

第I部門

木ノ川高架橋におけるひびわれに対する 最終報告について

藤谷 俊希¹・田中 富博²

¹近畿地方整備局 紀南河川国道事務所 道路管理課 (〒646-0003和歌山県田辺市中万呂142)

²近畿地方整備局 奈良国道事務所 工務課 (〒630-8115 奈良市大宮町3丁目5番11号)。

木ノ川高架橋は、国道42号那智勝浦新宮道路にあり、供用後まもなく、上部工のコンクリートひび割れ損傷が確認された。本報告では、補修・補強の概要およびその後の木ノ川高架橋の現状を述べ、今後の橋梁設計に向けての留意事項について述べる。

キーワード デザインビルド、コンクリートひび割れ、補修・補強、橋梁設計

1. はじめに

木ノ川高架橋は、設計・施工一括発注方式により行われ、「技術検討委員会」と「施工管理検討会」での審議と並行しながら進められた。上部工形式は国内初となる「ウェブに鋼管を用いたPC橋（鋼・コンクリート複合トラス橋）」であり^{1)~3)}、2003年6月に完成した。

2008年3月に供用が開始されたが、同年10月にコンクリートひび割れ等の変状が確認されたため、全橋に渡って詳細点検を実施し、その結果を基に補修を行った。その後、本橋の特殊性を鑑みて、損傷原因の究明と対策効果の検討が必要との判断から、「木ノ川高架橋モニタリング検討会」が設立された。計6回の検討会を行い、推定損傷原因⁴⁾、補修補強工事、モニタリングを行った。

その結果2022年3月に最終となる第7回検討会を開催し、今後の維持管理手法が策定された。本報では、検討会で決定された内容や検討会後の点検結果にも触れ、今後の橋梁設計に向けての留意事項を報告する。



図-1 位置図

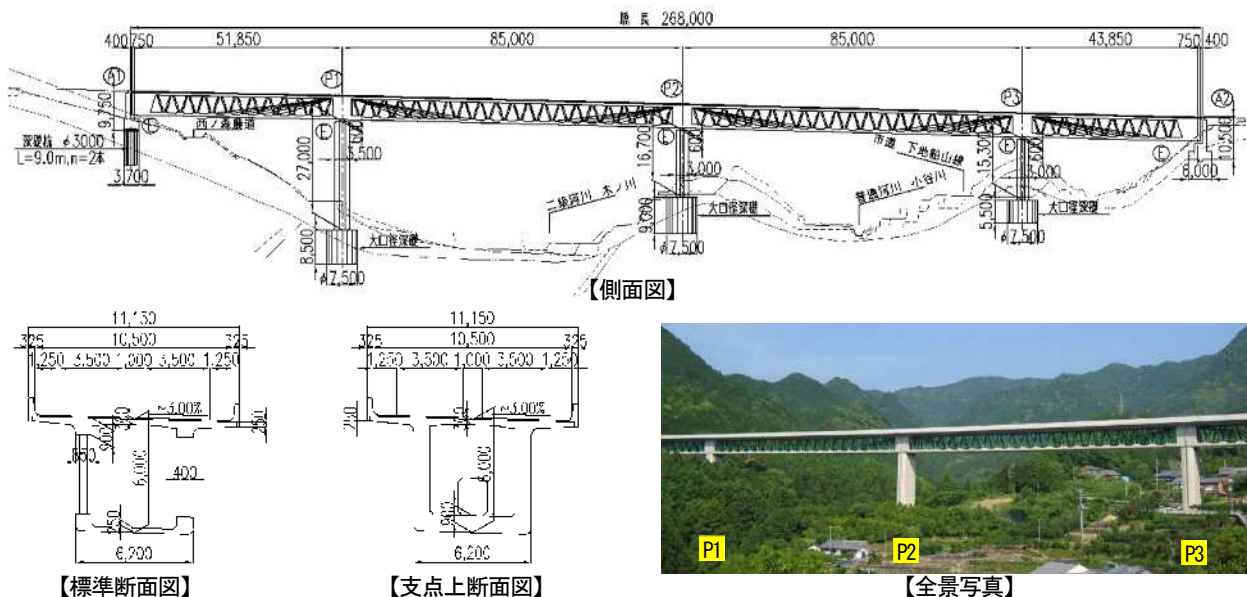


図-2 橋梁一般図および全景写真

2. 過去の状況

(1) 木ノ川高架橋の現在までの経緯

木ノ川高架橋の大まかな過去から現在までの経緯を、表-1の通り示す。

(2) ひび割れ損傷状況と桁内状況

本橋上部工における特徴的な損傷はコンクリートひび割れであり、代表的な発生箇所は外ケーブル定着部、格点部、支点上横桁部である。桁内の状況と各部の名称を写真-1に、代表的なひび割れ状況を図-3に示す。

(3) 本橋の構造と挙動の特徴

本橋の構造と挙動の主な特徴は以下のとおりである。

- ・ウェブを鋼管によるトラス構造とした断面で、横桁は支点上のみに配置され、一般的なPC箱桁橋に比べてねじり剛性が小さい。
- ・現地計測から、活荷重偏載及び温度差・温度変化の影響により、桁断面は僅かではあるが日々平行四辺形的な動き(桁断面のねじれ)をしている。

- ・ウェブが開放された構造のため、桁内外のコンクリート、斜材、外ケーブルとも外気温の影響に加え、日射や乾湿の繰り返しの影響を受ける構造である。

(4) 推定損傷原因

竣工直後には少なくとも顕著なひび割れはなく、供用後の作用によりひび割れは顕在化したと思われる。調査によれば、無応力状態から確認されているひび割れ状況を引き起こすような大きな作用が供用後に生じた可能性は低く、竣工直後に内在していた応力に、種々の荷重による応力(温度差・温度変化、活荷重等)が加わることによって、ひび割れの多くは発生したと考えられる。

これらの状況を踏まえ、死荷重応力の大きさや向きとひび割れ方向との関係を整理し、ひび割れの発生・進展を助長する原因を推定した。結果を以下に述べる。

- ・ひび割れの発生・進展が顕著な部位・部材では、死荷重時の引張応力が比較的高いレベルにあることが確認され、温度差・温度変化の影響により死荷重時の引張応力を助長させることが確認された。
- ・多くの部位では活荷重がひび割れ挙動に与える影響は、温度差・温度変化が与える影響より小さいが、横桁張

表-1 最終報告までの流れ	
2008年 3月	供用開始
2008年 10月	国総研・土研による変状確認
2010年 10月	施工業者による自主的補修 (ひび割れ注入、表面含浸工など)
2018年 8月～ 2019年 3月	補修補強工事(P2～A2) (炭素繊維シート補強工やコンクリート増し厚 強工など)
2018年 11月	モニタリングの開始 (モニタリング項目は表-3参照)
2019年 8月～ 2020年 3月	補修補強工事(A1～P2)
2021年 8月	モニタリングの終了
2022年 3月	第7回木ノ川高架橋モニタリング検討会 ・定期点検に向けた申し送り事項を作成 ・初期状態調査と中間点検を提言
2023年 2月	初期状態調査 (中間点検と損傷の状況を比較のため実施)
2023年 12月	中間点検
2024年 3月	座長への最終報告

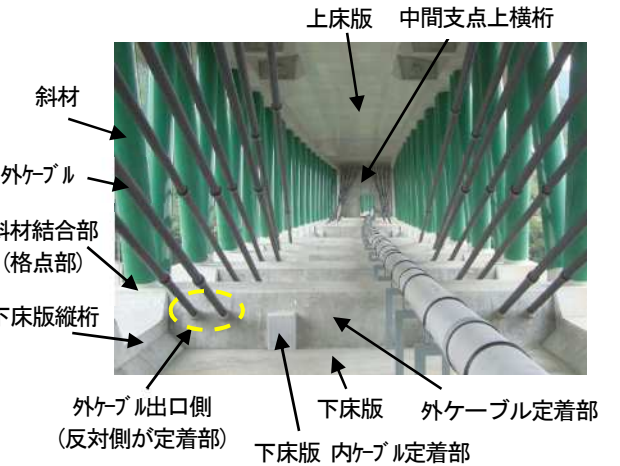
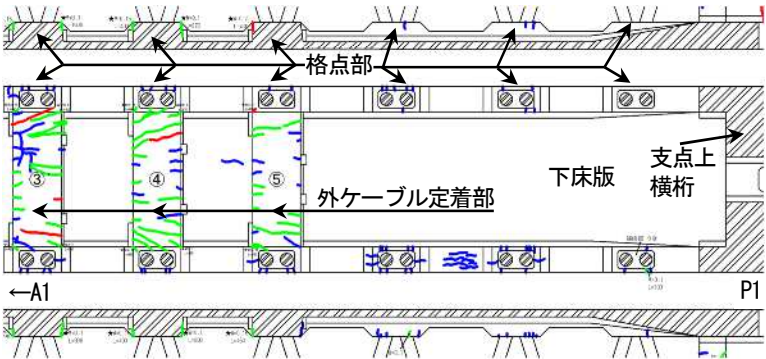
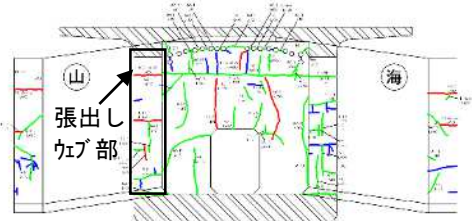


写真-1 桁内状況および部位名称(写真はP1付近から終点側を望む)



【下床版上面のひび割れ状況(A1～P1の一部を抜粋)】



- 【凡例】コンクリートひび割れ
- 0.1mm未満
 - 0.1～0.2mm未満
 - 0.2mm以上

図-3 上部工における代表的なコンクリートひび割れ状況 (第1径間を代表として示す)

出しウェブでは、活荷重の影響は温度差・温度変化によるものと同程度のレベルであることが確認された。

- ・ ひび割れの発生・進展に影響する可能性のある温度差・温度変化として、コンクリート表部と内部の温度下降差(もしくは収縮差)、上下床版間の温度差、外ケーブルの温度変化などが考えられた。

3. 検討会の提言

(1) 中間報告(2018年3月)

a) 現状の評価

現状(2018年3月)の評価のまとめは以下のとおりである。

- ①少なくとも橋の耐荷性能が大きく低下している可能性は小さい。
- ②一方、現状のまま放置すれば、ひび割れの増加や鉄筋とコンクリートとの一体性の低下などに至る可能性が高い。

b) 維持管理方法と補修補強対策

前述を踏まえ、本橋を通常の橋梁定期点検により維持管理を行える橋へ移行するために、①～⑤に述べる対策が必要である。

- ①耐久性能確保のため、現時点で生じているひび割れに対する補修は必須である。
- ②耐荷性能の確保のためには、橋全体の構造強化と、部位・部材毎の断面強化が考えられる。ただし、構造強化を伴う抜本的な対策は非常に大規模になることが想定されるため、部材毎の断面強化による対策を優先的に実施する。具体的には、ひび割れが多く発生している外ケーブル定着部と中間支点上横桁張出しウェブ部

は死荷重の増加が少ない炭素繊維シート補強を行う。

- ③ひび割れが生じると致命的な構造欠陥となる可能性のある格点部への炭素繊維シート補強と、ひび割れが多数生じており構造欠陥に繋がる懸念が考えられる中間支点上横桁本体へのコンクリート増厚補強を、予防保全の観点から行う。

- ④現時点(2018年3月)では、各部の応答を抑えて変状が進展しないことを目標とした対策を取るものの、採用する対策は橋全体の挙動を抑制するような抜本的な対策ではないため、ひび割れの進行・橋全体挙動の変化等についてモニタリングし、その効果を検証する。

- ⑤上記①～③の対策を行った上でモニタリングを行い、橋全体の構造強化対策はモニタリングの結果により実施の有無を判断するという段階的な対策とする。

(2) 提言を踏まえた補修・補強対策とモニタリング

a) 補修・補強対策

提言を踏まえ、2018年度・2019年度にかけて補修・補強工事を行った。工事内容は、ひび割れ注入工、表面含浸工、炭素繊維シート補強工、コンクリート増厚補強工である。

外ケーブル定着部では、炭素繊維シート補強工で部材全体を覆うとひび割れ状況を確認できなくなるため、死荷重時の引張応力が小さい箇所の一部では補強を施さずにコンクリート表面を露出させてひび割れ状況を確認できるようにした。また、中間支点上横桁部では、張出しウェブ部に断面強化対策としての炭素繊維シート補強工を行い、ねじり剛性が小さいという本橋の特徴から、ねじり剛性向上のためコンクリート増厚補強を行った。

また、橋の剛性を高めることで複雑な応答への抑制が期待されるものの引張応力の発生を完全に排除することができないため、桁内部に変形を拘束する構造を設けなかった。

b) モニタリング

補修・補強工事前(2018年11月)から工事完了後の翌年(2021年8月)まで、12回のモニタリングを行った。モニタ

表-2 推定損傷原因

格点部および外ケーブル定着部	外ケーブル力により生じる引張応力、温度差・温度変化、活荷重(外ケーブル張力の作用)、乾燥収縮、など
支点上横桁	橋軸方向のトラス作用による引張応力、水和熱、温度差・温度変化、活荷重(トラス作用による引張応力)、など

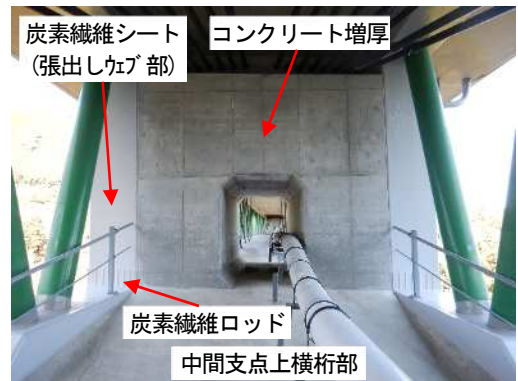
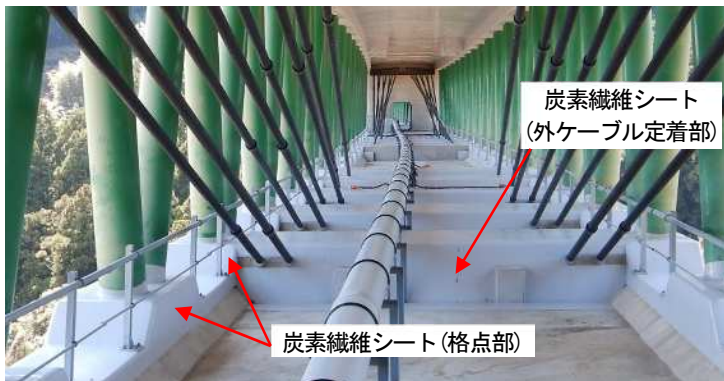


写真-2 補修補強工事の体表的な状況

リングの内容は表-3のとおりであり、定期的に機器を搬入して調査計測する定期計測(表-3に示すモニタリング項目のうち①③⑥)と、計測機器を現地に常設する常時計測を行った。いずれも四季毎(3ヶ月毎)に計測を行った。モニタリング結果に対する評価の基本方針は以下のとおりとした。

- ①ひび割れ調査はひび割れ状況図を作成してひび割れの進展の有無をモニタリングして行く。それ以外の項目に関しては計測結果の個々の数値を追うことは避けてそれらの経時的な推移傾向を整理して変化の兆候を評価の指標とする。
- ②補強による狙いどおりの傾向(例えば、短周期化や変形の抑制)が得られているか、あるいは、損傷が進行していない傾向など、大きな傾向や変化の兆候を評価する。

(3) 第7回モニタリング検討会(2022年3月)

a) 検討会審議結果

過去のモニタリング及び調査を整理し、2022年3月に第7回検討会を開催した。

その結果、外ケーブル定着部のコンクリート表面の一部にひび割れの進展や新たなひび割れパターン(図-4：C9、C10)が認められたが、ひび割れ調査以外の7項目の計測結果から橋全体の耐荷性能低下の進行を示す兆候は認められず、部材断面補強後は「橋全体の耐荷性能低下の進行を抑止する」という初期の目標が達成していると考えられることから、今後は道路橋定期点検要領に基づき管理していくことを基本とする決定がなされた。ただし、本橋の特殊性を鑑み、3点の留意事項が挙げられた。

表-3 モニタリング項目と調査方法

①ひび割れ調査	外ケーブル定着部のうち炭素繊維シートを貼付していない箇所、ひび割れの進展状況を近接目視調査
②ひび割れ挙動計測	外ケーブル定着部のうち炭素繊維シートを貼付していない個所で、ひび割れにπゲージを設置してひび割れ開閉量を計測
③内部ひび割れ状況確認	外ケーブル定着部で、定着部を橋軸方向に挟み込む方向に超音波を透過させて、その伝搬速度を計測
④炭素繊維シートひずみ計測	外ケーブル定着部上面の炭素繊維シート上面にひずみゲージを貼付して炭素繊維シートのひずみを計測
⑤炭素繊維ロッドひずみ計測	中間支点上横桁張出しウェブ下端の炭素繊維ロッドにひずみゲージを貼付してひずみを計測
⑥キャンバー計測	桁内(下床版上面)で橋全体のキャンバーを計測
⑦橋全体の振動計測	下床版上面に加速度計を設置して、橋全体の振動加速度を計測
⑧外ケーブル振動計測	外ケーブルに加速度計を設置して、外ケーブルの振動加速度を計測

- ⑤5年後の定期点検を待たず、2年後の冬季に「中間点検」を行う。中間点検では上部構造を対象としたひび割れ調査を行う。
- ②これまでのひび割れ調査では対象外としてきた部位・部材においても、留意すべき箇所では、中間点検に先立ち、初期状態調査を行う。
- ③初期状態調査、中間点検、定期点検に向けての、本橋特有の留意事項を取り纏めた申し送りを作成すること。なお、検討会提言を踏まえた本橋特有の留意事項に関しては、後述する「4. 提言を踏まえた調査」にて詳述する。

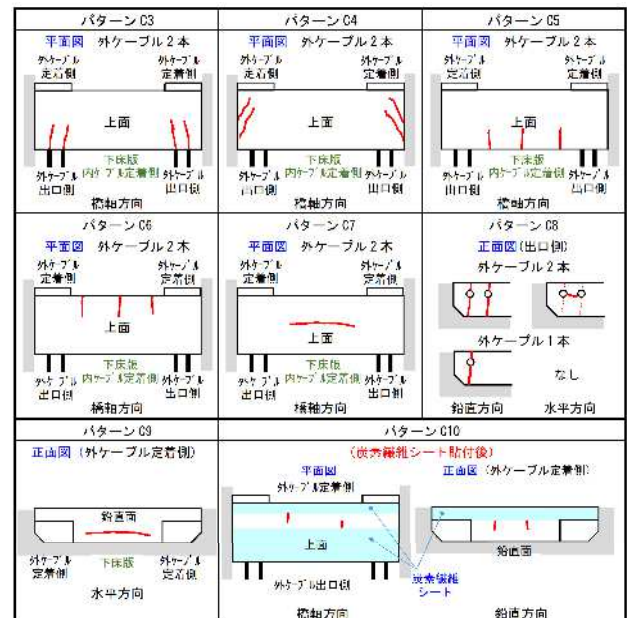
4. 提言を踏まえた調査

(1) 初期状態調査(2023年2月)

a) 初期状態調査における本橋特有の留意事項

初期状態調査における本橋特有の留意事項の概要は以下のとおりである。

- ①初期の記録が必要な箇所のひび割れ調査を行う。ひび割れ調査では、ひび割れが現れたか否かが重要であるため、ひび割れの幅に関係なく行う。
- ②補修・補強工事(2018～2019年度)における補修痕の記録(中間支点上横桁コンクリート増厚部下端部)



- ①死荷重時に引張応力が高いレベルにあると想定されたひび割れ(パターン C3, C4, C5, C8) → 炭素繊維シート補強済
- ②死荷重時の引張応力は①より小さいが温度変化・温度差の影響によりそれが助長されたと推定されたひび割れ(C6, C7) → 一部で炭素繊維シート補強済
- ③第6回検討会以降の新たなひび割れ(C9：側面水平方向ひび割れ, C10：シート端からのひび割れ)

図-4 外ケーブル定着部のひび割れパターン

写真-3に初期状態調査における留意箇所の例を示す。

b) 調査結果

初期状態調査結果の概要は次のとおりである。

- ①補修補強工事以降で、初期状態の記録が必要な箇所のひび割れ調査を行い、ひび割れ状況図を作成した(ケーブル定着部保護コンクリート部、中間支点上横桁コンクリート増厚部、下床版上面)。
- ②外ケーブル定着部側面の水平方向ひび割れがケーブル保護コンクリートや下床版縦桁に進展していないこと、保護コンクリート下端部の水平方向にひび割れが生じていないことを確認した。下床版格点部付近の断面急変部における炭素繊維シート下側では2箇所で0.1mm未満のひび割れが認められた。
- ③外ケーブル定着部における2022年2月からのひび割れの経時変化として、幅0.1mm以下の新たなひび割れの発生や既存ひび割れの延長・幅の進展を11箇所の定着部で確認した。いずれもこれまでと同様なひび割れパターンであり新たなひび割れパターンは認められない。

(2) 中間点検(2023年12月)

a) 中間点検における本橋特有の留意事項

中間点検における本橋特有の留意事項の概要は次のとおりである。

- ①桁内下面側、中間支点上横桁コンクリート増厚部を対象としたひび割れ調査を基本とする。実施時期は、これまでのひび割れ状況の経年変化を整理するため冬季

が望ましい。

- ②外ケーブル定着部コンクリート露出部では、これまでのモニタリングと同様な手法でひび割れ調査を行い、ひび割れ状況図を経時的に整理する。
- ③初期状態調査におけるひび割れ調査箇所についても、同様な手法でひび割れ調査を行い経時変化を整理する。

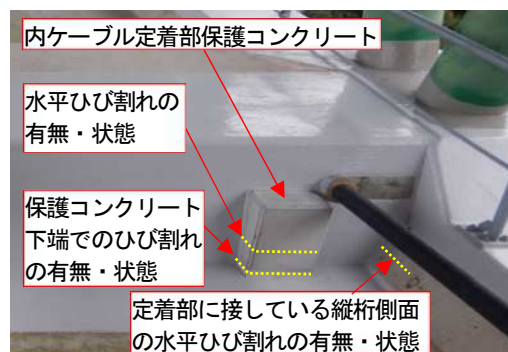
b) 調査結果

中間点検結果の概要は以下のとおりである。

- ①初期状態調査で新たに記録したひび割れ調査箇所の経時変化として、外ケーブル定着部保護コンクリート部では2箇所の保護コンクリート部で幅0.1mm未満の新たなひび割れが確認された。中間支点上横桁コンクリート増厚部では最大0.15mmの新たなひび割れが認められたが既存ひび割れの進展は認められなかった。下床版格点部付近の断面急変部におけるひび割れは進展していないことを確認した。
- ②初期状態調査時にひび割れが確認されなかった、外ケーブル定着部側面の水平方向ひび割れがケーブル保護コンクリートや下床版縦桁への進展がないこと、保護コンクリート下端部の水平方向ひび割れが生じていないことを確認した。
- ③外ケーブル定着部における初期状態調査からのひび割れの経時変化として、幅0.1mm未満の新たなひび割れの発生や既存ひび割れの延長を4箇所の定着部で確認した。いずれもこれまでと同様なひび割れパターンであり新たなひび割れパターンは認められない。



a) 外ケーブル定着部(外ケーブル定着側)



b) 外ケーブル定着部(外ケーブル出口側)



c) 格点部(下床版側)



d) 中間支点上横桁

写真-3 初期状態調査において留意すべきひび割れ調査箇所の例

5. 今後の維持管理について

調査結果を検討会座長に報告した上で、今後も本橋特有の留意事項を踏まえつつ「道路橋定期点検要領」に基づく定期点検により管理することとした。なお、定期点検に対して、以下のとおり申し送り事項を作成した。

- ①橋梁定期点検の実施時期は5年後(2028年度)とするが、これまでのひび割れ状況の経年変化を整理する必要があるため、点検の実施は冬季(1月～2月)が望ましい。
- ②本橋の特殊性を鑑み、通常の定期点検要領の調査内容の他、中間点検に関する調査内容に加えて、下記事項に留意し実施する。
 - ・外ケーブル定着部直下付近の下床版下側に橋軸直角方向にひび割れが生じていないことを確認する。
 - ・下床版下面に斜めのひび割れが生じていないことを確認する。
 - ・桁の最外縁にあり橋の挙動による変状が現れやすい部位として、壁高欄上部の垂直方向ひび割れが進展していないことを確認する。
 - ・橋脚は施工中に水和熱によるひび割れが生じた履歴があることを念頭に、ひび割れが進展していないことを確認する。
 - ・炭素繊維シートにうきが生じていないことを確認する。
 - ・伸縮装置の遊間に異常が生じていないことを確認する。

6. 本案件を踏まえた橋梁設計に向けての留意事項

本橋梁はデザインビルド方式で発注され、上部工形式は国内初となる鋼・コンクリート複合トラス橋が採用された。複合トラス橋は、PC箱桁においてウェブのコンクリートを鋼トラスに置き換えることで、活荷重に対する高い剛性を保持したまま、自重を軽量化し、橋軸方向プレストレスを上下床版に有効に導入できる他、コンクリートの打設等が削減されることで施工の省力化、主桁自重の軽量化によるスパンの長大化、基礎や下部工を含めた橋梁全体のコスト縮減が図れる特徴を有しているとされた。

国内初となる特殊な形式であるため、技術検討委員会や施工管理検討会における審議と並行しながら設計・施工が進められた。設計・施工に際しては、本橋を模したモデルを用いた格点部の実物大静的載荷試験も実施している。それでもなお、本橋には多数のひび割れが発生するなどの問題が発生した。

事象の発生から長期に渡り原因究明、各種検討・調査、補修補強対策、モニタリングなどを行ってきた過程で、

多くの知見を得ることができた。

上記を踏まえつつ、新規構造の橋梁では設計段階で留意すべき内容を以下にまとめる。

- ①材質の異なるものを一つの構造とするとき、その材質の耐久性(引張強度や圧縮強度など)や環境への変化(温度による体積変化など)を踏まえて、互いにどのような影響を及ぼし合うのかを十分に考慮されたい。
- ②少数部材化されていたり、極端に剛性が異なるもの同士が組み合わされたりしている橋梁は、橋の挙動を捉えることが難しいことがある。そのため、接合部の安全性を評価できるような荷重の組み合わせや、架設応力を十分に考慮した設計を行う必要がある。
- ③設計段階では死荷重や活荷重に加えて、環境の影響を十分に考慮されたい。乾湿や風、温度変化は短期では大きな影響を表さない場合も多いが、長期ではその影響を無視できない場合がある。
- ④新規構造の橋梁は本橋のように技術検討委員会や施工管理検討会における審議を経ても問題は発生する可能性がある。よって、設計時に致命的となるような損傷や想定される損傷を予測し、維持管理の場へ引き継いでいくことも考えられたい。
- ⑤新規構造では設計時点では想定しきれない損傷や施工箇所独自の環境条件が損傷の原因となることが考えられる。そのため、発生した損傷の早期の原因究明や安全性の調査を円滑に進められるようにしておくことが望ましい。例として振動計測やひずみ計測などの計測を行える機器の設置を検討されたい。

本橋で得た知見が今後の橋梁設計や新しい橋梁形式の活用に向けての一助となれば幸いである。

謝辞：本検討に際し、「木ノ川高架橋モニタリング検討会」(座長：鎌田大阪大学大学院教授)の委員の方々に多大なるご協力とご助言を賜りました。深く感謝致します。

参考文献

- 1) 木村, 山村, 本田, 山口, 南：那智勝浦道路木ノ川高架橋の設計, 橋梁と基礎, 2002.10
- 2) 前田, 南：木ノ川高架橋における鋼・コンクリート複合トラス構造の採用について, 平成14年度近畿地方整備局管内技術論文, 技術 I 7, 2002
- 3) 小野：木ノ川高架橋(鋼・コンクリート複合トラス)の施工について, 平成15年度近畿地方整備局管内技術論文, 施・安10, 2003
- 4) 三宅, 森：木ノ川高架橋におけるひびわれに対する調査・解析を踏まえた補修・補強について, 平成29年度近畿地方整備局管内技術論文, 防災・保全部門：No.06, 2017