

LPWA を用いた鋼箱桁コーナープレート切欠き部の疲労き裂監視方法の検討

(一財)阪神高速先進技術研究所 正会員 ○赤松 伸祐 正会員 中本 勇 非会員 笹脇 壮太
阪神高速道路(株) 正会員 西海 能史 関西大学 正会員 石川 敏之

1. はじめに

コーナープレート（以下、CP）は、鋼床版箱桁橋において、輸送や架設時の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。CP と横リブウェブの溶接部は荷重を伝達する片面溶接継手となり、橋軸方向応力の繰返しにより疲労き裂が確認された。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-1 に示すように、当該箇所の CP を一部切除する切欠きが施された。しかし、切欠き端面に露出した片面すみ肉溶接のルートから、再びき裂が発生する事例が報告されている。このき裂は、ウェブやフランジといった主部材へ進展により深刻な健全性低下のリスクがあることから、き裂の発生を早期に検知する必要がある。

そこで、疲労き裂検知モニタリング手法として提案されている、溶接部近傍に貼り付けたひずみゲージの計測値をLPWA(Low Power Wide Area)によって転送し、このひずみを監視することで疲労き裂の発生・進展を検知する手法¹⁾に着目し、実橋での計測方法の設定を目的とした板曲げ疲労試験を実施した。

2. CP 切欠き部を模した板曲げ疲労試験

試験体を図-2 に示す．下フランジを模した主板，幅 300 mm×長さ 700 mm×板厚 9 mm に，CP を模した板厚 9 mm 付加板を 45° の角度で片側から溶接する．CP 先端の角度は，切欠き角度の影響を検討するため，60° および 20° とした．試験体には図-3 に示すようにひずみゲージを貼付した．LPWA を用いた無線ひずみ計測位置は，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 (HX-L, HX-R) とした．なお，実橋計測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．

本疲労試験では、図-4 に示すように、切欠き先端部に $\phi 0.05$ mm の銅線を貼付してき裂の発生および進展を捉えることとした。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_{toc} 、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版に進展し始め、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。

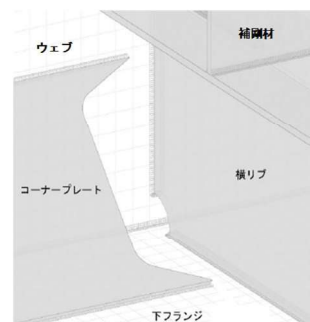


図-1 コーナープレート端部の切欠き

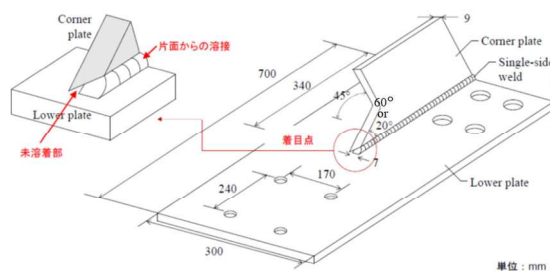


図-2 試験体

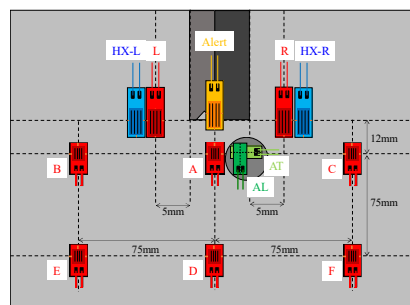


図-3 ひずみゲージ貼付位置

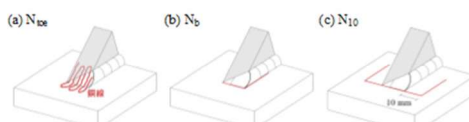


図-4 き裂を検出するための銅線

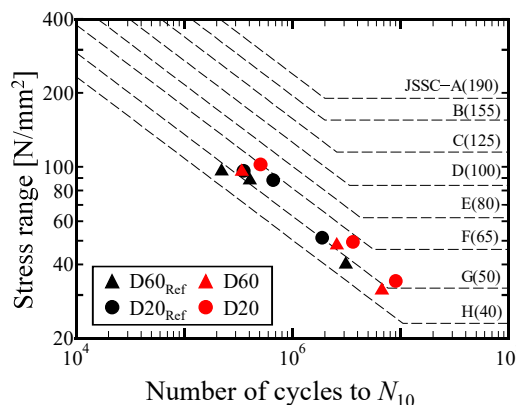


図-5 引張を繰返し受ける場合の疲労強度に補正したS-N関係図

キーワード コーナプレート, 疲労き裂, き裂検知, ひずみ計測

連絡先 〒541-0054 大阪市中央区南本町 4-5-7 東亜ビル内 (一財)阪神高速先進技術研究所 TEL 06-6244-6038

3. 板曲げ疲労試験結果と計測方法の提案

図-5 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²⁾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 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³⁾。その結果、引張を繰返し受ける場合では、JSSC-H 等級を下限としてプロットされた。つまり、CP 切欠き部の疲労強度は低く、き裂が発生する可能性があると言える。

実橋での計測を想定して LPWA で計測した HX-L と HX-R のひずみ範囲を図-6 (a) に、平均ひずみを図-6 (b) に示す。ここでは一例として、切欠き角度 20° 、応力範囲 40 N/mm^2 の場合を示す。これらより、ひずみ範囲より平均ひずみの方が、き裂の影響の感度が高いと言える。また、平均ひずみは、 $N_{5\%}$ 到達後に増加し、 N_b 到達後に継続的に減少する傾向が見られる。これは、き裂がひずみゲージ貼付位置に到達するまではき裂先端の小規模降伏の影響を捉え、その後、き裂進展により引張残留応力が解放される現象を捉えていると考えられる。このような平均ひずみの変化は、同じ位置に同じ荷重を載荷している疲労試験では容易に捉えることができるが、実橋で適用する場合は、荷重条件を特定することはできない。そこで、無載荷時のひずみに着目した結果を図-6 (c) に示す。なお、無載荷時のひずみは、応力比 $R=0$ のため、最小引張荷重時のひずみとなる。無載荷時のひずみも平均ひずみと同様の変化が見られることから、無載荷時のひずみの変化によるき裂の把握が可能と考えられる。

疲労試験結果より、無載荷時のひずみでき裂を検出できることから、実橋におけるモニタリング計測では、交通車両が少ない夜間のひずみを計測することとする。なお、夜間では車両の活荷重の影響を受けにくいものの、データ取得の確実性に配慮し、1 日 3 回 (0 時, 2 時, 4 時) 程度の計測とする。 N_{10} のき裂発生を捉えるための無載荷時のひずみ変化量は、図-6 (c) に示す切欠き角度 20° 、応力範囲 40 N/mm^2 の場合は圧縮側に 400μ 程度である。ただし、この変化量は、試験ケースによるばらつきを考慮し、安全側の閾値設定として、 300μ を目安に監視し、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、 1000μ を目安に監視することとする。

4. まとめ

CP 切欠き部を想定した板曲げ疲労試験の結果より、無載荷時のひずみ変化からき裂の発生や進展を捉えることができること、また、き裂進展時のひずみ変化量を確認した上で、実橋で溶接部近傍のひずみの計測値を LPWA によって転送するモニタリング手法を用いた場合の計測方法および監視するひずみ値を提案した。

参考文献

1) 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, 2024. 2) 清水優, 笹石和雄, 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, 2022. 3) 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

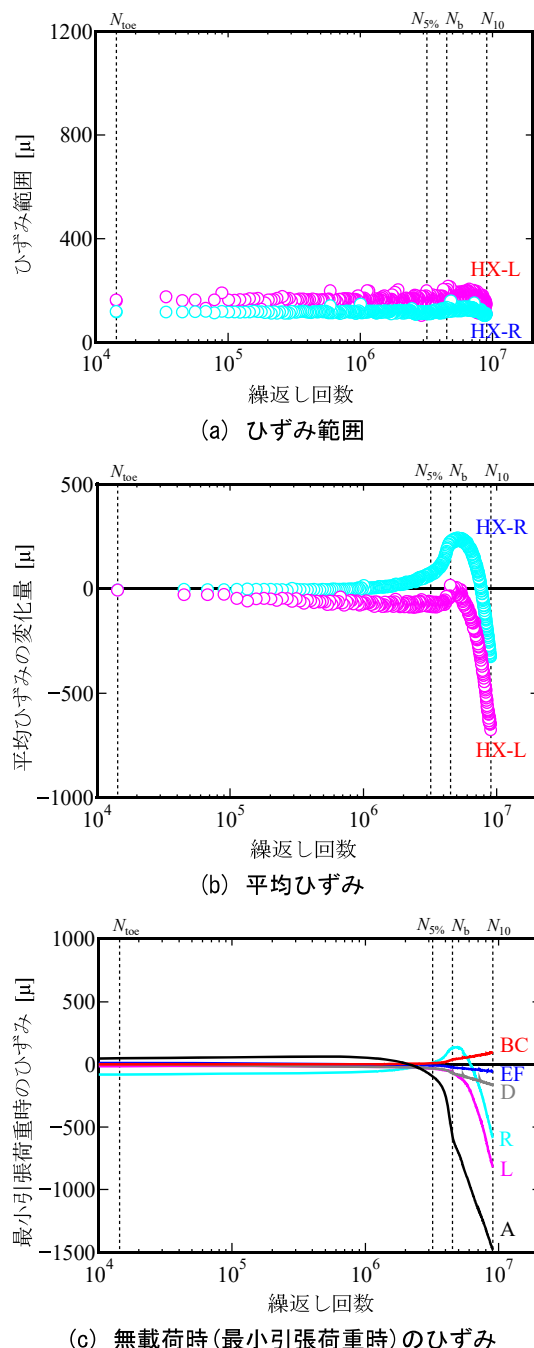


図-6 疲労試験から得られたひずみと繰返し回数 (切欠き角度 20° 、応力範囲 40 N/mm^2 の場合)