

CFRP 板接着により補修された面外ガセット溶接継手部き裂の疲労寿命予測

Fatigue Life Prediction for Fatigue Crack at Out-of-Plane Welded Gusset Joint Repaired with CFRP Strips

中村一史*, 姜 威**, 前田研一***, 鈴木博之†, 入部孝夫††, 福田欣弘†††

Hitoshi Nakamura, Wei Jiang, Ken-ichi Maeda, Hiroyuki Suzuki, Takao Irube, Yoshihiro Fukuda

* 博(工), 首都大学東京大学院 助教, 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域(〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

** 博(工), 大林組 URUP 湾岸船橋工事事務所(〒273-0014 船橋市高瀬町 62-2)

*** 工博, 首都大学東京大学院 教授, 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域(〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

† 工博, 明星大学 教授, 理工学部建築学科(〒191-8506 日野市程久保 2-1-1)

†† 工修, 東京鐵骨橋梁 技術本部長(〒302-0038 取手市下高井 1020)

††† JX 日鉱日石エネルギー 中央技術研究所 化学研究所(〒231-0815 横浜市中区千鳥町 8)

This study aims at predicting quantitatively the fatigue life of out-of-plane welded gusset joints repaired by the proposed CFRP strips based on fracture mechanics. With reference to past experimental results, the shapes peculiar to the weld bead of out-of-plane welded gusset joints was modeled and the linear FE analyses were examined. Since the experimental results showed the evidence of debonding of CFRP strips around the weld toe, the influences of debonding were also considered. Furthermore, while comparing the reduction effect of the stress intensity factor at the tip of a crack, the crack progress analyses were conducted and the fatigue life were predicted after repair.

Key Words: CFRP Strips, Fatigue Crack, Repair, Fatigue Life

キーワード: CFRP 板, 疲労き裂, 補修, 疲労寿命

1. 緒言

都市部における幹線道路などの鋼橋では、交通量の増加や、大型車両の通行による疲労損傷が数多く報告されている¹⁾。鋼部材に一旦、疲労き裂が発生すると、き裂が徐々に進行し、主要部材が破断に至る可能性もあり、その対策が重要な課題となっている。疲労き裂の補修では、き裂進展の防止あるいは遅延を図るために、一般に、ストップホールと呼ばれる拡大孔を施工して、き裂先端を除去し、応力集中を緩和する対策が取られる。さらに、補修効果の高い、ボルト締めや、添え板を併用する工法も適用されている¹⁾。しかしながら、これらの補修作業は狭隘な環境下で行われることが多く、特に、添え板で補強する場合、部材同士の取り合いを考慮して、ボルトの穿孔位置や添え板を設計、製作する必要があるため、作業工程が煩雑となる。また、実橋における種々の制約の下では、所要寸法の添え板の設置が困難であるケースもある。したがって、施工が容易で、効果的な補修工法が望まれている。

近年、FRP 接着による鋼構造物の補修・補強に関する

研究・開発が活発に行われており、鋼橋などの実構造物への適用が国内外で試験的に実施されている²⁾。中でも、軽量かつ高強度、高弾性率の特徴を有する炭素繊維強化樹脂板(以下、CFRP 板と呼ぶ)は、現場でのハンドリングに優れ、接合方法は接着のみであるため、簡便な補修・補強工法として期待されている。

しかしながら、疲労き裂補修への FRP の適用を目的とした基礎的な研究^{3,4)}は行われているものの、溶接接合部から発生する疲労き裂に対しては、特有のディテール、応力状態などを考慮する必要があるため、実構造への適用事例^{5,6)}は非常に少ない。

著者らは、これまでに面外ガセット継手の回し溶接部から発生した疲労き裂を補修の対象として、CFRP 板接着による補修方法を提案し、その効果を実験的に検証した⁷⁾。疲労試験による S-N 関係から CFRP 板の接着方法や積層数の相違を相対的に示したが、その実用化にあたっては、様々な設計条件の下での適用性を検討する必要があるため、補修効果を定量的に把握しておくことが不可欠である。特に、提案した CFRP 板接着方法では、疲労限は得られず、応急対策として位置づけられるため、

疲労寿命を予測できるかどうか重要な検討事項である。

一方、FRPが接着された金属系材料の疲労寿命については、航空、宇宙分野において検討されている⁸⁾。線形破壊力学に基づいたき裂進展解析⁹⁾によって予測が可能であるとされている。土木分野においても、FRP接着による疲労き裂の補修効果を明らかにするために、有限幅板中の中央貫通き裂モデルを対象に疲労寿命の評価が試みられている^{3), 10), 11)}。

そこで、本研究では、面外ガセット溶接継手部から発生した疲労き裂の補修を想定して、提案したCFRP板接着による延命効果を定量的に把握することを目的とした。ここでは、過去の実験結果⁷⁾に基づいて、溶接継手特有の形状をモデル化し、線形弾性有限要素解析によって検討を行った。実験では、溶接ビード回し溶接近傍で、CFRP板のはく離の兆候が見られたことから、それらの影響も検討した。さらに、き裂先端の応力拡大係数を算定して、その低減効果を比較するとともに、線形破壊力学に基づくき裂進展解析を行って、疲労寿命の推定を試みた。

2. 面外ガセット溶接継手に発生した疲労き裂のCFRP板接着による補修方法

検討対象とした面外ガセット溶接試験片 (SM400A, 公称板厚 9mm, ヤング係数 204.5 GPa, 降伏点 293 MPa, 引張強度 453 MPa) を図-1 に示す。過去に行われた疲労試験⁷⁾では、まず、試験片の長手方向に繰返し引張荷重を与え、面外ガセットの回し溶接止端部から疲労き裂を発生させた。き裂長さの半長 a が約 15mm に達した時

点では貫通き裂となり、この時に、図-2 に示すような2つの方法でCFRP板をエポキシ樹脂接着剤で接着して補修を行った。補修作業は、载荷治具から試験片を、一旦、取り外して無負荷状態で行った。

まず、図-2 (a)のSシリーズは、き裂先端を1層のCFRP板で補修する方法である。このSシリーズでは、応力集中が最も高くなるき裂の先端にCFRP板がちょうどかかる位置で補修を行うことで、き裂先端の応力集中を緩和することを想定している。

また、図-2 (b)のMシリーズは、ペンシルグラインダーで溶接ビードの断面形状を等脚に仕上げた後、CFRP板に矩形の切り込みを入れ、切り込み部が溶接ビードに密着するように、段階的にCFRP板を積層して接着するとともに、その外側にもSシリーズと同様のCFRP板を接着して補修する方法である。このMシリーズでは、積層したCFRP板を溶接ビードに密着して、き裂の開口部を完全に覆い、補修効果をより高めることを想定している。さらに、実験では、矩形に切り欠いたCFRP板の積層数を1, 3, 5層と変化させて検討を行った。接着剤が十分に硬化した後、再び繰返し载荷を行って、試験片が破断するまで疲労試験を実施した。

なお、CFRP板の寸法形状は、最適化されたものではないが、同様のディテールを考慮した接着継手試験片による引張試験を実施して、十分な接着強度を有していることが確かめられている¹²⁾。

本研究では、無補修のNシリーズ、Sシリーズ、および、Mシリーズのうち1層 (M1)、5層 (M5) のケースについて比較検討を行うこととした。

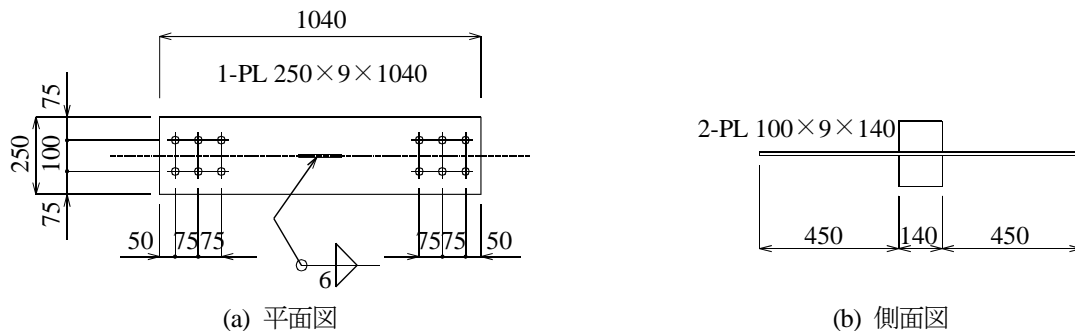


図-1 対象とした面外ガセット試験片

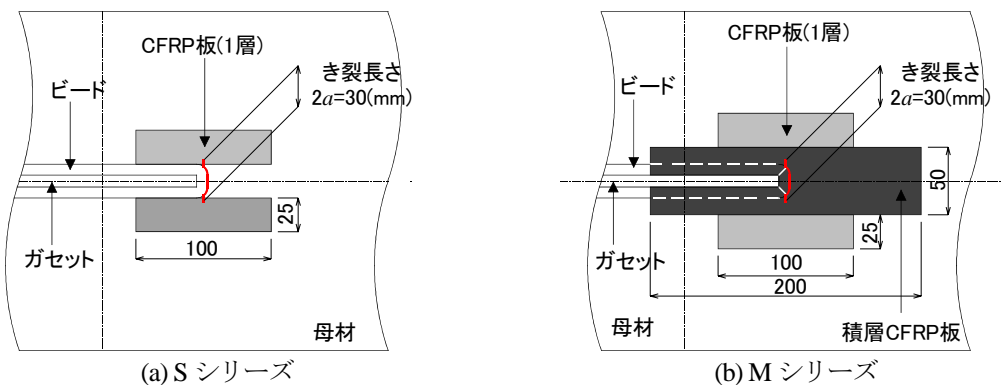


図-2 CFRP板接着による補修方法

3. 解析モデルと解析方法

数値解析には、汎用有限要素解析プログラム MSC Marc 2005r3 を適用して、線形弾性解析を行った。面外ガセット溶接試験片のモデル化にあたっては、8 節点ソリッド要素 (Marc 要素番号 7) を用い、図-3 (a) に示すように、面外ガセット試験片の対称性を考慮して、全体の 1/4 の部分モデルを作成した。解析モデルの寸法と境界条件を図-3 (b) に示す。荷重条件については、一様な引張応力 $\sigma_n=100\text{MPa}$ を長手方向に載荷した。

数値解析モデルの一例として、図-4 に、き裂長さ $a=15\text{mm}$ における拡大図を示す。図-4 は、き裂とその

進展方向の断面に対して、面外ガセット側の部分のみを取り出して示したものである。まず、図-4 (a) の S シリーズでは、図-2 (a) と同様に、単層 CFRP 板 (幅 25mm × 長さ 100mm) は、中心から $15\sim 40\text{mm}$ までの範囲に設置されている。図-4 (b) には、M シリーズのうち、5 層接着した M5 を示しているが、図-2 (b) と同様に、積層 CFRP 板 (半幅 25mm × 長さ 200mm) は、中心から 25mm までの範囲に設置され、その外側に隣接して、単層 CFRP 板 (幅 25mm × 長さ 100mm) が設置されている。

各部材の材料物性値を表-1 に示す。CFRP 板は直交異方性を考慮してモデル化した。鋼板および CFRP 板の厚さは、公称値とし、それぞれ 4.5mm (対称条件より半分

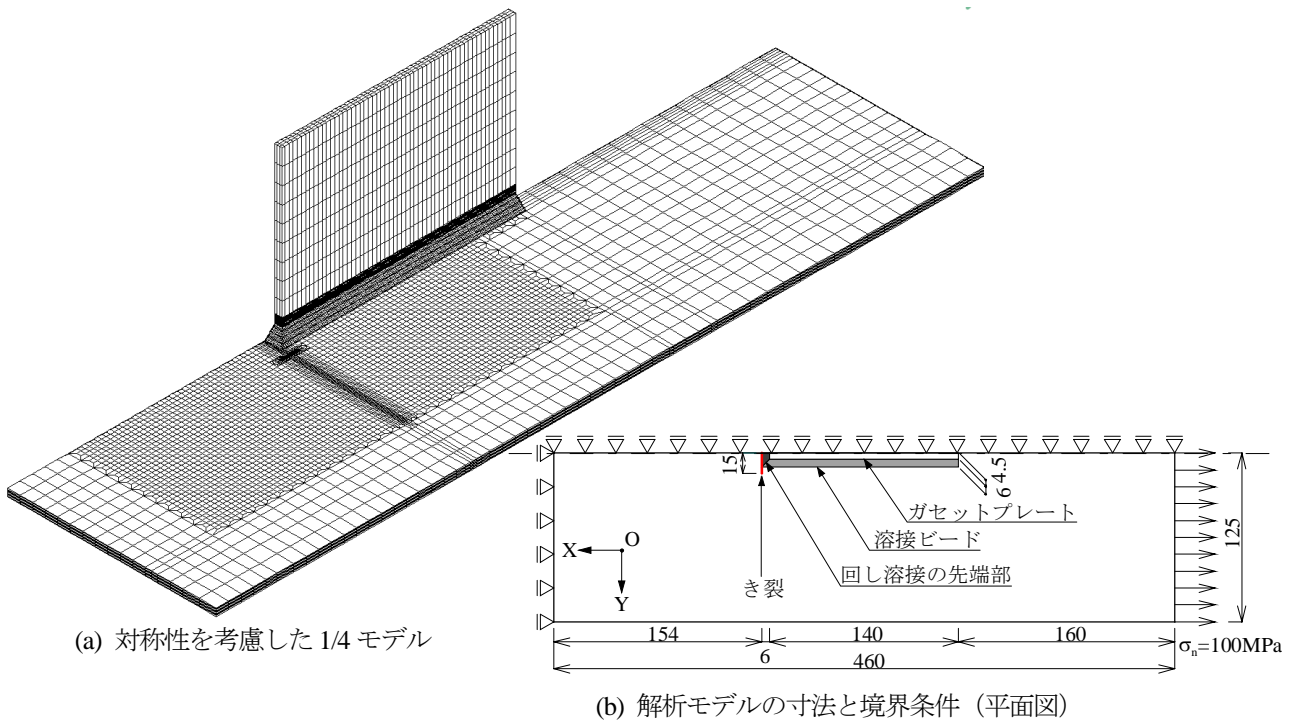


図-3 面外ガセット試験片と疲労き裂のモデル化 (き裂長さ $a=15\text{mm}$)

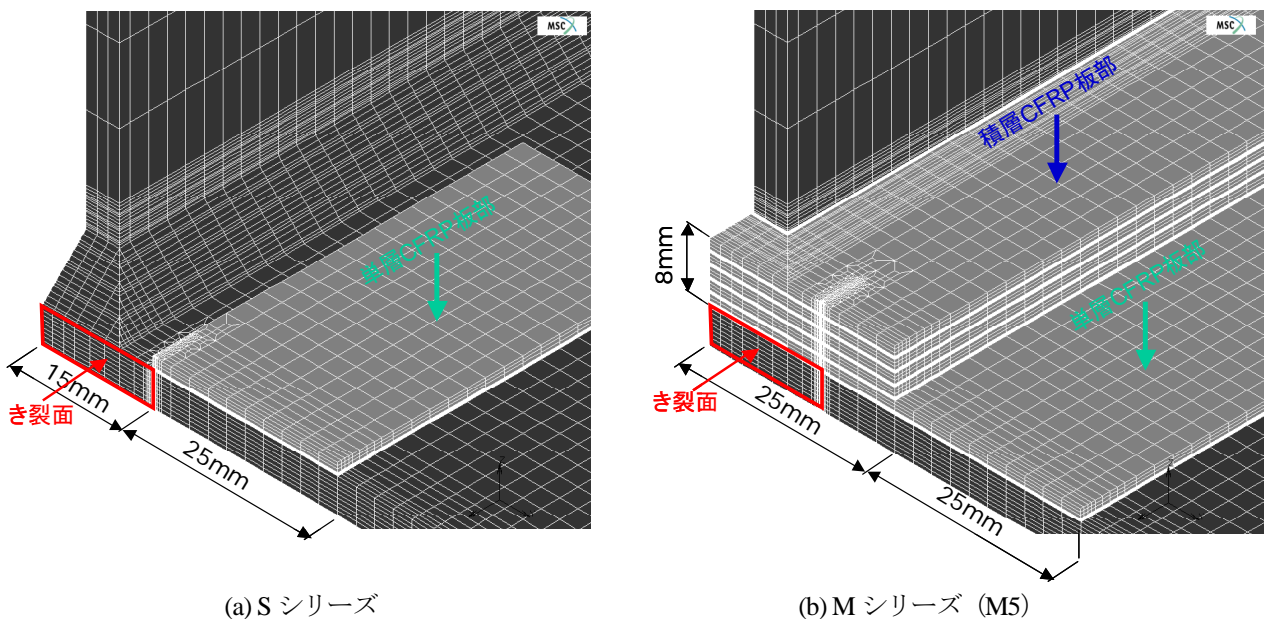


図-4 き裂長さ $a=15\text{mm}$ における数値解析モデルの一例

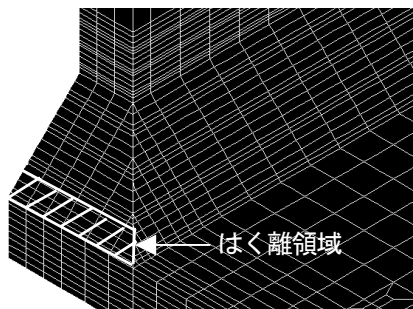
の厚さ) および 1.2mm とした. エポキシ樹脂接着剤の厚さについては, 過去の実験⁷⁾では厚さを管理しなかったため, 平均厚さの実測値は 0.2~0.4mm の範囲でばらついていた. 本研究では, 安全側の評価となるように 0.4mm を採用した. また, 平面内におけるき裂先端の最小メッシュのサイズは 0.05×0.05mm とし, 厚さ方向には, 鋼板 (半厚さ), CFRP 板およびエポキシ樹脂接着剤で, それぞれ 10 分割, 3 分割および 2 分割してモデル化した.

き裂は 2 重節点でモデル化した. き裂長さ a は 15~50mm まで 5mm の間隔で変化させ, N, S および M (M1, M5) の各シリーズに対して, 8 ケースの解析モデルをそれぞれ作成した. 加えて, M1 では, 実験結果と比較するために, き裂長さ 55mm の解析モデルも作成した.

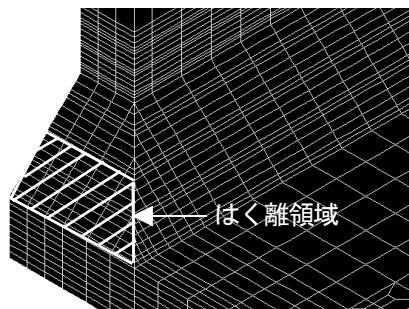
さらに, 疲労耐久性の評価にあたっては, 補修材料である CFRP 板やエポキシ樹脂接着剤の疲労特性についても考慮する必要がある. M シリーズの疲労試験⁷⁾によると, 繰返し回数の増加に伴って, 回し溶接の先端部付近の積層 CFRP 板では, 荷重の伝達が低くなり, 部分的にはく離が生じたものと考えられたが, き裂長さ a が 15~50mm までの範囲においては, CFRP 板の疲労破壊や CFRP 板全体のはく離は生じなかった. そこで, 本研究では, 回し溶接の先端部におけるエポキシ樹脂接着剤のはく離の程度が, き裂進展に伴う応力状態や, 疲労寿命の推定に及ぼす影響について比較することとした.

表-1 各部材の材料物性値

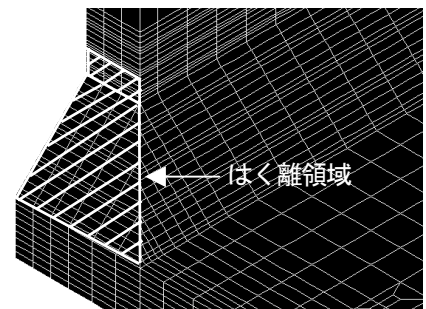
鋼板		
ヤング係数 (GPa)	E_s	204.5
ポアソン比	ν_s	0.3
CFRP 板		
ヤング係数 (GPa)	E_{cx}	188
	E_{cy}	8
	E_{cz}	8
せん断弾性係数 (GPa)	G_{cxy}	5.2
	G_{cyz}	4.0
	G_{czx}	5.2
ポアソン比	ν_{cxy}	0.34
	ν_{cyz}	0.005
	ν_{czx}	0.005
エポキシ樹脂接着剤		
ヤング係数 (GPa)	E_b	1.5
ポアソン比	ν_b	0.3



(a) 完全はく離モデル (M1)



(b) 半分はく離モデル (M5)



(c) 完全はく離モデル (M5)

図-5 M シリーズで仮定した回し溶接の先端部のはく離領域

表-2 仮定した回し溶接の先端部のはく離状態

回し溶接の先端部のはく離状態	M1	M5
はく離なし	○	○
半分はく離	—	○
完全はく離	○	○

表-2 に, 仮定した回し溶接の先端部のはく離状態と解析モデルとの対応関係を示す. まず, M1 では, ①はく離を考慮しないモデル, ②回し溶接の先端部が完全にはく離したモデルを作成した. また, M5 では, M1 と同様に, ①はく離を考慮しないモデル, ②回し溶接の先端部が完全にはく離したモデルに加えて, ③回し溶接の先端部の半分はく離したモデルを作成して検討した.

図-5 に, M シリーズの回し溶接の先端部において, はく離を仮定した領域をそれぞれ示す. はく離は, 回し溶接の先端部と接触している接着層の要素を取り除くことで考慮した. なお, 図-5 (b)に示したように, M5 において, 回し溶接の先端部の半分はく離したモデルでは, その接着面積のおよそ半分 (下から 2 層目の CFRP 板までの範囲) をはく離した範囲として仮定した.

4. CFRP 板と鋼板の応力分布の比較

M シリーズにおける数値解析のモデル化の妥当性および回し溶接の先端部のはく離の影響を検証するために, CFRP 板と鋼板の応力分布を, 疲労試験中に実施された静的載荷実験の結果と比較することとした. ここでは, 補修時 (き裂長さ約 15mm), および, き裂が CFRP 板の接着範囲を貫通した時 (き裂長さ約 50mm) において, き裂進展の断面上の CFRP 板と鋼板の応力分布に着目した. なお, 回し溶接の先端部におけるはく離の検出は, 技術的に困難であるため, 本研究では, 試験片中心部に設置された CFRP 板表面のひずみゲージの値の変化から推察した. すなわち, 回し溶接の先端部にはく離が生じると, CFRP 板による荷重の負担が小さくなり, ひずみゲージの値も低下するものと考えた.

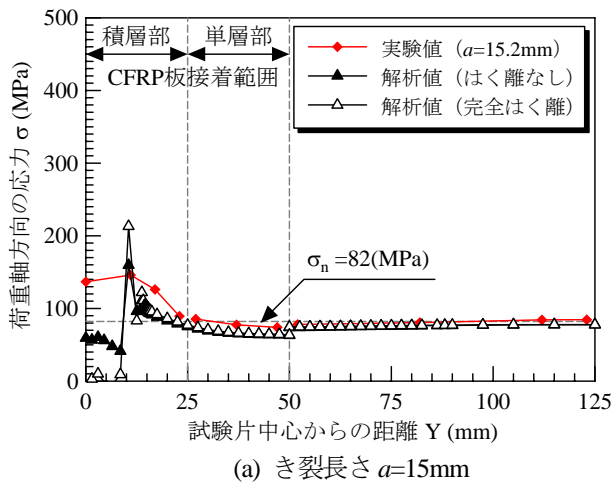
図-6, 図-7 に, M1 および M5 シリーズについて, 実験値と解析値を比較してそれぞれ示す. 回し溶接の先端部のはく離状態については, 表-2 で示した各ケース

を比較して示している。実験値は公称応力 $\sigma_n = 82\text{MPa}$ の結果であり、解析結果を0.82倍して比較した。

図-6のM1について、まず、実験値に着目すると、き裂長さが15.2mmから55.2mmに変化するにしがたって、CFRP板および鋼板の応力は全体的に高くなるが、試験片中心部におけるCFRP板の応力は零になり、荷重を伝達していないことが解る。したがって、回し溶接の先端部ではく離が生じたものと考えられる。ここでは、図を略したが、き裂がCFRP板の接着範囲に進展したと考えられる、84万回時(補修後の繰返し回数)に静的載荷実験を実施したが、この時点でも試験片中心部におけるCFRP板の応力は零であった⁷⁾。M1では、回し溶接の先端部におけるCFRP板の接着面積は小さいことを踏まえると、疲労試験の比較的早い段階ではく離したものと予想される。

これらの実験結果に対して解析結果を比較すると、図-6(a)のき裂長さ15mmでは、試験片中心部のCFRP板の応力は、はく離なしの解析値よりも実験値の方が高くなっているものの、それ以外では、両者は良い一致を示すことが解る。

また、図-6(b)のき裂長さ55mmについては、単層部



のCFRP板の応力は解析では小さく評価されていること、また、試験片中央部では、回し溶接の先端部が完全にはく離したものと仮定すればよいことが解る。したがって、M1の解析モデルでは、全体として実験結果の応力性状を反映しているといえる。なお、M1の解析結果では、試験片中心から10mmの位置で、CFRP板の応力が顕著に高くなるが、これはCFRP板の切り込み部の応力集中によるものである。

一方、図-7のM5については、まず、実験値のき裂長さは、補修時で17.2mmであった。また、き裂がCFRP板接着範囲を貫通した時の適切な計測値がなかったため、貫通前に、ひずみゲージで計測されたひずみ差からモニタリングする手法¹³⁾によって予測されたき裂長さ(約47mm)を採用した。したがって、解析値のき裂長さ(15mmおよび50mm)とは若干異なっている。

図-7から、き裂長さに関わらず、CFRP板の積層部以外では、解析結果は、実験による応力分布の性状を比較的良く反映していることが解る。また、積層部の応力を比較した場合、解析値は、実験値の半分程度であることが解る。さらに、試験片中心部の応力は、半分はく離、はく離なし、完全はく離の順に応力が高くなるが、その

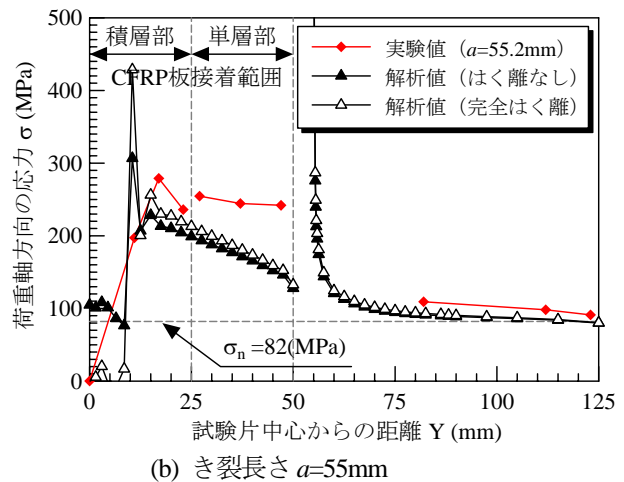


図-6 M1における鋼板、CFRP板上の応力分布の比較

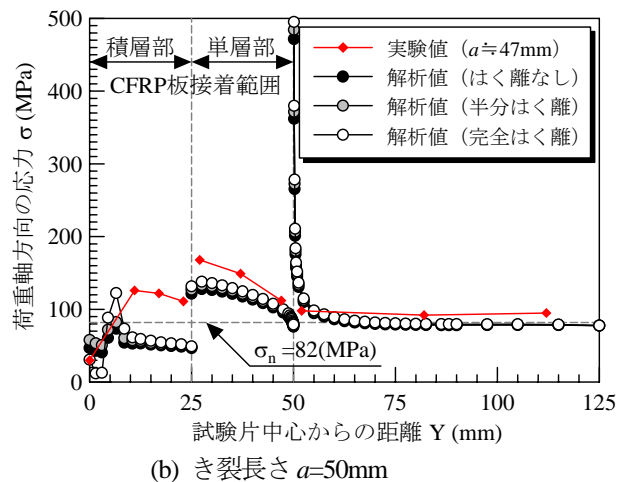
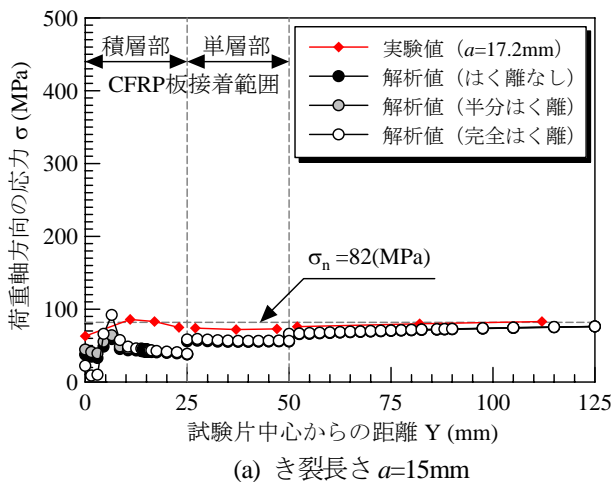


図-7 M5における鋼板、CFRP板上の応力分布の比較

差異は小さいことも解る。なお、解析において CFRP 板の応力が、実際よりも過小に評価される要因については、接着接合された積層 CFRP 板のせん断遅れの影響などが考えられるが、今回の検討では明らかにすることができなかった。

以上のことから、仮定したはく離領域の相違により、試験片中心部の CFRP 板の応力に差異を生じたが、その範囲は限定的であり、はく離が全体の応力分布に及ぼす影響は小さいといえた。

5. CFRP 板接着による応力拡大係数の低減効果

5.1 き裂先端の応力拡大係数の評価方法

き裂先端の応力拡大係数の算定には、変位外挿法、応力外挿法、エネルギー解放率による方法など¹⁴⁾があるが、事前検討¹⁵⁾により、CFRP 板接着補修によっても安定して算定することができるエネルギー解放率による方法を適用することとした。汎用有限要素解析プログラムによってき裂先端のエネルギー解放率 g を求め、式(1)より応力拡大係数を算定した¹⁴⁾。

$$g = K^2 / E_s \quad (1)$$

ここに、 E_s は鋼板のヤング係数、 K は応力拡大係数である。

さらに、比較のために、無補修時における応力拡大係数 K の理論解を、無限板中の中央貫通き裂の理論解に対して、有限板の幾何形状の影響による補正係数を考慮した次式から算定した¹⁴⁾。

$$K = F_w \cdot \sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

ここに、 σ_n は鋼板の公称応力、 a はき裂長さの半長、 F_w は、有限板の幾何形状の影響による補正係数であり、 a を鋼板の全幅 W で無次元化した $\xi (=2a/W)$ により、次式で与えられる。

$$F_w = (1 - 0.025\xi^2 + 0.06\xi^4) \sqrt{\sec \frac{\pi\xi}{2}} \quad (3)$$

5.2 板厚方向の応力拡大係数の比較

き裂長さ 15mm, 25mm, 50mm における全ての解析ケースについて、き裂先端の厚さ方向における応力拡大係数の分布を、図-8 に比較して示す。

まず、式(2)の有限幅板中の中央貫通き裂の理論解に対して、無補修の N では、面外ガセットによる構造的な応力集中のため、応力拡大係数が高くなるが、き裂長さが長くなるにしたがって、その影響は小さくなり、き裂長さ 50mm では、N の平均値で比較した場合、式(2)の理論解と同程度になる。

また、補修した全ケースで、き裂長さに関わらず、無補修の N と比べ、応力拡大係数が低減されていることが解る。その低減効果は、S, M1, M5 の順に高くなっていること、また、M シリーズで回し溶接の先端部におけるはく離の形態を比較した場合、応力拡大係数の差異はわずかであることも確かめられる。

さらに、全ての解析ケースで、鋼板の板厚方向に対して、鋼板の表面に近いほど応力拡大係数が小さくなるが、9mm 程度の板厚では、表面と板厚中心で応力拡大係数の差異は小さいといえた。したがって、次節以降では、厚さ方向に分布する応力拡大係数をその平均値で評価することとした。

5.3 き裂長さと応力拡大係数の関係

回し溶接の先端部のはく離を考慮していない M シリーズにおけるき裂長さと応力拡大係数の関係を図-9 に示す。図中には、式(2)による理論解、無補修の N シリーズおよび単層 CFRP 板接着による S シリーズについても併記している。

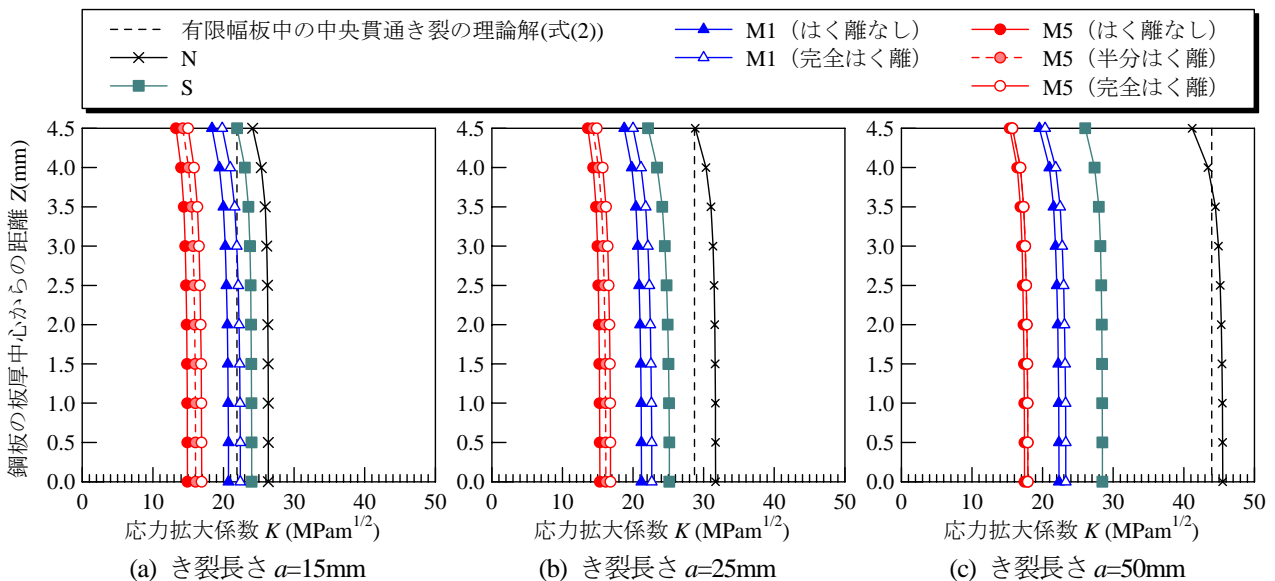


図-8 き裂先端の厚さ方向における応力拡大係数の分布

まず、無補修のNについては、理論解と解析値に差異がみられる。これは、前節で述べたように、面外ガセットによる構造的な応力集中による影響であり、き裂長さが短いほどその影響が大きくなる。また、き裂長さが50mmになるとその影響は小さくなり、Nの解析値は理論解とほぼ一致する。

次に、Sの解析結果からは、き裂長さが15mmの時(補修時)には、Nの解析値と比べて応力拡大係数の低減効果は小さいが、疲労き裂がCFRP板の接着範囲を貫通する前(40mm)までは応力拡大係数はほとんど増加せず、き裂長さが40mm以上になると増加することが解る。

これに対して、はく離を考慮していないMシリーズの解析結果からは、Sと比較した場合、応力拡大係数の値がさらに低く抑えられており、積層数が増えるほどその低減効果が大きいことが解る。また、き裂長さが25~50mmの範囲には、単層部のCFRP板が接着されているが、この範囲における応力拡大係数も低く抑えられていることも確かめられる。

図-10に、はく離の影響を考慮したMシリーズにおけるき裂長さと応力拡大係数の関係を示す。図-10(a)

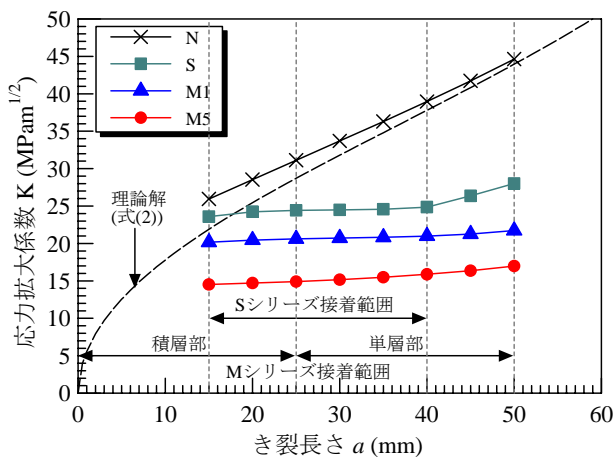


図-9 はく離を考慮していないMシリーズにおけるき裂長さと応力拡大係数の関係

のM1からは、回し溶接の先端部の接着が完全にはく離した場合、応力拡大係数の値がわずかに増加すること、また、完全にはく離の場合の補修効果は、Sシリーズと比べて若干高いことも解る。

図-10(b)のM5については、回し溶接の先端部におけるはく離の形態を比較すると、はく離を仮定した領域が大きいほど、応力拡大係数が増加するものの、それらの差異は小さいことが解る。さらに、き裂長さが長くなると、はく離の影響が小さくなることも確かめられる。

以上のことから、補修方法の相違や、回し溶接の先端部におけるはく離の程度が、き裂先端の応力拡大係数に及ぼす影響が示されたが、疲労寿命を推定する場合には、数値積分を実施する必要があるため、き裂長さ a と応力拡大係数 K の関係が連続関数で表示されると都合がよい。また、上述した解析結果は、公称応力 $\sigma_0=100\text{MPa}$ に対する応力拡大係数であるため、一般化して表示する必要もある。

そこで、これらの応力拡大係数を無限板中の中央貫通き裂の理論解($\sigma\sqrt{\pi a}$)の値で除して無次元化して示すとともに、き裂長さ a と無次元応力拡大係数の関係を多項式による近似曲線で与えることとした。

図-9、図-10を再整理して、き裂長さ a と無次元応力拡大係数の関係を、図-11に示す。全ての補修ケースで、き裂長さが長くなるほど、無次元応力拡大係数の値が低減されていることが解る。

ここでは、図-11で示された無次元応力拡大係数とき裂長さ a の関係を踏まえ、最小二乗法による多項式の近似曲線で表現する。無次元応力拡大係数 F_c の近似曲線を、式(4)のように定義して、それらの係数を表-4に示す。

$$F_c = A \cdot a + B \cdot a^{1/2} + C \quad (4)$$

式(4)は、表に併記した相関係数から高い精度で近似されていることが解る。なお、式(4)におけるき裂長さ a の適用範囲は15~50mmである。

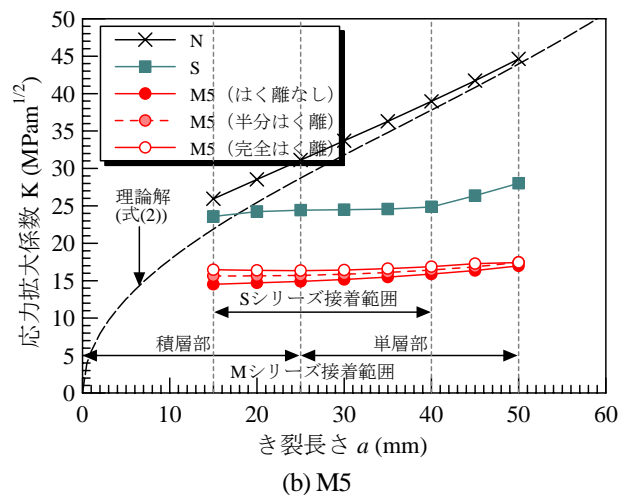
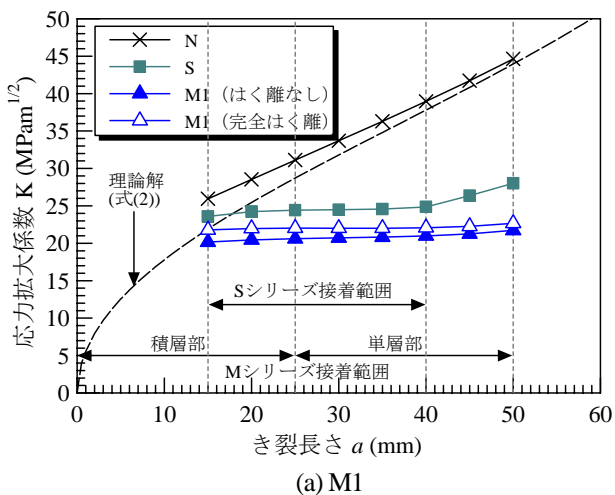


図-10 はく離の影響を考慮したMシリーズにおけるき裂長さと応力拡大係数の関係

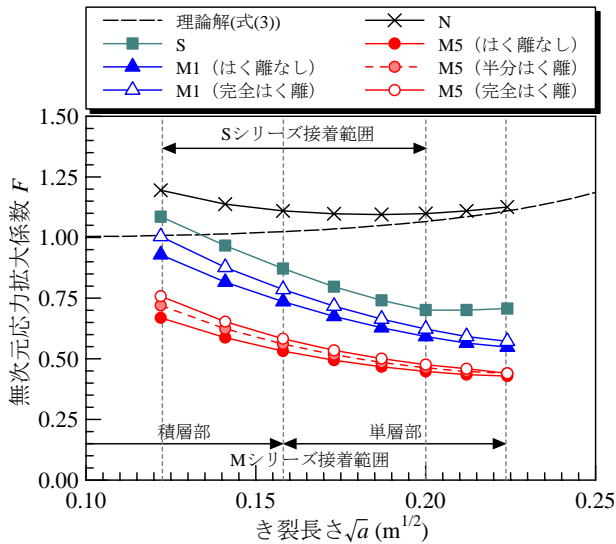


図-11 き裂長さと無次元応力拡大係数の関係

6. き裂進展解析による疲労寿命の推定

6.1 疲労寿命の算定条件

疲労き裂の進展は、次式のParis則⁹⁾に従うものとして、疲労寿命の推定を行った。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (5)$$

ここで、 N は繰返し回数、 a はき裂長さの半長、 C 、 m は材料定数、 ΔK は応力拡大係数範囲、 ΔK_{th} は下限界応力拡大係数範囲である。

また、疲労寿命の算定にあたっては、式(5)を積分して表示される次式⁹⁾から求めた。

$$N_p = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)} da \quad (6)$$

ここで、 a_i は初期き裂長さ、 a_f は任意のき裂長さであり、 N_p はき裂長さが a_i から a_f に至るまでに要する繰返し回数(疲労寿命)である。

材料定数 C 、 m および下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} については、文献9)に示された平均設計曲線の値を準用することとし、それらの値を表-5に示す。ここでは、CFRP板接着により補修した場合についても同一の値を適用した。

き裂長さの設定範囲については、補修後からき裂が進展して、CFRP板の接着範囲を貫通するまでとし、ここでは、15mmから50mmまでの範囲とした。すなわち、 $a_i=15\text{mm}$ 、 $a_f=50\text{mm}$ である。

計算手順については、まず、応力範囲 $\Delta\sigma_n$ を疲労試験と同じ、64、84、100、114MPaと設定し、各応力範囲に対して、式(7)から応力拡大係数範囲 ΔK を求める。

$$\Delta K = F_c \cdot \Delta\sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

ここに、 F_c は、式(4)で与えられる無次元応力拡大係数である。さらに、式(7)を式(6)に代入し、積分間隔 da を1.25mmとして数値積分を行って、疲労寿命を推定する。

表-4 近似曲線の係数

検討シリーズ	A	B	C	相関係数 R^2	
N	—	24.7	-9.19	1.95	0.9963
S	はく離なし	39.7	-17.7	2.66	0.9956
M1	はく離なし	24.7	-12.3	2.06	0.9998
	完全はく離	27.5	-13.8	2.28	0.9999
M5	はく離なし	21.4	-9.74	1.54	0.9996
	半分はく離	24.7	-11.3	1.73	0.9995
	完全はく離	25.0	-11.7	1.81	0.9985

表-5 設計 $da/dN-\Delta K$ 曲線の係数⁹⁾

$C (\times 10^{-11})$	1.5
m	2.75
$\Delta K_{th} (\text{MPam}^{1/2})$	2.9

6.2 推定結果と考察

図-12に、はく離を考慮していないMシリーズにおける疲労寿命の推定結果を示す。ここでは、き裂長さが15~50mmの範囲の疲労寿命を検証するため、疲労試験結果に基づく実験値は、過去の実験結果⁷⁾における $S-N_p$ 関係を再整理して示している。図中には、無補修のNシリーズおよび単層CFRP板接着によるSシリーズについても併記している。図より、まず、無補修Nにおける疲労寿命の算定結果は、実験値の上限を示しているものの、実験結果をよく再現しているといえる。

また、Sシリーズにおける疲労寿命の推定値は、実験値とよく一致していることが解る。

一方、図-12のMシリーズの場合、回し溶接の先端部のはく離を考慮していない場合の算定結果であるが、M1の推定値と実験値はよく一致していること、また、M5の推定値は実験値よりも低くなっていることが解る。

図-13には、はく離を考慮したMシリーズにおける疲労寿命の推定結果を、M1およびM5についてそれぞれ示す。図中には、比較のために、NおよびSシリーズについても併記している。

まず、図-13(a)のM1から、完全はく離の場合の推定値は、実験結果のばらつき範囲内に収まっていることから、回し溶接の先端部の接着状態が疲労寿命の推定に

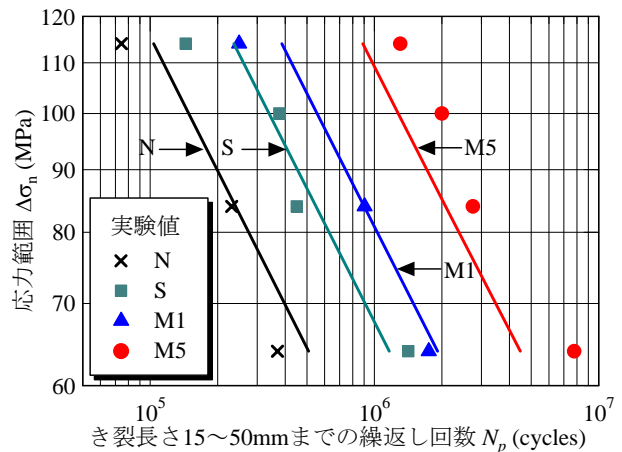
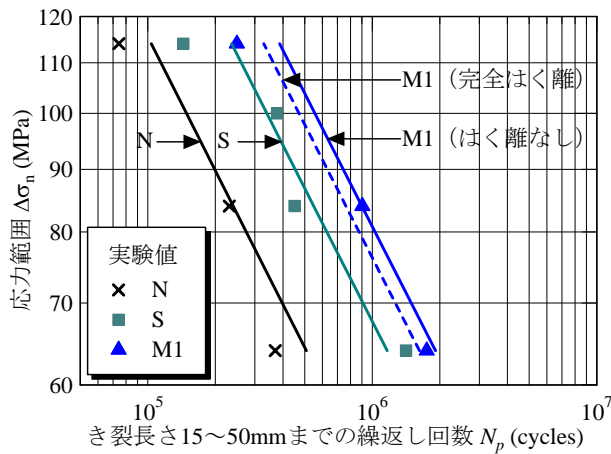
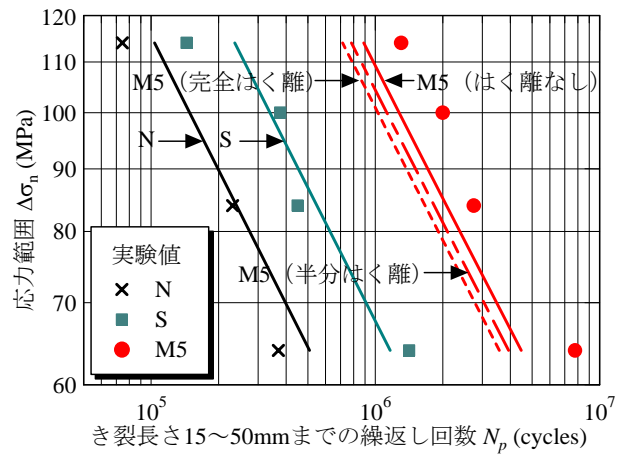


図-12 はく離を考慮していないMシリーズにおける疲労寿命の推定結果



(a) M1



(b) M5

図-13 はく離を考慮した M シリーズにおける疲労寿命の推定結果

及ぼす影響は小さいといえ、M1 では、疲労寿命を精度良く推定できることが解る。また、M1 の補修効果は、S と比べて若干高くなることも疲労寿命の推定値から確かめられる。

一方、図-13 (b)の M5 からは、回し溶接の先端部で仮定したはく離領域が大きくなるほど、疲労寿命が低く推定されるものの、それらの差異は比較的小さいことも解る。これは、前節で述べたように、はく離領域の相違が応力拡大係数に及ぼす影響は小さかったためである。さらに、疲労寿命が若干高めになったはく離なしの場合でも、M5 の推定値は、実験値よりも低くなり、安全側に評価されている。これは、第 4 章で述べたように、解析で算定された積層部の応力の値は、実験値よりも小さく、CFRP 板が負担する応力が低めに評価されていることによるものと考えられる。

7. 結言

本研究は、CFRP 板接着による疲労き裂の補修効果を、過去に行われた疲労試験結果と対比させて、定量的に明らかにすることを目的としたものである。面外ガセット溶接継手部から発生した疲労き裂の補修を想定して、CFRP 板の接着方法の相違や、回し溶接の先端部の接着形態が補修効果に及ぼす影響について解析的に検討した。線形弾性有限要素解析により、き裂先端の応力拡大係数を算定して、その低減効果を比較するとともに、線形破壊力学に基づいたき裂進展解析を行って、補修後の疲労寿命を推定した。これらの結果からは次のことがいえた。

- (1) スリットを入れた CFRP 板を面外ガセットに密着させて補修する M シリーズでは、単層 CFRP 板を接着して補修する S シリーズと比べて、応力拡大係数の低減効果が大きいことが解った。
- (2) M シリーズにおいて、回し溶接の先端部のはく離を考慮した場合、考慮しなかった場合と比べて、応力拡大係数は若干大きくなるものの、その差異は小さ

いことが解った。

- (3) 検討した全ての補修シリーズについて、き裂長さと無次元応力拡大係数の関係を求め、それらの関係式を多項式による近似曲線で与えた。
- (4) S シリーズおよび M1 シリーズでは、き裂進展解析によって補修後の疲労寿命を精度良く予測できることが確かめられた。
- (5) M5 シリーズでは、積層 CFRP 板の負担する応力が実験値に比べて低くなり、その算定に課題が残されたものの、疲労寿命の推定結果からは、実験結果を安全側に評価できることが解った。

謝辞

本研究の一部は、(財)海洋架橋・橋梁調査会の橋梁技術に関する研究開発助成、および、平成 22 年度文部科学省科学研究費 基盤研究(C) (研究代表者：中村一史, No. 22560484) の助成を受けて実施したものである。また、首都大学東京大学院 博士後期課程の林 帆 君には、解析データの作成・整理等で協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会編：鋼橋の疲労，丸善，pp.58-61，1997.5
- 2) 複合構造委員会編：FRP による鋼構造物の延命化技術，土木学会，平成 21 年度全国大会 研究討論会 研-21 資料，複合構造化による土木構造物の延命化，pp.5-7，2009.9
- 3) H. Liu, Z. Xiao, X. L. Zhao and R. Al-Mahaidi: Prediction of Fatigue Life for CFRP-Strengthened Steel Plates, Thin-Walled Structures, Vol.47, Issue10, FRP Strengthened Metallic Structures, pp.1069-1077, 2009.10
- 4) B. Täljsten, C. S. Hansen, J. W. Schmidt: Strengthening of Old Metallic Structures in Fatigue with Prestressed and Non-Prestressed CFRP Laminates, Construction and Building Materials, Vol.23, Issue4, pp.1665-1677, 2009.4

- 5) 山田 聡, 酒井吉永, 山田健太郎: 撤去した標識柱基部の疲労強度とその補修方法に関する一考察, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.725-734, 2003.3
- 6) D. Roach, K. Rackow, W. Delong and E. Franks: In-Situ Repair of Steel Bridges Using Advanced Composite Materials, International Bridge and Structure Management, Tenth International Conference on Bridge and Structure Management, Transportation Research Circular E-C128, pp.269-285, 2008.
- 7) 中村一史, 諸井敬嘉, 鈴木博之, 前田研一, 入部孝夫: 溶接継手に発生した疲労き裂の積層 CFRP 板による補修効果, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp.89-96, 2005.11
- 8) A. Baker, F. Rose and R. Jones: Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structures, Elsevier, 2002.
- 9) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1993.
- 10) 鈴木博之: GFRP を貼付した疲労き裂の進展速度, 土木学会, 第 64 回年次学術講演会講演概要集, CS-026, pp.91-92, 2009.9
- 11) H. Liu, X. L. Zhao, R. Al-Mahaidi: Boundary Element Analysis of CFRP Reinforced Steel Plates, Composite Structures, Vol. 91, Issue 1, pp.74-83, 2009.11
- 12) 姜 威, 中村一史, 鈴木博之, 前田研一, 入部孝夫: CFRP 板と鋼板の接着特性に関する実験的研究, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, 第 14 巻, pp.595-602, 2006.11
- 13) 中村一史, 山谷佑介, 前田研一, 鈴木博之, 入部孝夫: ひずみゲージを用いた CFRP 板貼付域の疲労き裂のモニタリング, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, 第 15 巻, pp.439-446, 2007.11
- 14) 岡村弘之: 線形破壊力学入門, 破壊力学と材料強度講座 1, 培風館, 1976.
- 15) 姜 威, 中村一史, 前田研一, 鈴木博之, 入部孝夫, 伊原啓裕: CFRP 板接着により補修された疲労き裂の応力拡大係数の算出について, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 64 回全国大会, I-615, pp.1229-1230, 2009.9

(2010 年 9 月 16 日受付)