

CFRP 板貼付域における疲労き裂進展状況のモニタリング

首都大学東京大学院 学生員○山谷佑介・学生員 姜威

首都大学東京 正会員 中村一史*・フェロー 前田研一

明星大学 正会員 鈴木博之 東京鐵骨橋梁 正会員 入部孝夫

新日本石油 伊原啓裕

1. はじめに

現在、多くの鋼橋で、交通量の増加、過積載車両の通行、老朽化といった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）を用いた補修工法について検討を行ってきた¹⁾。しかしながら、この工法では、疲労き裂をCFRP 板で覆ってしまうため、補修後の疲労き裂を容易に確認することはできない。補修後の疲労き裂の状況を適切に評価できれば、余寿命を精度良く評価することが可能となり、維持管理上も極めて有用である。そこで本研究では、CFRP 板貼付域におけるき裂進展をひずみゲージを用いてモニタリングする手法の開発を目的としている。

2. 解析的検討に基づくき裂長さ と CFRP 板上のひずみ変化の関係

ここで対象とした疲労き裂は有限幅板中の貫通き裂とし、一様な引張応力 σ_n によってき裂が進展する場合についてモデル化して検討を行った。まず、き裂長さ と CFRP 板上のひずみ変化の関係を把握することを目的とし、汎用有限要素解析プログラムMARC を適用して、FEM 解析を行った。解析モデルについては、図-1 に示す試験片を解析対象とし、試験片の斜線部分をソリッド要素でモデル化した。CFRP 板の厚さを1.2mm、接着層の厚さを0.4mm、き裂幅を0.1mm とし、き裂長さ a を10~27.5mm(全断面破断時)まで、0.5mm 間隔で変化させた解析モデルを作成した。表-1 に材料物性値を示す。また、図-2 にき裂近傍の要素分割図を示す。き裂近傍のひずみを正確に把握するため、き裂近傍の要素分割を細かくした。荷重条件については、一様な引張応力 σ_n として100MPaを作用させた。

図-3 に、き裂長さ a と CFRP 板上のひずみの関係を示す。着目位置は、図-2 に併記したように後述する実験と同様な位置とした。各着目点には、変化が見られ、ひずみゲージの貼付位置と変化が始まる時のき裂長さ a とが一致していることから、ひずみゲージの直下をき裂が進展すると、ひずみに変化が現れることが解る。しかし、ひずみは全体的に増加傾向を示しており、変化を正確に判断することは難しい。

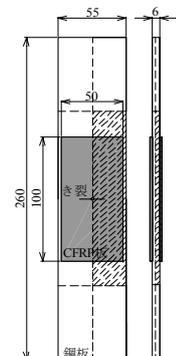
そこで、中心から16.0mm位置のひずみゲージC4の値を基準として、他の3点(C1~C3)のひずみゲージとのひずみ差をとり、き裂長さ a との関係を図-4に示す。基準としたひずみゲージ位置から離れるほど、ひずみ差が大きくなる傾向にあるものの、各着目点ではほぼ同じき裂長さの位置にピークが見られ、基準としたひずみゲージ位置とピークに相当するき裂長さ a とがほぼ一致していることが解る。このことより、2点間のひずみ差によってき裂の進展が特定できるといえる。

3. ひずみゲージを用いたき裂進展モニタリング手法の実験的検証

試験片については、図-1に示したように鋼板の中央部に $\phi 2$ の円孔を有し、幅方向に1mmのソーカットを入れたものを用いた。ここでは、まず、繰り返し荷重によって試験片に初期き裂を10mmまで発生させた後、CFRP 板を貼付した。CFRP 板の接着にはエポキシ樹脂接着剤を用い、ガラスビーズ($\phi 0.4$)により接着層厚を一定に管理した。さらに、図-5に示すようにCFRP 板上に5連のひずみゲージを貼り、試験片が破断するまで疲労試験を行った。応力範囲 $\Delta \sigma_n$ を100MPa、荷重速度 f を18Hzとした。

Key Words : CFRP 板, 疲労き裂, モニタリング, ひずみゲージ, ビーチマーク

連絡先* : 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL.042-677-1111 内線(4564)



鋼板(SS400)	
ヤング係数(GPa)	Es 204.5
ポアソン比	vs 0.3
CFRP板	
ヤング係数(GPa)	Ecx 172
	Ecy 8
	Ecz 8
ポアソン比	vcxy 0.34
	vcyz 0.005
	vczx 0.005
せん断弾性係数(GPa)	Gxy 5.2
	Gyz 4
	Gzx 5.2
エポキシ樹脂接着剤	
ヤング係数(GPa)	Eb 1.5
ポアソン比	vb 0.3

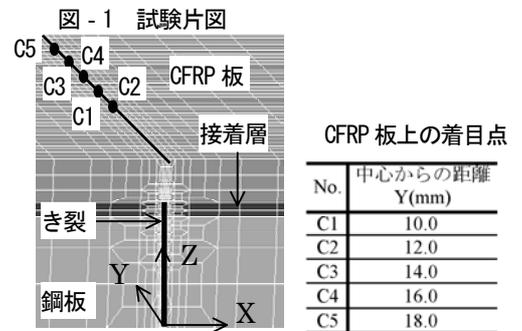


図-2 き裂近傍の要素分割図と着目位置

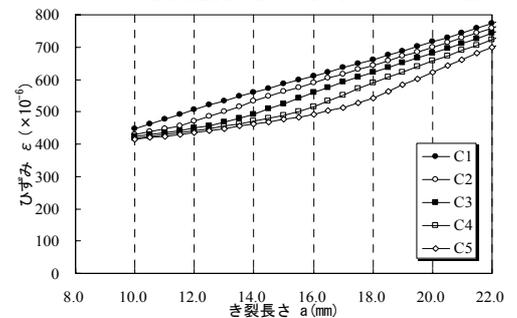


図-3 CFRP 板上のひずみとき裂長さ a の関係

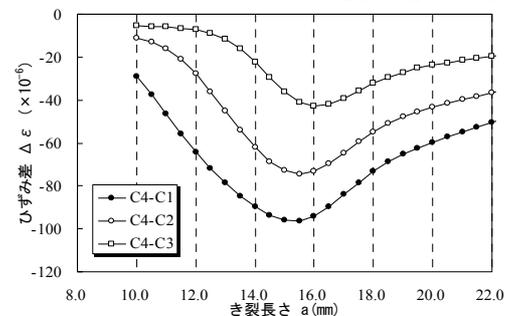


図-4 2点間のひずみ差とき裂長さ a の関係

疲労試験中に、動ひずみ測定器を用いて最大ひずみを 10 秒間隔で測定した。また、き裂長さ a の同定にはビーチマーク法を採用し、応力振幅の制御によってマーキングを行った。ここでは、全振幅で 10 万回ごとに、上限を固定した半振幅で 20 万回と設定した。なお、繰り返し回数については、半振幅時の回数を除いて評価を行った。試験片の破断後に読取顕微鏡を用い、ビーチマークの計測を行った。写真 - 1, 2 に、試験状況、ビーチマークの一例それぞれを示す。

図 - 6 に、CFRP 板上のひずみと繰り返し回数 N の関係を示す。解析結果と同様に、中心に近いひずみゲージからひずみが順番に立ち上がることが解る。変化が見られた時点で、ひずみゲージを貼付した位置にき裂の先端が到達したと考えられる。

図 - 7 に、中心から 16.0mm 位置のひずみゲージ C4 の値を基準とし、他の 3 点(C1~C3)のひずみゲージとのひずみ差と、繰り返し回数 N の関係について、ビーチマークにより計測されたき裂長さ a を対比させて示す。ここで、き裂長さ a は、補修後(10mm)から破断近傍までの範囲で示されている。各着目点で、ほぼ同じ繰り返し回数 N においてピークが見られ、この繰り返し回数 N におけるき裂長さ a は約 16.0mm となり、基準としたひずみゲージ位置とほぼ一致していることが解る。

さらに、図 - 8 では、中心から 16.0mm 位置のひずみゲージ C4 の値を基準とした各着目点のひずみ差と、き裂長さ a との関係を示す。各着目点でピークが見られ、ピークに相当するき裂長さ a は、基準としたひずみゲージの貼付位置とほぼ一致していることが解る。

また、実験、解析結果の整合性については、両者を比較して、図 - 9 に示す。ひずみの大きさが、実験値においてやや高めにしていることが解る。これは、き裂が左右均等に進展せず、き裂が早く進展した方で評価を行っているため、差異が生じたと考えられる。しかしながら、ひずみが増加する傾向は両者で良く一致していることから、実験結果の妥当性が示された。

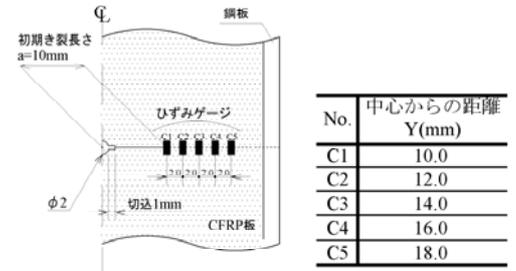


図 - 5 ひずみゲージの貼付位置

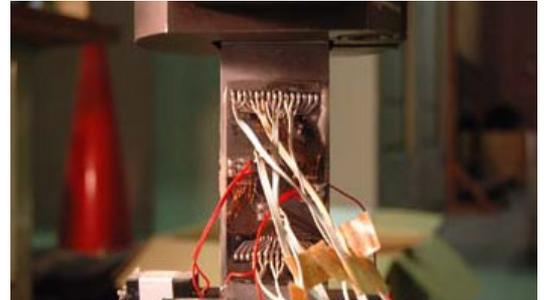


写真 - 1 試験状況



写真 - 2 破断面のビーチマークの一例

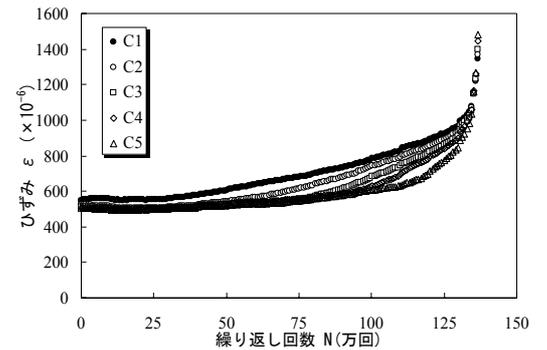


図 - 6 CFRP 板上のひずみと繰り返し回数 N の関係

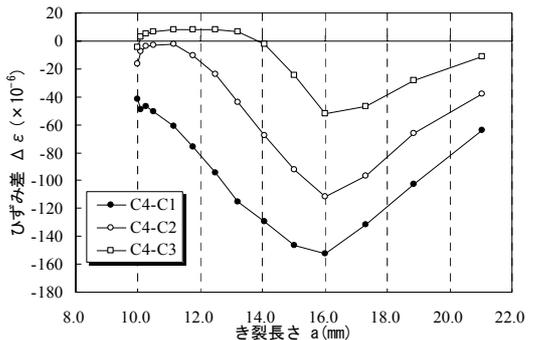


図 - 8 2 点間のひずみ差とき裂長さ a の関係

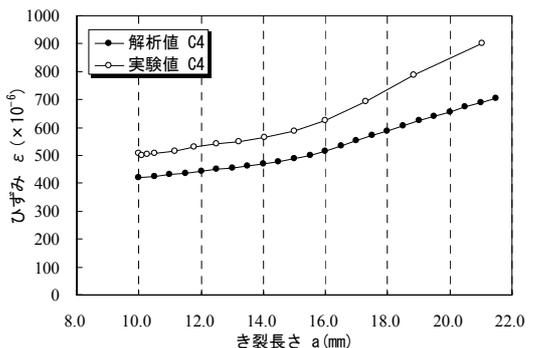


図 - 9 解析結果と実験結果の比較

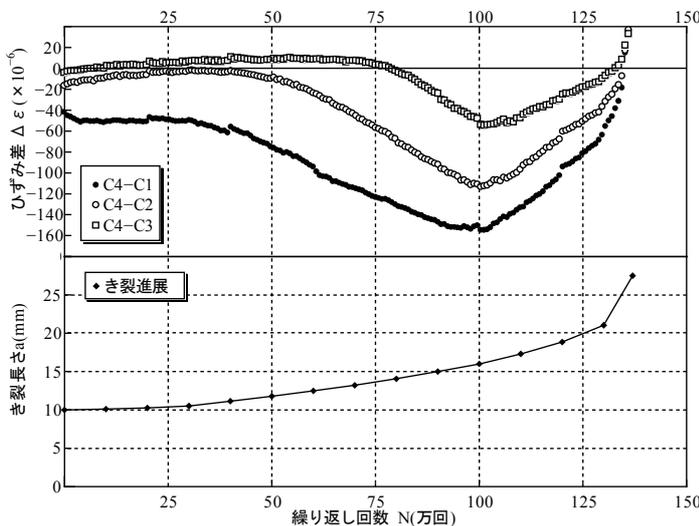


図 - 7 2 点間のひずみ差とき裂長さ a の関係

4. まとめ

以上のことから、提案したようにひずみゲージを用いれば、CFRP 板貼付域におけるき裂進展をモニタリングすることが可能であることが確かめられた。今後は、モニタリングの精度を高めるために、ひずみゲージの貼付間隔などを検討し、実際の現場へ適用可能なモニタリングシステムのプロトタイプ構築を目指したい。

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.