

大規模更新湊川橋梁に係る 疲労き裂監視手法の検討

赤松伸祐¹・西海能史²・中本勇¹

¹ (一財)阪神高速先進技術研究所調査研究部橋梁・構造研究室

² 管理本部管理企画部保全技術課

要約

阪神高速道路では老朽化が進む構造物の大規模更新として特定更新等工事を推進している。本稿が対象とする湊川橋梁は、過去より発生していた疲労損傷に対して、上部工の架替を予定しており、架替後の下部工耐力確保および架替までの桁断面力の改善のため、先行して中間橋脚が設けられた。ただし、本橋のうち西橋は一部の径間で中間橋脚が設置されておらず、この径間では桁断面力が改善されていない。そのため、この径間では架替までの疲労き裂発生に対する監視を強化する必要がある、その手法について検討を行った。

キーワード: 大規模更新, 疲労き裂, き裂検知, ひずみ計測

1. はじめに

湊川橋梁（以下、「本橋」という。）は、大規模更新事業の対象であり、阪神高速 3 号神戸線湊川付近（神上下 P585～591）に位置する。現地の状況を写真-1 に、現況平面図を図-1 に示す。本橋は、上下線分離の 3 径間連続鋼床版箱桁橋 4 連にて構成されており、1968 年（昭和 43 年）に供用が開始された。神上下 P585～588 を東橋、神上下 P588～591 を西橋と称している。

本橋の路下には国道 2 号線があり、運河や国道 28 号と交差することから、限られた敷地内での建設が余儀なくされた。そのため、上部工死荷重の軽減を図るため鋼床版桁が採用され、①横リブ間隔を大きくする、②ダイヤフラムを V 型対傾構方式とするなど、合理化にチャレンジした設計となっている。また主桁の板厚は、下フランジの端支点部 9 m（中間支点部は最大 18 mm）、ウェブ 12 mm と薄い。また、中間支点付近においても、デッキプレート板厚は 12 mm と増厚されておらず、主桁系としての曲げ剛性が低く、輸送や架設時の形状保持のため、主桁箱断面の 4 隅にコーナプレート（以下、「CP」とい

う。）が設けられている。

しかし、この CP 溶接部からは、フランジやウェブに進展する致命的なき裂が数多く発生しており、維持管理上の課題の一つとなっている¹⁾。このき裂に対しては、適宜対策が取られてきているものの、抜本的な対策として上部構造の架替が今後計画されている。

上部構造の架替時においては、既設下部工のみで



写真-1 現地の状況

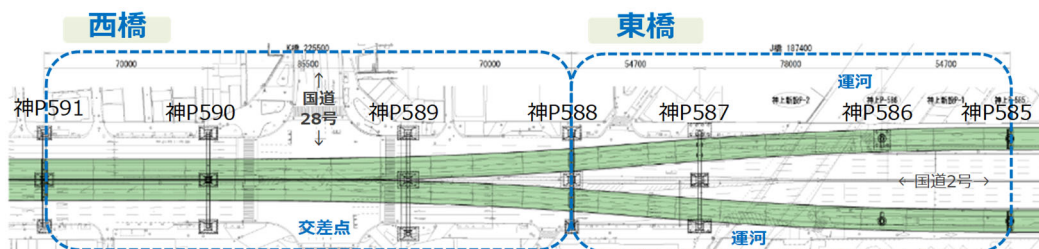


図-1 平面図（中間橋脚設置前）

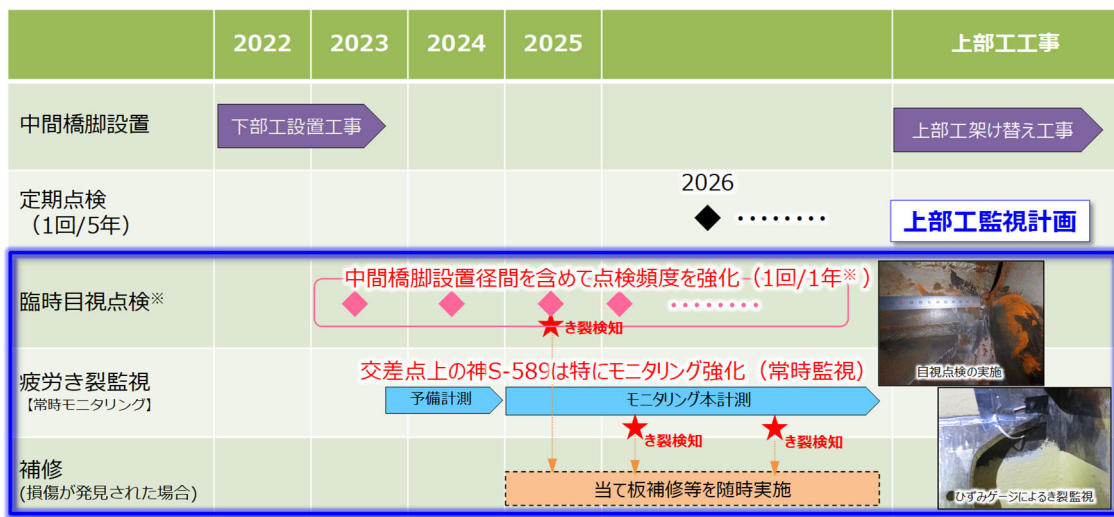


図-2 上部工監視の全体方針

は耐力が不足するため、架替に先行して既設橋脚間に中間橋脚を増設する方針とし^{2),3)}、2023年度に下部工工事が完了している。この増設した中間橋脚は活荷重反力を受け持つ構造となっていることから、桁断面力の改善による新たなき裂発生を抑止効果を期待できる。一方で上部構造の架替時期は、神戸地区のネットワーク整備状況を鑑みて判断する必要がある。相当程度の時間を要する可能性がある。また、西橋の国道2号と国道28号の交差点には中間橋脚を構築できないため、神上下P589～590の桁断面力は改善されていない。そのため、この径間は中間橋脚構築前と同等のき裂発生リスクを抱えており、き裂が大きく進展した場合には阪神高速の供用性のみならず、路下にも多大な影響を及ぼす可能性がある。

そこで、本稿では、本橋の架替までの期間の監視方針を示した上で、常時監視方法として低コストかつ長期間計測が可能なLPWA（Low Power Wide Area）を用いた疲労き裂検知モニタリング手法の適用について、検討した結果を述べる。

2. 上部工監視の全体方針と監視対象のき裂

(1) 上部工監視の全体方針

上部工監視計画の全体方針を、図-2に示す。湊川橋梁全体に対しては、通常の定期点検（1回/5年）に加えて点検頻度強化（1回/1年）した臨時目視点検を実施することとする。さらに、中間橋脚を設置していない神S589については、き裂監視を目的とした常時モニタリングを実施する。これらでき裂が確認された場合は、当て板補修等を随時実施する方針としている。このように、定期点検および臨時目視点検に加えて、常時モニタリングにより補修対応までのよどみないメンテナンスサイクルを構築する。

(2) 監視対象とするき裂

本検討では、CP溶接部から発生するき裂を監視

の対象とする。このき裂のこれまでの発生および対応の経緯を図-3に示す。なお、このき裂以外に、震災時のジャッキアップ補強として施された下フランジの増設リブ先端からのき裂、震災時の部材搬入用のデッキプレート開口部のき裂、および鋼床版の縦リブと横リブ交差部のき裂も発生していたが、これらについては全て対策が完了している。

a) CPと横リブ交差部のき裂

供用開始から16年が経過した1984年（昭和59年）に、図-3(a)に示すように、CPと横リブの交差点中央付近から、すみ肉溶接のビードを貫通させながら進展するき裂が120カ所で発見された。このき裂の発生要因は、①溶接部に発生する拘束応力、②組み立て時に生じるギャップによる溶込み不足、と分析されている。

このき裂に対しては、き裂の除去と拘束応力を開放するため、図-3(b)に示すように、当該箇所CPの一部（200mm）切除する半円状の切欠きが施された。その後、CPの切欠き部は、防錆のためにカバープレートが設置された。CPと横リブ交差点からき裂が確認された場合には、このような対応を随時実施しており、切欠きによる補修累計は下フランジ側で651カ所、デッキ側で35カ所に及んでいる。

b) CP切欠き部のき裂

2016年にカバープレートを除去した点検を実施したところ、図-3(c)に示すように、切欠き先端にき裂が発見された。このき裂の起点はCPの切欠きにより露出した溶接ルート部であり、進展方向は下フランジの主桁作用の最大主応力方向と直行する橋軸直角方向であった。き裂数は下フランジ側で145カ所、ウェブ側で36カ所の計181カ所であり、内28カ所で主桁を貫通している状況であった。

このき裂は、ウェブやフランジなど主部材へのき裂進展により深刻な健全性低下のリスクがあったため、図-3(d)に示すように、き裂先端にストップホールを施した上で当て板を実施された。なお、き裂が発生した切欠き部は、全ての箇所当て板補修が

完了している。

き裂発生していない切欠き部に対しては、図-3(e)に示すように、応力集中を緩和するために切欠き形状が改良されている。この改良では、止端部の平滑性を改善するために棒グラインダーにて切削した上で、切欠き先端の立ち上がり角度を 20° に改良している。なお、この対応は、下フランジ側 CP の全ての切欠き部で 2021 年に完了している。ただし、切欠き形状が管理されているのは下フランジ側のみであり、ウェブ側の切欠き形状にはバラつきが見られる。また、下フランジ側にストップホールと当て板を施した CP 切欠き部のウェブ側は、切欠いた当初のままの形状が残っている。

このように、健全性低下に影響が大きい CP 切欠き部のき裂は、今後発生するリスクが残されていることから、このき裂を常時モニタリングの対象とする。

3. 常時モニタリング手法の検討

(1) 疲労き裂検知モニタリング手法の概要

疲労き裂検知モニタリング手法として、溶接部近傍のひずみを LPWA 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が提案されている⁴⁾。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、低電力通信可能であり、長期間の稼働に適している。

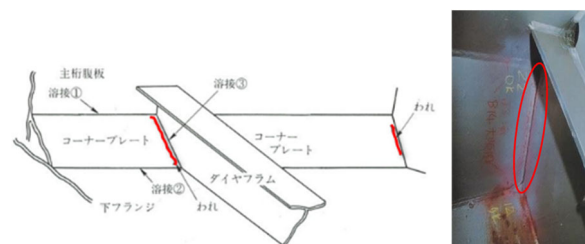
この LPWA を用いた無線ひずみ計測機器を図-4に示す。この機器は主に、①計測チャンネル数や計測する項目など計測プログラムを設定するボードコンピューター、②Sigfox や LTE-M で計測データを転送する LPWA 通信装置、③ひずみゲージからの抵抗変化を電圧信号に変換し増幅するひずみアンプシールドから構成される。一つの機器で最大 20 箇所のひずみを計測することが可能で、容易に持ち運び可能なサイズである。

(2) 疲労試験

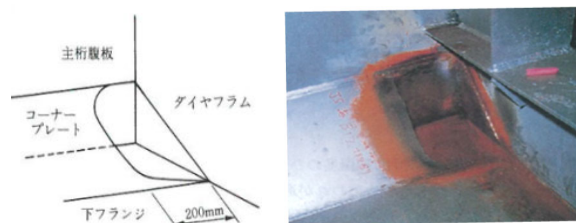
この計測機器を実橋の CP 切欠き部のき裂検知モニタリングに適用することを想定し、き裂が発生・進展した際のひずみ挙動の把握および計測したひずみ値の評価方法の設定を目的として疲労試験を実施した。

a) 試験概要

疲労試験には、図-5に示す板曲げ振動疲労試験機を用いた。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ブ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 $R = \sigma_{\min} /$



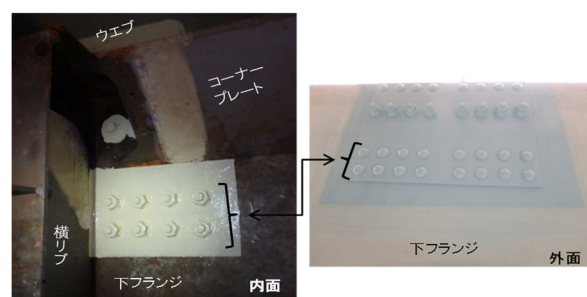
(a) CPと横リブ交差部のき裂



(b) CPと横リブ交差部のき裂への対応



(c) CP切欠き部のき裂



(d) CP切欠き部のき裂への対応(補修)



(e) CP切欠き部のき裂への対応(予防保全)
図-3 監視対象とするき裂のこれまでの経緯

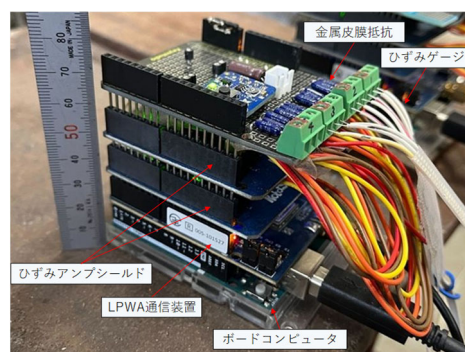


図-4 LPWAを用いた無線ひずみ計測機器

図-9 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

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-10 (c)に示す。なお、無荷重時のひずみは、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。

(4) 実橋におけるひずみ計測の方針

疲労試験の結果、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方針とする。なお、夜間においても、車両が存在する可能性があることから、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-10 (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、試験ケースによってばらつきが見られたことから、安全側の値として、 300μ を目安に監視することとする。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、 1000μ を目安に監視することとする。

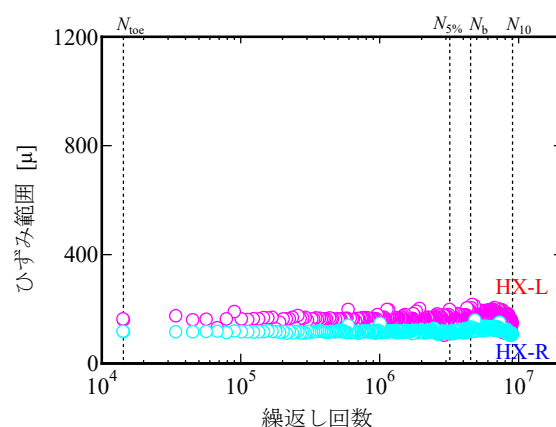
4. 実橋における予備計測

3. に示す計測機器を用い、箱桁内の通信環境の確認や時間帯(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月より予備計測を実施した。

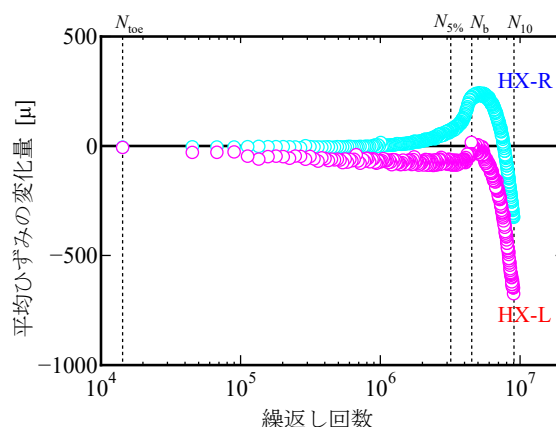
計測対象は常時監視の対象の交差点上支間である神下 S589 とし、計測箇所は径間中央部と交番部付近の CP 切欠き部とした(図-11)。フランジ側の CP 切欠き部に過去にき裂が発生し、ストップホールと当て板が施されている箇所は、き裂発生リスクが低いため、ウェブ側のみを計測とした。

CP 切欠き部のひずみ計測位置を図-12に示す。ウェブ側は、切欠き先端から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、切欠き先端の下側(CP 内側)とした。一方、下フランジ側は、き裂が発生した場合に切欠き先端から橋軸直角方向の両側に進展することから、ゲージの貼付しやすい CP の外側とした。なお、計測ゲージには 5 mm ゲージを用い、計測間隔は2時間ごととした。

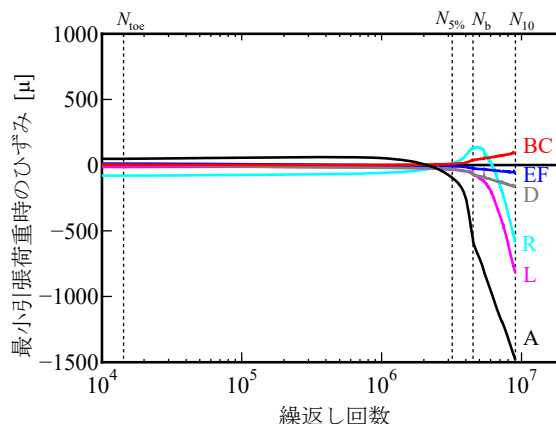
予備計測結果の一例として、2023年11月上旬～2024年12月下旬の約1年間の交番部のひずみを図



(a) ひずみ範囲



(b) 平均ひずみ



(c) 無載荷時(最小引張荷重時)のひずみ

図-10 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)

-13に示す。図-13 (a)に示す2時間毎の計測では、車両荷重の影響により一日ごとのひずみ変化が確認でき、その変化量は $\pm 150 \mu$ 程度であった。一方、図-13 (b)に示す AM4,5 時の計測結果を抽出した場合は、車両荷重の影響が小さいため、一日毎のひずみ変化は小さいことが確認できる。

計測位置 No.14, 15 のひずみの変化は、+側のひずみにシフトしているため、疲労試験のひずみ変化を考えると、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月に現地を確認したが、

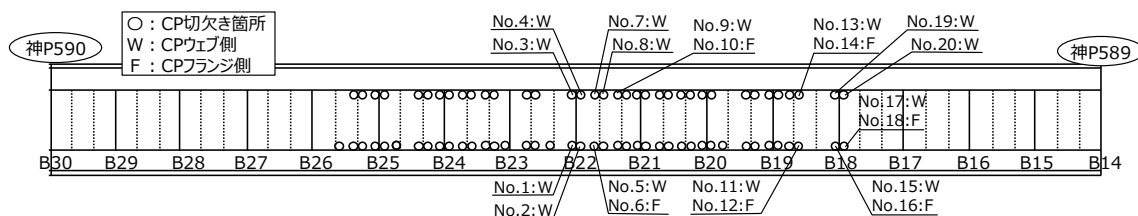


図-11 予備計測の対象としたCP（神下S589）

塗膜割れはなく，MTによっても疲労き裂は確認されなかった．これらのひずみは，1年間を通して中央値が圧縮から引張に変化していることから，温度変化の影響を受けている可能性がある．支間中央部を含めてその他の計測箇所では，有意な変化は見られておらず，疲労き裂は発生していない．

予備計測より，箱内から通信可能であること，通行車両や温度変化によるひずみ変化が設定した閾値より小さいことを確認した．この結果に加え，き裂発生リスクの分析により計測箇所を選定し，長期モニタリング計画を立案している⁶⁾．

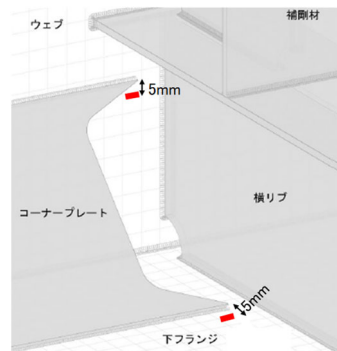


図-12 CP切欠き部のひずみ計測位置

5. まとめ

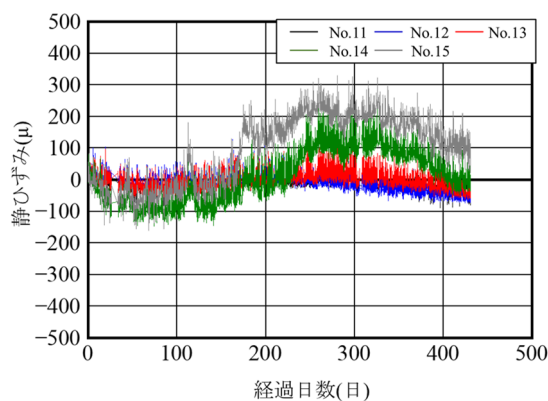
本稿では，本橋の架替までの期間の監視計画を示した上で，低コストかつ長期間計測が可能なLPWAを用いた疲労き裂検知モニタリング手法の適用性を検討した．得られた知見と計測の方針は以下の通りである．

- CP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可能であることを確認した．よって，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1日3回計測する方針とする．
- 捉えたいき裂長 (N_{I0}) 到達時のひずみ変化量にはばらつきがみられたが，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 を目安に監視する方針とする．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．
- 実橋での予備試験により，通信可能であること，通行車両や温度変化によるひずみ変化が設定した閾値より小さいことを確認した．

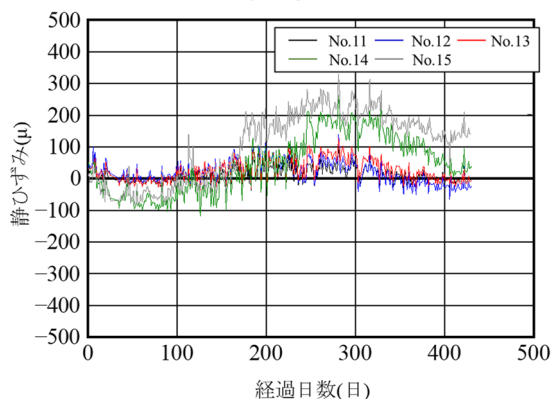
謝辞：疲労試験および予備計測にあたり，関西大学石川教授に協力頂いた．ここに記して謝意を表する．

参考文献

- 1) 中村雄基，長澤光弥，太田典裕：湊川付近における更新事業に伴う調査報告と更新内容の検討，阪神高速道路第49回技術研究発表会論文集，2017．
- 2) 藤林美早，高田佳彦，長谷川智昭：湊川橋梁大規模更新に係る西橋の構造検討，阪神高速道路第53回技術研究発表会論文集，2021．
- 3) 山口樹，藤林美早，高田佳彦：大規模更新湊川（東橋）に係る既設基礎の耐震性を考慮した中間橋脚の構造検討，阪神高速道路第53回技術研究発表会論文集，2021．



(a) 2時間毎の計測



(b) AM4, 5時の計測結果を抽出

図-13 予備計測の結果（ひずみ）

- 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.1，2024．
- 5) 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，2022．
- 6) 西海能史，赤松伸祐，上見範彦：大規模更新湊川橋梁に係る上部工更新までの監視強化計画，阪神高速道路第57回技術研究発表会論文集，2025．