

LPWA を活用した鋼箱桁コーナープレート切欠き部の 疲労き裂モニタリングの試行と監視方法の検討

TRIAL OF FATIGUE CRACK MONITORING OF CUT-OUTS IN CORNER PLATES OF STEEL BOX GIRDERS USING LPWA AND CONSIDERATION OF THE METHOD

赤松 伸祐^{*1}
中本 勇^{*3}

西海 能史^{*2}
笹脇 壮太^{*3}

上見 範彦^{*2}
石川 敏之^{*4}

Shinsuke AKAMATSU^{*1}
Yuu NAKAMOTO^{*3}

Yoshifumi NISHIUMI^{*2}
Sota SASAWAKI^{*3}

Norihiko AGEMI^{*2}
Toshiyuki ISHIKAWA^{*4}

ABSTRACT In this study, a monitoring method utilizing LPWA (Low Power Wide Area) technology to transfer strain measurement data near welded joints was investigated. Using this method, year-round preliminary measurements were conducted on the cut-outs in the corner plates of an actual bridge to determine strain variations caused by vehicle loads and temperature changes. Additionally, fatigue tests targeting cracks in the cut-outs of the corner plates were performed to identify the trends in strain variations during crack initiation and propagation. Based on these results, appropriate measurement methods and threshold strain values for effective monitoring of actual bridges were proposed.

Keywords: コーナープレート, 切欠き, 疲労き裂, モニタリング, 疲労試験
Corner plate, Cut-out, Fatigue crack, Monitoring, fatigue test

1. はじめに

鋼床版箱桁は、箱断面の上側が床版であり、その厚みは 12mm と薄肉となる。更にウェブや下フランジが薄い場合、横リブ間隔が大きい場合、ダイヤフラムに V 字型対傾構方式が採用された場合などは、断面の剛性が不足し、輸送や架設時に断面が変形する恐れがある。これに対し、コーナープレートは、図 1 に示すように、形状保持を目的として設置された部材であり、主桁フランジ・ウェブおよび横リブウェブに片側からすみ肉溶接で取付けられている。

コーナープレートと横リブウェブの隅肉溶接部

^{*1} 博士(工学) (一財) 阪神高速先進技術研究所
調査研究部

(〒590-0014 大阪市中央区南本町 4-5-7)

^{*2} 修士(工学) 阪神高速道路(株), 管理本部管理企
画部保全技術課

(〒650-0041 神戸市中央区新港町 16-1)

^{*3} 修士(工学) (一財) 阪神高速先進技術研究所
調査研究部

(〒590-0014 大阪市中央区南本町 4-5-7)

^{*4} 第 2 種正会員

博士(工学) 関西大学 環境都市工学部 教授

(〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

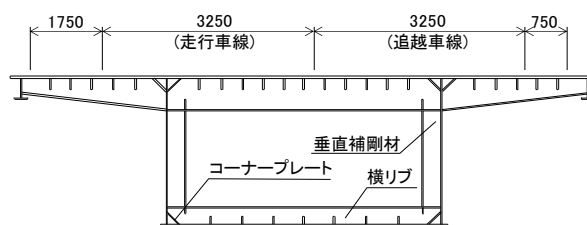


図1 鋼床版箱桁断面図

は荷重を伝達する片面溶接継手となる。文献[1], [2]では、この交差部において、図 2 に示すように、橋軸方向応力の繰返しにより疲労き裂が確認されている。このき裂に対する補修として、き裂の除去と拘束応力を開放するため、図 3 に示すように、当該箇所のコーナープレート端部を切除する切欠きが施された。しかし、切欠き端部に露出した片面すみ肉溶接のルートを開始点として、再びき裂が発生する事例が報告されている。

このコーナープレート切欠き部のき裂は、ウェブやフランジといった主部材へ進展し、深刻な耐荷性能の低下につながる懸念される。特に都市高速などの重交通路線では、5 年に 1 度の定期点検ではき裂が大きく進展する恐れがあるため、

このようなき裂の発生は、点検間隔を短くするなど点検体制を強化して、早期に検知することが対応の一つとなる。一方で、近年労働力不足が深刻化しており、人的資源への投資を増加させることが困難な状況である。また、き裂の進展速度が速い場合は、定期点検間に中間点検を行うなど、点検頻度を上げて、次回点検までにき裂が板厚を貫通するリスクがあるため、より早期にき裂の発生を遠隔で検知する必要がある。このような場合には、動的に変化するひずみを計測することが考えられるが、扱うデータが多く、遠隔で監視するには、通信環境やクラウド環境の構築に係るコストが課題となる。

このような中、IoT 技術を活用したモニタリング手法が提案されている。文献[3]では、疲労き裂の発生・進展によるき裂進展監視ゲージの破断を LPWA (Low Power Wide Area) によってデータ転送する疲労き裂検知方法が提案されている。また、文献[4]では、面外ガセット溶接継手試験体を用いた曲げ疲労試験を実施し、疲労き裂の発生・進展による無荷重時の静ひずみを、汎用の電子部材を組み合わせて製作した LPWA 通信が可能な無線ひずみ計測機器を用いて計測して、疲労き裂を検知する手法が提案されている。この手法は、数日に 1 度程度、数秒程度、静的にひずみを計測してき裂の発生および進展を評価するもので、低コストで長期間の疲労き裂モニタリングが可能である。この手法の適用により、コーナープレート切欠き部のき裂の発生を遠隔で早期に把握できる可能性があるが、このき裂を対象とした実橋での適用性は明らかとなっていない。

そこで本研究では、溶接部近傍のひずみの計測値を LPWA 通信技術によって転送するモニタリング手法を用い、コーナープレート切欠き部のき裂検知手法を検討した。まず、実橋のコーナープレート切欠き部において、本手法を用いた予備的な通年の計測を実施することで、車両荷重や温度変化によるひずみ変化量を把握した。併せて、コーナープレート切欠き部のき裂を対象とした板曲げ疲労試験により、き裂発生および進展時のひずみ変動を明らかとした。そしてこれらの結果を基に、実橋における計測方法および監視すべきひずみ値の設定について検討を行った。

2. 対象橋梁および損傷・対策の経緯

本研究で対象とする橋梁は、ウェブと上下フラ

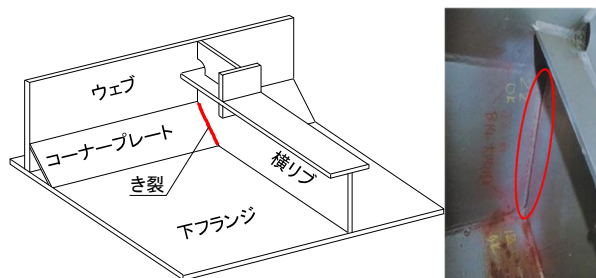


図2 コーナープレートと横リブ交差部のき裂

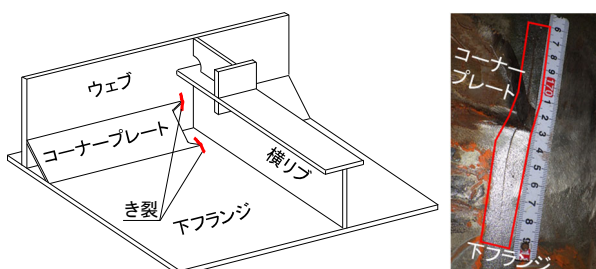
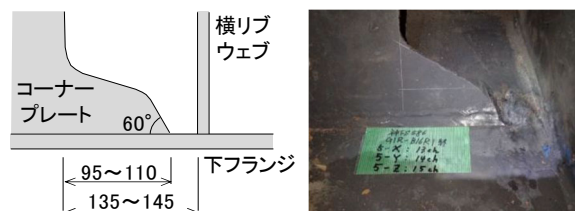
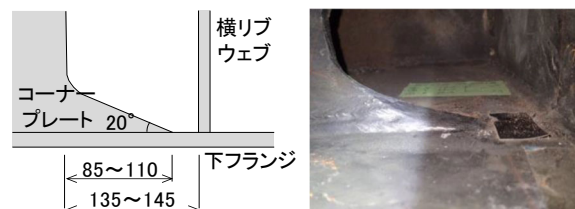


図3 コーナープレート切欠き部のき裂



(a) 切欠き角度60°



(b) 切欠き角度20°

図4 切欠き形状

ンジの角部にコーナープレートを有する 3 径間連続鋼床版桁橋である。同橋梁の車線数は 2 車線（走行車線・追越車線）であり、道路交通センサスで用いられる車種区分に基づいた大型車交通量が 1 日 1 車線あたり約 7,500 台の重交通路線である。1968 年に供用が開始され、供用 16 年目の 1984 年の調査において 119 箇所のコーナープレートと横リブ交差部の疲労き裂（図 2）が確認されている。き裂発生後の補修および予防保全対策として、コーナープレート端部に切欠きを設ける処理が施された。この時の処理では切欠きの形状が統一されおらず、比較的角度が急な箇所では、図 4 (a)に示すように、角度が約 60°であった。その後、2016 年に実施された調査では、切欠きを施工した全 651

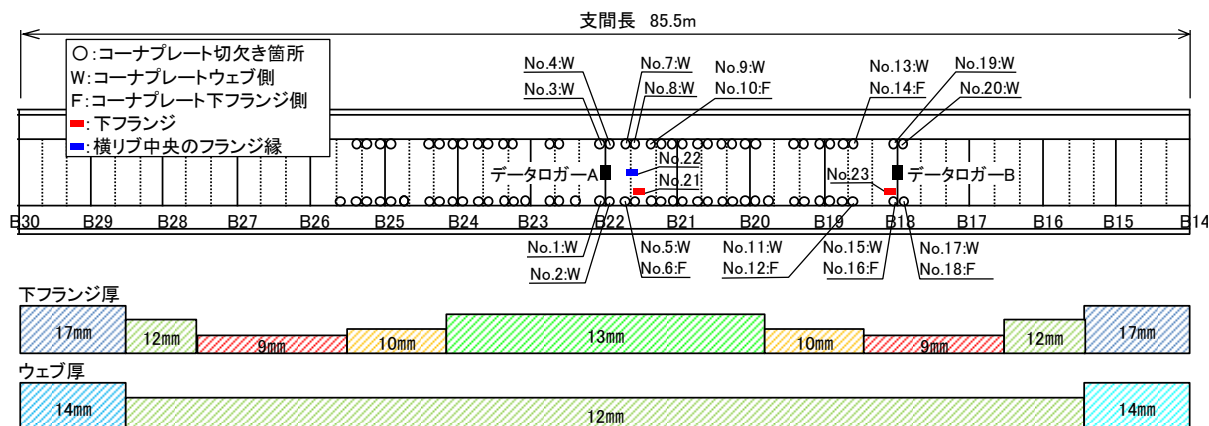


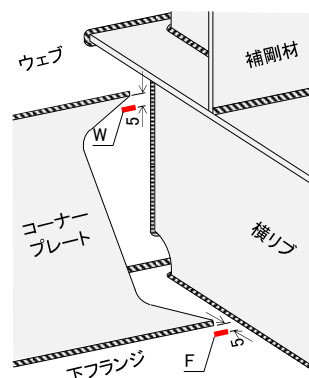
図5 計測対象径間の骨組図および板厚構成と計測対象としたコーナプレート

箇所のうち、145箇所で切欠き端部の下フランジにき裂(図3)が発生しており、そのうち28箇所ではき裂が下フランジを貫通していた。そのため、2018年に切欠き端部の応力集中緩和を目的として、図4(b)に示すように、全ての下フランジ側の切欠きに対して端部の角度が 20° となるように形状が改良された。一方で、ウェブ側の切欠き端部は対象としておらず、切欠き形状を更新しているものの形状が管理されていないため、端部の角度が急な箇所では 60° 程度となっている。なお、き裂が発生した箇所には、き裂先端にストップホールを施し、箱断面外側から当て板をボルトで接合する補修が施されており、き裂の再進展は確認されていない。この補修を施した切欠き端部および、下フランジ側に施した箇所のウェブ側の切欠き端部は、切欠き形状が改良されておらず、当時の形状がそのまま残されている。

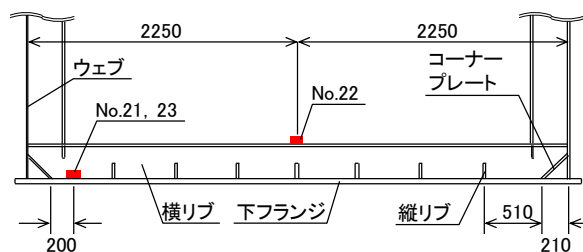
3. 実橋におけるモニタリング計測の試行

3.1 ひずみ変化によるき裂検知手法

文献[4,5]では、荷重が作用していない状態における静ひずみを計測することで、疲労き裂の発生および進展を評価する方法が提案されている。この方法では、疲労き裂の発生により、溶接部とその近傍に存在する残留応力が解放されることによって残留応力のつり合いが変化し、それに伴うひずみ変化に着目している。このため、一般的な疲労き裂の検出に用いられる、所定の荷重作用下におけるひずみ範囲を動ひずみで計測する必要がなく、作用荷重のばらつきが大きい道路橋の疲労き裂の検出に適した指標と言える。また、き裂の発生および進展の初期段階は急激な進展を示さないため、残留応力の開放によるひずみは、1日に1回～数回



(a) コーナプレート切欠き部



(b) 下フランジと横リブ中央

図6 ひずみ計測位置

程度の静的なひずみを計測すればよく、その変化でき裂の発生および進展を十分に評価することができる。

このような少量のデータによるモニタリングは、IoTの一つであるLPWAを用いたモニタリングに適している。なお、LPWAは、無線通信規格の一種であり、1度に通信できるデータ量に制限があるが、低速な狭帯域を利用することで10kmを超える長距離通信[6]ができ、低電力で通信可能なためIoT機器の長時間稼働に適していることが特徴である。このLPWAを活用することで、低コストかつ長期間の疲労き裂モニタリングが可能である。

3.2 モニタリング計測の目的および概要

実橋における温度変化や時間帯（交通状況）によるひずみ変化量の把握を目的として、2023 年 11 月から 2025 年 3 月まで予備的な計測を実施した。計測に用いた機器の構成は、3.3 に後述する。

計測対象は、3 径間連続鋼床版箱桁橋の中央径間の下フランジ側に施されたコーナプレート切欠き部とした。計測箇所は、図 5 に示す通り、下フランジ厚や断面力が異なる支間中央部（No.1～No.10）と交番部付近（No.11～No.20）とした。計測は、切欠き部の両端（ウェブ側・フランジ側）を対象とするが、フランジ側の切欠き部において過去にき裂が発生し、ストップホールと当て板が施されている箇所は、き裂発生リスクが低いため、ウェブ側のみを計測した。コーナプレート切欠き部のひずみ計測位置を図 6 (a) に示す。コーナプレート切欠き部に発生するき裂は、図 3 に示すように、ウェブ側・フランジ側ともに、切欠き端部に露出した片面すみ肉溶接のルート起点として主桁断面方向に進展する。この進展方向にひずみゲージを貼付することで、ひずみの変化だけではなく、進展したき裂がゲージを破断させる現象を利用できる。ウェブ側の計測位置は、発生したき裂がウェブの下縁側に進展すると進展速度が速く危険であるため、コーナプレート切欠き先端の下側とする。一方、下フランジ側の計測位置は、発生したき裂が橋軸直角方向の両側に進展し、その進展速度に差がないことから、ひずみゲージを貼付しやすいコーナプレートの外側とした。

また、図 6 (b) に示すように、下フランジの公称ひずみを No.21 と No.23 で計測した。これは、コーナプレート切欠き部の応力集中の影響を排除し、温度や交通荷重の影響を受ける構造物の挙動を捉えるためである。これと比較するために、交通荷重によるひずみが発生しない位置として横リブ中央のフランジ縁のひずみ（橋軸方向）を No.22 で計測した。

全ての計測点において、2 時間ごとの静的な橋軸方向ひずみを計測した。併せて、各データロガー内の温度を計測し、これらの計測データを LPWA により転送した。なお、長期的な計測となるが、箱桁内で水や日照の影響を受けないため、ひずみゲージ等の計測機器は環境に対する対策を行っていない。

3.3 LPWA を用いた無線ひずみ計測機器の構成

実橋計測で使用した LPWA を用いた無線ひずみ

表1 実橋計測で使用した機器構成一覧

項目	仕様・製品名
ボードコンピュータ	Arduino Mega (Arduino社)
LPWA通信装置	LET-M shield for Arduino (SORACOM)
ADコンバーター	HX711
ひずみゲージ	FLAB-5-350-11-15LJCT (東京測器)
ひずみブリッジ	金属皮膜抵抗器 350Ω, 許容誤差+0.1% (VISHAY社)

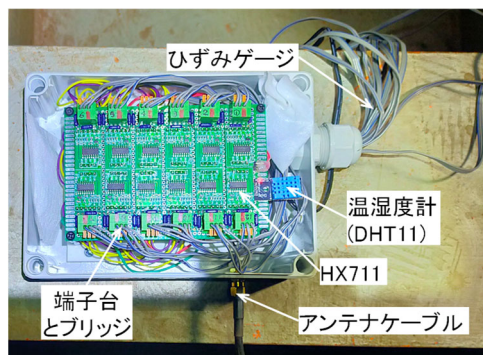


図7 LPWAを用いた無線ひずみ計測機器

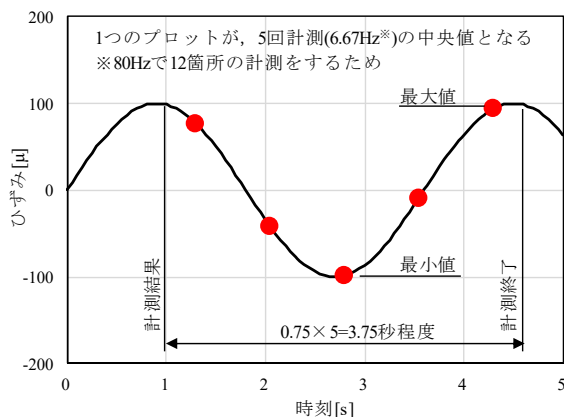


図8 本計測のデータ取得のイメージ

計測機器の主な構成を表 1、図 7 に示す。計測チャンネル数や計測する項目など計測プログラムを設定するボードコンピュータとして、Arduino Mega (Arduino 社)、ひずみゲージからの抵抗変化を電圧信号に変換し増幅する AD コンバータとして HX711、LPWA 通信機器としてセルラー系 LTE-M (LTE Cat.M1) の SIM が利用できる LET-M shield for Arduino (SORACOM) を用いた。この場合、一回に転送できるデータ量は 1000 バイト程度である。本検討では、2 バイトで 26 データ (12 箇所の最大・最小と温湿度) の送信 (52 バイト) とした。12 箇所のひずみデータが計測できるように、AD コンバ

ータ HX711 を 12 個内蔵した。また、ひずみを計測する際に、ゲージ長 5mm、ベース幅 3.8mm、ゲージ抵抗値 350 Ω 、ケーブル長さ 15m のひずみゲージ（東京測器社製 FLAB-5-350-11-15LJCT）を 3 線式結線法（リード線の温度影響の補償法）で接続するため、許容誤差 $\pm 0.1\%$ 、温度係数 $\pm 5\text{ppm}/^\circ\text{C}$ の 350 Ω の金属皮膜抵抗器（VISHAY 社）で、ひずみゲージブリッジを組み、端子台で接続できるようにした。データロガー内に温湿度計（DHT11）をセットし、計測機の設置位置の温度変化を計測することとした。鋼箱桁内部は、構造的に電波の遮蔽が生じやすく通信環境が不安定であったため、アンテナをケーブルで延長し、比較的電波状況が安定した位置にアンテナを配置した。また、装置への電力供給については、鋼箱桁内部に事前に設置されたコンセントを用いて電源を確保した。1 回の通信による電力消費量は 150mA $\times$ 30sec 程度となり、TPL5110 等のタイマーモジュールとバッテリー（2500mAh）を用いて 1 日 3 回計測した場合は、3 年程度の長期間計測に対応できる。

今回製作した機器で計測可能なひずみ範囲は 8,000 μ ～-8,000 μ 程度であり、計測速度は 80Hz である。スパイクノイズを除去するためのフィルタは Median Filter を用いた。各チャンネルに対してそれぞれ 5 個のデータを取得してその中央値を抽出（Median Filter）し、それを 5 回繰返して得られた各チャンネルの中央値のうちの最大値と最小値を抽出してデータ送信を行う。図 8 に一定のひずみ波形を例として、本計測のデータ取得のイメージを示す。12 チャンネルの場合、約 3.75 秒の間のひずみを計測することとなり、この間に車両が通過した場合は、無載荷時のひずみに加えて車両荷重によるひずみが含まれることとなる。

取得したデータの蓄積は、WEB プラットフォームである SORACOM を用いた。SORACOM では、計測機器から送信された計測データが自動的にグラフ化され、表示する計測データの期間の変更、計測データごとの表示・非表示、グラフの CSV 変換などが可能である。

3.4 モニタリング計測結果

データロガー内の温度の推移を図 9 に示す。温度の変化については、データロガー A、B に差異がなく、一般的な季節変動による温度の変化と同様である。また、1 日の温度変化幅は 10 度程度であった。

2 時間毎に計測した公称ひずみ計測位置の静ひ

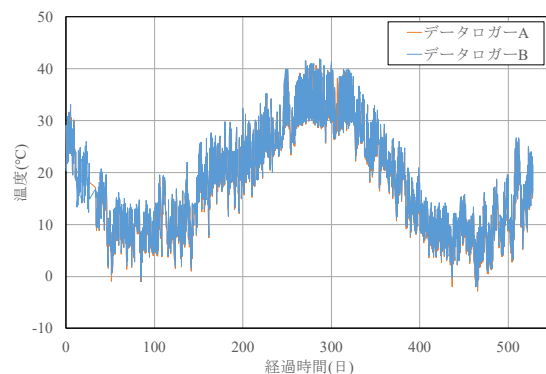
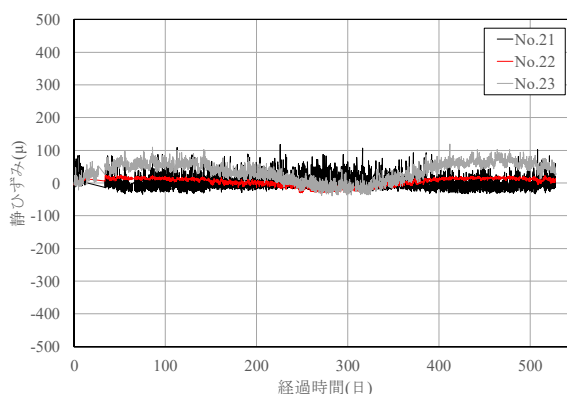
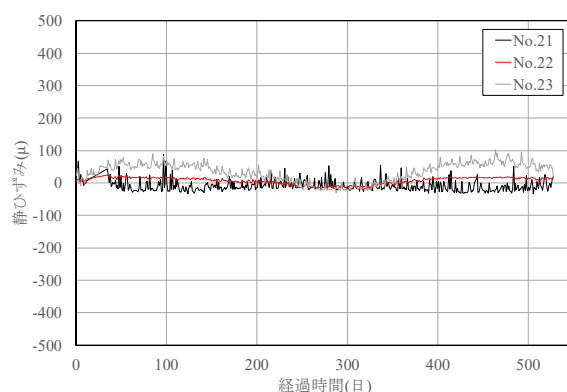


図9 データロガー内の温度の推移



(a) 2時間毎の計測データ



(b) AM4～5時台のみの計測データ

図10 公称ひずみ計測位置の静ひずみの推移

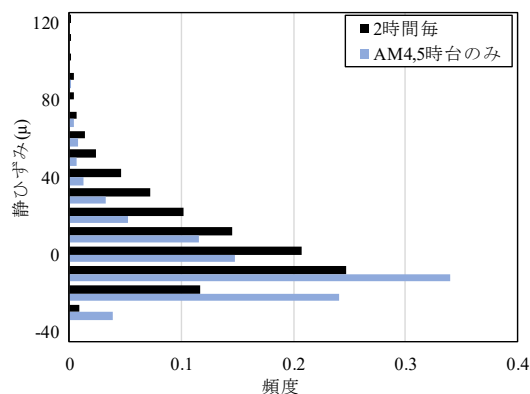


図11 No.21の静ひずみの頻度分布

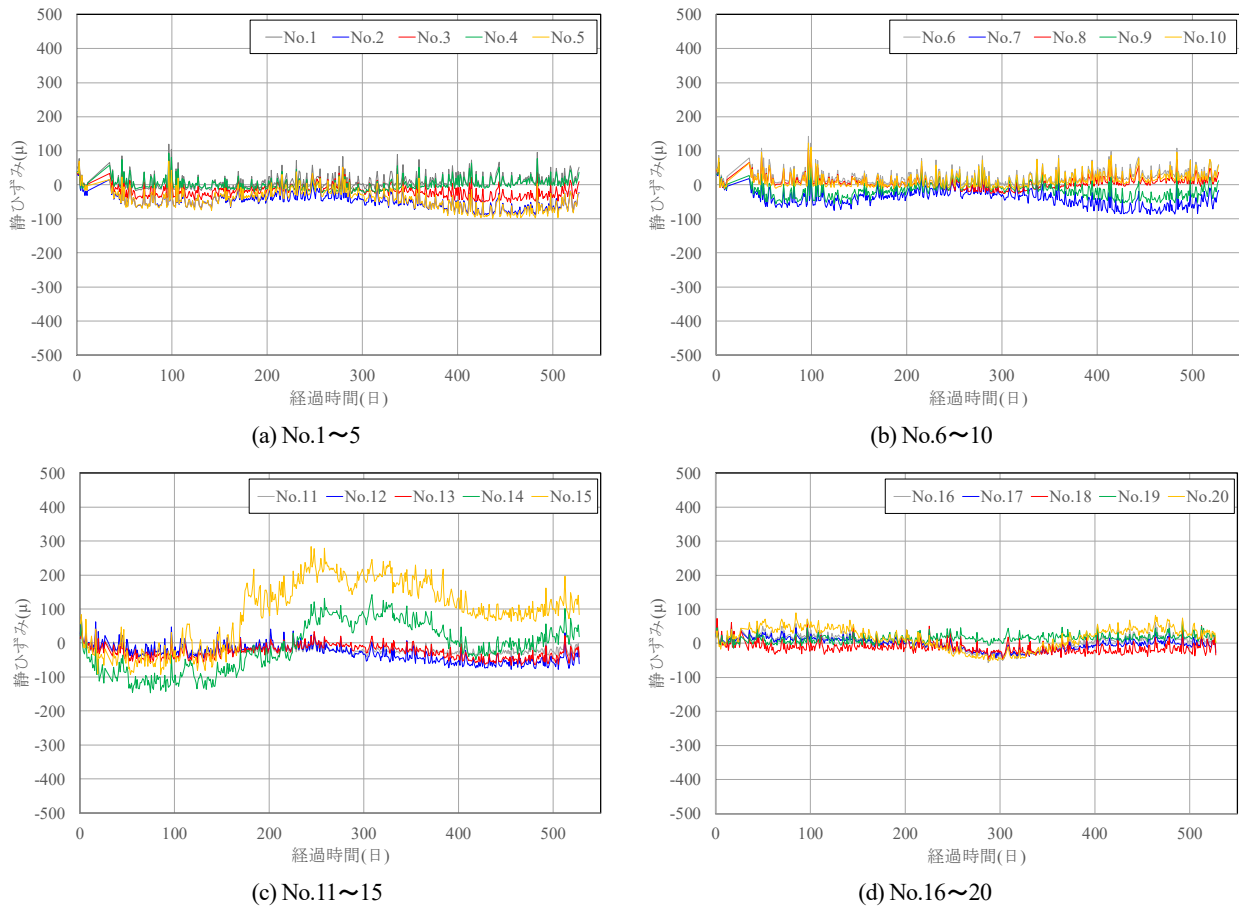


図12 各計測位置の静ひずみの推移 (AM4~5時台のみのデータ)

ずみの推移を図 10(a)に示す. この図から, ひずみが発生しない No.22 の静ひずみは, 年間を通じてほとんど生じていない. つまり, ひずみゲージとそのケーブルや, ブリッジの抵抗に対する温度変化による見かけのひずみ変化は小さいことがわかる. 一方, No.21, No.23 の静ひずみは, 変動幅があり, 年間の温度変化による影響と交通荷重の影響が含まれていると言える. 特に No.23 では, 静ひずみの中央値が変化しており, これは温度変化の影響と考えられる. 続いて, 交通荷重の影響を把握するため, 交通量が少ない AM4~5 時台に計測された静ひずみのみの推移を図 10(b)に, 2 時間毎と AM4~5 時台に計測された静ひずみの頻度分布を図 11 に示す. なお, 静ひずみの頻度分布は, 温度変化の影響が小さい No.21 の結果を示している. 図 10(b) に示す AM4~5 時台のみの静ひずみの推移は, 2 時間毎の計測に比べて変化が小さいと言える. また, 図 11 に示す静ひずみの頻度分布から, AM4~5 時台の計測データは, 2 時間毎の計測に比べて, 静ひずみが大きい領域, つまり交通荷重の影響がある静ひずみの頻度は少ないと言える. これらのこと

から, AM4~5 時台の静ひずみの変化は, 交通荷重が載っていない状態で計測されている日が多く, 静ひずみの変化を評価しやすくなっていると言える. 一方で, 今回計測の対象としたような影響線長が長い多径間連続桁橋では, 3.75 秒程度の計測の間に, 車両が完全に載っていない状態での計測は困難であることがわかる.

No.1~20 の各計測位置に対する静ひずみの推移を図 12 に示す. ここでは静ひずみの変化を評価しやすい AM4~5 時台のみのデータを示す. 計測位置 No.14, 15 の静ひずみの変化が大きい, それ以外の計測位置は, $\pm 100\mu$ 程度に収まっており, 今回実施した予備的な計測の期間内では, 疲労き裂が発生していないと考えられる. 計測位置 No.14, 15 の静ひずみの変化は, 計測開始から 150 日程度経過後に+側のひずみにシフトしているため, 後述する疲労試験のひずみの変化を考えると, 疲労き裂が発生している可能性が考えられた. そこで 2024 年 12 月 (経過時間 400 日程度) に現地を確認したが, コーナープレート切欠き部の先端に塗膜割れがなく, MT によっても疲労き裂の発生は確認

されなかった。また、その周辺にも疲労き裂などの
静ひずみが増加する要因は確認できなかった。現
地確認後はひずみの変化が停滞しているが、引き
続き計測して監視し、さらに変動が見られた場合
は、再度現地確認を実施する予定である。

No.14, 15 の静ひずみの変化が大きい原因は特定
できないが、これらの測点に近い No.23 の公称ひ
ずみも年間を通して変化していることから、この
変化を温度変化の影響と仮定した場合、静ひずみ
の最大の変化量は、圧縮側に -150μ 、引張側に 300μ
程度である。これは、後述する疲労き裂を検知する
ためのひずみ量に比べて小さいと言える。

なお、一部の計測において、計測開始から10日
～35日までは、セットしたアンテナの位置の電
波状況が悪く、データが転送されなかったため
アンテナの位置を再設定するまでデータが欠損
している。

4. 疲労試験

3章に示す計測からコーナプレート切欠き部
のき裂検知モニタリングを行う際の基礎データ
を得るために疲労試験を実施した。この試験では、き
裂が発生および進展した際のひずみ挙動の把握、
また計測したひずみ値の評価方法の設定を目的と
している。

4.1 試験概要

疲労試験には、図13に示す板曲げ振動疲労試験
機[7]を用いた。この試験機は、荷重フレームに試
験体を片持ち梁状態で固定し、試験体自由端側に
取付けた加振機で曲げ荷重を発生させるものであ
る。偏心錘のメモリとパイプレータの振動数によ
って応力範囲を、自由端側に取り付けたスプリン
グによって平均応力を制御することができる。本
試験では死荷重状態で引張応力を受ける下フラン
ジを対象とすることから、応力比は引張の片振り
(応力比 $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0$) とし、公称応力範囲は
 $\Delta\sigma = 40, 60, 120 \text{ N/mm}^2$ とした。荷重速度は設定す
る応力範囲により変動するが、本試験では
15~18Hzとなる。

試験体を図14に示す。文献[8]と同様に、下フ
ランジおよびウェブを模した主板、幅 $300 \text{ mm} \times$ 長さ
 $700 \text{ mm} \times$ 板厚 9 mm (実橋で最も薄い下フラン
ジ厚) に、幅 $150 \text{ mm} \times$ 長さ $340 \text{ mm} \times$ 板厚 9 mm の
コーナプレートを模した付加板を 45° の角度で
溶接する。鋼材の材質は、溶接構造用圧延鋼板(JIS
G3106 SM490Y)とする。実橋におけるコーナプ

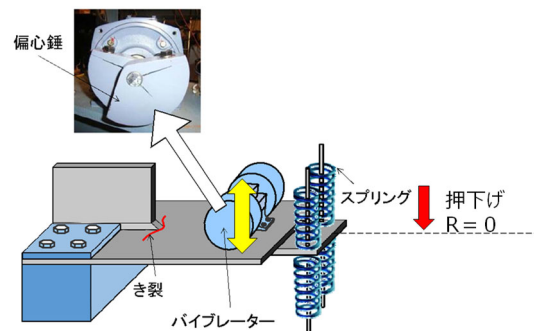


図13 板曲げ振動疲労試験機

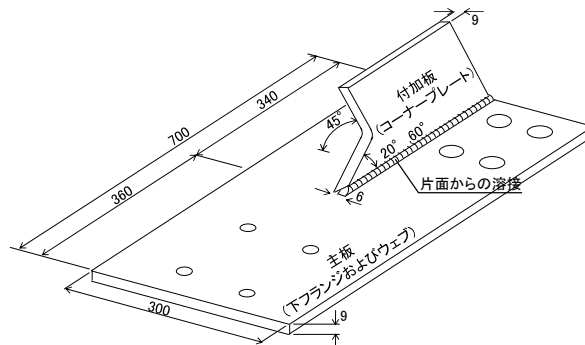


図14 試験体 (単位: mm)

表2 溶接条件

溶接棒線径 (mm)	パス数	電流 (A)	電圧 (V)	溶接速度 (cm/sec)
3.2	5	145	200	5

表3 試験体一覧

試験体	端部の角度(°)	試験体数
D60	60	3
D20	20	3

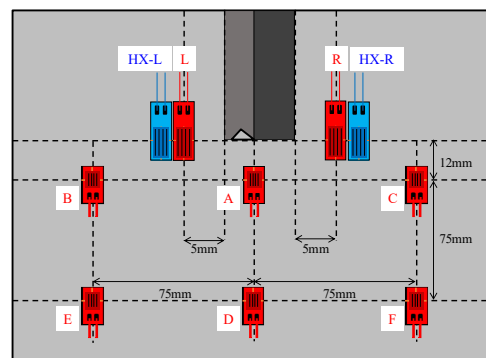


図15 ひずみゲージ貼付位置

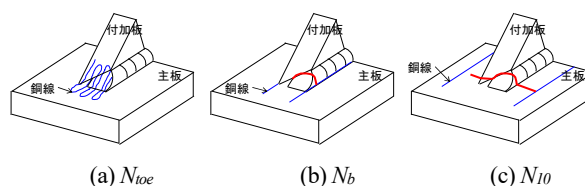


図16 疲労寿命の定義

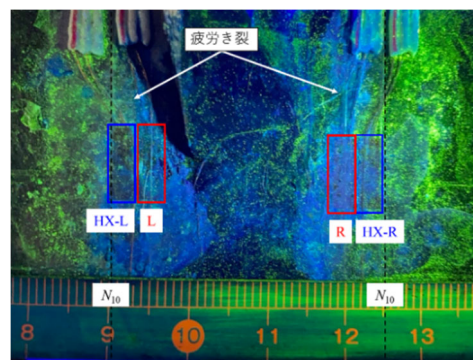
レートは下フランジまたはウェブに対して片面からのみ溶接されているため、試験体も実橋を再現するため片面から溶接とした。溶接条件は、文献[8]で検討された対象橋梁の溶け込み量と同程度になるように事前に試験施工された表 2 に示す条件とした。なお、対象橋梁の 10 箇所計測した溶け込み量の平均は、コーナープレーットの板厚 9mm に対して 6mm であった。試験体の一覧を表 3 に示す。切欠き角度の影響を検討するため、2 章で述べたように、対象橋梁において、フランジ側の切欠き角度は 20°に改良されているものの、ウェブ側の切欠き角度は最大で 60°であることから、コーナープレーット先端の角度は 60°および 20°の試験体を製作した。付加板を溶接した後に、実橋での施工と同様、まずガス溶断により大まかな切欠き加工を施し、ディスクグラインダーおよびバークグラインダーで成形した。

図 15 に、本疲労試験のひずみ計測位置を示す。図 6 に示す実橋での計測位置を想定して、溶接止端から試験体幅方向に 5mm 位置で動ひずみ計測 (L, R) を行い、LPWA を用いた無線ひずみ計測位置 (HX-L, HX-R) はその外側とした。ひずみゲージは、ゲージ長 5mm の単軸ゲージ (3 線式) を使用し、最大・最小ひずみを計測した。計測の周期は、き裂の発生や進展に伴うひずみ変化を捉えるために 10~15 分に 1 回とした。各計測周期におけるひずみ計測では、3 章に示す実橋での計測方法と同様に、スパイクノイズを除去するため 5 回のデータを取得し、その中央値を抽出する Median Filter 処理を適用した。また、最大ひずみ・最小ひずみが計測できるように、この処理を 100 回繰り返した。無線ひずみ計測機器には表 1 の構成とし、USB ケーブルを用いた PC からの常時給電とした。なお、ボードコンピュータは、計測点が 2 箇所と少ないことから、Arduino Mega に替り、処理性能や機能が同じでピン数が少ない Arduino Uno を利用した。

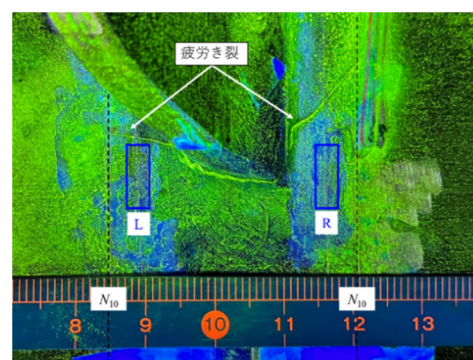
公称応力範囲は、試験体軸方向に貼付したひずみゲージのうち、き裂発生前の CH-B, C の平均値と CH-E, F の平均値から溶接止端位置まで線形外挿したひずみに鋼のヤング係数 ($E_s = 200 \text{ kN/mm}^2$) を乗じた値とした。また、全て応力比 $R=0$ で実施したため、最小引張荷重時が無荷重時のひずみとなる。

4.2 疲労寿命の定義

本疲労試験では、図 16 に示すように、切欠き先



(a) D20



(b) D60

図17 き裂の発生状況

端部に $\phi 0.05 \text{ mm}$ の銅線を貼付してき裂の発生および進展を捉えた。疲労寿命の定義は、疲労き裂が発生し、銅線が破断した段階の繰返し回数を N_{lo} 、溶接止端部のゲージ A のひずみ範囲が 5%低下した繰返し回数を $N_{5\%}$ 、切欠き先端部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、切欠き先端部に沿って試験体軸方向に貼付した銅線が破断した段階の繰返し回数を N_b 、疲労き裂が切欠き先端部から 10 mm 離れた位置に貼付した銅線が破断した段階の繰返し回数を N_{10} とした。 N_b , N_{10} は、左右で先に銅線が破断した繰返し回数としている。疲労試験は、実橋で捉えたいき裂長である N_{10} に到達した段階で終了した。

4.3 疲労試験結果

4.3.1 き裂発生状況

図 17 に D20 と D60 の疲労試験終了時のき裂発生状況を示す。図 17(a)に示すように、ルートの付加板側からき裂が発生し、溶接を貫通して主板に到達し、試験体幅方向に進展しているケースが、D20 の 3 体全てと D60 のうち 2 体で確認された。一方、D60 のうち 1 体では、図 17(b)に示すように、ルートの主板側からき裂が発生し、切欠き先端に沿って進展し、最終的に試験体幅方向に進展する

き裂が確認された。

2章に示した実橋のコーナープレート切欠き部で発生したき裂は、約8割がルート付近から溶接上およびコーナープレートのコバ面へ進展し、残りの約2割は、切欠き先端に沿って進展していた。進展経路の違いと切欠き角度との間に明確な相関は確認できなかったが、今回の疲労試験におけるき裂の挙動と同様の傾向を示した。

4.3.2 疲労強度

表4に試験体の初期応力範囲と各き裂長に対する疲労強度の一覧を示す。D60-60では、 N_{10} に貼付した銅線がひずみゲージと重なり、銅線が切れなかったため、き裂が主板を20mm進展(N_{20})した。そのため、D60-60試験体における N_{10} は、D60-120試験体で疲労き裂が N_{10} に達した際のひずみゲージHX-Rのひずみ範囲の低下率と一致する繰返し回数として推定した値である。

図18に N_{10} に対する疲労試験結果のS-N関係を示す。図には、過去に実施された同寸法の試験体の内AWの結果[8]およびJSSCの疲労強度曲線を併記している。なお、本試験は板曲げであり、実橋のフランジおよびウェブ断面の応力分布である引張に比べ、疲労き裂の進展が遅くなる。そこで、短いき裂ではあるが、 N_{10} の試験結果に対して、応力範囲を4/5倍とし、引張を繰返し受ける場合の疲労強度に補正した[9]。その結果、引張を繰返し受ける場合では、コーナープレート先端の角度 60° 、 20° ともに、JSSC-H等級を下限としてプロットされた。

つまり、切欠き形状を 20° に改良したコーナープレート切欠き部は、改良によって応力集中点が変わったものの疲労強度は依然として低く、き裂が発生する可能性があるため、モニタリングが必要と言える。

4.3.3 き裂進展時のひずみの変化

疲労試験結果の内、実橋での計測を想定してLPWAで計測したHX-LとHX-Rのひずみ範囲および平均ひずみの変化と繰返し回数を図19に示す。

ひずみ範囲は、疲労き裂の発生・進展によって減少しているが変化量は小さい。これは、ひずみゲージの計測位置とき裂進展位置が一致していないためと考えられる。図19(c)に示すHX-L・HX-R、図19(e)に示すHX-Rは、途中でひずみゲージの配線部分の被覆銅線がき裂により切断され、計測不能となった。また、図19(e)(f)に示すHX-Lは、計測されたひずみ範囲のばらつきが大きい。これは、今回用いた計測機のひずみブリッジの結線部に

表4 試験体と応力範囲と疲労強度

試験体	応力範囲 (N/mm ²)	繰返し回数($\times 10^4$)						備考
		N_{10e}	$N_{5\%}$	N_b	N_{10}	N_{20}		
D20-40	42.7	1.4	319.1	450.1	904.5	-		
D20-60	61.5	43.7	118.4	166.8	365.5	-		
D20-120	127.4	3.8	16.7	28.1	51.2	-		
D60-40	39.1	56.6	171.0	402.4	671.1	-		
D60-60	59.9	14.7	48.9	104.8	255.8	303.2	N_{20} まで進展 N_{10} は推定値	
D60-120	119.7	3.0	4.9	22.1	34.1	-		

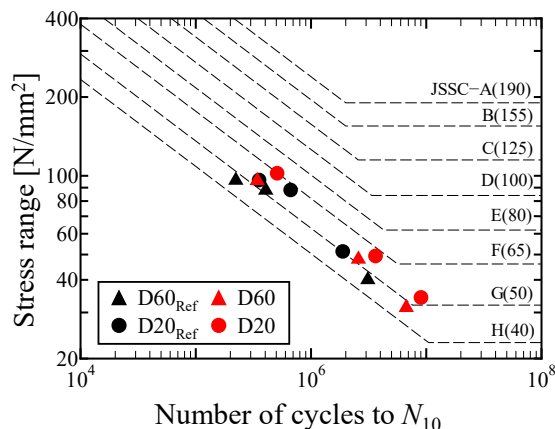


図18 引張を繰返し受ける場合の疲労強度に補正したS-N関係図

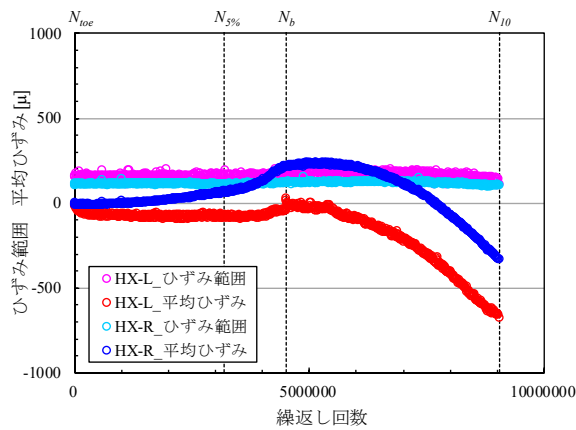
Arduino UnoのICSP用のピンが接触していたためと考えられる。

平均ひずみは、最大ひずみと最小ひずみから算出しており、図では計測された平均ひずみの初期値を0として補正し、変化量で示している。平均ひずみは、疲労き裂の発生・進展によって変化し、 N_{10} 時点で約 500μ 、最大で約 750μ まで減少している。また、平均ひずみは、 $N_{5\%}$ 到達後に増加し、 N_b 到達後に減少する傾向が見られる。これは、疲労き裂の発生・進展による残留応力の再分配の影響と考えられ、一度平均ひずみが増加する要因は、疲労き裂先端の小規模降伏の影響が計測されたためと考えられる。

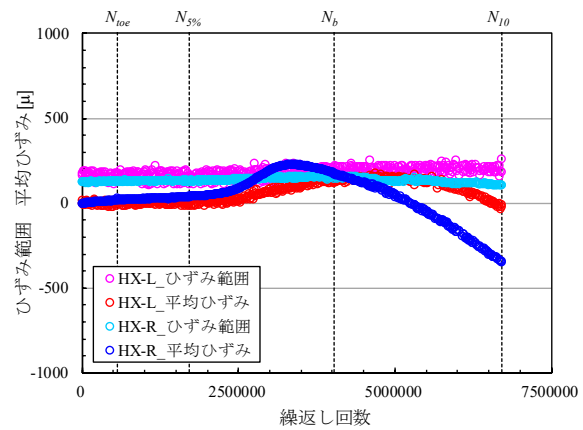
このように、実橋での計測を想定してLPWAで計測したHX-LとHX-Rでは、き裂進展によるひずみ範囲の変化に比べ、残留応力の再分配によるひずみ変化がより大きいことが確認されたため、無載荷時のひずみ変化を捉えることで、き裂の進展を確認できると考えられる。

4.4 実橋におけるひずみ計測の方針

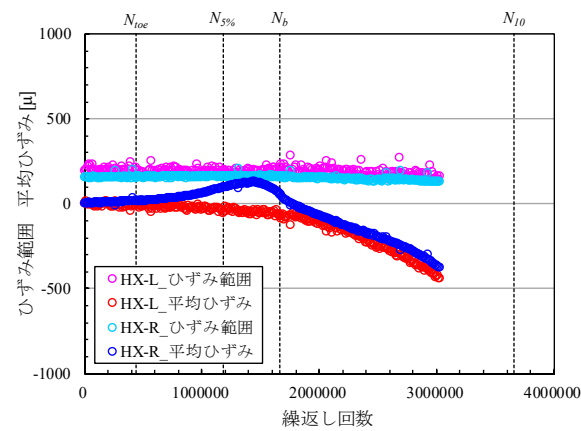
疲労試験の結果、実橋の計測位置において、無載荷時のひずみでき裂を検出できることが確認できた。今後実施する本格的なモニタリング計測では、



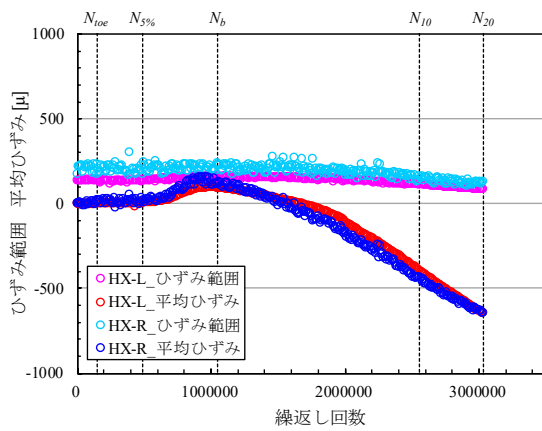
(a) D20-40



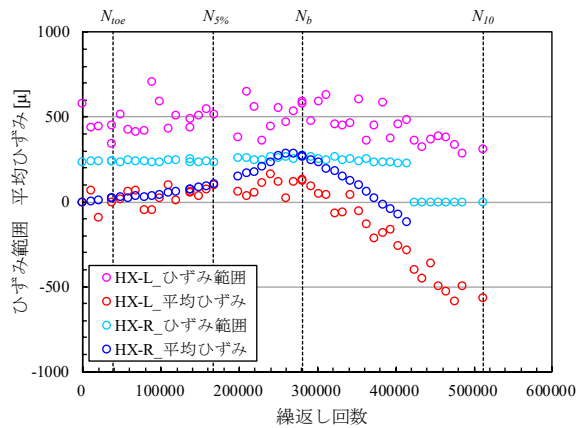
(b) D60-40



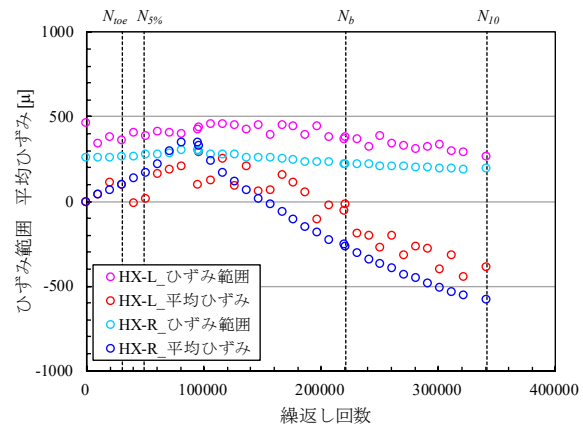
(c) D20-60



(d) D60-60



(e) D20-120



(f) D60-120

図19 ひずみゲージHX-L, HX-Rのひずみ範囲および平均ひずみの変化と繰返し回数

比較的交通量が少ない夜間のひずみを計測する。なお、夜間においても、車両が存在する場合があることや通信環境の不安定性に伴うデータ欠損に対応して、計測は1日3回(0時, 2時, 4時)程度の間隔で実施する。

N_{I0} のき裂進展を捉えるための無載荷時のひず

み変化量は、試験ケースによってばらつきはあるが、安全側の値として、圧縮側 300μ を目安に監視する。なおこの変化量の目安は、3章に示す AM4 ~5 時台の静ひずみの変化の最大値より大きな値である。引張側の変化量については、き裂がゲージ方向に進展しゲージを破断させた場合に引張側の

大きな値を示すことから、 $1000\ \mu$ を目安に監視する。

なお、疲労試験に用いた試験体はコーナプレートと主板の溶接のみを模擬したものである。一方、実橋では図 6 に示すように、下フランジの場合は計測位置付近に縦リブ・横リブ・ウェブと下フランジ、ならびにコーナプレートとウェブの溶接が存在する。本研究では、計測位置におけるき裂の発生および進展に伴う橋軸方向の残留応力ひずみの再分配を評価している。計測位置は、橋軸方向の溶接線（ウェブ・縦リブと下フランジ、ならびにコーナプレートとウェブ）から橋軸直角方向に最小で 200mm 以上離れており、各溶接線による圧縮の残留応力を受ける領域に該当するが、離れ量からその影響は小さいと考えられる。また、横リブと下フランジの溶接は、橋軸直角方向の残留応力の影響が支配的であり、計測位置における橋軸方向残留応力への影響は小さいと考えられる。

5. まとめ

本研究では、コーナプレート切欠き部の疲労き裂を対象として、実橋での予備的な計測と曲げ疲労試験を実施し、低コストかつ長期間計測が可能な LPWA を活用した疲労き裂検知モニタリング手法による監視方法を検討した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 実橋での予備的な計測により、鋼箱桁内から通信可能であった。通行車両による静ひずみの変化量は最大で $\pm 100\mu$ 程度であり、温度変化による静ひずみの変化量は、圧縮側に -150μ 、引張側に 300μ 程度であった。
- 2) コーナプレート切欠き部を想定した曲げ疲労試験により、無載荷時のひずみを計測することでき裂を検知できる可能性を示した。したがって、実橋でのひずみ計測は、交通車両が少ない夜間のひずみを計測するのがよい。
- 3) き裂長が主板に 10mm 進展した時の無載荷時のひずみ変化量は圧縮側に 400μ 程度である。この変化量にはばらつきがみられたが、実橋でのひずみ計測では、安全側の値かつ車両荷重の影響を排除できる値として、圧縮側 300μ を目安に監視することとした。なお、引張側の変化量については、き裂がゲージを破断させた場合を検知するため、 1000μ を目安に監視することとした。

なお、本研究で対象とした手法は、モニタリングの対象としたコーナプレート切欠き部のき裂を検出するものである。対象橋梁にはき裂が発生し補修が施されたコーナプレート切欠き部を除いて、 500 箇所を超えるコーナプレート切欠き部が残存している。き裂発生の可能性がある切欠き部先端は、フランジ側とウェブ側に存在するため計測の対象は $1,000$ 箇所を超える。低コストな手法であっても、これら全ての箇所を計測することは非効率である。このため、交通量が多い走行車線側に位置するコーナプレート切欠き部の方が、追越車線側に比べて相対的にき裂発生率が高いなど、これまでに発生したき裂の傾向を分析し、き裂発生リスクが高い箇所を選定してモニタリングを実施することで効率的かつ効果的なモニタリングが可能であると考ええる。

6. 謝辞

疲労試験および予備計測にあたり、研究当時、関西大学大学院生の松本直樹氏には多大なる協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] 藤林美早, 山口樹, 吉田祐介: 鋼箱桁橋コーナプレート部に発生した疲労損傷報告, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, VI-710, 2020.
M. Fujibayashi, I. Yamaguchi, Y. Yoshida: Fatigue Crack Report of Corner Plate of Box Steel Girder, Proceedings of the 75th Annual Academic Lecture Meeting of the Japan Society of Civil Engineers, VI-710, 2020.
- [2] 吉田祐介, 藤林美早, 坂本直太: 鋼箱桁橋コーナプレート部の疲労損傷に対する予防保全工法の効果確認, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, VI-711, 2020.
Y. Yoshida, M. Fujibayashi, N. Sakamoto: Confirmation of the Effectiveness of Preventive Maintenance Methods for Fatigue Cracks in Corner Plates of Steel Box Girder Bridges, Proceedings of the 75th Annual Academic Lecture Meeting of the Japan Society of Civil Engineers, VI-711, 2020.
- [3] 齋藤豪, 安川和利: 専用断線ゲージを用いた疲労き裂進展の遠隔監視手法の検討, 令和元年度土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, I-205, 2019.
G. Saito, K. Yasukawa: Study on remote monitoring method of fatigue crack propagation using dedicated

- breakage gauge, Proceedings of the 74th Annual Academic Lecture Meeting of the Japan Society of Civil Engineers, I-205, 2019.
- [4] 松本直樹, 石川敏之, 公門和樹, 上田尚史: LPWAを用いた疲労き裂検知モニタリング手法の開発, インフラメンテナンス実践研究論文集 Vol.3 No.1, pp.62-71, 2024.
(DOI: https://doi.org/10.11532/jsceim.3.1_62)
N. Matsumoto, T. Ishikawa, K. Komon, N. Ueda: Development of Fatigue Crack Detection Monitoring Using LPWA, Infrastructure Maintenance Practices, Vol.3, No.1, pp.62-71, 2024.
- [5] 石川敏之, 松本直樹: 疲労き裂の発生・進展による無載荷時のひずみ変化の評価, 構造工学論文集, Vol.68A, pp.554-563, 2022.
(DOI: <https://doi.org/10.11532/structcivil.68A.554>)
T. Ishikawa, N. Matsumoto: Evaluation of Strain Change under Unloading Conditions by Initiation and Propagation of Fatigue Crack, Journal of Structural Engineering, Vol.68A, pp.554-563, 2022.
- [6] 総務省: 平成 30 年版情報通信白書, p.13, 日経印刷, 2018.
- [7] 山田健太郎, 小藺江朋堯, 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, 第 14 巻, 第 55 号, pp.1-8, 2007.
(DOI: https://doi.org/10.11273/jssc1994.14.55_1)
K. Yamada, T. Osonoe, T. Ojio: Bending Fatigue Test on Welded Joint between Vertical Stiffener and Deck Plate, Steel Construction Engineering, Vol.14, No.55, pp.1-8, 2007.
- [8] 清水優, 館石和雄, Shinta Ayuningtyas, 判治剛, 高田佳彦, 熊澤美早, 山口樹, 岡本亮二, 西芝貴光: コーナープレート切欠き部の疲労耐久性と ICR 処理による延命効果, 構造工学論文集, Vol.68A, pp.580-590, 2022.
(DOI: <https://doi.org/10.11532/structcivil.68A.580>)
M. Shimizu, K. Tateishi, Shinta Ayuningtyas, T. Hanji, Y. Takada, M. Kumazawa, I. Yamaguchi, R. Okamoto, T. Nishishiba: Fatigue Durability of Cut-out in Corner Plate and Fatigue Life Extension by ICR Treatment, Journal of Structural Engineering, Vol.68A, pp.580-590, 2022.
- [9] 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 2012 年改定版

(2025 年 5 月 22 日原稿受理)