

CFRP 板接着による疲労き裂の補修工法における養生中の繰返し荷重と架橋効果の検討

Influence of Cyclic Load during Curing and Crack Bridging on Repair of Fatigue Crack using CFRP strip

林 帆*, 中村一史**, 前田研一***, 福田欣弘****
Fan Lin, Hitoshi Nakamura, Ken-ichi Maeda, Yoshihiro Fukuda

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

**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)

*** 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)

**** 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)

In the CFRP repair of steel bridges in service condition, not only steel members, but also the CFRP strips and epoxy resin adhesives in situ are subjected to cyclic stress and vibration generated due to traffic load. The aim of this study is to investigate for the effects of the fatigue crack repair using CFRP strips and epoxy resin adhesives under dynamic load during curing. First, experiments have been carried out using coupon specimens of steel plates with through center crack. Second, FEM analysis has been carried out to predicate the fatigue crack propagation, and compared it with the experiment results. As a result, it can be considered that bonding repair in service conditions will not affect to the fatigue life, and it was confirmed feasible for practical use.

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

多くの鋼橋で, 交通量の増加の影響による疲労損傷が発生しており, 効果的な補修工法が求められている。その中で, 著者らは炭素繊維強化樹脂板 (以下, CFRP 板と呼ぶ) の接着による疲労き裂の補修を提案してきた¹⁾。

一般に, 既設鋼橋において補修・補強を行う場合, 車両通行に伴う橋梁の振動や, 対象部位の供用下における特有の力学挙動が, 補修・補強の作業と品質に影響を及ぼすことに留意しなければならない。例えば, 現場溶接では, その制約の下で施工管理を行う必要があるとされている²⁾。また, 高力ボルトを用いた接合では, 供用下において動的な繰返し荷重の作用を受けて, 摩擦接合が十分に期待できない場合には, 打込み式高力ボルトを用いて接合されるケースもある³⁾。一方, 補修・補強に伴う一時的な通行止めなどの交通規制は, 社会活動に大きな影響を及ぼすこともあることから, 供用下で補修・補強を行うことが望ましい。

CFRP 板接着による補修工法においても, 供用下で施工を行う場合には, 鋼部材だけでなく, 補修材料である CFRP 板やエポキシ樹脂接着剤も, その硬化中に動的な繰返し荷重を受ける。したがって, 硬化後の鋼板と CFRP 板の接着強度に影響を与える可能性があり, 補修効果や離強度の低下などが懸念される。そこで, CFRP 板接着工法を供用下で実施する場合には, 接着剤の硬化中に, 繰返し荷重を受けた場合の接着特性や, 硬化後の接着強度について検討しておく必要もある。

既往の研究では, 曲げモーメントを受ける鋼桁^{4),5)}や, 軸方向の引張力を受ける鋼部材⁶⁾に対して, CFRP 板を接着する際, 硬化中に動的な繰返し荷重を受けた場合における接着特性や接着強度の検討が実施され, 最大, 最小応力に対して平均応力下で接着されることなどが明らかにされている^{5),6)}。しかしながら, 疲労き裂の補修を対象とした場合, 接着剤の硬化中におけるき裂進展や, 平均応力の影響についても検討しておく必要がある。

一方, CFRP 板接着による疲労き裂の補修効果は, 接

着された CFRP 板が公称応力の一部を負担し、鋼板に作用する応力範囲が低減されることが主であり、CFRP 板がき裂を覆うことで、その開口変位を抑制する効果（以下では、これを架橋効果とよぶ）は局所的な作用と考えられている⁷⁾。例えば、鋼板と CFRP 板の引張剛性比に基づき、き裂長さに応じて公称応力の低減を考慮する簡便な評価式によって、平鋼板の中央貫通き裂に対するき裂進展挙動の予測手法が提案されている⁸⁾。しかしながら、応力範囲の低減効果と架橋効果の割合については十分に明らかにされておらず、疲労き裂の補修設計を確立するためには、それらの相互作用を定量的に把握することも重要である。

そこで、本研究では、既往の研究⁹⁾を踏まえ、平鋼板の中央貫通き裂を対象に、動的な繰返し荷重の作用下で CFRP 板を接着し、その接着特性、および、養生中、硬化後の疲労き裂の進展挙動を実験的に検討した。さらに、FEM 解析プログラムを用いて応力拡大係数を求め、線形破壊力学に基づいたき裂進展解析を実施して、補修後の疲労き裂の進展を実験結果と比較するとともに、公称応力の低減を考慮した評価式⁸⁾から算出される応力拡大係数および疲労寿命との対比から、公称応力の低減効果と架橋効果の定量的な評価を試みた。なお、本研究では、CFRP 板接着による疲労き裂補修において、硬化中に繰返し荷重を受けた場合や、その補修効果に着目した基礎的な検討であることから、対象としたき裂モデルは、有限幅板中の中央貫通き裂とした。

2. 実験的検討

2.1 実験方法

(1) 試験片と実験シリーズ

試験片を図-1 に示す。図に示すように、予き裂として、まず、平鋼板の中央部に直径 2mm の円孔をあけた後、長さ 4mm、幅 0.2mm のソーカットを、円孔の両側に導入した。

表-1 に、鋼板、CFRP 板およびエポキシ樹脂接着剤の材料物性値を示す。表-2 に示す実験条件に基づいて、以下の 4 つのシリーズについて疲労試験を行った。各実

験シリーズの名称は、以下の通りとした。

- (a) FBN：補修を行わないもの
- (b) FBS：無荷重の状態で補修を行ったもの
- (c) FBD：動的な荷重作用下で補修を行ったもの
- (d) FBMS：一定荷重（平均応力）作用下で補修を行ったもの

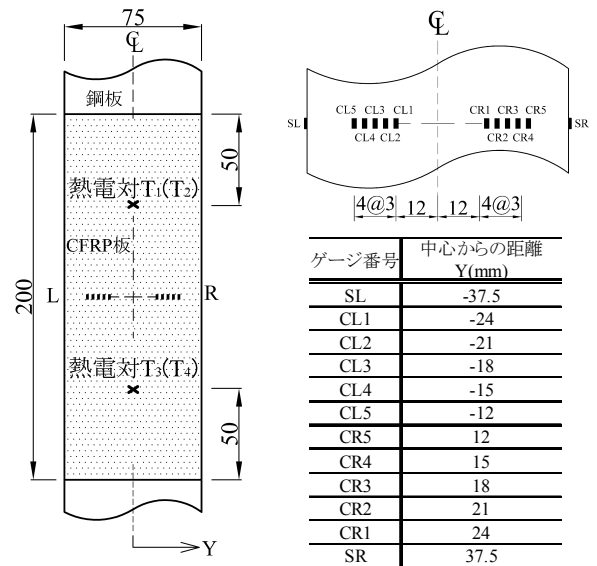
ここで、実験シリーズにおける最初の数字は、応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}$ を示している。

表-1 (a) 鋼板と CFRP 板の材料物性値

	鋼板 (SM400)	CFRP 板
降伏点 (MPa)	282	—
引張強度 (MPa)	428	2990
破断伸び (%)	29	1.9
弾性係数 (GPa)	205.8	165
線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	12	0.7

(b) エポキシ樹脂接着剤の材料物性値

混合粘度 (Pa·s)	116
硬度 (HDD)	80
圧縮弾性率 (GPa)	1.5
引張強さ (MPa)	30
曲げ強さ (MPa)	48.7



(a) CFRP 板の貼付域

(b) ひずみゲージの位置

図-2 各種センサーの設置位置

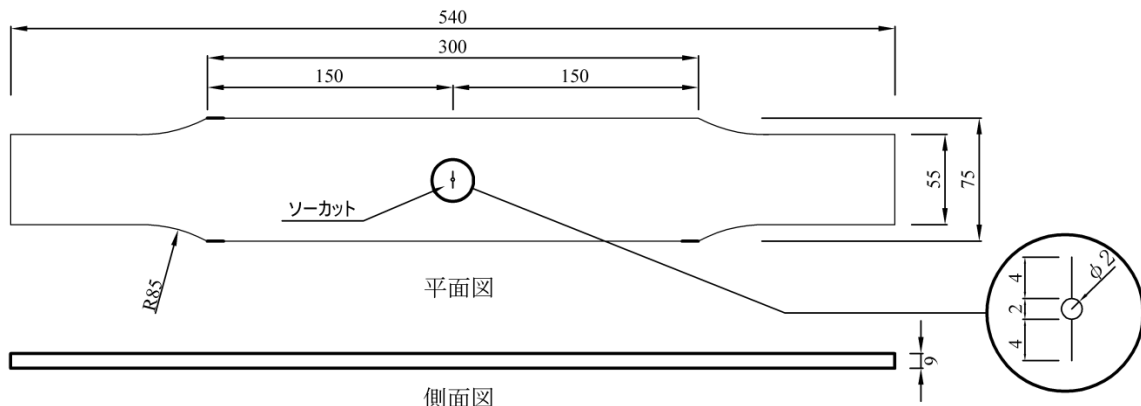


図-1 試験片図

(2) CFRP 板の接着方法と養生条件

用いた CFRP 板は、補修・補強で多用される汎用品（幅 50mm、厚さ 1.2mm）であり、長さ 200mm、幅 37.5mm に加工し、鋼板の全幅に、片面あたり 2 枚並べて両面に接着した。CFRP 板の長さは、既往の研究¹²⁾を参考に、十分な定着長さとした。

鋼板の表面については、ガラスビーズ（#40）でブラスト処理を行い、CFRP 板の表面については、サンドペーパー（#150）で目荒らした。鋼板、CFRP 板の表面をアセトンで十分に脱脂した後、エポキシ樹脂接着剤により接合した。接着層厚は、エポキシ樹脂接着剤を塗布する際に、呼び径 0.4mm の球形の石英ガラスを極少量入れて、一定の厚さに管理した¹¹⁾、表-3 に実測値の一部を示したように、若干、厚くなった。

養生温度は、2 ケースで検討することとし、既往の研究⁶⁾を参考に、室温（約 20℃）養生（表-2 の-R シリーズ）と加温養生（表-2 の-H シリーズ）とした。養生時

間は、20~40℃の範囲では、24 時間で十分な接着強度が得られる⁹⁾ことから、FBD および FBMS の養生時間を 24 時間とした。なお、比較対象とした FBS は、十分な養生時間を確保するために、7 日間とした。

(3) 初期き裂長さと载荷条件

まず、疲労試験により、予き裂から所定の長さまで初期き裂を発生させるが、その長さは、接着養生中の進展挙動を把握するために、片側当たり 12.5mm とした。疲労試験では、初期き裂長さは、左側 (a_{iL})、右側 (a_{iR}) でばらついたことから、その平均値を初期き裂長さ a_i とし、 $a_i = (a_{iL} + a_{iR}) / 2$ と定義した。

また、応力範囲は、疲労試験機の性能より、70、90MPa の 2 ケースとした。繰返し速度は、疲労試験機の载荷能力の上限とし、応力範囲が 70MPa では 18Hz、90MPa では 10Hz とした。なお、応力範囲 90MPa については、FBN と FBD のみの検討とした。

表-2 実験シリーズと実験条件

実験シリーズ	実験ステップ	繰返し速度 f (Hz)	最大応力 σ_{smax} (MPa)	最小応力 σ_{smin} (MPa)	応力範囲 $\Delta\sigma_s$ (MPa)	温度 T (℃)	備考
70-FBN	—	18	75	5	70	室温	破断まで繰返し载荷
70-FBS-H	Step1	18	75	5	70	室温	初期き裂発生まで繰返し载荷
	Step2	—	—	—	—	40	無負荷で養生（7 日間）
	Step3	—	—	—	—	40→室温	固定治具の撤去、室温まで放置
	Step4	18	75	5	70	室温	破断まで繰返し载荷
70-FBS-R	Step1	18	75	5	70	室温	初期き裂発生まで繰返し载荷
	Step2	—	—	—	—	室温	無負荷で養生（7 日間）
	Step3	—	—	—	—	室温	固定治具の撤去
	Step4	18	75	5	70	室温	破断まで繰返し载荷
70-FBD-H	Step1	18	75	5	70	室温	初期き裂発生まで繰返し载荷
	Step2	3	75	5	70	40	繰返し载荷（24 時間）
	Step3	—	—	—	—	40→室温	固定治具の撤去、室温まで放置
	Step4	18	75	5	70	室温	破断まで繰返し载荷
70-FBD-R	Step1	18	75	5	70	室温	初期き裂発生まで繰返し载荷
	Step2	3	75	5	70	室温	繰返し载荷（24 時間）
	Step3	—	—	—	—	室温	固定治具の撤去
	Step4	18	75	5	70	室温	破断まで繰返し载荷
70-FBMS-R	Step1	18	75	5	70	室温	初期き裂発生まで繰返し载荷
	Step2	—	40	40	—	室温	一定荷重の载荷（24 時間）
	Step3	—	—	—	—	室温	固定治具の撤去
	Step4	18	75	5	70	室温	破断まで繰返し载荷
90-FBN	—	10	95	5	90	室温	破断まで繰返し载荷
90-FBD-H	Step1	10	95	5	90	室温	初期き裂発生まで繰返し载荷
	Step2	0.01	95	5	90	40	繰返し载荷（24 時間）
	Step3	—	—	—	—	40→室温	固定治具の撤去、室温まで放置
	Step4	10	95	5	90	室温	破断まで繰返し载荷

表-3 試験片の諸元

実験シリーズ	鋼板		接着層厚 t_a (mm)	予き裂長さ a_o (mm)		初期き裂長さ a_i (mm)			養生温度 T (℃)	繰返し回数 N (cycles)	
	幅 B (mm)	厚さ t (mm)		左側 a_{oL}	右側 a_{oR}	左側 a_{iL}	右側 a_{iR}	$2a_i$		N_i	N_p
70-FBN	74.74	8.60	—	5.41	4.51	—	—	—	—	—	—
70-FBS-H	74.86	8.54	0.63	5.03	4.87	13.12	12.88	26.00	40	1,622,506	1,744,303
70-FBS-R	74.82	8.55	0.60	4.97	4.96	12.64	12.22	24.86	室温	1,700,399	3,264,391
70-FBD-H	74.82	8.57	—	4.98	4.92	12.88	12.23	25.11	40	1,449,510	2,292,502
70-FBD-R	74.96	8.55	—	4.87	5.01	13.05	13.15	26.20	室温	1,578,133	2,061,320
70-FBMS-R	74.90	8.53	—	4.95	4.96	12.97	12.06	25.03	室温	1,587,222	3,391,618
90-FBN	75.06	8.57	—	4.85	5.13	—	—	—	—	—	—
90-FBD-H	74.76	8.49	0.63	4.96	4.98	9.32	9.54	18.86	40	480,000	1,501,303

※ N_i : 予き裂から初期き裂の発生までの繰返し回数, N_p : 初期き裂から破断までの繰返し回数

(4) き裂長さおよびひずみの計測方法

疲労き裂の進展を計測するために、補修を行わない FBN ではクラックゲージを設置した。FBS, FBD, FBMS の補修を行った実験シリーズでは、図-2 に各種センサーの設置位置を併記したように、き裂の進展方向の CFRP 板上にひずみゲージを設置した。また、鋼板の両側面にもひずみゲージ (SL, SR) をそれぞれ設置した。さらに、補修を行った実験シリーズにおいては、疲労き裂を直接観察できないことから、疲労試験中にビーチマーク法を併用して、所定の繰返し回数ごとにマーキングを行った。ビーチマークは、疲労試験の 10 万回ごとに、全振幅 (応力範囲) と最大応力を一定とした半振幅 (応力範囲の半分) を交互に設定して、15 本以上、導入した。なお、繰返し回数の評価にあたっては、半振幅時の繰返し回数はカウントしていない。

疲労試験中には、動ひずみ測定器を用いて、荷重およびひずみを計測した。表-3 に、全試験片の諸元を示す。なお、室温は、各実験シリーズで計測しなかったが、25°C 程度であった。

(5) 実験ステップ

まず、FBD については、初期き裂長さ $2a_i$ が約 25mm となるまで繰返し載荷を行った (Step1)。CFRP 板をエポキシ樹脂接着剤で接着し、直ちに、接着剤の硬化中に 24 時間、所定の繰返し荷重を作用させた (Step2)。繰返し速度は、文献(2)に示されている実橋の振動数の計測データを参考に 3Hz とし、比較のために、準静的な条件として 0.01Hz についても検討した。応力範囲は Step1 と同一とした。CFRP 板の固定には、マグネットスタンドに固定治具を取り付けたものを用いた。養生温度は、室温および投光器による約 40°C の加温とした。この状態で 24 時間、繰返し荷重を与えた後、固定治具を取り外し、試験片が室温と同じ温度となるまで放置した (Step3)。最後に、同一の応力範囲で、ビーチマーク法を併用し、破断まで繰返し荷重を載荷した (Step4)。

また、FBS については、FBD と同様に初期き裂を発生 (Step1) させた後、無負荷の状態 で CFRP 板を接着し、40°C で 7 日間養生した (Step2)。その後、所定の応力範囲で破断まで疲労試験を行った (Step3)。

さらに、FBMS については、FBD と同様に所定の初期き裂を発生させ (Setp)、CFRP 板をエポキシ樹脂接着剤で接着した直後に、一定の応力を作用させて室温で 24 時間、養生した (Setp2)。作用応力は、FBD の繰返し応力の平均応力 (40MPa) とした。CFRP 板の固定は、FBD と同一とした。24 時間後に、固定治具を取り外した (Step3)。その後、所定の応力範囲で、ビーチマーク法を併用し、破断まで繰返し載荷を行った (Step4)。

2.2 繰返し荷重作用下における接着特性と補修効果

繰返し荷重作用下における接着特性を検討した、既往の研究成果⁶⁾から、硬化中に繰返し荷重を受けた場合、

CFRP 板はその平均荷重を基準として接着され、CFRP 板には交番応力が作用することが確かめられている。そこで、疲労き裂を有する平鋼板においても、その条件を以下のように仮定して比較検討を行うこととした。

(1) 無負荷の条件で接着する場合

鋼板のひずみ ε_s と CFRP 板のひずみ ε_c は、鋼板の板厚 t_s 、弾性係数 E_s 、公称応力 σ_{sn} 、および、CFRP 板の板厚 t_c 、弾性係数 E_c を用いて、次式で与えられる。

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c = \frac{t_s}{E_s t_s + 2E_c t_c} \sigma_{sn} \quad (1)$$

(2) 動的な荷重作用下および平均応力作用下で接着する場合

平均応力 σ_{mean} で、CFRP 板が接着されると仮定すれば、この時、CFRP 板のひずみ ε_c は 0 となるため、CFRP 板のひずみ ε_c 、および、鋼板のひずみ ε_s は以下ようになる。

$$\varepsilon_c = \frac{(\sigma_{sn} - \sigma_{mean}) t_s}{E_s t_s + 2E_c t_c} \quad (2)$$

$$= \frac{t_s}{E_s t_s + 2E_c t_c} \sigma_{sn} - \frac{t_s}{E_s t_s + 2E_c t_c} \sigma_{mean}$$

$$\varepsilon_s = \frac{(\sigma_{sn} - \sigma_{mean}) t_s}{E_s t_s + 2E_c t_c} + \frac{\sigma_{mean}}{E_s} \quad (3)$$

$$= \frac{t_s}{E_s t_s + 2E_c t_c} \sigma_{sn} + \frac{2E_c t_c}{(E_s t_s + 2E_c t_c) E_s} \sigma_{mean}$$

式(1)、(3)を比較すると、まず、無負荷で接着する場合、鋼板のひずみ ε_s は、一様に $t_s/(E_s t_s + 2E_c t_c)$ だけ低減されるのに対して、平均応力 σ_{mean} で接着される場合、平均応力 σ_{mean} 相当の公称応力が作用する時、鋼板のひずみ ε_s は、無補修時のひずみ σ_{mean}/E_s となり、低減効果はないものの、鋼板のひずみ振幅は、式(1)と同様に低減される。

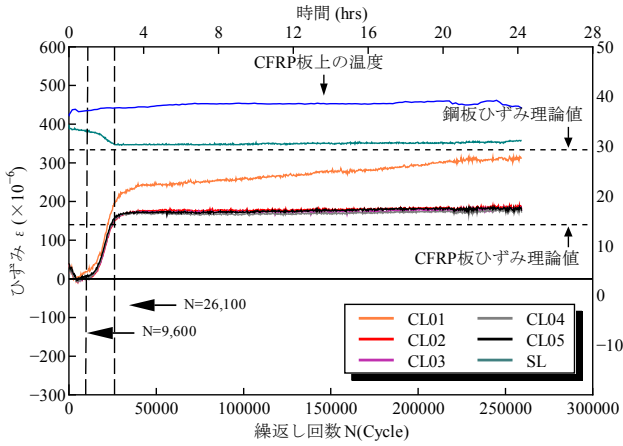
図-3 に、繰返し荷重作用下で、24 時間、養生した FBD シリーズにおける繰返し回数とひずみの関係を示す。養生中におけるき裂の進展は、試験片のセットアップ時の偏心等で、左右で大きくばらついたため、進展速度が速かった方に着目して示している。また、加温養生した試験片では、鋼板用のひずみゲージを用いたため、温度変化に伴ってみかけのひずみが生じた。そこで、CFRP 板の温度履歴実験を別途行って、その影響を補正した。なお、40°C で加温養生した 70-FBD-H では、CFRP 板上の温度変化も併記している。

まず、図-3 (a) の 70-FBD-H では、約 1 時間 ($N=9,600$ 回) で、CFRP 板のひずみゲージのうち、CL01 を除いて、ひずみの値が増加し始め、約 2.5 時間 ($N=26,100$ 回) でほぼ一定値となり、この時点でほぼエポキシ樹脂接着剤が硬化したと判断された。鋼板側面のひずみ (SL) も、それに対応して低下し、一定値に収束していることも解る。若干のばらつきはあるものの、ほぼ理論通りの補修効果が得られていることが確かめられる。なお、今回の実験では、CFRP 板表面の温度は約 39°C であり、文献(9)に示された実験結果を参照すれば、初期強度を発現する

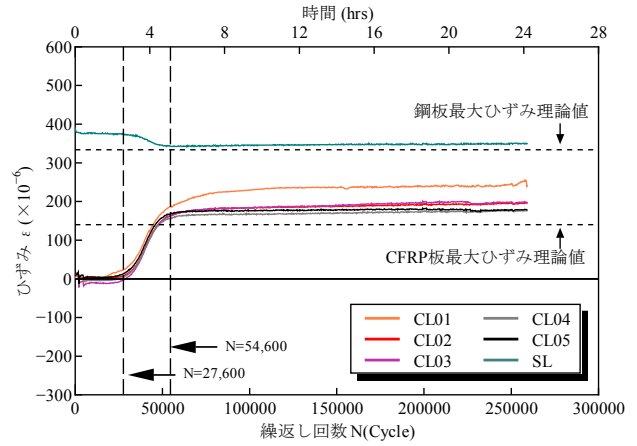
ための硬化時間としては、十分妥当であるといえた。一方、き裂先端に最も近い CL01 では、繰返し回数の増加とともに、ひずみの値が大きくなっている。これは、平鋼板のき裂が、接着剤の硬化中に進展し、き裂近傍の CFRP 板が負担する応力が大きくなることに起因するものと考えられ、過去にひずみゲージを用いてき裂進展をモニタリングした時の傾向¹²⁾と一致している。

図-3 (b)の 70-FBD-R では、室温養生であるため、接着剤の硬化の開始と完了で、それぞれ時間を要しているものの、基本的な挙動は、70-FBD-H と同様であることが解る。

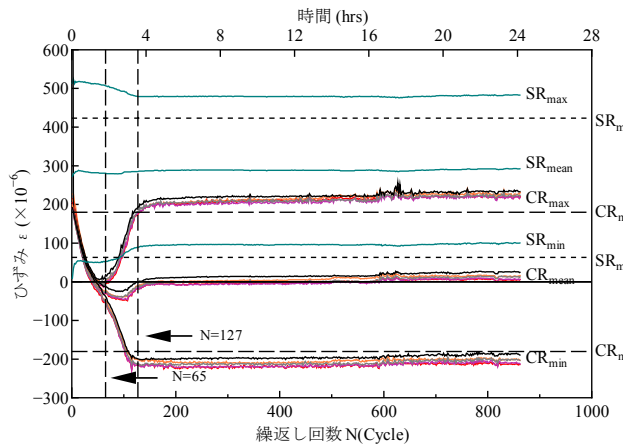
図-3 (c)の 90-FBD-H では、まず、試験開始 (約 26°C) から加温養生が安定する (約 40°C) までの温度差は約 14°Cあり、CFRP 板の温度差が大きかったことから、十



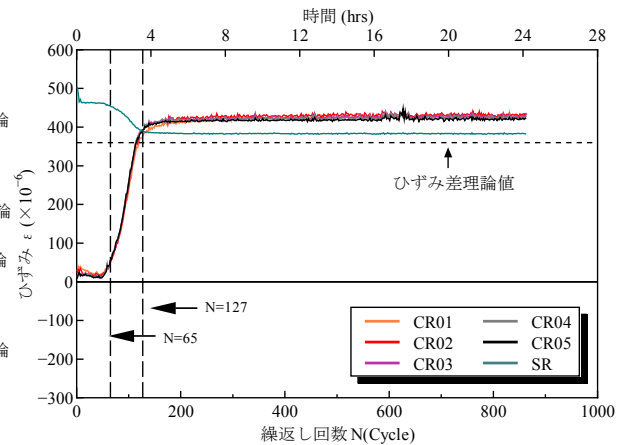
(a) 70-FBD-H における繰返し回数と最大ひずみの関係



(b) 70-FBD-R における繰返し回数と最大ひずみの関係

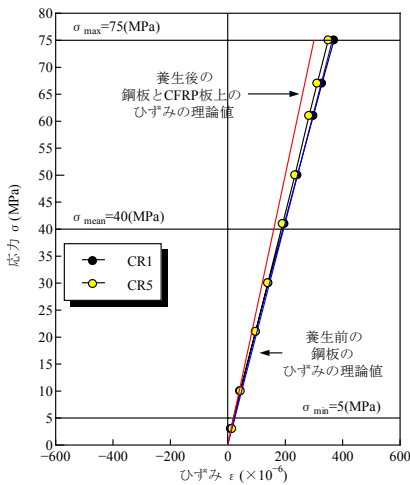


(c) 90-FBD-H における繰返し回数とひずみの関係

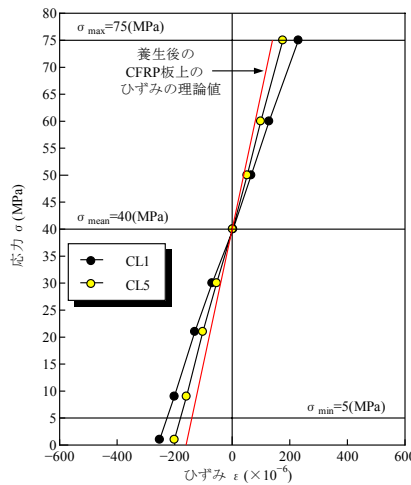


(d) 90-FBD-H における繰返し回数とひずみ差の関係

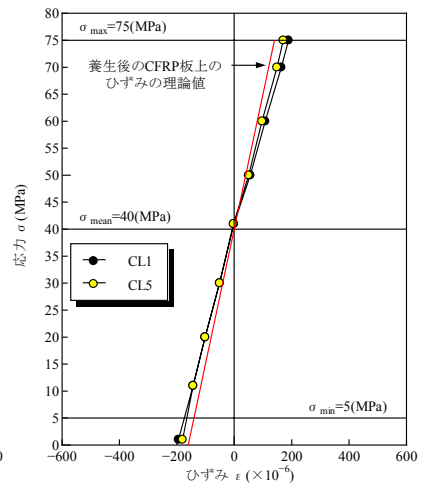
図-3 繰返し回数とひずみの関係



(a) 70-FBS-H



(b) 70-FBD-H



(c) 70-FBMS-R

図-4 養生完了後 (24 時間経過後) における公称応力と CFRP 板のひずみの関係

分な補正ができず、CFRP 板には、約 $176\mu\epsilon$ のみかけの初期ひずみが生じた。また、CFRP 板のひずみの挙動は、接着剤の硬化後は、最大、最小ひずみが正負で交番し、ほぼ理論通りであることから、CFRP 板はその平均荷重を基準として接着されることが確かめられた。鋼板のひずみも 70-FBD シリーズと同様の挙動を示しているものの、その値は理論値よりも大きかった。そこで、その補修効果を確認するために、最大、最小ひずみの差で評価した。図-3 (d) に、90-FBD-H における繰返し回数とひずみ差の関係を示す。図より、CFRP 板、鋼板のひずみ差は、理論値より若干大きくなるものの、補修効果によりひずみ差が低下していることが解る。なお、90-FBD-H では、繰返し速度が 0.01Hz であり、CFRP 板のひずみの増加もなく、鋼板のき裂の進展はないと判断された。

接着剤の養生完了後、CFRP 板の荷重の伝達特性を確認するために、FBS, FBD, FBMS シリーズについて、比較を行った。なお、FBD および FBMS については、養生完了後 (24 時間経過後) に、静的载荷を行った結果である。図-4 に、養生完了後における公称応力と CFRP 板のひずみの関係を示す。

まず、無負荷で養生した 70-FBS-H では、公称応力とひずみの関係は、通常のゼロを基準とした挙動であるのに対し、繰返し荷重作用下で養生した 70-FBD-H では、既往の研究⁹⁾と同様に、CFRP 板のひずみは、平均応力付近でゼロになることが解る。これは、CFRP 板が硬化中に繰返し荷重を受け、正負が交番する作用状態になったことによるものである。また、平均応力に相当する一定の作用応力下で養生した 70-FBMS-R においても、平均応力付近でひずみがゼロになる。なお、き裂先端に近いひずみゲージほど、その値が理論値よりも大きくなるが、これは、前述したように、接着剤の養生中に、き裂が進展したことによる影響である。図を略したが、70-FBS-R, 70-FBD-R, 90-FBD-H についても同様の挙動を示した。また、養生中に進展したき裂長さの評価については、後述する破断面の観察結果から考察する。

2.3 接着剤硬化後の疲労試験による補修効果の検討

ここでは、Step4 において、養生完了後に疲労試験を実施した結果に基づいて、補修効果を検討する。疲労試験では、疲労き裂は、中心から両側に向かって進展するが、

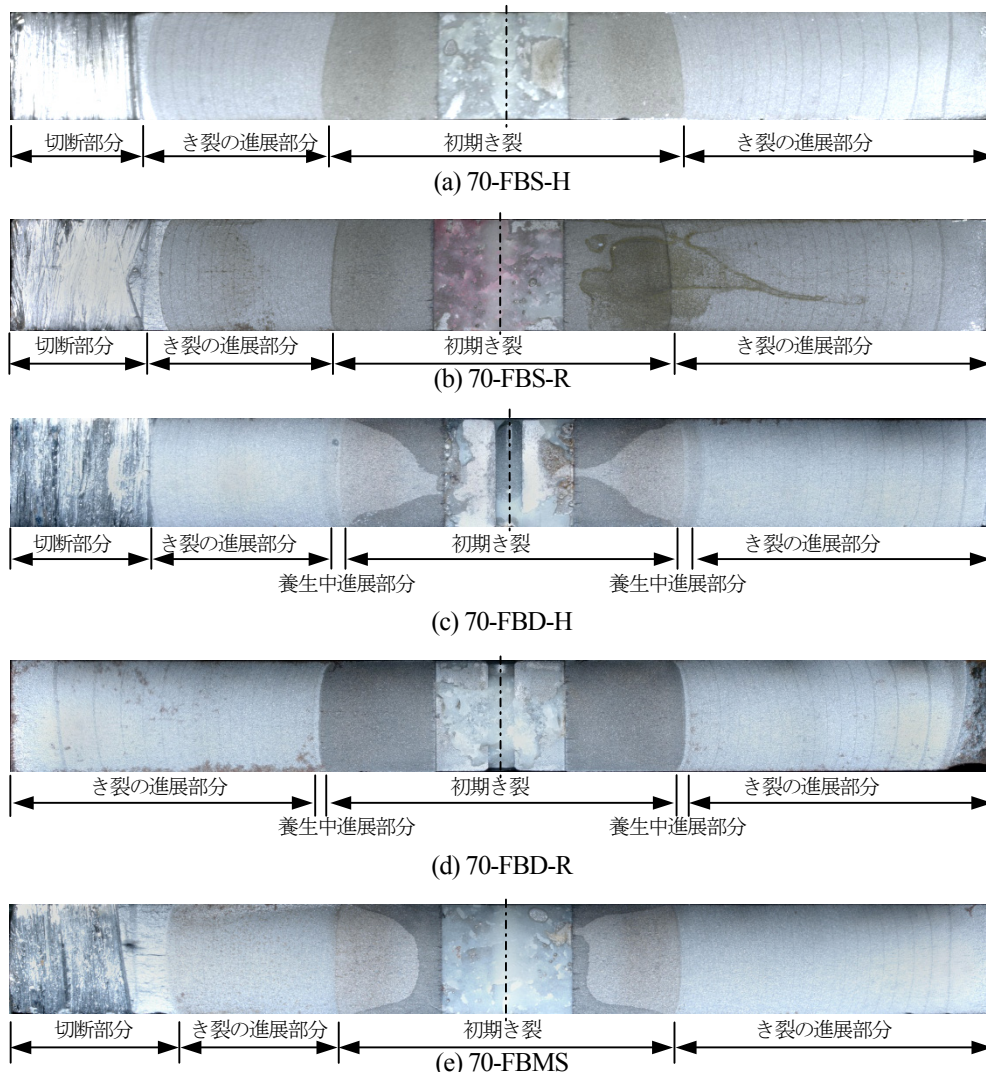


図-5 ビーチマーク断面の写真

片側が先に貫通して破断する場合、また、両方からほぼ同時に貫通して破断する場合があることを確認している。ここでは、き裂が、試験片の左右いずれかの端部に到達した段階で、疲労試験を終了した。その時点では、CFRP板がはく離して脱落することはなかった。

き裂長さは、無補修の70-FBNでは、クラックゲージを用いて計測した。また、補修を行った実験シリーズでは、前述したように、ビーチマークからき裂長さを同定した。破断面の観察を行うために、まず、鋼板のリガメント部をバンドソーで切断し、CFRP板についてはディスクグラインダーを用いて切削、除去した。さらに、ビーチマークを含む破断面を、デジタルマイクロスコープ(VHX-1000)で撮影し、1/100mmの精度で、き裂長さを計測した。なお、本研究では、ビーチマークの観察から、鋼板の厚さ方向の中心と表面で、き裂の進展速度はほぼ同じであったことから、鋼板表面のき裂長さを計測し、その平均値を用いて評価した。

図-5に、破断面のビーチマークの状況を示す。全てのケースで、両端部に向かってき裂が進展していく様子が解る。また、養生中に進展したき裂を確認するために、養生完了後、疲労試験を行う際には、はじめに半振幅から载荷し、マーキングを行った。FBDシリーズでは、養生中に、初期き裂から、若干き裂が進展することが確か

められる。さらに、全ての試験片で、初期き裂の開口部からエポキシ樹脂接着剤が浸透し、白濁している様子が観察された。

表-4に、接着剤の養生中(24時間)に進展したき裂長さを示す。き裂進展長さは、図-5に示したビーチマークより読み取ったものである。表には、補修効果を確認するために、後述するき裂進展解析により、無補修におけるき裂進展長さを併記している。養生中のき裂進展はわずかであり、き裂が進展する中でも、接着剤が硬化すればその進展を減速できることが確かめられた。

図-6に、応力範囲70MPaにおける実験シリーズの繰返し回数とき裂長さの関係を示す。繰返し回数は、初期き裂長さ $2a_i=a_{iL}+a_{iR}$ から試験片が破断するまでの回数であり、FBDシリーズでは、養生中の繰返し回数 N を含んでいる。比較のために、無補修の70-FBNにおいて、き裂長さ $2a=24.3\text{mm}$ から破断までの結果を併記しているが、補修したシリーズでは、全てのケースで疲労寿命が大幅に増加していることが確かめられる。

さらに、養生完了後からの補修効果を比較するために、き裂長さ $2a=26\text{mm}$ から破断までについて再整理して、図-7に示す。

図より、まず、70-FBNにおいて、き裂長さ $2a$ が約50mmになると、進展速度が急激に増加し、破断する。一方、

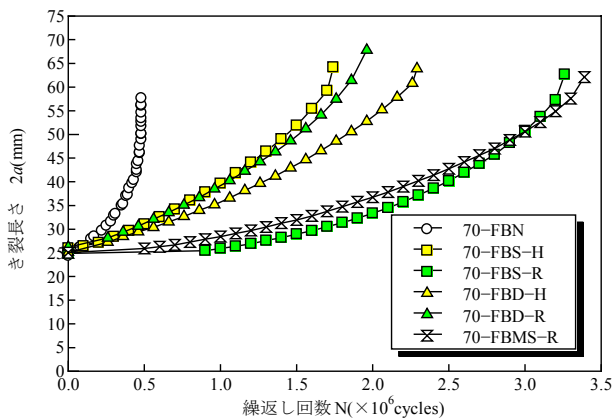


図-6 初期き裂長さ a_i から破断までの繰返し回数

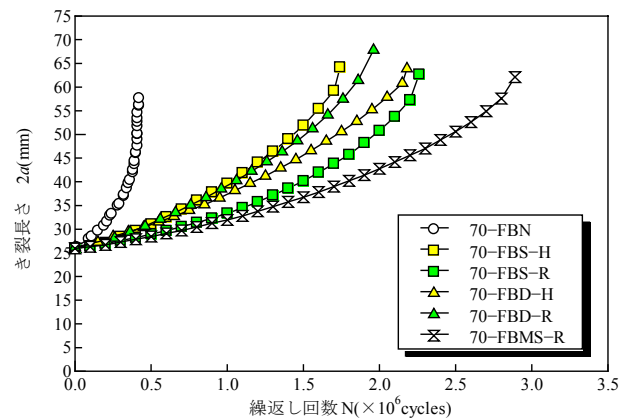


図-7 き裂長さ26mmから破断までの繰返し回数

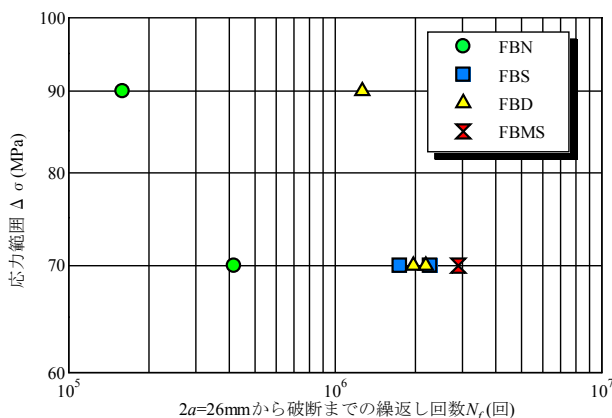


図-8 S-N線図

表-4 70-FBDシリーズにおける養生中のき裂進展長さ a

実験シリーズ	実測値 (mm)		解析値 (mm)
	左側	右側	
70-FBD-H	1.12	1.04	5.6
70-FBD-R	0.98	0.96	6.5

表-5 $2a=26\text{mm}$ から破断までの回数 N_f および補修効果

実験シリーズ	繰返し回数 (N_f)	補修効果 (N_f/N_{f0})
70-FBN	416,376	—
70-FBS-H	1,744,303	4.2
70-FBS-R	2,264,391	5.4
70-FBD-H	2,184,803	5.2
70-FBD-R	1,961,320	4.7
70-FBMS-R	2,891,618	6.9
90-FBN	159,079	—
90-FBD	1,263,375	7.9

補修を行った全シリーズでは、試験片が破断するまで、き裂進展速度が十分に抑えられていることが解る。図を略したが、応力範囲 90MPa においても、応力範囲 70MPa と同じ挙動を示すことを確かめている。なお、図中、70-FBS-R は、70-FBS-H よりも効果が高く、70-FBD-H は 70-FBD-R よりも効果が高くなっており、養生温度に依存しないといえるが、このばらつきは、初期き裂長さや、後述するように、き裂開口部に接着剤が入り込むことなどが、その要因と考えられる。

図-8 に、 $S-N$ 線図を示す。繰返し回数は、き裂長さ $2a=26\text{mm}$ から破断までの回数 N_f である。また、表-5 に、無補修シリーズの繰返し回数 (N_{f0}) に対する補修シリーズの繰返し回数 (N_f) の比を、補修効果として示す。これらの図表より、養生中に繰返し荷重を作用させた FBD シリーズと、無負荷で補修した FBS シリーズを比較した場合、両者でばらつきがあるものの、それぞれの平均を比べるとほぼ同程度であることが解る。したがって、養生中に繰返し荷重を受けた場合であっても補修効果は変わらないといえた。

一方、一定の荷重下で接着養生した 70-FBMS-R では、70-FBN に対して 6.9 倍となり、かなり寿命が延びることが解る。70-FBMS-R の補修効果については、試験片数が 1 体であるため、接着状態のばらつきなどの影響を考慮する必要もあるが、図-5 (e) より、他の試験片と比べて、き裂開口部の多くが白濁しており、接着剤が混入している様子が確認できる。き裂開口部に接着剤の注入により、き裂進展が遅延される効果も報告¹³⁾されており、今後はそれらの影響についても検討する必要もあると考えられる。

3. 線形破壊力学に基づく補修効果の検証

3.1 検討対象と解析方法

ここでは、補修後の疲労寿命の予測、および、公称応力の低減効果と架橋効果の相互作用の把握のために、汎用有限要素解析プログラム (Msc. Marc2005r3) を用いて、解析的な検討を行った。まず、前述の疲労試験と対応させ、き裂モデルは、一様な引張りを受ける有限幅板中の中央貫通き裂であり、き裂モードはモード I (開口型) である。

図-9 に、解析モデルを示す。中央貫通き裂を有する鋼板 ($75 \times 400 \times 9\text{mm}$) に、CFRP 板 ($75 \times 200 \times 1.2\text{mm}$) をエポキシ樹脂接着剤で接着されたケースを解析対象とした。試験片の対称性を利用して、図の斜線部分 (1/8 モデル) を 8 節点ソリッド要素 (Marc 要素番号 7) でモデル化した。エポキシ樹脂接着剤の厚さは 0.4mm とし、2 層でモデル化した。また、鋼板と CFRP 板については、厚さ方向にそれぞれ 9, 3 層でモデル化した。

図-10 に、き裂近傍の要素分割図を示す。き裂先端の応力の特異場を精度良く評価するため、後述する理論値と比較検討から、き裂先端の要素の最小サイズを 0.5mm

とした。

さらに、き裂長さ a に応じて、 12.5mm から 33.5mm (全断面破断直前) まで、 1mm 間隔で変化させ、無補修を N、補修を R として、各解析シリーズに対して、計 22 個の解析モデルを作成した。

荷重条件は、疲労試験と同様な荷重条件とし、引張応力を 70MPa とした。解析モデルに用いた材料物性値を表-6 に示す。

なお、公称応力の低減効果と架橋効果の相互作用は、このような 3 次元 FEM 解析によるモデル化によって考慮されるものと仮定した。

3.2 CFRP 板のひずみ分布とき裂の開口変位の比較

解析結果の一部として、図-11 に、き裂長さ $a=14.5\text{mm}$ における CFRP 板のひずみ分布を示す。実験値は、試験

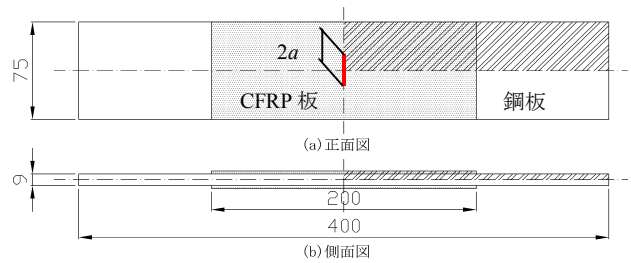


図-9 解析モデル

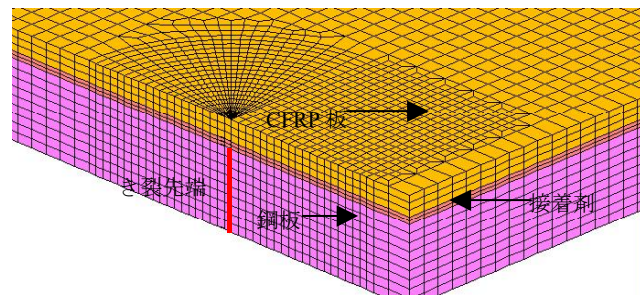


図-10 き裂先端の要素分割

表-6 解析に用いた材料物性値

CFRP 板		
弾性係数 (GPa)	E_{cx}	165
	E_{cy}	8
	E_{cz}	8
ポアソン比	ν_{cxy}	0.34
	ν_{cyz}	0.005
	ν_{cxy}	0.005
せん断弾性係数 (GPa)	G_{xy}	5.2
	G_{yz}	4
	G_{xy}	5.2
エポキシ樹脂接着剤		
弾性係数 (GPa)	E_b	1.5
ポアソン比	ν_b	0.3
鋼板(SM400)		
弾性係数 (GPa)	E_s	205.8
ポアソン比	ν_s	0.3

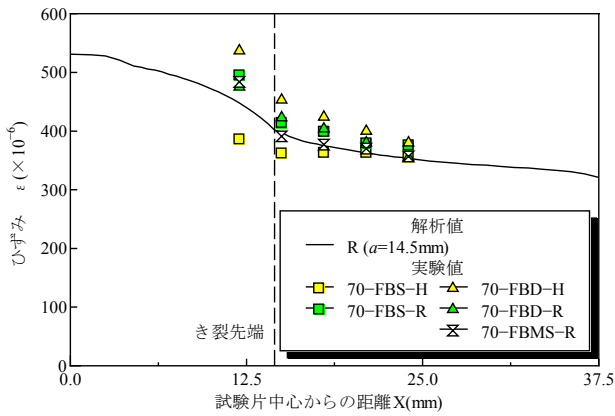


図-11 き裂長さ $a=14.5\text{mm}$ における CFRP 板上のひずみ分布

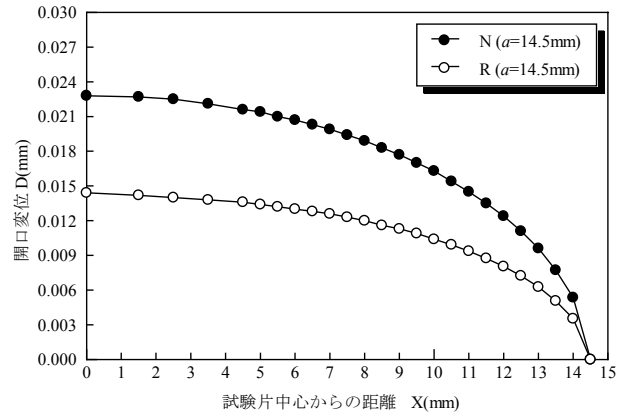


図-12 き裂長さ $a=14.5\text{mm}$ における開口変位

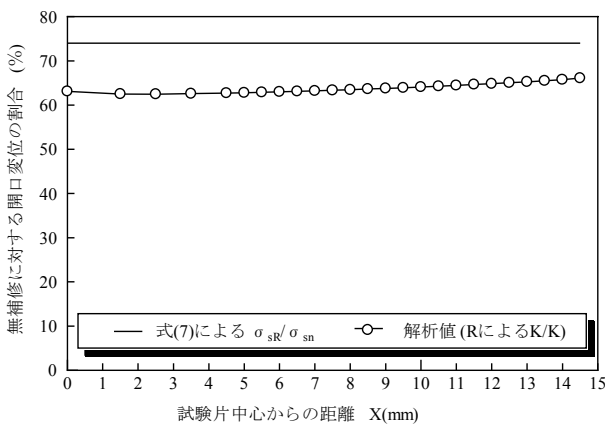


図-13 き裂長さ $a=14.5\text{mm}$ における開口変位の抑制効果

片に設置されたひずみゲージによる値であり、解析結果と比較して示す。図より、実験結果にはばらつきがあるものの、き裂の開口部に近づくほど、ひずみが増大することなど、解析結果と傾向は一致していることが解る。実験結果のばらつきは、左右のき裂進展が異なることによるものと考えられる。

一方、図-12に、き裂長さ $a=14.5\text{mm}$ における開口変位を示している。図より、補修によって、無補修に比べて、開口部全体で開口変位が大幅に抑制されていることが解る。さらに、補修効果を定量的に把握するために、無補修の解析値 N の開口変位を、補修の解析値 R の開口変位で除した値を図-13に示す。なお、図中には、後述する CFRP 板接着による公称応力の低減効果を評価する式(7)を、公称応力 σ_{sn} で除した値を示す。図より、FEM による解析値 R は、無補修の解析値 N に対して、開口変位を 63~66%低減する効果があり、開口部に沿ってほぼ一定であるが、き裂先端ほど大きくなることが解る。また、式(7)によって算定した値は、約 74%の低減効果であり、その差は約 8~11%である。したがって、この差異が架橋効果と考えられる。

3.3 CFRP 板の接着補修における応力拡大係数の評価

き裂先端の応力拡大係数の算定については、エネルギー

一解放率による方法を適用することとした。本研究では、汎用有限要素解析プログラムにおける領域積分法¹⁴⁾に基づいた J 積分法¹⁵⁾を適用し、線形弾性モデルと仮定して、J 積分値と等価となるエネルギー開放率 g を算定した。さらに、応力拡大係数 K は、式(4)より求めた。

$$g = K^2/E_s \quad (4)$$

ここに、 E_s は鋼板のヤング係数である。なお、鋼板とエポキシ樹脂接着剤の異種材料間にき裂が存在し、厳密には、そのき裂先端の応力拡大係数を考慮する必要があるが、接着剤の弾性係数が小さく、鋼板の応力拡大係数に及ぼす影響は小さいことを確認している。

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¹⁶⁾。

$$K = F_w \cdot \sigma_{sn} \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

ここに、 σ_{sn} 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。

$$F_w = (1 - 0.025\xi^2 + 0.06\xi^4) \sqrt{\sec \frac{\pi\xi}{2}} \quad (6)$$

一方、文献 8)では、CFRP 板接着による補修効果として、公称応力の低減を考慮した式(7)が提案されている。

$$\sigma_{sr} = \frac{E_s t_s}{E_s t_s + 2E_c \cdot \frac{W}{W - 2a}} \cdot \sigma_{sn} \quad (7)$$

ここに、 σ_{sn} は補修しない鋼板に作用する公称応力、 σ_{sr} は CFRP 板接着により低減された鋼板の応力である。式(7)は、き裂長さ a が長くなるほど、CFRP 板の負担する応力が増大して、鋼板に作用する応力 σ_{sr} が低下することを示している。さらに、式(7)を、式(5)に代入すれば、公称応力の低減効果により評価される応力拡大係数が次

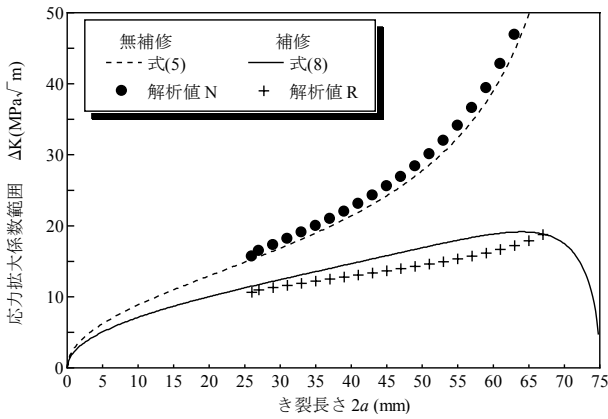


図-14 応力拡大係数範囲とき裂長さの関係

式のように誘導される⁸⁾。

$$K_{sr} = F_w \cdot \sigma_{sr} \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

以下では、FEMによる解析値は、公称応力の低減効果と架橋効果の全補修効果を示すものと仮定して、両者の補修効果を比較する。解析結果の一部として、図-14に、応力拡大係数範囲とき裂長さの関係を示す。なお、FEM

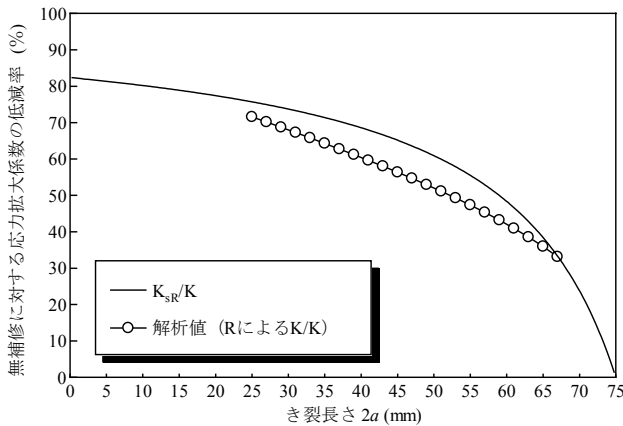


図-16 応力拡大係数の低減率とき裂長さの関係

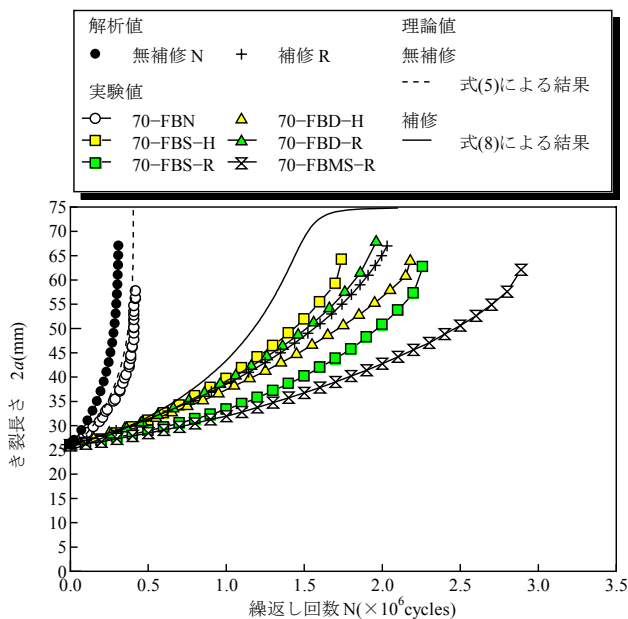


図-17 き裂長さとき裂長さの関係

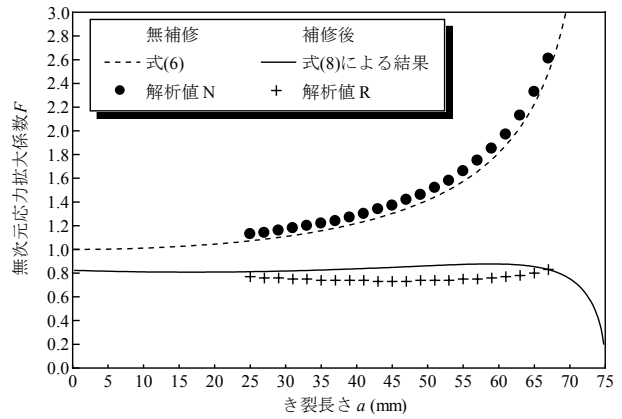


図-15 無次元応力拡大係数とき裂長さ関係

解析による鋼板の厚さ方向の応力拡大係数は、板厚中心ほど高くなるが、表面との差異は小さかったため、平均値で評価した。図より、無補修において、解析値 N は、有限幅を考慮した理論式(6)の値より若干高いものの、ほぼ一致していることが解る。一方、補修において、解析値 R は、無補修と比べて大幅に応力拡大係数範囲が低減されていることが解る。さらに、式(8)による算定値からは、き裂長さが長くなると適用は困難になるといえる。

図-15に、無次元応力拡大係数とき裂長さの関係を示す。縦軸の F は無次元応力拡大係数であり、応力拡大係数を、無限板中の中央貫通き裂の理論解 $\sigma_{sn} \sqrt{\pi a}$ で除したものである。図より、無補修における理論値は、式(6)の値であり、解析値 N とほぼ一致する。また、補修において、公称応力の低減効果を評価した式(8)による算定値は、き裂長さによらず 0.8 程度でほぼ一定となる。これに対して、補修の解析値 R は、それよりも若干低くなることから、その両者の差が架橋効果であるといえる。

図-16に、両者の補修効果を定量的に示すために、無補修の応力拡大係数の理論値(式(5)の値)に対する補修時の応力拡大係数の低減率を示す。図より、2つの低減率の差が架橋効果に相当し、き裂長さに応じてその効果が増減すること、また、その割合は5~10%程度であることが解る。

3.4 疲労寿命の推定

疲労寿命の推定は、次式のパリズ則にしたがってき裂進展解析により行った。

$$da/dN = C \cdot \Delta K^m \quad (9)$$

ここに、 C 、 m は、材料パラメータであり、本研究では、 C 、 m は、応力範囲 70、90MPa において、無補修時の疲労試験結果に基づいて、 da/dN と ΔK の関係を求め、累乗近似曲線から求めた。その結果、 C は 1.44×10^{-12} 、 m は 3.41 となった。

また、疲労寿命の算定にあたっては、式(9)を積分して表示される次式¹⁷⁾から求めた。

$$N_p = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C \cdot \Delta K^m} da \quad (10)$$

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。

図-17に、き裂長さと繰返し回数の関係を、実験結果と比較して示す。まず、実験値は、左右のき裂進で相違があり、ばらつくことが解る。また、前述したように、無補修の実験結果では、き裂長さ $2a$ が約50mmを超えると、き裂進展速度が急激に速くなるがわかる。

公称応力の低減効果のみを考慮した式(8)に基づいて算定した場合、疲労寿命の推定値は、実験結果を安全側に評価していることが解る。また、FEMによる解析値Rでは、架橋効果も考慮されて疲労寿命を算定した場合、実験結果を精度良く予測できることが確かめられた。

4. 結言

本研究では、CFRP板接着による疲労き裂の補修工法において、養生中の繰返し荷重とき裂先端のはく離が、補修効果に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、実験的、解析的な検討を行った。それらの成果をまとめると以下のようである。

- (1) 養生中に繰返し荷重を受けて接着されたCFRP板は、平均荷重相当の圧縮ひずみが残留し、交番応力を受けるようになることが解った。
- (2) 疲労き裂は、接着の直後から硬化が完了するまで、わずかに進展するものの、硬化時間は数時間であり、実用上は問題ないことが確かめられた。
- (3) 接着剤の養生中に繰返し荷重を受けた場合であっても、養生完了後の疲労寿命は、無負荷で補修した場合と同程度であるといえた。
- (4) CFRP板接着による架橋効果は、き裂の開口部に沿ってほぼ同程度であること、また、き裂長さに応じてその割合が変化することが解った。
- (5) 架橋効果は、公称応力の低減効果と比べると小さく、今回の検討の範囲では、応力拡大係数の低減率では5~10%程度であることが確かめられた。
- (6) 疲労試験結果との比較から、公称応力の低減効果のみを考慮した評価では、疲労寿命が安全側に予測されること、また、FEM解析により架橋効果も考慮した場合、今回の実験の範囲では、疲労寿命を精度よく予測できることが解った。

以上のことから、CFRP板の硬化中に動的な荷重作用を受けても、硬化そのものには影響はなく、補修効果も無負荷で補修した場合と同程度であることが確かめられた。したがって、CFRP板の接着補修は、交通荷重を受ける供用下でも十分に可能であるといえた。

さらに、FEM解析結果との比較から、公称応力の低減効果と架橋効果の定量的な評価が可能となった。今後は、CFRP板の配置や、き裂近傍のはく離が補修効果に及ぼす影響について検討したい。

参考文献

- 1) 中村一史, 諸井敬嘉, 鈴木博之, 前田研一, 入部孝夫: 溶接継手部に発生した疲労き裂の積層CFRP板による補修効果, 鋼構造年次論文報告集, 第13巻, 日本鋼構造協会, pp.89-96, 2005.11
- 2) 日本鋼構造協会編: 供用下にある鋼構造物の溶接による補強・補修指針(案), JSSC レポート No.8, 1988.2
- 3) 首都高速道路: 既設橋梁構造物補修・補強要領, 鋼製橋脚隅角部の補強設計施工編, 2007.7
- 4) S. S. J. Moy and A. G. Bloodworth: Strengthening a Steel Bridge with CFRP Composites, Proceedings of the ICE, Structures and Buildings, Vol. 160, Issue 2, pp.81-93, 2007.
- 5) 大久保智, 山田稔, 長嶋文雄: 動的繰返し荷重下のCFRP補強桁の接着特性に関する実験的研究, 土木学会, 第66回年次学術講演会, 1-679, pp.1357-1358, 2011.9
- 6) 林帆, 北章太郎, 中村一史, 前田研一, 福田欣弘: 繰返し荷重作用下における鋼板とCFRP板の接着特性, 鋼構造年次論文報告集, 第18巻, 日本鋼構造協会, pp.499-506, 2010.11
- 7) National Research Council: Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures - Metallic Structures, 2007.6
- 8) Hongbo Liu, Zhigang Xiao, Xiao-Ling Zhao, Riadh Al-Mahaidi: Prediction of fatigue life for CFRP-strengthened steel plates, Thin-Walled Structures, Vol.47 pp.1069-1077, 2009.
- 9) 孫継光, 北章太郎, 中村一史, 前田研一, 福田欣弘: 養生条件および鋼材の表面状態がCFRP板と鋼板の引張せん断接着強さに及ぼす影響, 鋼構造年次論文報告集, 第18巻, 日本鋼構造協会, pp.515-518, 2010.11
- 10) Sabrina Fawzia, Riadh Al-Mahaidi, Xiao-Ling Zhao: Experimental and finite element analysis of a double strap joint between steel plates and normal modulus CFRP, Composite Structures, Vol.75 pp.156-162, 2006.
- 11) 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
- 12) 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, 鋼構造年次論文報告集, 第 15 卷, 日本鋼構造協会, pp.439-446, 2007.11

- 13) 舘石和雄, 北河一喜, 稲葉尚文, 富田芳男: 局部加熱を併用した硬化材注入手法による鋼材の疲労き裂進展抑制, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.1, pp.126-131, 2006.
- 14) Samuel W. Key, Raymond D. Krieg: On the numerical implementation of inelastic time dependent and time independent, finite strain constitutive equations in structural mechanics, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.33 pp.439-452, 1982.9
- 15) 石田誠: き裂の弾性解析と応力拡大係数, 破壊力学と材料強度講座 2, 培風館, 1976.
- 16) 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.
- 17) 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.

(2011 年 9 月 14 日受付)