

疲労き裂進展の簡易モニタリングの開発

関西大学環境都市工学部 教授 石川敏之

1. はじめに

近年、都市内高速道路などの鋼橋を中心に、多くの疲労き裂が発見されている¹⁾。一般に、微小な疲労き裂の場合は、グラインダー処理によってき裂を除去するが、ある程度進展したき裂の場合は、応急処置として、ストップホール工法やICR処理²⁾が施され、その後、恒久的な補修を行うことが一般的である。

筆者は、面外ガセット溶接継手の溶接止端近傍の無荷重時のひずみの計測によって、疲労き裂の発生・進展を評価する方法を提案している³⁾。この方法は、疲労き裂の発生によって、溶接時に導入された残留応力が解放されることで内部のつり合いが変化し、その変化をひずみで計測する方法である。また、無荷重時のひずみ計測は、作用荷重による、ひずみ範囲を計測する必要がなく、大量の計測データを必要としないため、実橋で計測しやすく、低電力で長距離通信が可能なLPWA (Low Power Wide Area) を用いたモニタリングに適した指標であると考えられる。

既往研究³⁾では、疲労き裂の発生・進展を評価することを目的としていたため、疲労き裂が発生する位置である溶接止端近傍に着目していた。しかし、すでに発生している疲労き裂の進展を監視する場合、溶接止端近傍は疲労き裂により応力を伝達しないため、き裂先端近傍のひずみに着目すると考えられる。しかし、疲労き裂が発生・進展した場合、残留応力が解放されているため、き裂先端では、内部応力のつり合いの変化をひずみの値で評価するのではなく、疲労き裂先端の局所的な降伏による塑性ひずみを用いた評価になると考える。

そこで、本研究では、疲労き裂先端周辺部の無荷重時のひずみ変化に着目した疲労き裂の進展のモニタリングを実施する。疲労試験を実施し、き裂先端周辺部の無荷重時のひずみ計測を行い、無荷重時のひずみの変化によって、疲労き裂の進展の評価ができるかどうかを明らかにする。また、用いるひずみゲージのゲージ長が、疲労き裂進展モニタリングに与える影響を確認する。

2. 疲労試験

(1) 試験体

本研究では、面外ガセット溶接継手試験体を用いて、板曲げ疲労試験を行い、試験体に発生する疲労き裂の先端周辺部の無荷重時のひずみを動ひずみ計および無線ひずみ計測機器によって計測する。本研究では、応力比 $R = -1$ としたため、平均ひずみが無荷重時のひずみとなる。本研究で実施した疲労試験の応力範囲を表-1に示す。

本研究で用いる面外ガセット溶接継手試験体は、厚さ 12mm、幅 200mm の主板に、厚さ 12mm、高さ 100mm のガセットプレートが、半自動 CO₂ ガスシールドアーク溶接(電流 320A、電圧 37V、速度 24.0 cm/min、下向き)されている。面外ガセット先端のまわし溶接部では、溶接の継ぎを設けていない。すみ肉溶接は等脚長の 6mm とした。本研究で用いた鋼板の機械的性質を表-2に示す。疲労試験には、板曲げ振動疲労試験機^{7)、8)}を用いた。

(2) 疲労寿命の定義

本研究では、図-1に示すように、まわし溶接部の止端に貼付した $\phi 0.05\text{mm}$ の銅線が疲労き裂の発生で切れた段階を N_{oc} 、まわし溶接部の止端から発生した疲労き裂が溶接部から離れて主板に進展し始める段階を N_b 、まわし溶接部の止端から発生した疲労き裂が溶接部から離れて主板部に進展し、5mm 進展した

表-1 試験体と疲労試験結果

試験体	応力範囲 (N/mm ²)	疲労寿命(×10 ⁴ 回)								
		N _{toe}	N _b	N ₅	N ₁₀	N ₁₅	N ₂₀	N ₂₅	N ₃₀	N _f
AW120	122.1	10.2	21.4	28.7	34.8	38.7	45.6	51.3	54.9	45.6
AW110	111.3	7.2	27.9	38.5	49.5	56.7	64.0	70.4	74.7	69.7
AW100	101.0	10.5	27.8	—	49.6	—	—	—	—	—
AW90	90.8	—	63.9	78.4	96.9	105.0	119.3	131.8	142.1	—

表-2 鋼材の機械的性質と化学成分

鋼種	板厚	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	化学成分(%)				
					C	Si	Mn	P	S
SM490Y	12	431	549	25	0.16	0.28	1.32	0.009	0.004

き裂を N₅、以降 5mm ごとに、N₁₀、N₁₅、N₂₀、N₂₅、N₃₀ とき裂長さを定義した。N_b 以降のき裂も φ0.05mm の銅線の切断で検知した。さらに、主板裏面から疲労き裂が発生した段階のき裂を N_f と定義した。本研究では、き裂長さが N₃₀ の時点で疲労試験を終了した。

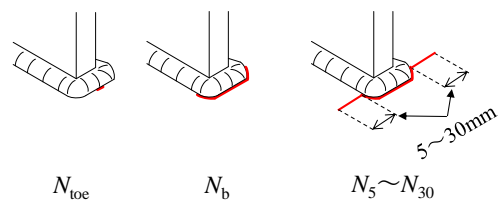


図-1 疲労寿命の定義

(3) 計測位置

図-2 に、試験体の主板部に貼付したひずみゲージ位置を示す。ゲージ D は、溶接止端近傍のガセット軸方向に対して直角方向のひずみを計測している。疲労き裂が発生すると、試験体の固有振動数が低下し、疲労試験の振動数に近づくと、一定の応力範囲の疲労試験となくなるので、疲労き裂が発生しても影響を受けないゲージ E、F の値から一定の応力範囲で疲労試験を実施できているか判断している。

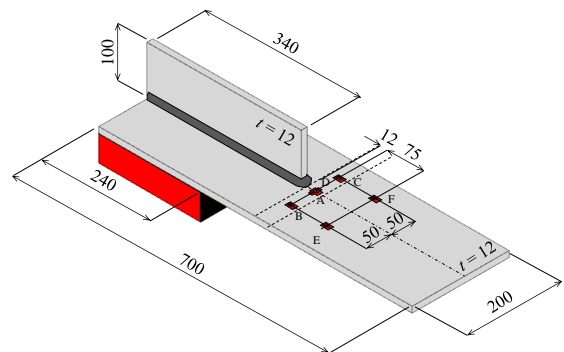
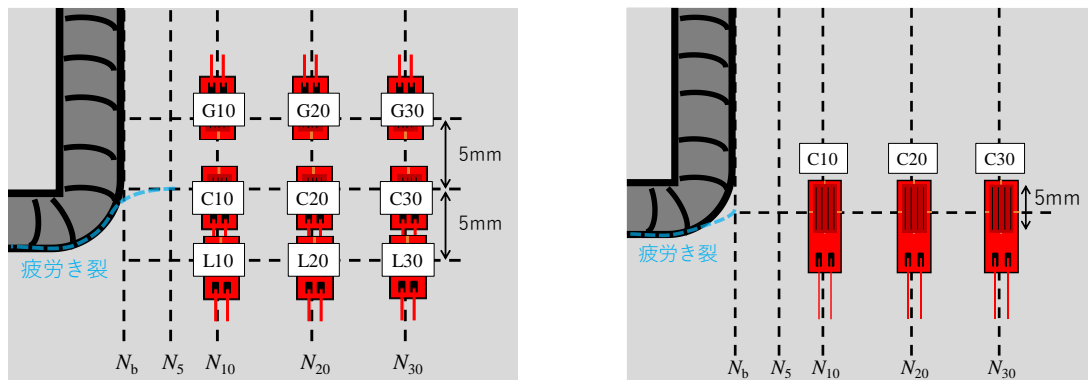


図-2 試験体寸法と主板部のひずみゲージ貼付位置

図-3(a)に、AW110、AW90 に貼付した、き裂先端周辺部のひずみゲージ位置を示す。き裂先端を中心にガセット軸方向に±5mm、き裂進展方向に N₁₀、N₂₀、N₃₀ にゲージ長 1mm のひずみゲージを貼り付けた。



(a) AW110, AW90

(b) AW120

図-3 き裂先端周辺部のひずみゲージ貼付位置

本研究では、すでに発生している疲労き裂の進展の評価を目的としているため、AW110 では N_5 、AW90 では N_6 まで疲労き裂を発生・進展させてから疲労き裂先端近傍のひずみゲージを貼付している。図-3(b)には、AW120 で貼付した、き裂先端部のひずみゲージ位置を示す。AW120 では、ゲージ長 5mm のひずみゲージをき裂先端部のき裂進展方向に N_{10} 、 N_{20} 、 N_{30} の位置に貼り付けた。面外ガセット溶接継手の溶接止端部に発生する疲労き裂が主板に進展する位置は、試験体ごとに若干異なるため、き裂先端を基準としてひずみゲージを貼付している。

3. 疲労試験結果

(1) 溶接止端近傍の無荷重時のひずみ変化

図-4 に、AW110 の疲労試験から得られた溶接止端近傍の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係、ひずみ範囲と繰返し回数の関係を示す。図には、各疲労寿命も併記している。図-4(a)より、疲労き裂の発生・進展によって、引張残留応力が解放されるため、ゲージ A の無荷重時のひずみが減少し、残留応力の再分配によってゲージ B、C の無荷重時のひずみが増加する。ゲージ D はガセット軸直角方向の圧縮残留応力の解放によって無荷重時のひずみが増加している。ゲージ E、F は溶接止端部から離れているため、残留応力の解放によるひずみの変化がなかった。したがって、疲労き裂が N_{30} まで進展した場合でも、文献 3)と同様に、溶接止端近傍の無荷重時のひずみの変化によって、疲労き裂の発生・進展の評価が可能であることがわかる。

図-4(b)より、ひずみ範囲も疲労き裂の発生・進展によって、変化しているが、無荷重時のひずみよりも変化量が小さい。AW110 の疲労試験では、 N_f からゲージ E、F のひずみ範囲が増加している。ゲージ E、F は、疲労き裂が発生してもその影響を受けない位置であるが、疲労き裂進展によって試験体の固有振動数が低下したため、公称応力範囲が大きくなったと考える。したがって、 N_f 以降の公称応力範囲が急激に大きくなっているため、 N_f 以降は一定応力範囲の疲労試験になっていないことに注意が必要である。

(2) き裂先端周辺部の無荷重時のひずみ変化

図-5 に、AW110 の疲労試験から得られた、き裂先端周辺部および溶接止端近傍の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係を示す。繰返し回数は、き裂先端周辺部にひずみゲージを貼付した時点(N_5)を基準として示している。

図-5(a)より、疲労き裂が計測位置に近づくにつれて、無荷重時のひずみが増加していることがわかる。これは、疲労き裂先端の微小範囲が局部的に降伏したためと考える。しかし、C30 では、疲労き裂が計測位置に近づくとも無荷重時のひずみが減少している。ここで、AW110 の疲労試験終了後の磁気探傷試験結果を図-

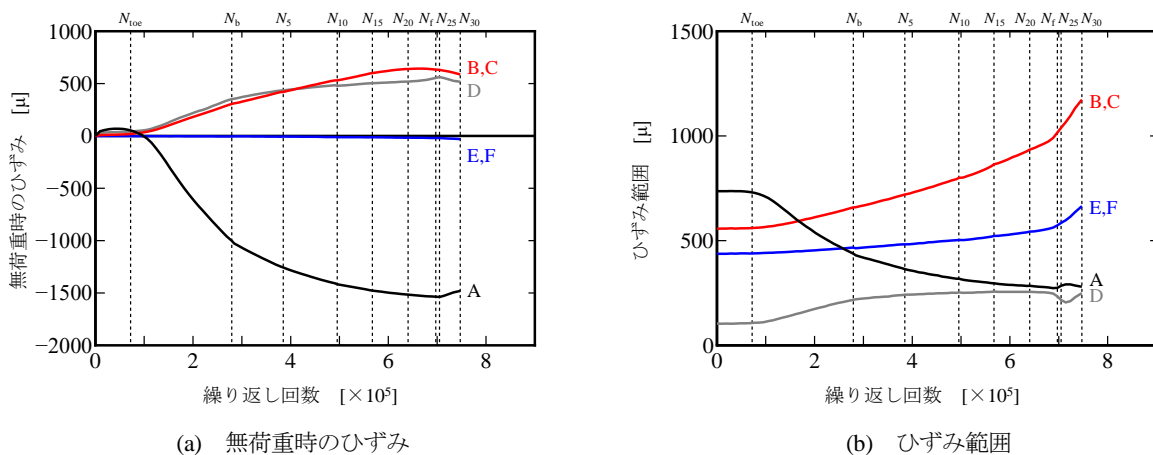


図-4 主板部の無荷重時のひずみ、ひずみ範囲の変化と繰返し回数(AW110)

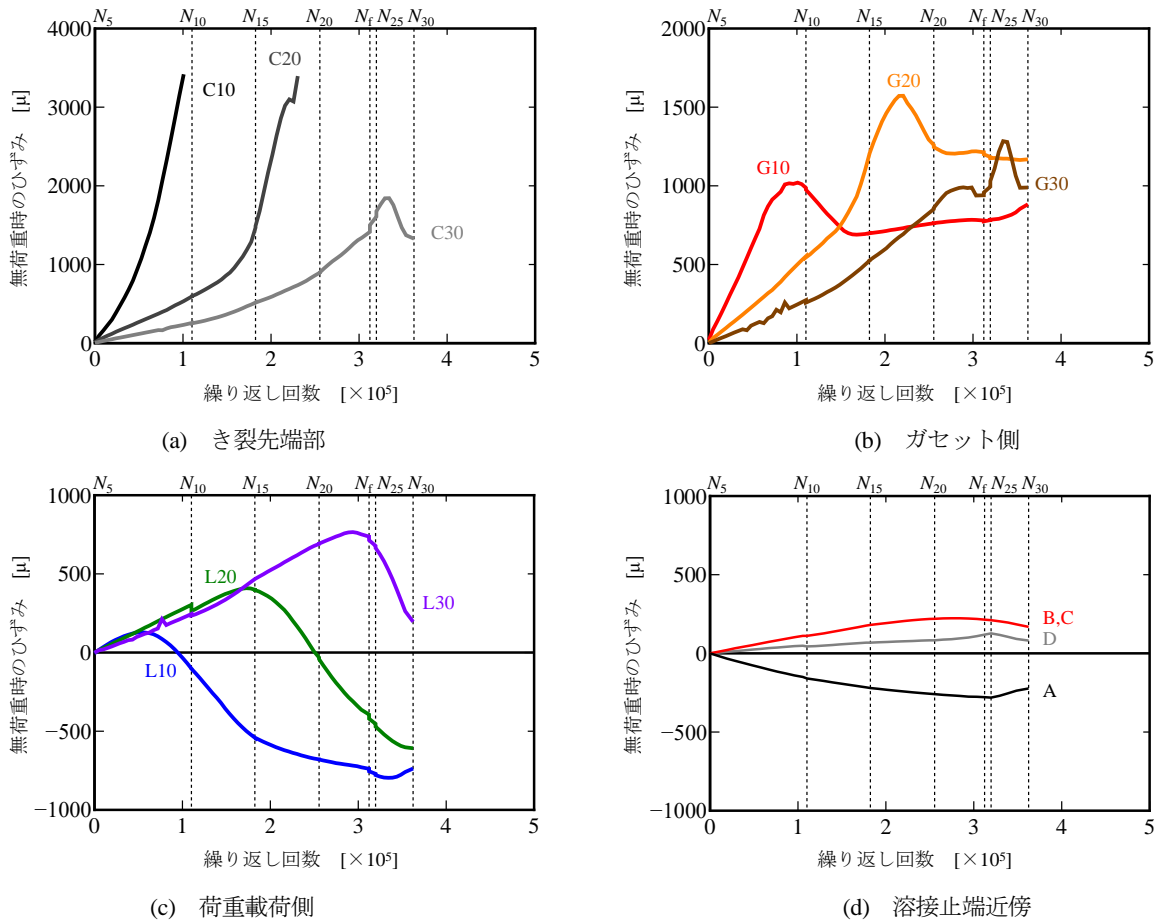


図-5 き裂先端周辺部および溶接止端近傍の無荷重時のひずみと繰返し回数(AW110)

6に示す。図より、疲労き裂は、C30のひずみゲージからずれた位置を進展していることがわかる。したがって、図-5(a)のC30の位置の無荷重時のひずみの値がC10, C20より小さく、き裂が近づいた際にひずみが低下している要因は、C30の計測位置が、き裂先端の塑性域から離れていたためと考える。また、本研究では、 N_{10} , N_{20} , N_{30} の位置とひずみゲージの中心が一致するように貼り付けているため、C10, C20では、疲労き裂が、ひずみゲージの金属抵抗体を切断し、疲労き裂が各き裂長さに達する前に計測不能となった。

図-5(b), (c)より、き裂周辺部は、き裂先端部C30と同様に、疲労き裂が進展することで、無荷重時のひずみが増加するが、ある程度進展し、計測位置に近づくと低下した。ガセット側では、疲労き裂が計測位置を過ぎると変化がほぼ一定になる傾向が見られた。荷重側側も同様に、疲労き裂の進展によって、無荷重時のひずみが増加し、計測位置に近づくと減少するが、疲労き裂の先端が計測位置を過ぎると、圧縮側まで変化した。無荷重時のひずみが圧縮側まで変化した理由は、L10は溶接の近傍であるため、引張残留応力の影響があったと考える。

無荷重時のひずみの変化量を比較すると、き裂先端部は、約3,000 μ 以上、き裂周辺部は、ガセット側と荷重側側ともに、約1,000 μ 変化している。一方、既往の研究で着目した溶接止端近傍は N_5 からの変化のため、約250 μ (図-5(d))しか変化しなかった。

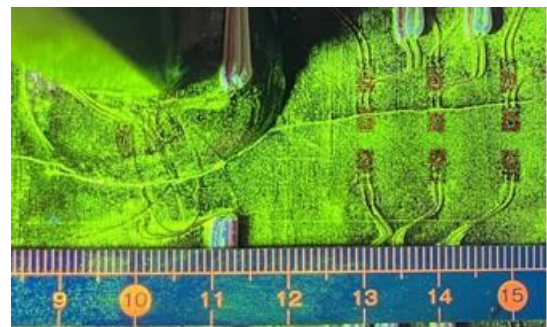


図-6 疲労試験終了後の磁気探傷検査結果(AW110)

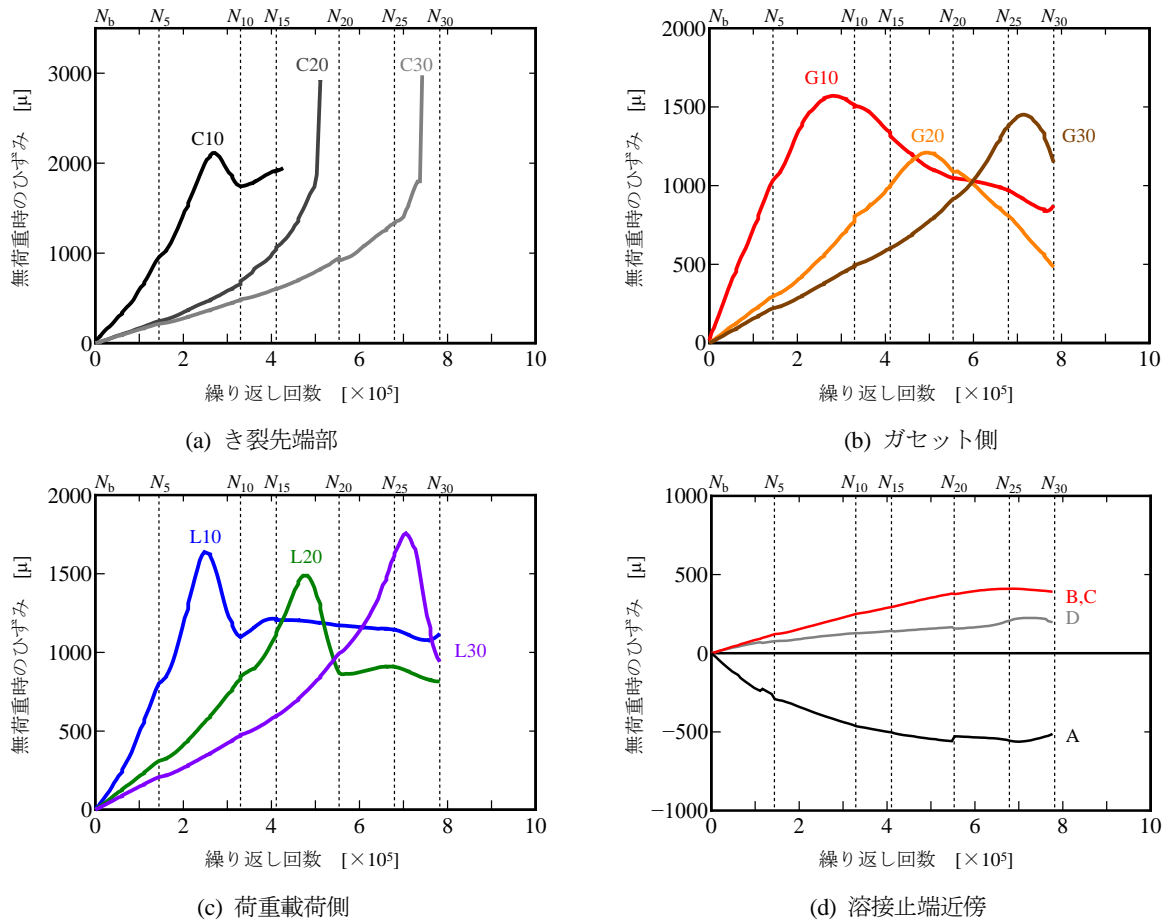


図-7 き裂先端周辺部および溶接止端近傍の無荷重時のひずみと繰返し回数(AW90)

次に、図-7に、AW90の疲労試験から得られた、き裂先端周辺部および溶接止端近傍の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係を示す。繰返し回数は、き裂先端周辺部にひずみゲージを貼付した時点(N_b)を基準として示している。図より、AW110と同様に、溶接止端近傍とき裂先端周辺部の無荷重時のひずみが、疲労き裂の進展によって、変化していることがわかる。

図-7(a)より、AW90では、C10の無荷重時のひずみが、疲労き裂が計測位置に近づくとき減少していることがわかる。図-8にAW90の疲労試験終了後の磁気探傷試験結果を示す。図より、計測位置と疲労き裂先端が一致していない。したがって、AW110とAW90の結果より、き裂先端部の計測は、ひずみゲージと疲労き裂先端が一致しない場合、疲労き裂が計測位置に近づくとき、無荷重時のひずみが減少する傾向があることがわかった。

図-7(b), (c)より、き裂周辺部でも、AW110と同様に、疲労き裂の進展によって、無荷重時のひずみが増加した。AW90では、ガセット側の無荷重時のひずみは、疲労き裂が計測位置を過ぎると、試験終了まで減少した。荷重載荷側の無荷重時のひずみは、疲労き裂が計測位置に近づくとき減少し、計測位置を過ぎると変化がほぼ一定となった。AW110とAW90のき裂周辺部の無荷重時のひずみ変化の違いは、 N_5 と N_b を基準として貼付したひずみゲージ位置の違いや残留応力の解放の違い、試験体ごとの残留応力の違いが含まれると考えられる。しかし、疲労き裂の進展によって、き裂周辺部の無荷重時のひずみが、約1,000 μ 以上変化するため、疲労き裂の進展を評価できると考える。

図-7(d)より、AW90でも、溶接止端近傍の無荷重時のひずみは、 N_b 以降は約500 μ しか変化しなかった。AW110と同様の範囲の N_5 から N_{30} の変化量は、約300 μ であった。したがって、溶接止端近傍よりも、き裂先端周辺部の無荷重時のひずみの方が大きく変化することがわかる。

図-9 に、AW120 の疲労試験から得られた、き裂先端部の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係を示す。繰返し回数は、き裂先端部にひずみゲージを貼付した時点(N_b)を基準として示している。図-10 に AW90 の疲労試験終了後の磁気探傷試験結果を示す。図-9 より、AW110, AW90 と同様に、き裂先端部の無荷重時のひずみが、疲労き裂の進展によって、変化していることがわかる。AW120 では、ゲージ長 5mm のひずみゲージを用いたため、貼付したすべてのひずみゲージ位置と、き裂先端部の塑性域が一致したことから、無荷重時のひずみが増加し続けたと考える。したがって、溶接先端部に発生する疲労き裂の進展に対しては、き裂先端の塑性域の計測および、ひずみゲージの金属抵抗体の切断によるモニタリングが適しているため、ゲージ長が長いひずみゲージを用いるのが良いと考える。

4. LPWA を用いた疲労き裂進展モニタリング

AW120, AW100 の疲労試験では、無線ひずみ計測機器を製作し、き裂先端周辺部の無荷重時のひずみの計測を行った。

無線ひずみ計測機器は、図-11 に示すような、シングルボードコンピュータ(Arduino Uno R3)と LPWA 通信装置 (Sigfox Shield for Arduino : UnaShield V2S), 2チャンネルひずみアンプシールド(計装アンプ AD8426 : Robotshop 社)を組み合わせた小型の IoT 機器である。このひずみアンプシールドは、ひずみゲージから得られた電圧を増幅し、0~5V の電圧を 0~1,023 の整数に変換したデータを計測する。動作電圧は 3.3V であるため、ゲージ率を 2.00 とした際に計測できるひずみ範囲が、-2,000~2,000 μ になり、計測値が 1 変化すると、ひずみは約 6 μ 変化する。また、疲労試験で利用しているひずみゲージ(ゲージ長 1mm, ベース幅 2.4mm またはゲージ長さ 5mm, ベース幅 2.8mm)を 3 線式結線法で接続するために、許容誤差+0.1%の 120 Ω 金属皮膜抵抗器(VISHAY 社製)でひずみゲージ用のブリッジを組んでいる。ひずみの計測は、21 データに対して median フィルターを適用してノイズを除去し、それを 50 回繰り返して最大・最小ひずみを計測し、その平均値を出力するシステムとしている。

この IoT 機器は、計測したデータを低電力で長距離通信が可能な LPWA(Low Power Wide Area)によって、データが転送でき、図-12 のように、インターネット上のプラットフォーム SORACOM Air for Sigfox (ソラコム IoT プラットフォーム)でデータの確認ができる簡易的なモニタリングシステムである。本研究では、PC の USB ポートから無線ひずみ計測機器への電源供給を行ったが、バッテリーを搭載することで、電源確保が困難な箇所でもひずみモニタリングができる。

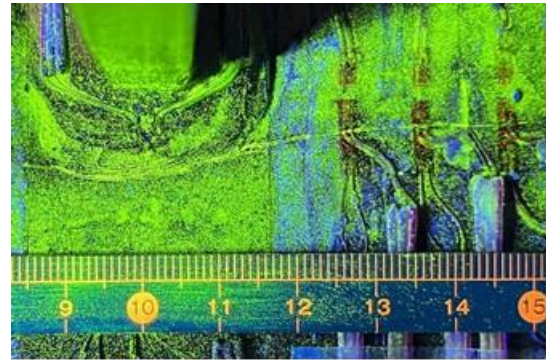


図-8 疲労試験終了後の磁気探傷検査結果(AW90)

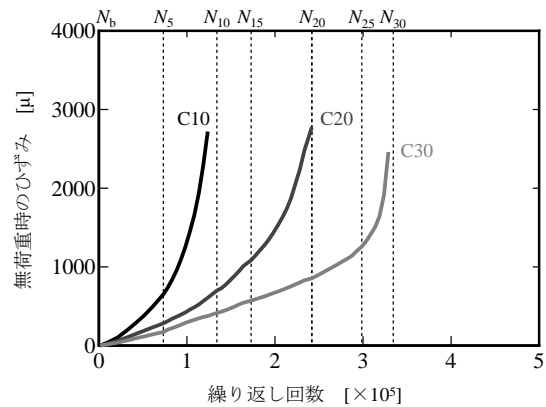


図-9 き裂先端部の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係(AW120)

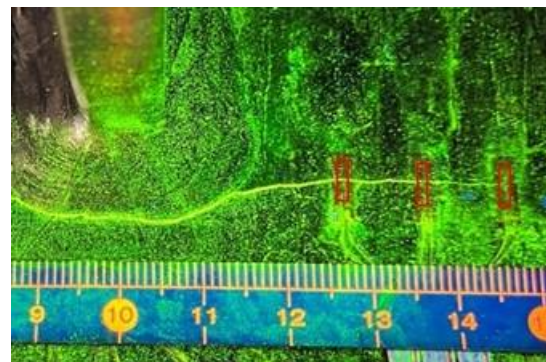


図-10 疲労試験終了後の磁気探傷検査結果(AW120)

図-13 にき裂先端周辺部のひずみゲージ位置を示す。AW100 は、き裂先端部とき裂周辺部にゲージ長 1mm のひずみゲージを N_{10} とひずみゲージの中心が一致するように貼り付けている。AW120 はゲージ長 5mm のひずみゲージを 3 章と同様に、 N_{10} , N_{20} , N_{30} 、とひずみゲージの中心が一致するように貼付している。本章の疲労試験は AW100 では N_{10} , AW120 は N_{30} に疲労き裂が達した段階で終了とした。

AW100, AW120 の疲労試験から得られた、き裂先端部の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係を図-14 に示す。図より、3.2 節の動ひずみ計を用いた計測と同様に、疲労き裂の進展によって、無荷重時のひずみが増加していることがわかる。無線ひずみ計測でも疲労き裂によって、ひずみゲージの金属抵抗体が切断されたので、き裂長さに達する前に計測不能となっている。また、ゲージ長の違いによる影響も見られなかった。ただし、図-14 からわかるように、ひずみの計測範囲が動ひずみ

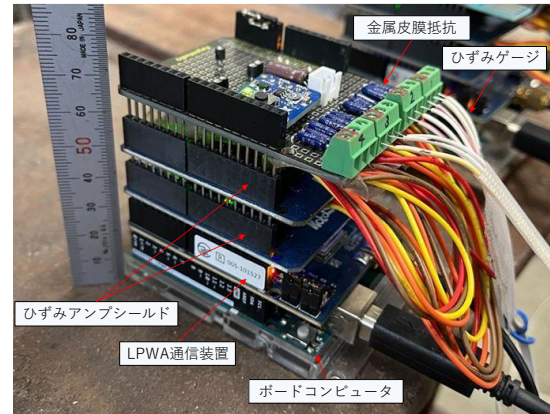


図-11 無線ひずみ計測機器構成の一例

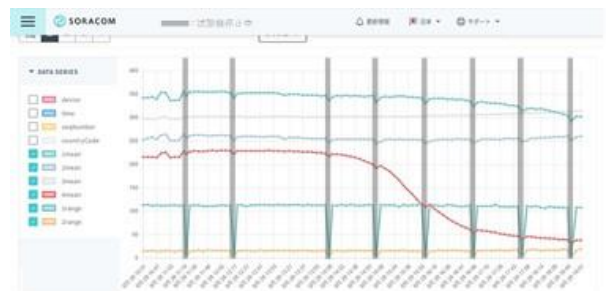
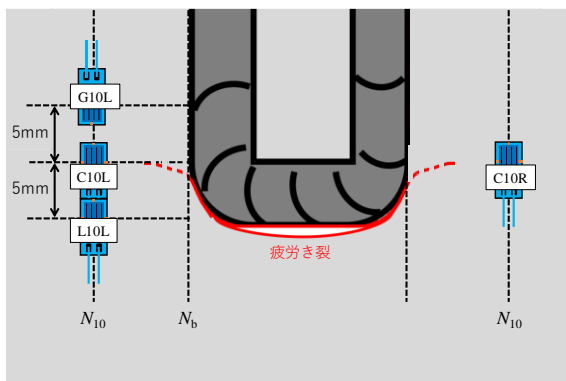
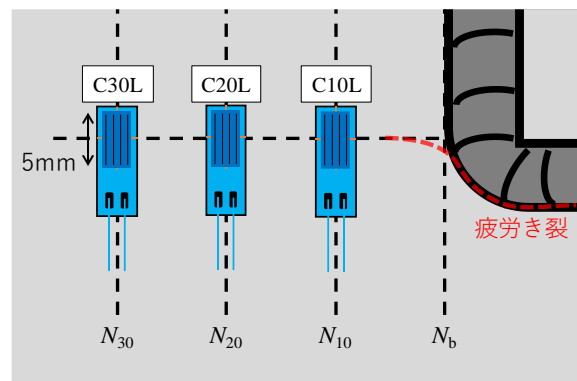


図-12 SORACOM Air for Sigfox の画面の一例

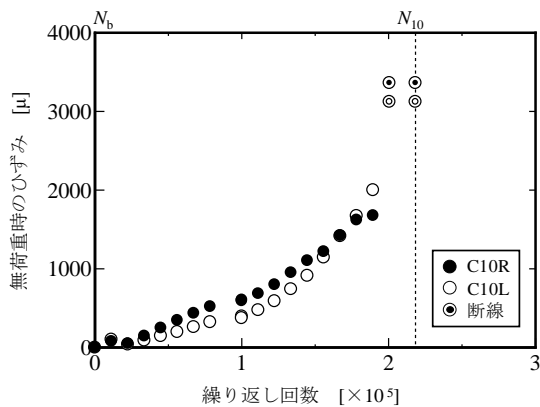


(a) AW100 (ゲージ長 1 mm)

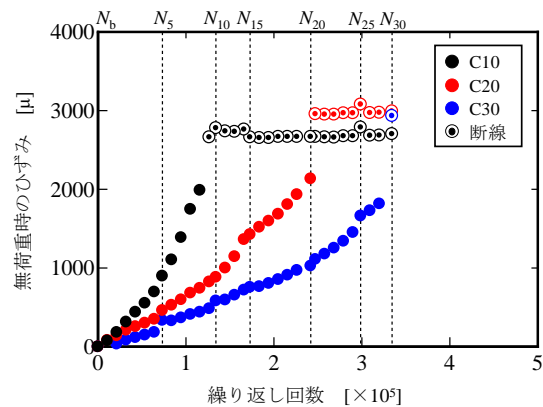


(b) AW120 (ゲージ長 5 mm)

図-13 無線ひずみ計測のき裂先端周辺部の計測位置



(a) AW100 (ゲージ長 1 mm)



(b) AW120 (ゲージ長 5 mm)

図-14 き裂先端部の無荷重時のひずみの変化

計と比べて狭いため、2000~3000 μ が上限となっている。ひずみの上限値は、初期のひずみの値に依存して変化する。

次に、AW100 の疲労試験から得られた、き裂周辺部の無荷重時のひずみと繰返し回数の関係を図-15 に示す。き裂周辺部も同様に、疲労き裂の進展によって変化する、無荷重時のひずみが計測できている。L10L は G10L と比較すると、変化量が小さいが、AW110 の L10 の無荷重時のひずみの変化(図-5(c))と同様の傾向を示していることから、 N_{10} 以降も疲労試験を続けた場合、明確に変化すると考えられる。

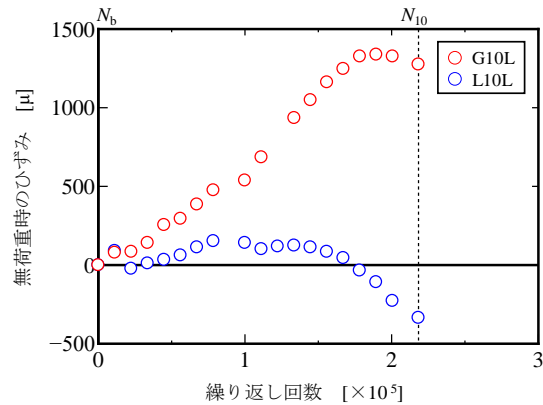


図-15 き裂周辺部の無荷重時のひずみの変化

したがって、LPWA と無線ひずみ計測機器を用いて、き裂先端部と周辺部の無荷重時のひずみの変化を計測することによって、疲労き裂の進展をモニタリングできた。

5. まとめ

本研究では、疲労試験において、き裂先端周辺部の計測を行い、無荷重時のひずみの変化によって、疲労き裂の進展が評価できるかどうかを明らかにした。本研究の範囲内で得られた主な結論を以下に示す。

- 1) き裂先端部やその近傍の無荷重時のひずみが、疲労き裂先端の局所的な降伏の影響によって変化することが明らかとなった。
- 2) 疲労き裂がゲージの金属抵抗体を切断する場合は、計測不能になるまで、き裂進展に伴って無荷重時のひずみが増加し続けた。しかし、ひずみゲージの位置がき裂の進展位置からずれていた場合は、き裂進展に伴って一旦、無荷重時のひずみが増加するが、その後減少に転じた。き裂が小さい段階で、き裂進展近傍にひずみゲージを貼付した場合、残留応力の解放による影響も無荷重時のひずみに含まれる。
- 3) LPWA を用いた無線ひずみ計測機器を製作し、き裂先端周辺部の無荷重時のひずみの変化を動ひずみ計と同様に計測できた。

参考文献

- 1) 土木学会 鋼構造委員会：鋼橋の疲労対策技術， 鋼構造レポート 22， 2013.
- 2) 石川 敏之，山田 健太郎，柿市 拓巳，李 蒼：ICR 処理による面外ガセット溶接継手に発生した疲労き裂の寿命向上効果，土木学会論文集 A， Vol.66, No.2, pp.264-272, 2010.
- 3) 石川 敏之，松本 直樹：疲労き裂の発生・進展による無荷重時のひずみ変化の評価，構造工学論文集 Vol. 68A, pp.554-563, 2022.
- 4) 山田 健太郎，小藪江 朋堯，小塩 達也：垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのすみ肉溶接の曲げ疲労試験，鋼構造論文集，Vol.14, No.55, pp.1-8, 2007.