

## 報告 ウェブに変状が発生したPC箱桁橋の変状原因推定に関する検討

鈴木 真<sup>\*1</sup>, 松井 俊吾<sup>\*2</sup>, 浦 啓之<sup>\*3</sup>, 川谷 泰山<sup>\*4</sup>

## A Study of Cause Determination on Defection in the Web of PC Box Girder

Shin SUZUKI<sup>\*1</sup>, Shungo MATSUI<sup>\*2</sup>, Hiroyuki URA<sup>\*3</sup> and Taizan KAWATANI<sup>\*4</sup>

**要旨**：張り出し架設工法により施工されたA橋は、供用開始後約20年を経過したPC3径間連続ラーメン箱桁橋である。平成25年に実施した橋梁点検において、本橋のウェブ内面の一部分に多数発生している斜め方向のひび割れを確認した。斜め方向ひび割れの発生原因として、せん断耐力の不足が考えられるが、当該部位は本橋の主桁（主方向）に発生するせん断力が卓越する部位とは一致しておらず、その発生原因を特定することができなかった。よって、現地調査を行い、解析的検討を実施して変状原因の推定を行った。

**キーワード**：PC箱桁橋、張り出し架設工法、斜め方向ひび割れ、目地開き

## 1. はじめに

調査および検討の対象となった橋梁を、本稿ではA橋と称す。A橋の構造概要を以下に記す。また、A橋の断面図を図-1に、側面図を図-2に示す。

構造形式：PC3径間連続ラーメン箱桁橋

橋長：133.380m

支間長：37.940m+56.600m+37.940m

幅員：全幅員10.400m 有効幅員9.000m

桁高：1.700m～3.400m

施工方法：張り出し架設工法

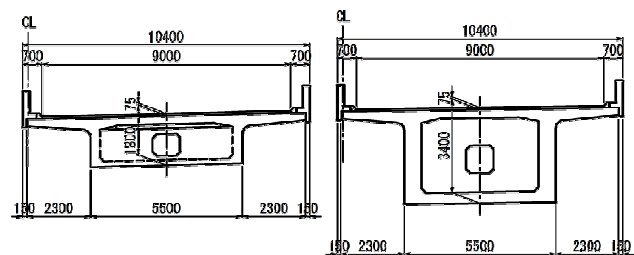
竣工年度：平成3年3月

PC鋼材種別（主ケーブル）：PC鋼棒φ32mm

活荷重：TL-20, TT-43

平成25年に本橋の箱桁内で実施した橋梁点検において、ウェブ内面に発生している斜め方向のひび割れを確認した。一般的に本橋のような箱桁橋のウェブに対して斜め方向に発生するひび割れは、荷重により主方向に発生するせん断力に起因する場合は考

えられるが、当該ひび割れが集中的に発生している部位は、中央径間の支間中央部近傍であり、せん断力が卓越する部位（中間支点部近傍）と一致していなかったため、橋梁点検を行った時点では、ひび割れの発生原因を特定することはできなかった。本橋の現状における耐荷性の確認および補修対策を講じるためには、ひび割れ発生原因を推定する必要がある。よって、本橋に対して現地調査を行い、調査結果を反映した解析的検討を実施した。



(a) 支間中央部 (b) 中間支点部

図-1 断面図

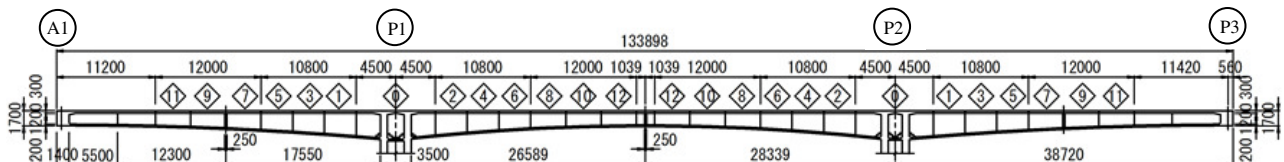


図-2 側面図

- \*1 西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社道路技術部 課長代理  
 \*2 西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社道路技術部 主任  
 \*3 西日本高速道路株式会社関西支社建設事業部技術計画課 課長  
 \*4 株式会社 CORE 技術研究所

## 2. 外観目視調査結果

本橋のウェブ内外面から、外観目視によりひび割れの性状について調査した。なお、ウェブ外面の調査は、橋梁点検車を使用して行った。ひび割れの状況を図-3 および図-4 に示す。また、外観目視調査結果の内、ひび割れの特性を以下に記す。

- ・ 水平方向のひび割れも確認されたが、斜め方向のひび割れが多く、ひび割れ幅も大きかった。
- ・ ひび割れの角度は、おおむね 45 度であった。
- ・ ひび割れは、ウェブ内面だけでなく外面にも発生していた。両面でのひび割れ位置はほぼ一致しており、ウェブを貫通している可能性が高い。
- ・ 左右のウェブにおいて確認したひび割れは、ほぼ同様の位置に発生していた。また、幅、方向および長さともほぼ同じであった。
- ・ ひび割れの幅は  $W=0.2\text{mm}$  以上あり、最大幅は  $W=0.5\text{mm}$  であった。
- ・ ひび割れは、中央径間 (P1~P2) において確認され、当該径間の支間中央側に比較的集中していた。
- ・ ひび割れは、ウェブおよび下床版内面に設置され

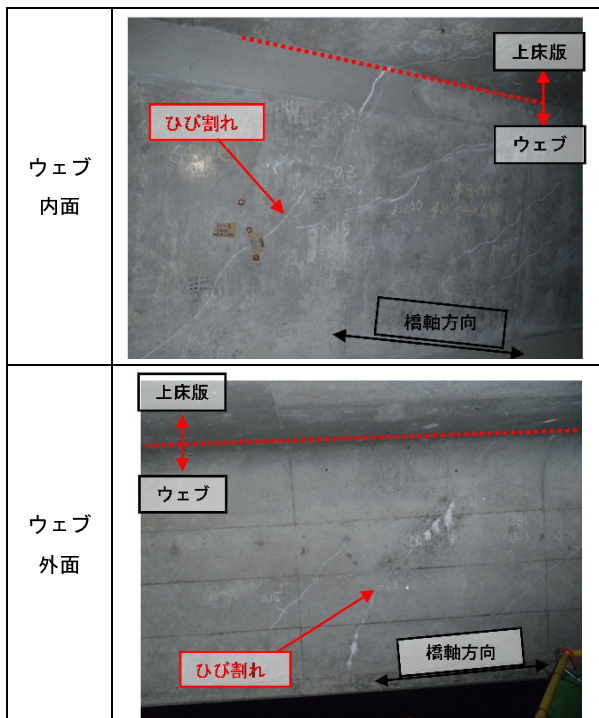


図-3 ひび割れの状況写真

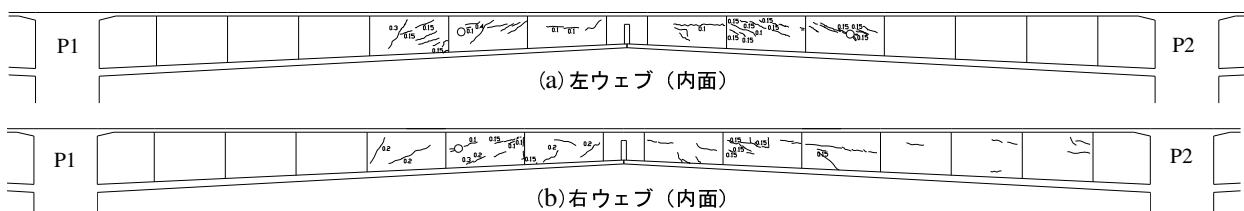


図-4 ひび割れ性状図 (P1~P2 径間)

ている PC (主) ケーブルの定着突起近傍に発生していた。

- ・ 支間中央部を基点として P1 側および P2 側に発生しているひび割れは、支間中央部から見て「ハ」の字のように対称に発生していた。

また、図-5 に示すような施工目地部 (本橋は、張り出し架設工法により施工されているため、各施工ブロック間に施工目地が存在する) に目地開きを確認した。図-6 に示すように主に中央径間において、下床版からウェブ上端にかけて発生しており、その幅は下床版部で  $0.2\sim 0.9\text{mm}$ 、ウェブ (左右) 部で  $0.1\sim 0.2\text{mm}$  であった。



図-5 下床版 (上面) の目地開き

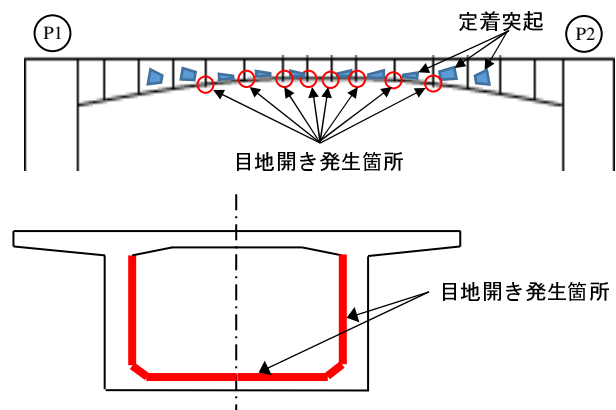


図-6 目地開きの発生箇所

## 3. ひび割れ発生原因の推定

既往文献<sup>1)</sup>を参照したが、類似する変状報告を確認することができなかった。よって、ひび割れの発生原因を推定するための検討を行うこととした。

当検討を行う前に、原因と考えられる要因の抽出を行った。各要因に対する考察を行い、検討対象とすべき原因案を選定した。

### 3.1 原因案1: 過積載車両の荷重によるせん断力の卓越

本橋の主桁（主方向）のクリープ終了時における設計荷重作用時のせん断力図を図-7に示す。主桁に発生するせん断力は中間支点部 P1 および P2 近傍において卓越しており、本橋のウェブにひび割れが発生している部位と一致していない。仮に過積載車両が走行し、想定以上のせん断力が発生したと想定した場合、ひび割れ発生部位より中間支点部近傍での損傷が顕在化していることになる。よって、ひび割れの発生は、過積載車両の荷重が載荷されたことにより発生したものではないと推測される。上記より、ひび割れの発生は他の原因によるものと推測されるため、原因案1は検討対象外とした。

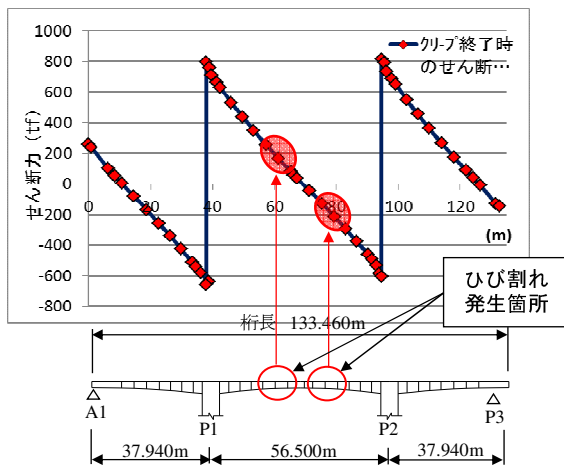


図-7 せん断力図とひび割れ発生部位との関係

### 3.2 原因案2: 材料的原因

ひび割れが集中して発生している部位には、下床版およびウェブ内面に PC (主) ケーブルを定着する定着突起が配置されている。当該定着突起の近傍には、プレストレスを導入した際に、応力集中が発生することが想定される。この応力集中が、クリープ・乾燥収縮により助長され、経年的に応力度が増加する傾向にあることは否めない。仮に本橋に使用されたコンクリート（設計基準強度： $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$ ）の品質に問題があり、クリープ・乾燥収縮が想定以上に発生したと仮定した場合、上記の傾向はさらに顕著となる。

図-8 に、本橋から採取したコンクリートコア（直径  $\phi 20\text{mm}$ ）の写真を示す。当該コンクリートコアを見ると、茶褐色の骨材が含まれていることがわか

る。当該骨材は玄武岩である可能性が高い。玄武岩は比較的吸水率が高い骨材であり、クリープ・乾燥収縮が想定以上に発生した可能性も考えられる。

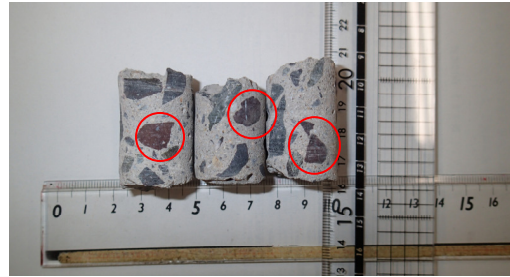


図-8 本橋から採取したコンクリートコア

本橋の施工が完了してから 20 年以上が経過しており、クリープ・乾燥収縮はすでに収束していると考えられる。現段階において、上記の傾向を実験等により確認することは難しい。よって、ここでは、ひび割れを発生させた、もしくはひび割れの進展を助長した可能性のある原因の一つとして取扱う。

### 3.3 原因案3: 施工的・構造的な原因

先述のように、本橋の P1~P2 径間のひび割れ発生部位近傍には定着突起が比較的多く配置されており、定着突起近傍において応力集中が発生した可能性が考えられる。しかし、定着突起には十分な補強鉄筋が配置されており、ひび割れ発生直接的な原因としては考え難い。

先述のように、施工目地部の目地開きは、本橋の PC (主) ケーブルに十分なプレストレスが導入されていれば、発生する可能性はありえない。何らかの要因により発生した目地開きが、あらかじめ生じている状態で、下床版定着突起に配置されている PC (主) ケーブルにプレストレスが導入された場合、図-9 に示すような損傷が発生すると想定される。

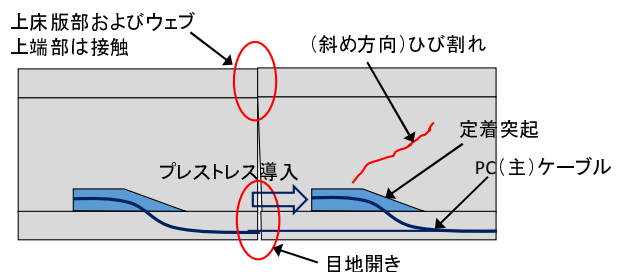


図-9 目地開きがある状態でプレストレスを導入した場合のイメージ図

上記より、目地開きがある状態でプレストレスを導入したことによる定着突起部近傍の応力集中に着目して、解析による検討を実施した。

#### 4. 解析による検討

##### 4.1 検討方針

本検討では、FEM 解析を適用して以下に記す 3 通りの検討を行った。

###### ① FEM 解析 0

橋梁全体をモデル化し、クリープ・乾燥収縮の影響を考慮した定着突起部近傍のコンクリート部材に発生する応力集中を検討する。

###### ② FEM 解析 1

局部モデルにより、目地開きがある状態で定着突起部の PC(主) ケーブルにプレストレスを導入した場合にコンクリート部材に発生する応力集中を検討する。

###### ③ FEM 解析 2

各定着突起部に配置されている PC(主) ケーブルにプレストレスを導入していく順序に応じて、施工目地部に目地開きが発生する可能性 (原因) について検討する。

##### 4.2 定着突起部近傍の応力集中に対する検討

FEM 解析 0 の解析モデル図を図-10 に記す。

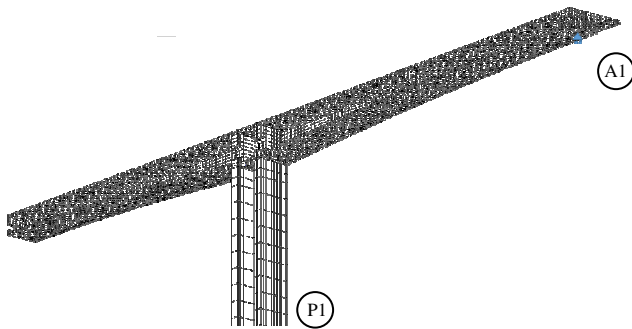


図-10 FEM 解析 0 の解析モデル図

本橋の主桁形状は対称であるため、解析モデルは 1/4 モデルとした。解析モデルには、既往設計図書を参照して、支承の拘束条件、下部工下端部のバネ値、施工ステップ、PC 鋼材配置を正確に反映し、時間に依存する長期的な応力の変動に対し、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮の影響が大きいと考え、これらによって発生する応力についても解析することができるように考慮した (図-11, 図-12 参照)。

FEM 解析 0 の結果を図-13 に示す。図-13 より、下床版に配置されている定着突起近傍において応力集中が発生している。当該部位における最大引張応力度は、 $\sigma_c = -3.4\text{N/mm}^2$  であり、ひび割れ発生限界応力  $\sigma_{ca} = -2.7\text{N/mm}^2$  を上回る結果となった。しかし、ひび割れの発生状況 (幅、長さ、本数等) を考慮すると、この解析結果 (応力値) 以上

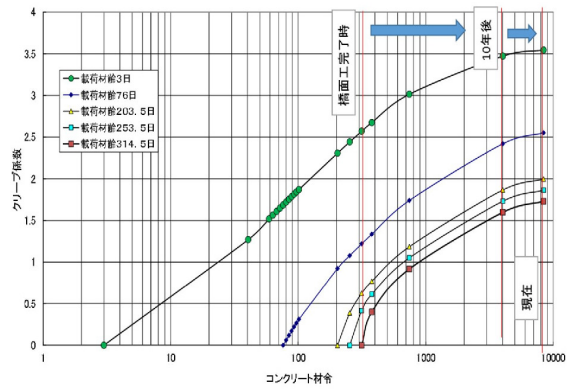


図-11 クリープの経時変化

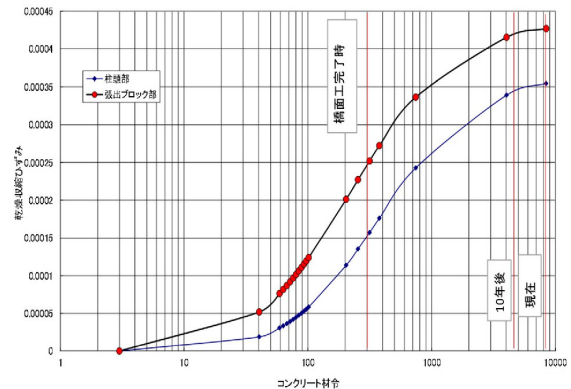


図-12 乾燥収縮の経時変化

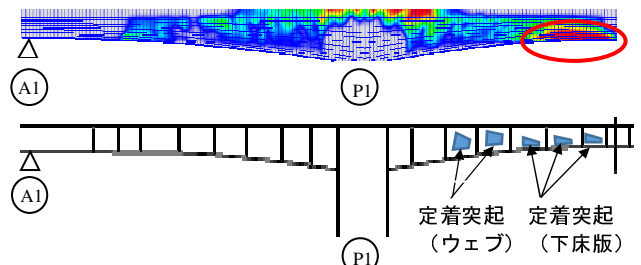


図-13 FEM 解析 0 の結果 (コンター図)

の引張応力が発生していると推測する。よって、この解析結果を妥当と判断することは難しいと考え、FEM 解析 1 を実施することとした。

##### 4.3 目地開きによる応力集中の検討

FEM 解析 1 の解析モデルは、図-14 に示すように下床版定着突起が配置されている (FEM 解析 0 の結果より応力集中が発生していることを確認した) 3 つの施工ブロック (8 ブロック, 10 ブロック, 12 ブロック) を抽出した局部解析モデルとした。各施工ブロックの施工目地部には、下床版全域およびウェブ中段までスリット (隙間) を設け、下床版定着突起だけでなく上床版に配置されている架設 PC (主) ケーブルによるプレストレスも考慮した。解析モデル図を図-15 に記す。



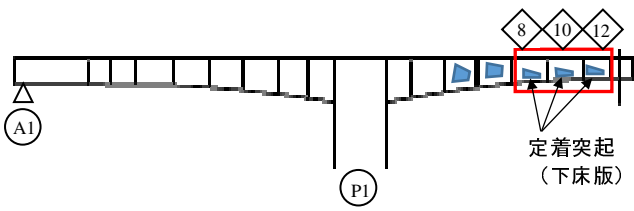
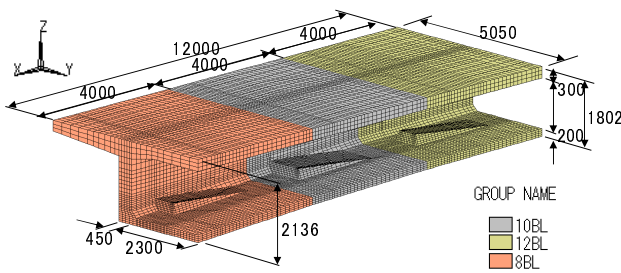


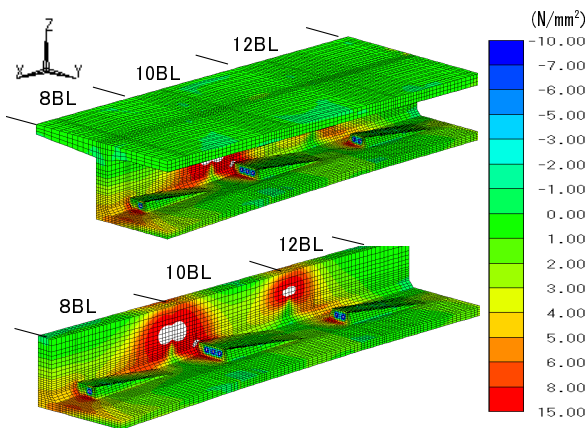
図-14 モデル化した施工ブロック



※図中の 12BL, 10BL, 8BL は施工ブロック番号を示す。

図-15 FEM 解析 1 の解析モデル図

解析結果を図-16 に示す。ウェブの施工目地部において、スリット近傍に応力集中が発生していることがわかる。応力の方向はひび割れ方向とほぼ一致しており、最大引張応力度は  $\sigma_c = -7.6\text{N/mm}^2$  であった。



※図中の 12BL, 10BL, 8BL は施工ブロック番号を示す。

図-16 FEM 解析 1 の結果 (コンター図)

FEM 解析 0 および FEM 解析 1 より算出した最大引張応力度を足し合わせることは一概にはできないが、参考値として算出してみると以下ようになる。

FEM 解析 0 :  $\sigma_{c0} = -3.4\text{N/mm}^2$

FEM 解析 1 :  $\sigma_{c1} = -7.6\text{N/mm}^2$

合計 :  $\sigma_{c(0+1)} = -11.0\text{N/mm}^2$

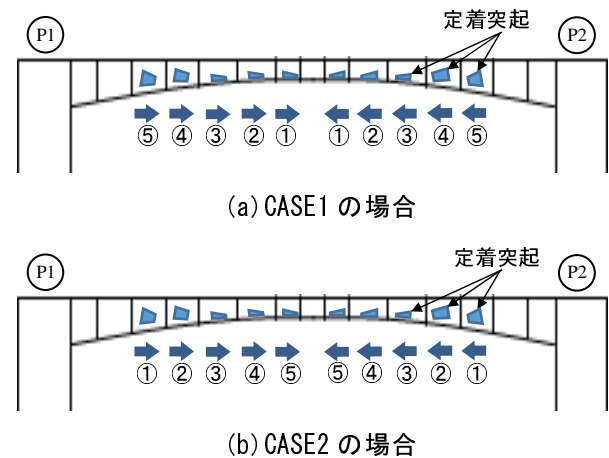
上記のように、本橋のような張り出し架設工法により施工される PC 橋において、施工目地部において目地開きが発生している状態で PC (主) ケーブル

にプレストレスを導入した場合、ひび割れ発生限界応力を超過する (斜め方向) 引張応力がコンクリート部材に発生する可能性があることがわかった。ただし、上記の仮説はあくまでもプレストレス導入前に目地開きが発生していなければ成立しない。よって、次項に目地開きが発生するメカニズムについて検討した結果を示す。

#### 4.4 目地開きの発生原因に関する検討

FEM 解析 2 は、FEM 解析 0 で作成した解析モデルに対して、各施工ブロック目地に一定の引張応力が作用するとひび割れが発生するような要素を設けた (ひび割れの発生を目地開きが発生した状態と想定する)。この要素については、 $\sigma = 1.0\text{N/mm}^2$  以上の引張応力が作用すると応力伝達が行われなくなり、ひずみのみが増加するように設定した。

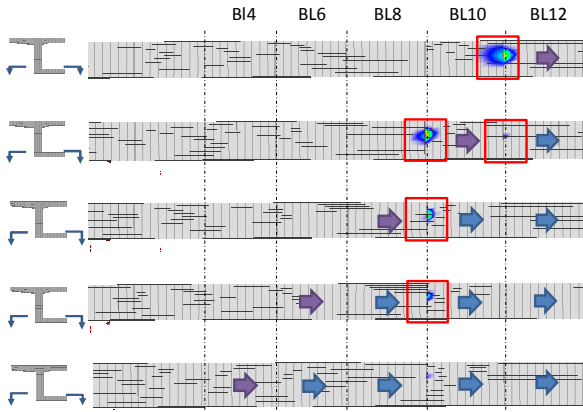
解析手法としては、箱桁内の定着突起に定着されている PC (主) ケーブルにプレストレスを導入していく順序に応じて、施工目地部近傍に発生する応力の変動を確認した。プレストレスの導入順序は、図-17 に示すように、支間中央側から行った場合を CASE 1、橋脚側から行った場合を CASE 2 とした。



※○内の数字はプレストレス導入順序を示す。

図-17 プレストレスの導入順序

CASE 1 において、下床版に発生する応力の解析結果を図-18 に示す。CASE 1 において、プレストレスを導入していく過程において、施工目地部に引張応力が発生し、クリープの進行とともに残留していくことが分かった。これに対し、CASE 2 では施工目地部に引張応力の発生および残留が全く発生しなかった。このことから、施工手順 (プレストレスの導入順序) によっては、張り出し架設工法により施工された PC 橋の施工目地部において、目地開きが発生する可能性があることを証明することができたと考える。



※図中の矢印はプレストレスが導入されたことを示す。

図-18 FEM 解析 2 (CASE1) の結果 (コンター図)

### 5. 目地開きおよびひび割れ発生メカニズムの推定

FEM 解析 1 および FEM 解析 2 の結果を踏まえ、コンクリート材料の問題を加味した目地開きおよび斜めひび割れの発生に関するメカニズムを以下のように推測した。

P1～P2 径間の支間中央部に位置する中央閉合部は、P1 および P2 橋脚からの張り出し架設が完了した段階で、コンクリート打設が行われ、箱桁内にある定着突起に定着されている PC (主) ケーブルにプレストレスが導入されて一体化が図られる。張り出し架設工法を行う場合、施工ブロック毎にコンクリート部材の材令差が生じ、最後にコンクリート打設が行われる中央閉合部は、乾燥収縮等による収縮ひずみが大きく発生する。前項 (3.2) で述べたように、収縮性の高い骨材が使用された可能性もあり、中央閉合部と隣接する施工ブロックとの施工目地部に目地開きが発生したと想定すれば、FEM 解析 2 の CASE1 のように、先行して隣接の施工ブロック内に定着突起に配置されている PC (主) ケーブルにプレストレスが導入されると、当該施工ブロック後方の施工目地に目地開きが発生することになる。これが繰り返されれば、目地開きは各施工ブロック間に発生していくことになる。現在想定している目地開きおよびひび割れの発生メカニズムを図-19～22 に示す。

- ① P1 および P2 橋脚からの張り出し施工完了

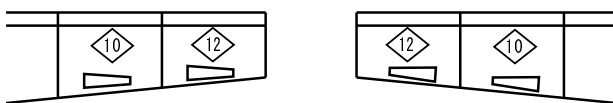


図-19 目地開き発生メカニズム (①)

- ② 中央閉合部の施工後、中央閉合部と隣接の 12 ブロック間に目地開きが発生する。

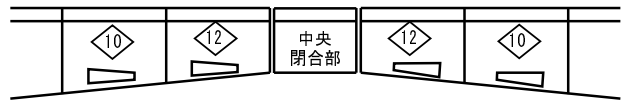


図-20 目地開き発生メカニズム (②)

- ③ 12 ブロックの定着突起にある PC (主) ケーブルにプレストレスを導入した場合、10 および 12 ブロック間に目地開きが発生し、12 ブロックのウェブに斜め方向のひび割れが発生する。

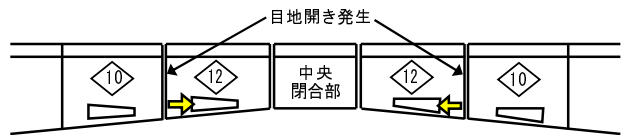


図-21 目地開き発生メカニズム (③)

- ④ 10 ブロックの定着突起にある PC (主) ケーブルにプレストレスを導入した場合、8 ブロックと 10 ブロックに目地開きが発生し、10 ブロックのウェブに斜め方向ひび割れが発生する。

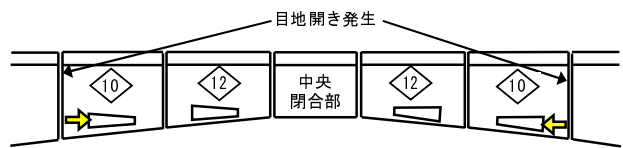


図-22 目地開き発生メカニズム (④)

- ⑤ 上記の現象が、後続の (定着突起がある) 施工ブロックにも順次発生する。

### 6. まとめ

本橋の補強対策として、終局荷重状態のせん断耐力の検討を行い、不足するせん断耐力に対して炭素繊維シート接着工法を適用する計画を進めている。

本橋に限らず、せん断力が卓越しない部位において、斜め方向ひび割れが発生している PC 箱桁橋を橋梁点検において確認している。本橋との共通点は、①張り出し架設工法により施工されていること、②ひび割れ発生部位近傍に PC (主) ケーブルの定着突起があること、③施工目地部に目地開きが発生していることが挙げられる。このことから、本検討結果が、本橋のひび割れ発生原因案の一つとして考えることができる。

### 参考文献

1) PC 構造物の維持保全, 社団法人プレストレス・コンクリート建設業協会, 2010.3