

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

三宅 純¹・森 光正²

^{1,2}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)

木ノ川高架橋は、国道 42 号那智勝浦新宮道路にあり、上部工形式は国内初となるウェブに鋼管を用いた「鋼・コンクリート複合トラス橋」である。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、ひび割れ注入等の補修が実施された。その後、本橋の特殊性に鑑み、長期的な耐荷力への影響の観点から、現地調査・計測、FEM 解析、既往図書等による損傷原因究明や、それを踏まえた補修・補強対策検討、モニタリング計画検討が行われ、現在も検討中である。本報告では、検討中のものも含み、これまでの検討内容の概要について紹介する。

キーワード コンクリートひび割れ、現地調査計測、3 次元 FEM 解析、原因究明、補修・補強

1. はじめに

本報告は、和歌山県新宮市に位置する木ノ川高架橋のひび割れ損傷に関して、調査・計測、検討、解析等を踏まえた損傷原因究明および、それを受けた補修・補強検討、モニタリング計画検討に関して述べるものである。

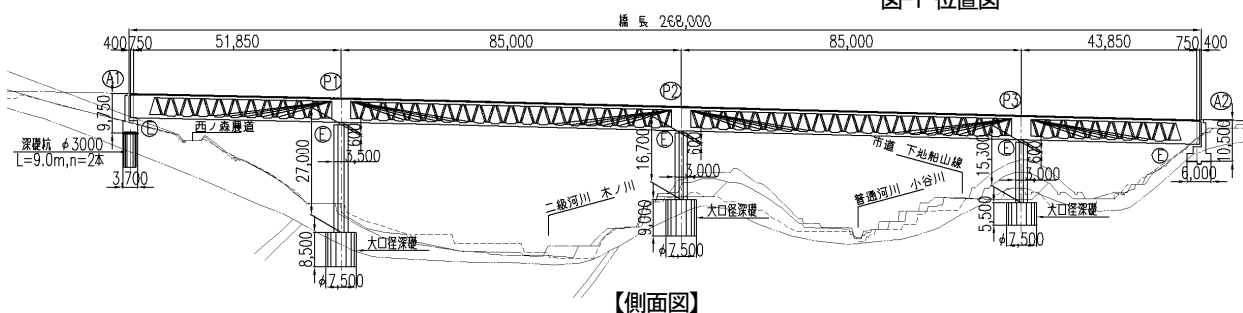
なお、本報で述べる内容は現時点でのものであり、今後の検討会での審議を踏まえて修正する予定である。

木ノ川高架橋は、平成 20 年 3 月に開通した紀伊半島の沿岸部を通過する那智勝浦新宮道路にあり、二級河川木ノ川および市道等を跨ぐ 4 径間連続の鋼・コンクリート複合トラス橋（橋長 268m）である¹⁾。

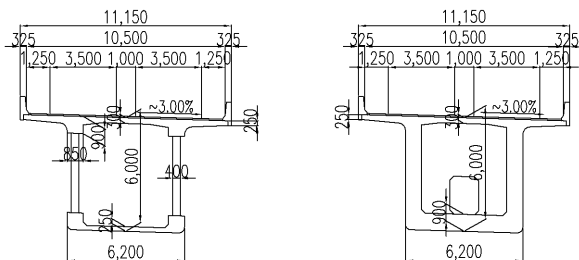
位置図を図-1に、橋梁一般図および全景写真を図-2に、橋梁諸元を表-1に示す。



図-1 位置図



【側面図】



【標準断面図】

【支点上断面図】



木ノ川高架橋全景

図-2 木ノ川高架橋 一般図および全景写真

本橋の工事は設計・施工一括発注方式により行われ、「技術検討会」および「施工管理検討会」における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「ウェブに鋼管トラスを用いたPC橋（鋼・コンクリート複合トラス橋）」であり、平成15年6月に完成した。

表-1 橋梁諸元

構造形式	4径間連続鋼・コンクリート複合トラス橋
橋長(支間長)	268m(51.85+2@85.0+43.85m)
幅員	11.15m(全幅員), 10.5m(有効幅員)
平面線形	R=1200m(緩和と曲線区間あり)
勾配	縦断 1.7~2.6%, 横断 2.8~3.0%
下部工	橋台: 逆T式橋台, 橋脚: 柱式RC橋脚
基礎工	深礎杭(φ3.0), 直接基礎, 大口径深礎杭(φ7.5)

平成20年3月に供用が開始されたが、同年10月に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が行われ、その結果をもとに平成22年10~11月にひび割れ注入工や表面含浸工等の損傷部の補修が行われた。

その後、本橋の特殊性に鑑み、長期的な耐荷力への影響について、損傷原因との関係を踏まえてさらなる検討が必要となることから、平成25年12月に「木ノ川高架橋モニタリング検討会」が設立された。平成29年6月初旬時点までに5回の検討会が実施され、近々第6回検討会が予定されている。

本報では、本橋の特徴的な損傷である上部構造のコンクリートひび割れに着目した内容を報告する。

2. ひび割れ損傷概要

(1) 木ノ川高架橋の特徴と各部名称

木ノ川高架橋は、ウェブに鋼管を使用した1箱形式のPC橋で、鋼管(φ406.4)は上床版側、下床版側ともに縦桁コンクリートに埋め込まれ、その結合部（以下、格点部と言う）には、コンクリート内部に鋼製ボックスが配置さ

れている²⁾。桁内の状況と本報で使用する各部の名称を写真-1に示す。桁には、支点上横桁から張出した5段の外ケーブルが配置され、下床版側に設けられた外ケーブル定着部(高さ650mm、橋軸方向幅1.6m)で支持されている。横桁は支点上のみに配置され、橋軸方向に880mmの張出しウェブ(図-3参照)が設けられている。架設は、中間橋脚部からワーゲンをを用いた張出し工法によりされた³⁾。

(2) ひび割れ損傷概要

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。3章で原因究明のための調査・計測内容およびその結果概要を示すが、外ケーブル定着部、下床版側格点部、支点上横桁部の代表的なひび割れ損傷状況を、第1径間を代表として図-3に示す。

外ケーブル定着部では、図-3に示す定着部上面のみでなく鉛直面にもひび割れが生じており、その最大幅は0.3mmである。格点部では外ケーブル定着部との交差部で最大0.25mmが確認されたが、ほとんどは0.1mm未満のひび割れである。支点上横桁では張出しウェブ部の水平ひび割れが最大0.4mmである他、横桁一般部では最大0.3mmのひび割れが確認された。

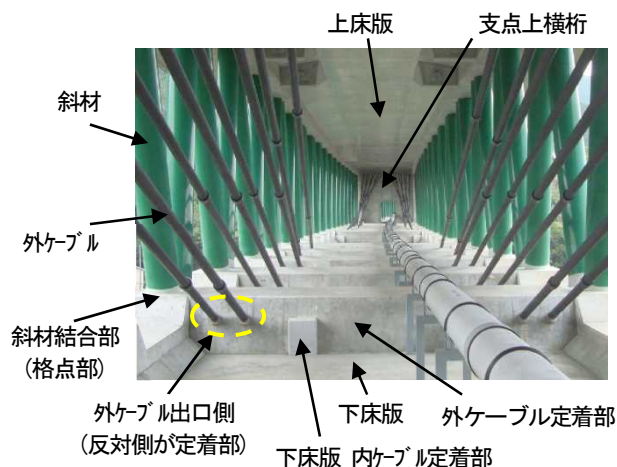
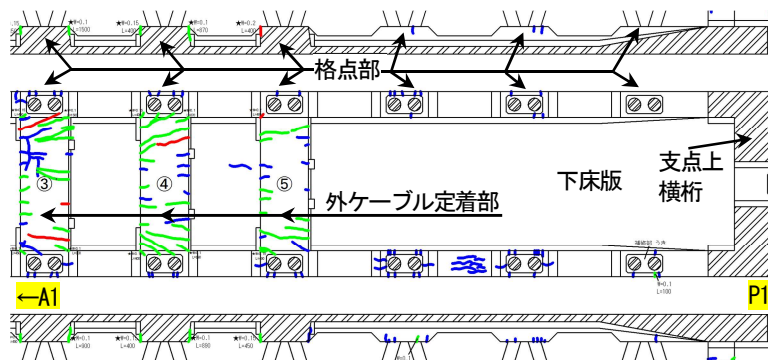
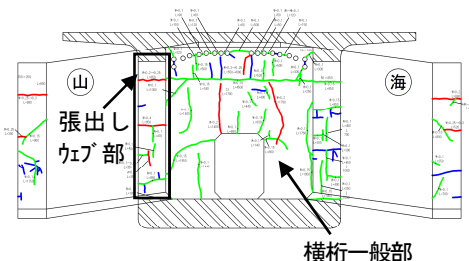


写真-1 桁内状況および部位名称



【下床版上面のひび割れ状況(A1~P1の一部を抜粋)】



【支点上横桁のひび割れ状況(P1橋脚起点側面)】

【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)

3. 原因究明に向けた調査・計測・検討

(1) 現地調査・計測

a) 外観変状調査・ひび割れ深さ計測

原因究明に向けて実施した主な現地調査・計測項目を表-2に示し、その目的、内容、結果概要を以下に記す。

外観変状調査では、主に桁内面を対象に、0.05mm以上のひび割れについて複数年に渡り継続した近接目視を行った。調査結果は、ひび割れ発生箇所やパターン毎に整理し、ひび割れ密度やひび割れ深さ計測結果とともに、その進展に着目して整理した。この結果、ひび割れ発生部位やパターンの変化は小さいが、ひび割れの進展（長さ・幅）が継続していることを確認した。その結果は(2)節で詳述する。

b) 橋全体の挙動確認

橋全体としての変状確認のため、桁のキャンバー計測や外ケーブル張力計測を行い、完成直後や設計値との対比から橋全体として有意な変状がないことを確認した。また、この結果を、今後のモニタリングに向けた指標として整理した。

c) 活荷重及び温度差・温度変化の影響

本橋は、ウェブに鋼管を用いた開放的な断面で、中間横桁がなく、一般的なPC箱桁橋よりも桁のねじれ剛性が小さい特徴を有する。加えて、直射日光等により温度変化・温度差の影響も比較的受け易い。このため、試験車（60t吊りラフタークレーン：約40t）を用いた静的載荷試験や、温度変化・温度差による各部の挙動を計測した。

結果概要は以下のとおりである。ア)温度差・温度変化の影響に伴い、ひび割れは挙動している、イ)車両偏載に伴うひび割れ挙動は、温度差・温度変化に比べ小さい、ウ)車両偏載や温度差・温度変化により、桁断面は平行四辺形的な挙動を示すが、ひび割れ挙動と桁断面のねじれ変形とは強く連動していない可能性がある、エ)ひび割れの最大開閉変位量とそれに対応するコンクリート表面の温度変化は、概ね一定の相関を示している。

d) 部材温度

ウェブが開放された構造であるため、桁内（下側）の部材はコンクリート、斜材、外ケーブルともに外気温の影響に加えて、日射の影響を強く受けていることを確認した。

e) 桁内乾燥状態調査

雨後に桁内（下面）の濡れ方や乾き方を調査した結果、桁内の環境と桁外の環境に差がないことを確認した。また、複数年でのコンクリート表面ひずみを計測した結果、収縮の進行が継続していることを確認した。

(2) ひび割れパターン及びひび割れ発生箇所の整理

ひび割れ発生箇所、ひび割れパターン、時系列的な整理のうち、各部位毎のひび割れパターンを図-4～図-6に示す。なお、これらの整理は、損傷原因究明のための検討を踏まえて整理した結果である。

全体的な傾向として、ひび割れは進展しているが新たなひび割れパターンは認められないこと、格点部や外ケーブル定着部ではひび割れ延長の増加や新たなひび割れの発生によりひび割れは依然増加傾向にあるが支点上横桁ではその傾向は鈍化傾向であること、最大ひび割れ幅やひび割れ深さは極端な変化・進行は認められないこと、が確認された。

a) 格点部

下床版側の格点部に生じたひび割れのパターンを図-4に示す。ひび割れの特徴は以下のとおりである。ア)ひび割れの発生箇所は増加しているが、ひび割れパターンの進展は認められない、イ)外ケーブル定着部との交差部では、斜め及び鉛直方向のひび割れ（パターンC1,C2）が認められる、ウ)橋軸・直角方向のひび割れ（パターンT1～T3）は、ほとんどが0.1mm未満である。

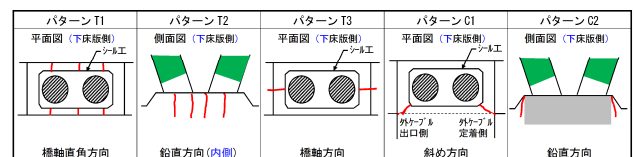


図-4 ひび割れパターン（格点部：下床版側）

表-2 原因究明に向けて実施した、主な現地調査・計測

調査・計測項目	調査・計測内容
①外観変状調査	主に桁内面を対象に、近接目視調査の実施(0.05mm以上のひび割れを対象)
②ひび割れ深さ計測	代表的なひび割れを対象に、超音波測定器によるひび割れ深さの計測
③キャンバー計測	橋全体として有意な変形が生じていないことの確認のため、キャンバーを計測し、完成直後の結果と比較
④ひび割れ挙動計測	車両の偏載や温度変化・温度差の影響によるひび割れ挙動を、代表的なひび割れでπゲージ等により計測
⑤斜材ひずみ計測	格点部周りのひび割れと斜材ひずみとの因果関係確認のため、ひずみを計測(車両偏載、温度変化・温度差)
⑥外ケーブル張力計測	設計値との対比や今後のモニタリング指標を目的に、加速度計により振動数・加速度を計測し張力を算定
⑦桁断面挙動計測	鋼管ウェブで支間部に中間横桁が設置されていないことから、一般的なPC箱桁橋よりもねじれ剛性が小さいという特徴に鑑み、トータルステーションを用いて桁断面挙動を計測(活荷重、温度差・温度変化)
⑧桁内乾燥状態調査	開放的な構造である特徴に鑑み、実施済みの補修材塗布の有無によるコンクリート表面の収縮量を計測
⑨部材温度計測	温度変化が与える影響把握の基礎資料として、斜材鋼管や桁内コンクリート等の部材表面温度を計測

b)外ケーブル定着部

外ケーブル定着部に生じたひび割れのパターンを図-5に示す。ひび割れの特徴は以下のとおりである。ア)ひび割れの発生箇所は増加しているが、パターンの進展は認められない、イ)上面のひび割れ(パターン C3,C4)は「ハの字」の傾向が認められる、ウ)定着部側面(鉛直面)のひび割れ(パターン C8)は全ての定着部で外ケーブル出口側に認められる。エ)中央付近では橋軸直角方向のひび割れ(パターン C7)が一部に認められる。このほか、定着部の角部に橋軸方向ひび割れ(パターン C5,C6)が認められる。

c)支点上横桁(橋脚上に着目)

支点上横桁(橋脚上)に生じたひび割れのパターンを図-6に示す。ひび割れの特徴は以下のとおりである。ア)ひび割れの発生箇所の増加は少なく、パターンの進展は認められない、イ)張出しウェブ端面に水平方向ひび割れ(パターン D1,D2)が顕著に認められる、ウ)横桁本体及び張出しウェブ端面に鉛直方向のひび割れ(パターン T4,T5)が認められる、エ)開口部左右及びその上方に斜めひび割れ

(パターン T6,T7)が認められる、エ)打継ぎ目付近で水平・鉛直方向のひび割れ(パターン J1,J2)が認められる。

(3) 工事関係資料、設計図書等に基づく損傷原因究明検討

工事関係資料、設計報告書、施工業者ヒアリング等をもとに、損傷原因を「材料起因」、「施工起因」、「環境起因」、「構造起因」の面から検討した。

a)材料起因に関する検討

コンクリートの品質(スランプ、空気量、塩化物含有量、コンクリート温度、圧縮強度に着目)のばらつきや偏りを架設ブロック毎、部材毎、施工時期毎に整理し、ひび割れ状況との関係を検討した。その結果、コンクリート品質とひび割れ状況との明確な因果関係は認められなかった。

b)施工起因に関する検討

実際の施工ステップ(コンクリート打設日)、実際の鉄筋かぶりや施工時の補修痕等と、ひび割れ状況との関係を整理した結果、施工そのものに起因すると思われる事項とひび割れとの因果関係は明らかでなかった。

c)環境起因に関する検討

飛来塩分調査結果から、現時点では塩害の可能性はないことを確認した。

d)構造起因に関する検討

部位・部材毎に設計断面力や応力度を整理し、ひび割れ状況との関係を検討した。この結果から、設計応力とひび割れ状況との因果関係は明らかでなかった。

4. 損傷原因究明に向けたFEM解析

(1) 3次元FEM解析の必要性

設計図書等に基づく部位・部材毎の設計断面力や設計応力度の整理(マクロな応力状態)では、ひび割れ状況を説明できないことが明らかとなったため、損傷原因究明のため、3次元FEM解析により細部構造に着目した応力(ミクロの応力状態)を把握することとした。

実橋において、ア)ひび割れが生じていること、イ)ひび割れの進展が確認されていること、ウ)ひび割れの開閉が確認されていること、の3点を踏まえて、どこがどのような挙動をしないと起こりえないのかという観点を持ち、感度あるいは応力の向きの変化に着目して解析を行った。

解析は、死荷重状態(完成直後の無載荷時)では精緻なモデルを目指して中間橋脚付近に着目した部分モデルを、活荷重や温度差・温度変化等の橋全体の挙動を確認する場合には若干粗くした要素を用いた全橋モデルを採用した。また、モデル要素は、着目部のコンクリート要素はソリッド要素、着目部位外のコンクリートはシェル



図-5 ひび割れパターン(外ケーブル定着部)

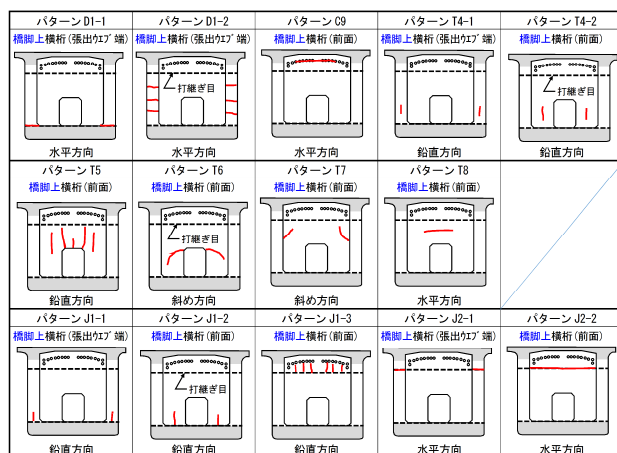


図-6 ひび割れパターン(支点上横桁:橋脚部)

要素, 斜材や外ケーブルは棒要素でモデル化した。

(2) 死荷重時（完成直後の無載荷時）の応力状態

3次元FEM解析結果の一例として、図-7に外ケーブル定着部及び格点部のベクトル図とコンター図を示す。ベクトル図ではひび割れパターンとの概念も合わせて示している。なお、図中のひび割れ記号は図-4及び図-5の記号を表している。

図-7(a)に示すように、解析結果のベクトル図とひび割れの方向を整理することで、解析で得た引張方向とひび割れに直交する方向が一致するか否かを整理した。例えば、図-7(a)では、ひび割れパターン C1, C3~8, T3(出口側のみ)は一致しており、その他は死荷重においてひび割れ直交方向に引張応力が生じていない。これらにより、死荷重状態で、箇所によって比較的大きな引張応力が内在していることを確認した。

同様に、支点上横桁についても整理した結果(図-7(b)にコンター図のみ参考として示す)、支点上横桁の張出しウェブ端面の下側は、解析での引張方向応力とひび割れに直交する方向が一致することを確認した。

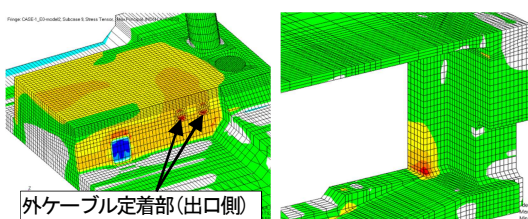
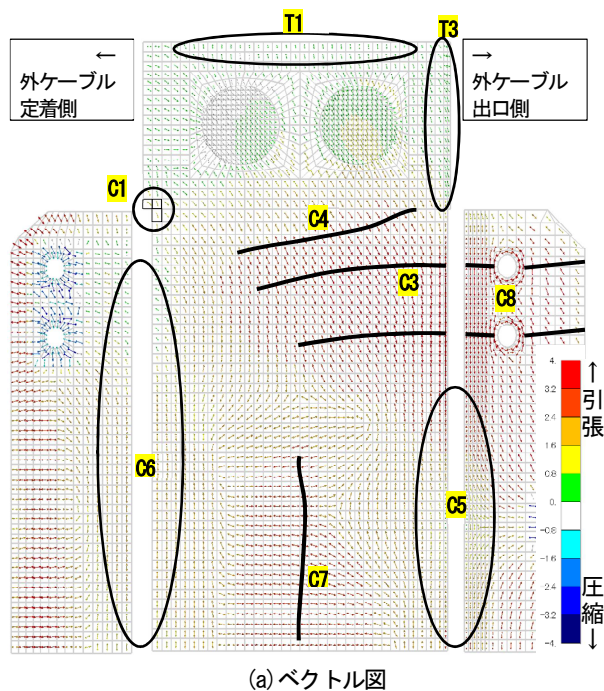


図-7 死荷重時の応力状態

(3) 死荷重状態（完成直後の無載荷時）での引張応力を助長させる要因

死荷重状態で、箇所によって比較的大きな引張応力が内在していることを確認した後に、ひび割れの進展要因を検討するため、その引張応力と同方向に引張応力が生じる要因について解析的に検討した。その一例として、外ケーブル自身の温度変化が与える影響の結果を図-8に、部材表面と内部との温度差が与える影響結果を図-9に示す。これらから、外ケーブルの温度下降時やコンクリート部材表面の温度下降時等で、死荷重状態で生じている引張応力を助長させる可能性があることを確認した。

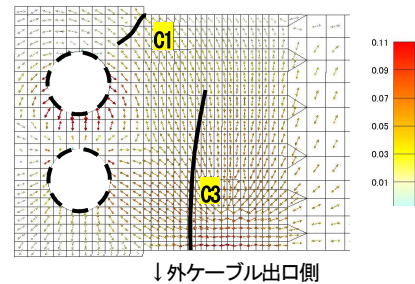


図-8 外ケーブルのみ温度下降時の影響（外ケーブルのみ -10°C ）

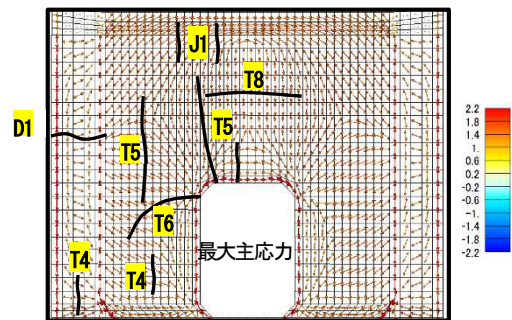


図-9 部材表面の温度差の影響：横桁（部材表面のみ -10°C ）

5. 損傷原因究明

(1) 損傷要因

検討結果をもとに、考えられる損傷要因を、部位毎、ひび割れパターン毎に、ア)主要因もしくは可能性が大きいと考えられる要因、イ)単独で損傷を生じさせるものではないが可能性のある要因、ウ)損傷を助長させると考えられる要因、に区別して検討・整理した。その詳細は割愛するが、推定した主な損傷要因は以下のとおりである。

(a) 格点部及び外ケーブル定着部

格点部及び外ケーブル定着部では、ケーブル力により生じる引張応力(図-10参照)や、温度差・温度変化による影響(コンクリート表面と内部との収縮差、部材間の温度差)、活荷重(外ケーブル張力の作用)、乾燥収縮、などの原因を推定した。

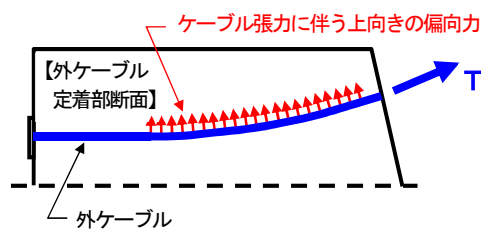


図-10 外ケーブル曲げ上げに伴う断面力の概念図

(b)支点上横桁

支点上横桁では、死荷重+プレストレス（橋軸方向のトラス作用による引張応力（図-11 参照）、水和熱（前施工部による外部拘束）、温度差・温度変化（コンクリート表面と内部との収縮差）、活荷重（トラス作用）などの原因を推定した。

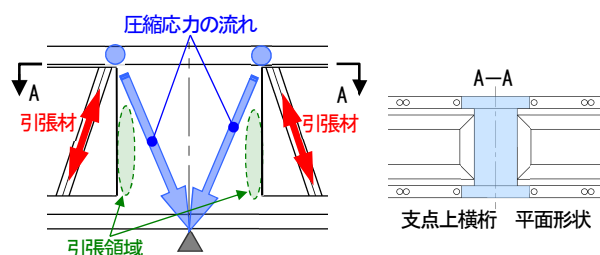


図-11 支点上横桁の橋軸方向トラス作用の概念図

(2) ひび割れ進展の要因

現時点においてもひび割れの進展や挙動が確認されており、その要因を推定した。

日々、桁に作用するものとしては、活荷重、温度差（部材・部位間、表面と内部）、温度変化（部材）、乾燥収縮（あるいは乾湿の繰り返し）が考えられ、調査・計測結果からウェブが開放された本橋では外気温や直射日光の影響を受け易く、ひび割れ挙動に与える影響は活荷重よりも温度差・温度変化によるものが大きいことが確認された。また、FEM 解析では、代表的なひび割れが生じている箇所では温度差・温度変化や活荷重により、死荷重状態で生じる引張応力を助長させる引張応力が生じる可能性があることも確認された。加えて、コンクリート表面の収縮の進行が継続していることも確認された。

これらを、部位毎、ひび割れパターン毎に整理し、補修・補強検討、モニタリング計画検討に資するものとした。

6. 補修・補強対策（案）とモニタリング計画（案）

(1)補修補強対策（案）

補修・補強対策は、ひび割れ注入工、表面塗布工に加えて、「炭素繊維シート補強工」や「断面増し厚」等を検討している。

現時点では、死荷重状態での引張応力が比較的高いレベルにある部位・部材、橋の長期的な耐荷力確保に重要部位である部位・部材、予防保全の視点等を考慮して、補修補強対象箇所・方法を検討している。

(2)モニタリング計画（案）

将来、定期点検で対応できる通常の橋に移行するための判断が可能となるよう、モニタリングを行い客観的なデータを集積することを検討している。

モニタリングは、ア)補強対策の妥当性を検証する、イ)無補強部のひび割れに有意な進展のないことを検証する、ウ)橋全体の安全性を検証する、という視点が考えられる。

補強対策の妥当性を検証するためのモニタリングでは、例えば、炭素繊維シート補強を行う箇所を対象に、ひび割れ挙動や補強部材のひずみを計測することが考えられる。

無補強部のひび割れに有意な進展のないことを確認するためのモニタリングでは、例えば、モニタリングを行うひび割れを特定し、そのひび割れの幅、先端位置の変化、深さを調査・計測することが考えられる。

橋全体の安全性を検証するためのモニタリングでは、外ケーブル張力の変化や桁のキャンバーの変化等、比較的簡易な方法の計測を継続的にを行い、橋全体の安全性が保持されていることを確認することが考えられる。

7. おわりに

本報告は、木ノ川高架橋上部工のひび割れ損傷に関して、原因究明のための調査・計測・解析、それらを受けた原因推定、推定原因を踏まえた補修・補強対策検討および今後のモニタリング計画検討に関して、現時点での概要を述べたものである。今後の検討会審議や委員の方々のご意見により、修正を加え、補修・補強対策工事や今後のモニタリングに活かして参りたいと考えている。

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) 古市, 日紫喜, 吉田, 本田, 山村, 南: 鋼・コンクリート複合トラス橋の新しい格点構造の開発と設計法の提案, 土木学会論文集 F, Vol.62 No.2, 2006.6
- 3) 南, 瀬戸, 小野, 尾鍋: 那智勝浦道路木ノ川高架橋の施工, 橋梁と基礎, 2004.1