。なお、ボルト併用ダブルラップ接着接合では、静的試験と同様に、ボルトに10Nm のトルクを加えた。

表-2 疲労試験のケース

Joint type	Attached plate	Surface treatment	
		Acetone	Acetone Sandpaper
Double Lap	SS400	○	—
	SUS316L (cold roll)	○	○
Bolted Double Lap	SS400	○	—
	SUS316L (cold roll)	—	○
Single Lap	SS400	○	—
	SUS316L (cold roll)	—	○

2. 4 環境劣化強度に関する実験

環境劣化試験は、浸漬試験体を用いた促進劣化試験とし、接合形式や様々な環境要因が強度に及ぼす影響の把握を目的に実施する。ここでは、環境要因として浸漬温度や試験体の含有水分を取り上げ、静的強度との関係を検討した。促進劣化試験は4ヶ月を上限とし、1ヶ月単位に含有水分や強度の測定を行った。また、測定は、①浸漬直後の測定、②浸漬後に試験体を乾燥させ、重量が定常になった時点での測定、の2ケースに対して行った。対象とした試験体は、各接合形式に対して下記の通りである。

①ダブルラップ接着接合 (1種類)

- FRP/冷間圧延 SUS316L

②シングルラップ接着接合 (2種類)

- FRP/冷間圧延 SUS316L
- 冷間圧延 SUS316L/冷間圧延 SUS316L

試験ケースは表-3 の通りであり、試験体の数を各試験ケースに対して3体とした。また、冷間圧延 SUS316L の表面処理はアセトン脱脂である。さらに、試験体への水分の浸入箇所を明確にするため、SUS316L を供試体とした場合には接着部の側面とタブ部、FRP を供試体とした場合には接着部および

表-3 促進劣化試験のケース

Joint type	Specimen	Environment condition	Elapsed time (days)			
			28	56	84	112
Double Lap	FRP	Wetted	○	○	○	○
		Dried	○	○	○	○
Single Lap	FRP	Wetted	○	○	○	○
		Dried	○	○	○	○
	SUS316L (cold roll)	Wetted	○	○	○	○
		Dried	○	○	○	○

供試体の側面とタブ部に樹脂塗装を施した。

3. 研究結果

3. 1 静的強度に関する実験結果

1) プラズマ処理

図-2 は、SS400 を添接板とした試験体の静的強度を、プラズマ処理の有無により比較したものである。図には標準偏差も併せて表示している。プラズマ処理の効果を有意水準 5% で検定した結果、ダブルラップ接着接合とシングルラップ接着接合では、プラズマ処理の効果が棄却できることを確認した。しかし、ボルト併用ダブルラップ接着接合では、プラズマ処理による強度減少が棄却できないことを確認した。一方、試験体の破壊状況を観察すると、ダブルラップ形式では、ボルトの有無や表面処理の種類によらず、FRP が破壊している。そのため、プラズマ処理が基本的に界面強度の増加に寄与することや、データの数およびばらつきを考慮すると、プラズマ処理による強度減少はほとんどないと考えられる。従って、本試験で対象とした全ての接合形式に対して、プラズマ処理の効果はほとんどなかったと判断される。

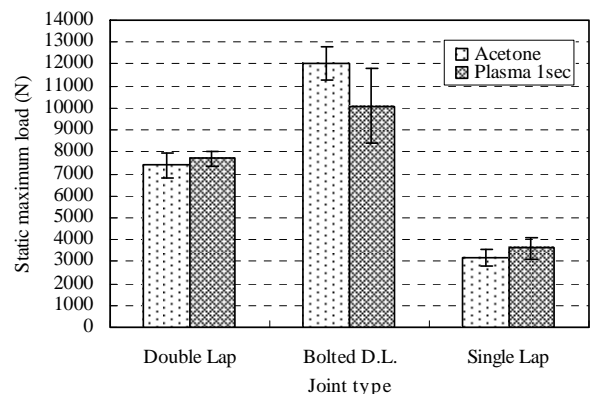


図-2 プラズマ処理が静的最大荷重に及ぼす影響

図-3 は、シングルラップ接着接合の破壊状況を、プラズマ処理の有無で比較したものである。これによると、接合部は、表面処理によらず、接着界面で破壊している。ただし、SS400 をアセトン脱脂した場合には、SS400 の約半分で接着剤の付着が見られないのに対し、アセトン脱脂に加えてプラズマ処理でSS400 を表面処理した場合には、その割合が減少している。これは、プラズマ処理により、破壊箇所が添接板と接着剤の界面から接着剤とFRPの界面へと移行する可能性を示唆したものと考えられる。プラズマ処理による静的強度の増加は、有意水準5%の検定では棄却できたが、破壊状況からは増加の可

能性を否定できない。また、試験結果からもプラズマ処理により強度が微増しており、SS400 を添接板とした場合には、プラズマ処理による強度増加を否定できないと考えられる。

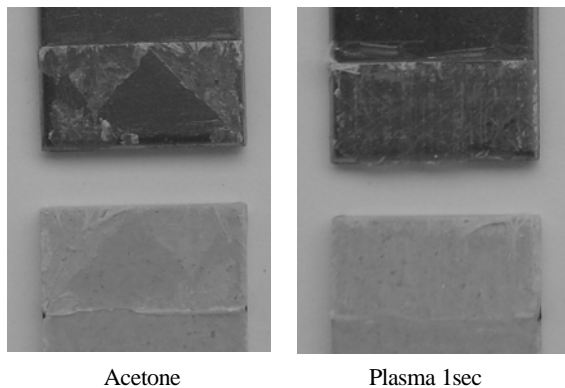


図-3 プラズマ処理が破壊状況に及ぼす影響

次に、接合形式が接着強度に及ぼす影響を検討する。ダブルラップ形式とシングルラップ形式の最大の相違は、破壊応力に対する剥離応力の寄与度である。ダブルラップ形式ではせん断応力が破壊の支配要因となるが、シングルラップ形式では剥離応力も大きな要因となる。ダブルラップ形式では、添接板の表面処理によらず FRP が破壊することから、界面の強度は、せん断応力に対しては大きいと判断できる。一方、シングルラップ形式では、添接板の表面処理によらず添接板と接着剤の界面で剥離することから、界面の強度は、剥離応力に対しては小さいと判断できる。そのため、プラズマ処理により破壊箇所が添接板と接着剤の界面から接着剤と FRP の界面へと移動する場合、シングルラップ接着接合の強度は増加すると考えられる。

2) サンドペーパー処理

図-4 は、冷間圧延 SUS316L を添接板とした試験体の静的強度を、サンドペーパー処理の有無により比較したものである。サンドペーパー処理による強度の増加を有意水準 5% で検定した結果、ダブルラップ接着接合では、サンドペーパー処理の効果が棄却できることを確認した。一方、ボルト併用ダブルラップ接着接合やシングルラップ接着接合では、サンドペーパー処理による強度増加が棄却できないことを確認した。

試験体の破壊状況を観察すると、ダブルラップ形式では、表面処理によらず、FRP が破壊している。しかし、ボルトを併用した試験体の接合強度は、サンドペーパー処理がアセトン脱脂を上回り、両者の力学状態が異なることを示唆している。サンドペーパー

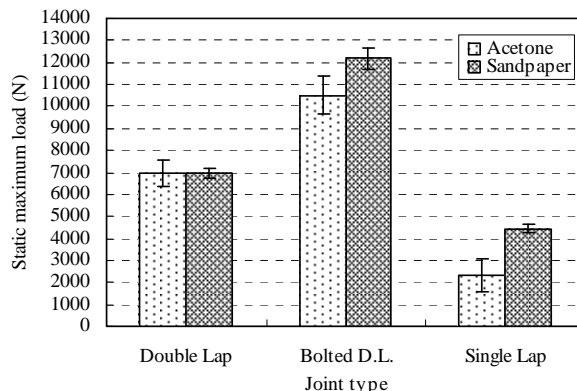


図-4 サンドペーパー処理が静的最大荷重に及ぼす影響

処理した添接板の表面は凹凸形状となる。表面の凹凸形状は、添接板と接着剤の界面に作用するせん断力に対しては抵抗となる。そのため、添接板と接着剤の界面がせん断塑性流動すると仮定した場合には、塑性流動は添接板表面に凹凸のない方が大きくなると判断される。ラップ接合では、接着端で破壊応力を評価する。ボルトを併用した試験体では、接着端での材厚方向の応力は、ボルト軸力による応力が剥離応力を上回ると考えられる。添接板と接着剤の界面がせん断塑性流動する場合には、界面のせん断変形が大きくなることから、接着端の移動によりボルト軸力による材厚方向の応力は減少すると考えられる。図-5 は、ボルトを併用した試験体の荷重-変位曲線を、表面処理の違いで比較したものである。これによると、試験体の荷重増加は、一定の荷重変位までは表面処理によらず一致するが、それ以降はサンドペーパー処理がアセトン脱脂を上回っている。これは上記の考察を裏付けるものであり、ボルト併用ダブルラップ接着接合強度の表面処理による相違は、添接板と接着剤界面の塑性流動に伴う材厚方向の応力減少が主要な要因であったと判断される。一方、

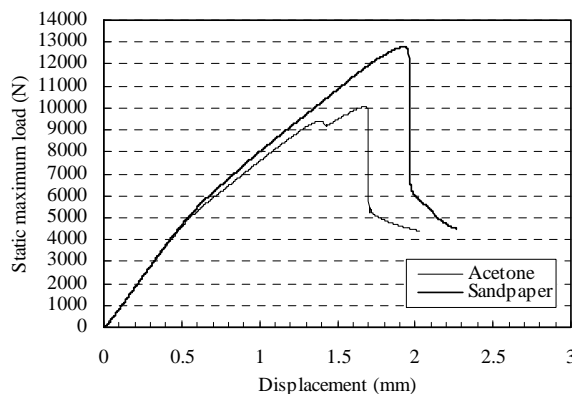


図-5 ボルト併用ダブルラップ接着接合の荷重-変位曲線

ダブルラップ接着接合の強度は、表面処理によらずほぼ等しい。マクロな破壊基準を考慮すると、接着接合の強度は、界面の塑性流動の影響を受けることはほとんどないと判断される。

図-6は、シングルラップ接着接合の破壊状況を、表面処理の違いにより比較したものである。これによると、アセトン脱脂した試験体では添接板と接着剤の界面が破壊するが、サンドペーパー処理した試験体では接着剤とFRPの界面が破壊している。

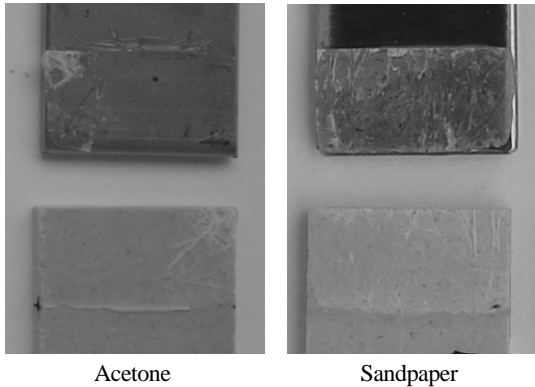


図-6 表面処理が破壊状況に及ぼす影響

破壊は初期クラックの進展で規定されることから、破壊強度はクラック先端の応力拡大係数や破壊靱性に依存する。図-7は、剥離応力による添接板と接着剤界面の破壊モードと表面状態との関係を示したものである。剥離応力による破壊モードは、界面が平面の場合には引張剥離を規定するモードIとなるが、界面が凹凸形状の場合にはモードIとせん断破壊を規定するモードIIの混合モードへと変化する。混合モードの場合には応力拡大係数が小さくなるため、添接板と接着剤の界面強度は、サンドペーパー処理がアセトン脱脂よりも大きくなると考えられる。この場合には、サンドペーパー処理した試験体の接合強度は、添接板と接着剤の界面で剥離するアセトン脱脂した試験体の接合強度よりも大きくなる。また、前項で検討したプラズマ処理は、サンドペーパー処理と同様の粗面効果を有するため、添接板と接着剤の界面強度が増加した可能性がある。

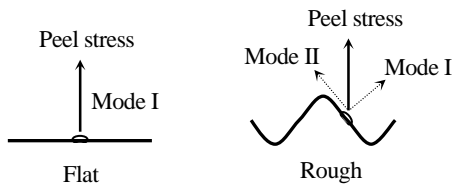


図-7 表面状態が破壊モードに及ぼす影響

図-4によると、冷間圧延 SUS316L の表面処理をアセトン脱脂とした場合には、シングルラップ接着

接合の強度がばらつく傾向にある。しかし、図-2によると、冷間圧延 SUS316L より表面に凹凸がある SS400 を添接板とした場合には、接合強度のばらつきが小さくなる。これは、平面からの剥離は不安定となることを示唆している。一方、界面での初期クラックは確率的に生じる。一般に、応力が小さいほど発生確率が低くなる。そのため、モードIでは、モードIIを含む混合モードに比べて、発生確率の低い初期クラックも全体破壊へと進展する可能性が高くなる。シングルラップ接着接合では、剥離応力も破壊の大きな要因となることを考慮すると、平面状態の接着界面が強度のばらつきを引き起こしたと判断される。また、サンドペーパーで表面処理した試験体の接合強度は、アセトン脱脂よりもばらつきが小さくなる。界面は異種材の接合箇所であるが、接着剤やFRPは樹脂で構成されており、接着剤とFRPの界面の方が均質と推察される。従って、初期クラックの発生応力は、添接板と接着剤の界面の方が接着剤とFRPの界面より幅広く分布すると考えられる。これは、接合強度のばらつきが、添接板と接着剤の界面で破壊する方が大きくなることを示唆するものである。

ダブルラップ接着接合では、シングルラップ接着接合同様に、アセトン脱脂した試験体の接合強度がばらついている。しかし、添接板の表面処理によらず、試験体はFRPで破壊する。マクロな破壊基準を考慮すると、接着界面が塑性流動して接着端の応力状態に変化が生じたと可能性がある。塑性流動では応力変化に対するひずみ変化が大きくなるため、マクロな破壊基準を満足する接着端の応力状態は結果的にばらつくと考えられる。

3) 材質

図-8は、添接板の表面処理をアセトン脱脂とした場合に、試験体の接合強度を添接板の材質により比較したものである。これによると、材質の影響が接合形式により異なっている。ダブルラップ接着接合では材質の影響はほとんど見られないが、ボルト併用ダブルラップ接着接合やシングルラップ接着接合では、SS400で大きく、冷間圧延 SUS316Lで小さくなっている。ボルト併用ダブルラップ接着接合では、接合強度の相違が、添接板の表面状態が原因となる界面の塑性流動に依存することを確認した。一方、SUS316Lは、接着強度に影響しないと考えられるニッケル、クロム、モリブデンを炭素鋼に少量添加した材料であり、これが界面の塑性流動に影響を

及ぼすことはないと考えられる。従って、ダブルラップ形式の接合強度は、材質の影響を受けることはないと判断される。また、シングルラップ接着接合では、SS400 と熱間圧延 SUS316L の強度はほぼ同じであるが、冷間圧延 SUS316L の強度はこれらより小さい。試験体は全て添接板と接着剤の界面で破壊しており、材質が破壊箇所に影響を及ぼすことはほとんどない。さらに、SS400 と熱間圧延 SUS316L の接合強度がほぼ同じあることから、シングルラップ接着接合でも材質の影響はほとんど受けないと考えられる。前項までの検討結果を考慮すると、接合強度の相違は、材質ではなく、表面状態が大きな要因であったと判断される。

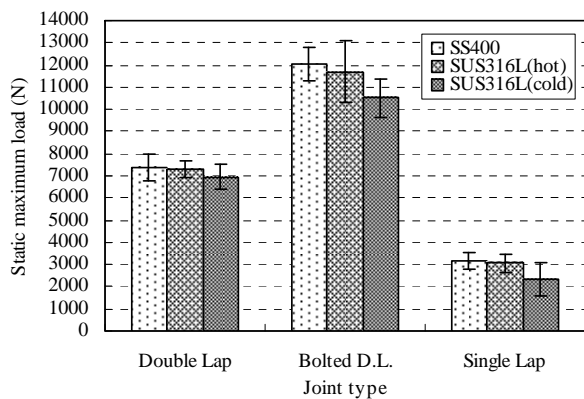


図-8 材質が静的最大荷重に及ぼす影響

3. 2 疲労強度に関する実験

1) ダブルラップ接着接合

図-9 は、ダブルラップ接着接合を対象に、アセトン脱脂した SS400 とサンドペーパーで表面処理した冷間圧延 SUS316L を添接板とした疲労強度に関する試験結果を示している。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。回帰曲線は決定係数が高く、疲労強度をほぼ近似すると考えられる。両者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、試験体は、静的破壊と同様に、添接板と接着剤の界面ではなく FRP で疲労破壊している。静的強度の検討では、SS400 や SUS316L の材質が影響を及ぼすことはないと考えられた。両者の材料組成を考慮すると、これは疲労強度にも当てはまると判断される。また、疲労試験では、静的最大荷重を静的試験結果に基づいて設定した。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すると、疲労強度の差異がほとんどなくなる。また、静的最大荷重のデータ数やばらつきを考慮すると、

表面処理による差異は、SS400 や SUS316L の静的最大荷重の設定が大きな要因であったと考えられる。

一方、回帰曲線の決定係数を比較すると、SS400 が SUS316L より低く、SS400 の試験結果がばらついている。アセトン脱脂した SS400 の表面は、サンドペーパー処理した SUS316L よりも平面状態に近い。そのため、SS400 の疲労試験では、添接板と接着剤の界面が塑性軟化した可能性がある。塑性軟化の速度が異なる場合には、接着端の応力状態が大きく変化して疲労強度がばらつくと考えられることから、試験結果と同様の現象が生じると判断される。

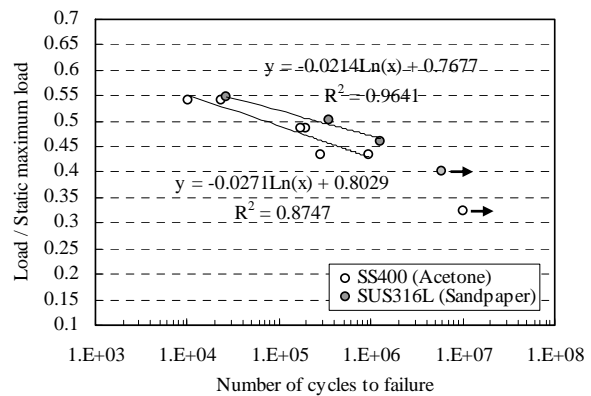


図-9 ダブルラップ接着接合の疲労強度

図-10 は、冷間圧延 SUS316L を対象とした疲労強度を、表面処理の違いにより比較したものである。サンドペーパー処理の場合には、対数回帰曲線と決定係数も表示している。ただし、アセトン脱脂の場合には、得られた2個のデータを結んだ線分となっている。これによると、回帰曲線や線分は疲労強度をほぼ近似すると考えられ、サンドペーパー処理した試験体の疲労強度はアセトン脱脂よりも大きいことが確認される。試験体の破壊状況を観察すると、サンドペーパー処理した試験体は FRP で破壊するが、アセトン脱脂した試験体は添接板と接着剤の界面で破壊している。静的試験では、アセトン脱脂した試験体

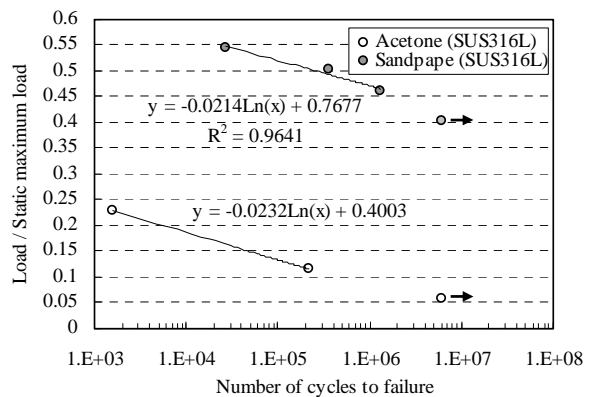


図-10 表面処理が疲労強度に及ぼす影響

の界面がせん断塑性流動すると判断された。繰り返し载荷によるせん断塑性軟化では、せん断塑性流動する界面は、せん断塑性流動しないFRPより低い载荷重で疲労破壊する。

図-11は、アセトン脱脂した試験体を対象に、疲労試験中の変位を、载荷重により比較したものである。これによると、载荷の初期には、1500回程度で疲労破壊する载荷重1600Nと20万回程度で疲労破壊する载荷重800Nの変位は、共にほとんど増加していない。一方、载荷重1600Nの結果によると、変位は疲労破壊直前に増加し、最後には剥離等により終局することが確認される。

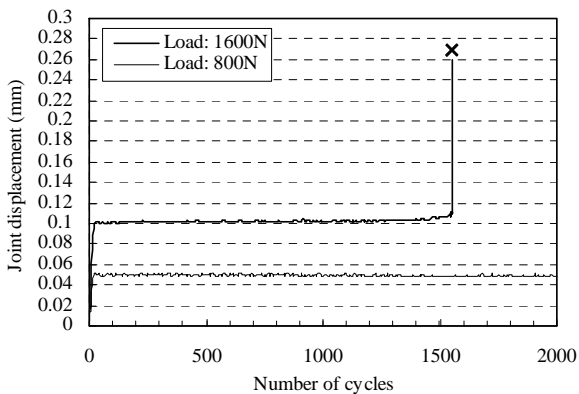


図-11 疲労試験中の試験体変位

一方、平坦界面の剥離は、低い応力で生じる初期クラックが全体破壊へと進展する可能性が高いことを確認した。初期クラックの発生自体が確率的であることを考慮すると、疲労試験でクラックが生じるまでの载荷回数が一定するとは言えず、結果的に疲労強度もばらつくと考えられる。しかし、図-10によると、アセトン脱脂した試験体の疲労強度はばらつきが小さく、平坦界面のせん断破壊が支配的な要因であったと推察される。また、せん断塑性軟化速度のばらつきは小さく、試験体による界面形状にほとんど差異のないことが要因と考えられる。

2) ボルト併用ダブルラップ接着接合

図-12は、ボルト併用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冷間圧延SUS316Lを添接板とした疲労強度に関する試験結果を示している。図には対数回帰曲線と決定係数も表示している。これによると、SS400とSUS316Lに対する回帰曲線は決定係数が大きく、ダブルラップ接着接合同様に、疲労強度をほぼ近似すると考えられる。回帰曲線を比較すると、SS400とSUS316Lはほぼ一致することが確認される。また、試験体は、ダブルラップ接着接合同様に、両者と

も添接板と接着剤の界面ではなくFRPで破壊している。以上より、ボルト併用ダブルラップ接着接合では、表面処理による疲労強度の差異はほとんどないと考えられる。

一方、回帰曲線の決定係数を比較すると、ダブルラップ接着接合同様に、アセトン脱脂したSS400がサンドペーパー処理したSUS316Lより低く、SS400の試験結果がばらついている。SS400の表面の方が平面状態に近いことを考慮すると、疲労試験では添接板と接着剤の界面がせん断塑性軟化した可能性がある。この場合には、ボルト軸力による材厚方向の応力が減少するため、疲労強度は小さくなる。さらに、SS400の表面はSUS316Lより凹凸形状であることから、界面のせん断塑性軟化速度が試験体により異なると仮定した場合には、疲労強度はばらつくことになる。しかし、データ数が少ないこともあり、明確に判断することは困難である。

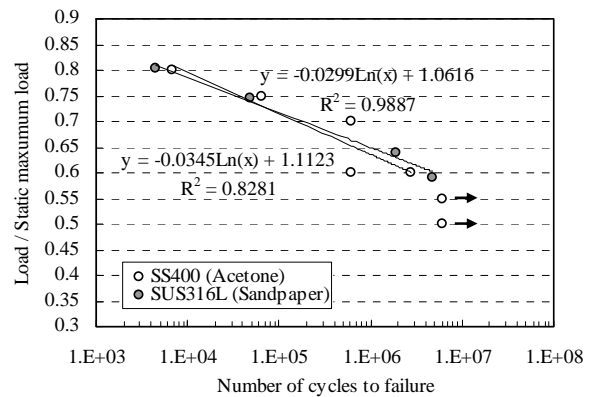


図-12 ボルト併用ダブルラップ接着接合の疲労強度

図-13は、ダブルラップ接着接合とボルト併用ダブルラップ接着接合を対象に、サンドペーパーで処理したSUS316Lを添接板とした試験体の疲労強度を比較したものである。これによると、両者の差は明確であり、ボルトを併用した試験体では疲労強度が大きく増加している。接合部の力学状態を比較すると、接着単独の試験体では接着端で剥離応力が作用するが、ボルトを併用した試験体では接着端で剥離応力が作用しないと考えられる。しかし、両者の回帰曲線を比較すると、傾きがほぼ同じであり、疲労破壊に寄与する応力に大きな差異はなかったと判断される。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、ボルト軸力により生じる摩擦力がクラックの進展を抑制するため、せん断塑性軟化は接着単独の試験体よりも生じにくくなる。以上より、

ボルトの有無による疲労強度の差は、せん断塑性軟化がボルト軸力による摩擦力に抑制されたことが主な要因であったと判断される。

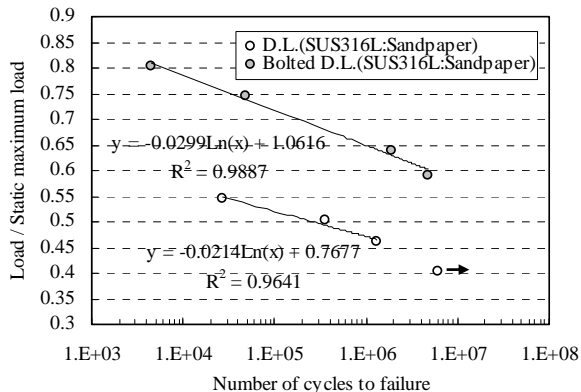


図-13 ボルト軸力が疲労強度に及ぼす影響

3) シングルラップ接着接合

図-14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冷間圧延 SUS316L を添接板とした疲労強度に関する試験結果を示している。図には対数回帰曲線と決定係数を表示している。SUS316L に対する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、疲労強度が近似できないと判断される。実際、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。また、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 の界面で破壊している。SS400 の表面凹凸は、サンドペーパー処理した SUS316L の表面よりも小さいと考えられた。そのため、SS400 の表面は平面状態に近く、添接板と接着剤の界面応力は、剥離応力の寄与が高いと考えられる。また、添接板と接着剤の界面は異種材料の接合箇所であるため、初期クラックの発生応力がばらつくと考えられる。従って、添接板と接着剤の界面が剥離する場合には、アセトン脱脂した SUS316L と同様に、接合強度がばらつくと判断される。一方、接着剤と FRP の界面は同種材料の接合箇所であるため、初期クラックの発生応力は、添接板と接着剤の界面に比べてばらつきが小さくなると考えられる。従って、サンドペーパー処理した SUS316L では、疲労強度のばらつきが小さくなると判断される。

サンドペーパー処理した冷間圧延 SUS316L を添接板とした試験体は、回帰曲線の傾きがダブルラップ接着接合よりも大きい。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 が破壊している。接着剤と FRP の界面は FRP に比べて剥離応力に対する塑性軟化が大きいいため、結果的にダブルラップ接着接合の塑性軟化を上回ると考えられる。また、載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がダブルラップ接着接合を上回っている。接着端の応力状態を比較すると、シングルラップ接着接合は、ダブルラップ接着接合よりも応力成分の偏在度が低くなる。そのため、各応力成分の破壊応力に対する比は、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、破壊への寄与が高い応力成分の破壊応力に対する比が大きい場合に小さくなると考えられる。従って、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大きくなると判断される。

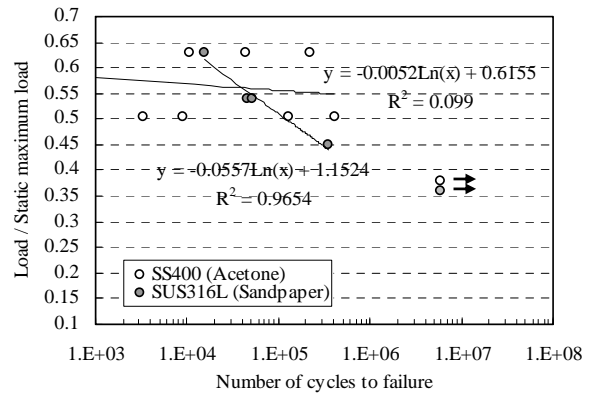


図-14 シングルラップ接着接合の疲労強度

3. 3 環境劣化強度に関する実験

1) 重量変化

図-15は、SUS316L を供試体と添接板に適用したシングルラップ接着接合の重量変化を示したものである。図には標準偏差も併せて表示している。重量変化は、前後から接着部に浸入する水分の変化と等しくなっている。これによると、浸漬直後に測定された接着部の水分は、データのばらつきが大きいものの、温度条件によらず経時的に増加する傾向にある。さらに、この傾向は 112 日を経過した後も持続しており、接着部の水分は飽和していないと考えられる。また、浸漬直後と乾燥後に測定された重量を比較すると、両者の差は明確に認められない。接着部の水分は、試験体の乾燥ではほとんど蒸発しなかったと考えられる。

温度条件による相違を調査すると、浸漬期間の短い 28~56 日後では、全体的に温度の高い 60℃ の試験体で含有水分が多くなる傾向にある。しかし、浸漬期間の長い 84~112 日後には、この傾向が解消され、

両者の差はほとんど見られなくなる。樹脂の含有水分は、基本的に温度が高くなると増加すると考えられる。そのため、接着部の温度は、外側では短期間で上昇するが、内側では大きく上昇しなかったと推察される。

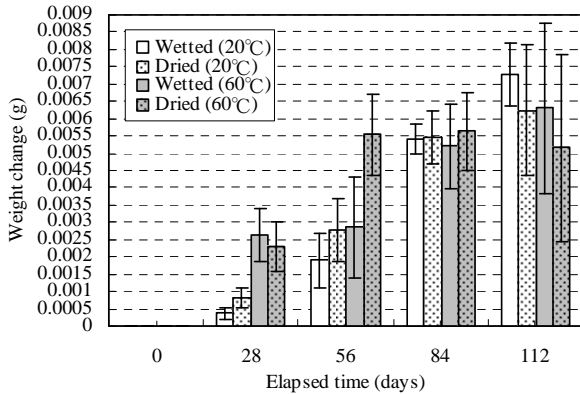


図-15 シングルラップ接着接合 (SUS316L) の重量変化

図-16 は、ダブルラップ接着接合の重量変化を示したものである。この場合には、重量変化は、前後面から接着部に浸入する水分と表裏面から FRP に浸入する水分の合計と等しくなっている。これによると、浸漬直後に測定された重量は、図-15 と同様にデータのばらつきは非常に大きい。温度条件によらず 56~84 日後にピークを迎えた後に減少に転じることが確認される。重量の減少は、接着部の水分が 112 日後まで一貫して増加していることを考慮すると、FRP の樹脂が含有水分との水和反応により崩壊したことが要因の一つと考えられる。また、浸漬直後と乾燥後に測定された重量を比較すると、蒸発面積が大きい FRP 試験体の場合でも、両者の差は明確に認められなかった。本試験結果からは、接合部の樹脂に含有された水分は、乾燥ではほとんど蒸発しなかったと考えられる。

温度条件による相違を調査すると、接着部とは異なり、浸漬期間によらず温度の高い 60°C の試験体で含有水分が多くなっている。これは、試験体樹脂の含水への寄与度が高いことを示すものである。FRP の材厚が接着長に比べて小さいことを考慮すると、FRP 内部の温度上昇は接着内部より大きいと考えられる。この場合には、全ての浸漬期間にわたって、浸漬温度の高い試験体の水分が多くなる。また、温度が高い場合には樹脂の水和反応が促進されると考えられるため、樹脂の崩壊も 60°C の試験体で大きくなると推察される。

また、FRP を試験体としたシングルラップ接着接

合の重量変化も、ダブルラップ接着接合とほぼ同様の結果となっている。接合形式の相違が含有水分にほとんど影響しないことを考慮すると、ダブルラップ接着接合を対象とした上記の検討は、シングルラップ接着接合にも適用できると判断される。

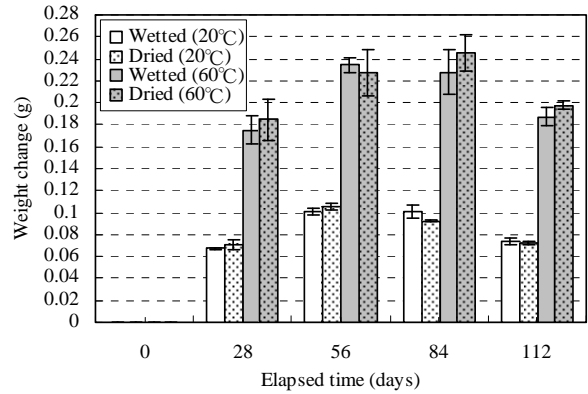


図-16 ダブルラップ接着接合の重量変化

2) 環境劣化強度

図-17 は、シングルラップ接着接合の静的最大荷重を示したものである。図には標準偏差も併せて表示している。浸漬直後に測定された最大荷重は、重量変化と同様に、データのばらつきは非常に大きい。温度条件によらず、浸漬により減少することが確認される。特に、浸漬期間の短い 28 日後に大きく減少しており、それ以後の減少は非常に小さい。最大荷重の変化と重量変化を比較すると、最大荷重の減少は水分の増加より速く進展することが分かる。含有水分が浸漬期間中にほとんど蒸発しないことを考慮すると、強度劣化に寄与する水分は全体の一部に止まると推察される。また、浸漬直後と一定重量となる乾燥後に測定された最大荷重を比較すると、温度条件によらず、乾燥後が浸漬直後を上回っている。試験体は、静的破壊と同様に、添接板と接着剤の界面で破壊する。界面での接着は、接着部の水分により全てが非可逆的に劣化することではなく、一部は可逆的に劣化する部分もあると考えられる。

温度条件による相違を調査すると、60°C で浸漬した試験体の方が大きく劣化しており、28 日後にほぼ完了していることが確認される。一般的に、温度が高くなると、水和反応等の化学反応が促進されるため、接着構造に大きな変化が生じると考えられる。また、60°C で浸漬した試験体の最大荷重は、含有水分がほぼ等しくなる 112 日後でも 20°C で浸漬した試験体の最大荷重より小さくなっている。従って、高温で浸漬した試験体は、低温で浸漬した試験体よりも、非可逆的な劣化が促進されると考えられる。こ

これは、乾燥後の強度回復が、20℃より60℃で小さいことから示唆されている。

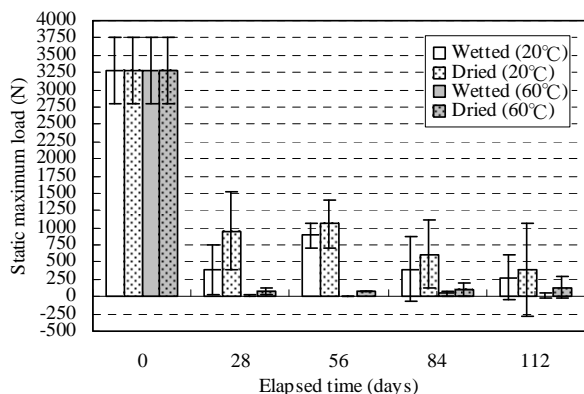


図-17 シングルラップ接着接合 (SUS316L) の静的最大荷重

図-18 は、ダブルラップ接着接合の静的最大荷重を示したものである。図には標準偏差も併せて表示している。これによると、浸漬直後に測定された強度は浸漬により減少することが確認される。特に、浸漬期間の短い28日後に大きく減少しており、それ以後の減少は比較的小さくなる傾向にある。この傾向は、SUS316Lを供試体と添接板に適用したシングルラップ接着接合と定性的に一致している。また、最大荷重の減少も水分の増加より速く進展していることが確認される。

浸漬直後と重量が一定となる乾燥後に測定された最大荷重を比較すると、SUS316Lを試験体に用いたシングルラップ接着接合同様に、乾燥後に最大荷重が回復する傾向にある。しかし、乾燥後に強度が回復する程度は、ダブルラップ接着接合の方が大きい。以上の結果からは、可逆的な界面接着の劣化は、多くが剥離ではなくせん断で生じると推察される。しかし、FRPを供試体としたシングルラップ接着接

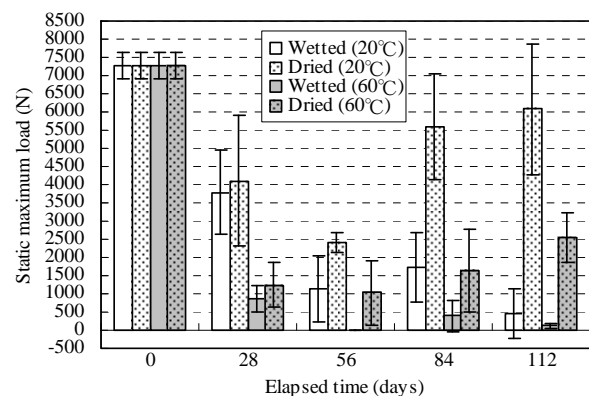


図-18 ダブルラップ接着接合の静的最大荷重

合でも、ダブルラップ接着接合同様に、乾燥後に強度が大きく回復しているため、明確に判断することは困難である。

4. まとめ

本研究では、ラップ形式のFRP接合を評価することを目的として、静的強度の他、疲労強度や環境劣化強度等の長期強度を実験的に検討した。その結果、以下のことが確認された。

- 1) 静的強度は、接合形式や添接板の表面状態に依存するが、材質には依存しない。ダブルラップ接着接合の強度は、添接板の表面処理にほとんど影響されない。一方、ボルト併用ダブルラップ接着接合の強度は、添接板の表面状態に大きく影響される。接着端が添接板と接着剤界面のせん断塑性流動により移動する場合には、ボルト軸力に伴う強度の増加は小さくなる。また、シングルラップ接着接合の強度も、添接板の表面状態に大きく影響される。添接板の表面凹凸が大きい場合は接着剤とFRPの界面で破壊するが、表面凹凸がほとんどない場合は添接板と接着剤の界面で破壊する。これは、添接板と接着剤の界面強度が剥離応力に対して小さいことが要因であり、結果的に接合強度のばらつきを引き起こす。
- 2) 疲労強度は接合形式や添接板の表面状態に大きく依存するが、その程度は静的強度と異なる。静的試験ではFRPで破壊する表面状態でも、疲労試験では添接板と接着剤の界面で破壊する場合がある。これは、添接板の表面状態が界面の塑性軟化に大きく影響を及ぼすためと考えられる。また、ボルト併用ダブルラップ接着接合の強度は、界面が塑性軟化する場合には、接着端の移動により、疲労強度が大きく減少する。
- 3) 環境劣化強度は浸漬期間よりも温度の影響を大きく受ける。水分による接着界面の劣化には、非可逆劣化と可逆劣化があり、高温では非可逆劣化が促進されると考えられた。

今後は、環境劣化強度の検討を目的として、更にデータを収集すると共に、様々なパラメータに対する試験を行っていくことが必要である。

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）

A study on the long term durability of joint structures for composite materials

【英文要旨】

FRPs (Fiber Reinforced Plastics) are composite materials with high-corrosion resistance and going to be widely applied to infrastructure. Application of FRP to infrastructure requires joints of FRP and ordinary members. The aim of this study is to obtain the strength properties of FRP applied joints experimentally. Joint types are double-lap adhesive joints, double-lap adhesive bolted joints and single-lap adhesive joints. Experimental results showed the static and fatigue joint strength affected by the joint type and surface condition of attached plate. They also showed the effects of bolt clamping force on the joint strength affected by the surface condition of attached plate. On the other hand, experimental results by accelerated immersion tests showed the effects of water on the strength deterioration affected by immersion temperature.

Key words: FRP, joint, static strength, fatigue strength, environmental deterioration