

## 斜め方向ひび割れが発生したPC箱桁橋の変状原因の推定

西日本高速道路エンジニアリング関西(株)  
 西日本高速道路エンジニアリング関西(株)  
 (株)CORE技術研究所  
 西日本高速道路(株)関西支社

○鈴木 真  
 上田 憲寿  
 正会員 真鍋 英規  
 加藤 寛之

### 1. はじめに

張り出し架設工法により施工されたA橋は、PC3径間連続ラーメン箱桁橋（一室）であり、供用が開始されてから約20年が経過している。平成25年に実施した橋梁点検において、本橋のウェブ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。当該変状に対して、補修等の対策検討を行うにあたり、その発生原因を推定する必要があったが、変状発生部位は、主方向に発生するせん断力が卓越する部位とは一致しなかったため、変状原因の推定を目的とした現地調査および当該調査結果を反映させたFEM解析による検討を実施した。本橋の断面図（中間支点上）を図-1に、側面図を図-2に示す。

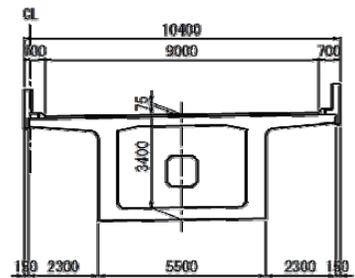


図-1 断面図（中間支点上）

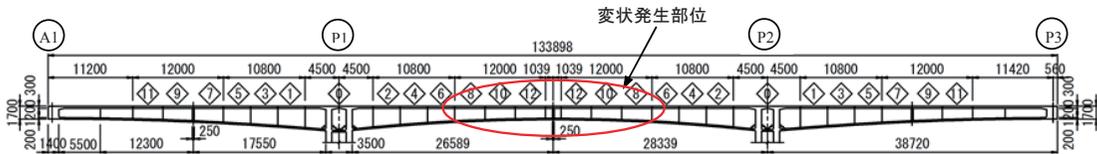


図-2 側面図

### 2. ひび割れの発生状況

本橋のウェブ内外面に発生しているひび割れの状態を外観目視により調査した。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、写真-1および図-3に示す。また、外観目視調査により得られたひび割れ状態を以下に示す。

- ・ウェブ内外面のひび割れの位置、大きさ、幅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。
- ・ウェブ左右のひび割れは、発生位置、幅、方向および長さともほぼ同様であった。
- ・ひび割れの角度は、おおよそ45度であった。
- ・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。
- ・ひび割れのほとんどは中央径間（P1～P2径間）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（図-3参照）。
- ・ひび割れは、ウェブおよび下床版内面に設置されているPC（主）ケーブルの定着突起近傍に発生していた。
- ・中央径間（P1～P2径間）の支間中央部を中心として、ひび割れは「ハ」の字のようにP1側およびP2側にそれぞれ対称に発生していた。



写真-1 ひび割れ発生状況

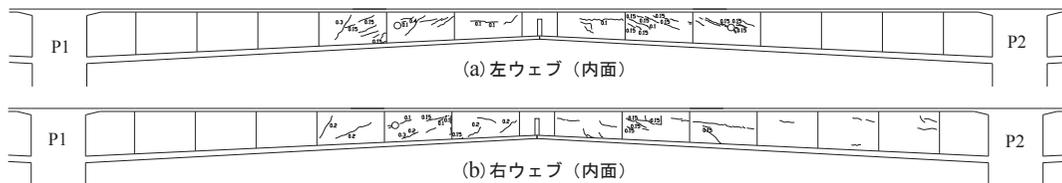


図-3 ひび割れ性状図 (P1~P2 径間)

### 3. ひび割れの発生原因の推定

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-4に示す。本橋の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。仮に過積載車両の走行等により、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なければならないが、そのような変状は見られなかったことから、ひび割れの発生は、荷重により発生したものではないと推測される。また、既往文献<sup>1)</sup>には類似する変状について報告されていないため、一般的な変状ではないと推測されることから、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。

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多数配置されており、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、ひび割れ発生の直接的な原因としては考えにくい。

ここで、外観目視調査の結果を参照すると、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。目地開き発生箇所を図-5に示す。

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、目地開きが発生することはありえないが、何らかの要因により、図-5に示す箇所において目地開きが下床版からウェブ上端にかけて発生していた。目地開きの幅は、下床版において0.2~0.9mm、ウェブにおいて0.1~0.2mmであった。このような目地開きがあらかじめ発生している状態で、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を導入した場合、図-6に示すようなひび割れが発生すると想定されることから、目地開きがある状態でプレストレスを導入したことにおける定着突起部近傍の応力集中に着目して、FEM解析による検討を実施した。

### 4. FEM解析による検討

#### 4.1 ひび割れ発生に関する検討

FEM解析により、目地開きがある状態で定着突起部

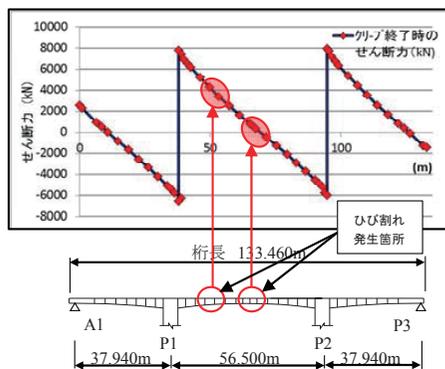


図-4 せん断力図

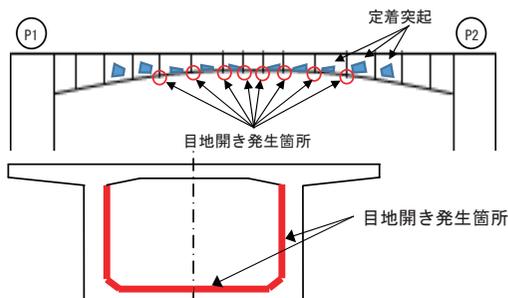


図-5 目地開きの発生箇所

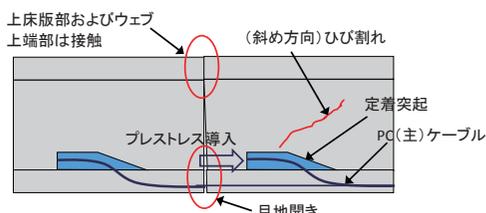


図-6 ひび割れ発生のイメージ図

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対象に検討を行った。

解析モデルは、下床版定着突起が配置されている3つの施工ブロック (図-2に示す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継目部には、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-7に、解析結果を図-8に示す。図-8より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 $\sigma_c = -7.6\text{N}/\text{mm}^2$  (ひび割れ発生限界応力:  $\sigma_c = -2.9\text{N}/\text{mm}^2$ ) であった。

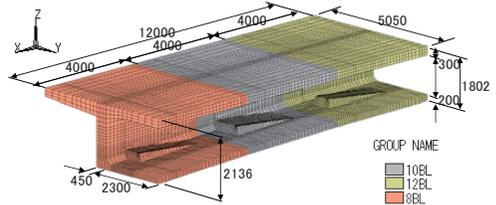
解析により、本橋のような張り出し架設工法により施工される PC 橋において、施工目地部において目地開きが発生している状態で PC (主) ケーブルにプレストレスを導入した場合、ひび割れ発生限界応力を超過する斜引張応力がコンクリート部材に発生する可能性があることがわかった。ただし、上記の仮定は、あくまでもプレストレスを導入する前に目地開きが発生していなければ成立しないことから、目地開きが発生する過程について検討を行った。

#### 4.2 目地開き発生に関する検討

本橋の主桁形状は対称であるため、解析モデルは図-9に示すような 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 鋼材配置を設計値を基に反映し、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る、これらによって発生する応力についても解析が行えるように考慮した。

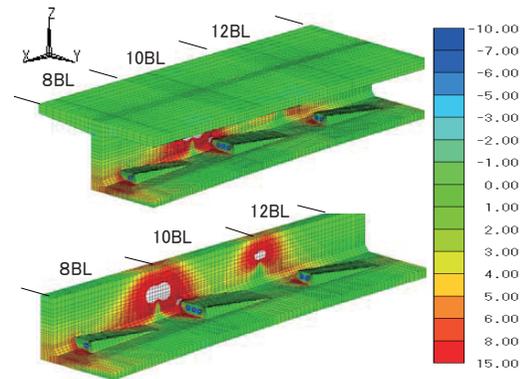
各施工ブロック目地に一定の引張応力が作用するとひび割れが発生するような要素を設けることとした (ひび割れの発生を目地開きが発生した状態と想定する)。この要素は、 $\sigma = 1.0\text{N}/\text{mm}^2$  以上の引張応力が作用すると応力伝達が行われなくなり、ひずみのみが増加するように設定した。

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-10に示すように支間中央側から行う場合 (CASE1), P1 および P2 橋脚側から行う場合 (CASE2) の 2 ケースとした。



※図中の 12BL, 10BL, 8BL は施工ブロック番号を示す。

図-7 FEM 解析モデル図 (局部)



※図中の 12BL, 10BL, 8BL は施工ブロック番号を示す。

図-8 FEM解析の結果 (コンター図)

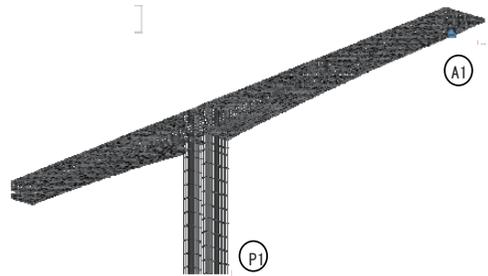
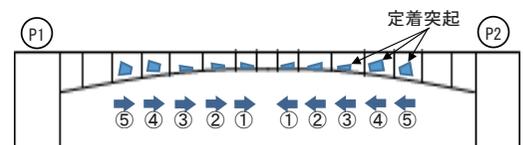


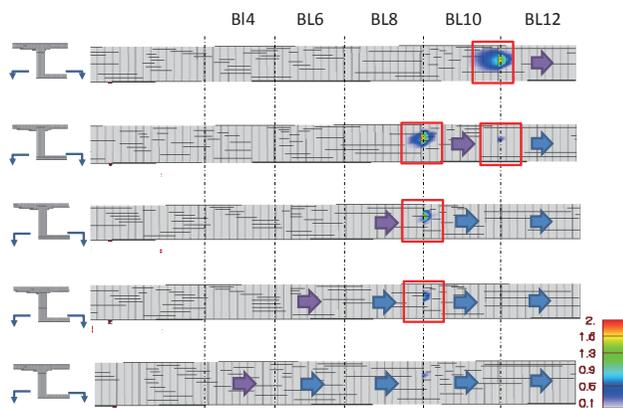
図-9 FEM (全体) 解析モデル図



※○内の数字はプレストレス導入順序を示す。

図-10 プレストレスの導入順序の設定

CASE1 における下床版施工目地近傍に発生する応力（クリープ終了時）の解析結果を図-11 に示す。当解析結果から、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（図-11 中の□内）が発生し、クリープにより残留していくことが分かった。これに対し、CASE2 については、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。



※図中の矢印はプレストレスが導入されたことを示す。

図-11 CASE1 の FEM 解析の結果（コンター図）

### 5. ひび割れ発生過程の推定

P1～P2径間の支間中央部には中央閉合部がある。この中央閉合部は、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る。その後、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れる。

このような施工が行われる場合、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の乾燥収縮等による収縮ひずみが、隣接の部材よりも大きく発生する。これにより、図-12に示すように、中央閉合部と隣接の12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、CASE1に記したように12ブロック内の定着突起に配置されているPC（主）ケーブルに先行してプレストレスが導入されたことにより、12ブロックおよび10ブロック間の施工目地に目地開きが発生する。このとき、先述のFEM解析結果より、12ブロックのウェブに斜め方向ひび割れが発生する可能性があり、10ブロック以降の施工時に順次繰り返されれば、定着突起が配置されている施工ブロックにひび割れが発生する範囲が広がっていくことがわかった。

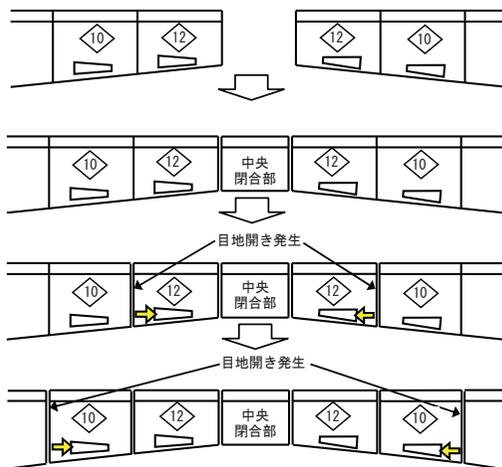


図-12 目地開き発生メカニズム

### 6. まとめ

張り出し架設工法により施工された本橋のウェブに発生しているひび割れは、①（主方向の）せん断力が卓越しない部位において斜め方向に発生している、②ひび割れ発生部位近傍にはPC（主）ケーブルの定着突起が配置されているといった特徴があり、施工目地部においては目地開きが確認された。本検討において、架設時におけるプレストレスの導入順序によっては、目地開きの発生とともに定着部近傍の応力集中が卓越し、これによりひび割れが発生した可能性を示すことができた。

### 参考文献

- 1) 社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会, PC構造物の維持保全, 2010. 3