

## 世界初のプレキャストコンクリートネットワークアーチ橋の施工時応力（前編） – Construction stresses in the world's first precast concrete network arch bridge (Part 1) –

著：Hossein Yousefpour, Todd A Helwig, Oguzhan Bayrak  
 訳：会誌編集委員会海外部会

テキサス州フォートワース市の West Seventh Street Bridge は、2013年に建設された12連のプレキャスト・プレストレストコンクリート・ネットワークアーチ橋であり、コンクリート打設に先立ち、振動ワイヤーゲージがアーチに埋め込まれた。

埋込みセンサーにより、ひび割れを防止するためのプレストレッシング、輸送および床版の施工のデータが得られた。本計測工では、応力計算精度の評価手法も設計段階で生み出された。

キーワード：アーチ橋、プレキャスト

### 1. はじめに

アーチは、効率的に大きな荷重を支持するだけでなく、意匠的にも優れた形態を創り出す。歴史的に、アーチは広く橋梁構造に用いられてきた。しかしながら、近代では通常、意匠が重要な役割を果たすシンボリックな橋梁形式として用いられてきた。アーチは、基本的に圧縮力に対して抵抗するため、コンクリート橋はアーチに用いるには理想的な材料である。

建設技術および解析能力がシステムティックに向上した一方、主として建設費が高いために過去50年においてコンクリートアーチ橋の建設はわずかであった。コンクリートアーチは、時間を要するとともに労働集約的な木製あるいは鋼製の固定支保工かカンチレバー工法により建設されてきた。結果として、構造技術者は効率的かつ意匠的に魅力的なアーチ橋の建設技術の向上に興味を抱いてきた。

革新的な建設技術がテキサス州フォートワース市の West Seventh Street Bridge というシンボリックな橋梁において適用された。本橋は、2500 kNの12連のネットワークアーチからなり、アーチ部材は横に寝かされた状態でコンクリート打設を行い、鉛直に回転させて輸送と架設がなされた。この回転と輸送による大きな応力に抵抗させるために、タイおよびアーチリブとも緊張力が導入されている。

ネットワークアーチは、傾斜したハンガーを有するタイドアーチであり、ハンガーは少なくとも2本の他のハンガーと交差する構造となっている。密に配置されたハンガーは、アーチリブとタイとの間にほぼ連続的にせん断力を伝達させるため、アーチ部材の曲げモーメントとたわみを大幅に低減することができる。このため、大幅に使用材料数量を減じることができる。ネットワークアーチは、ノルウェイのアグデル大学 (University of Agder) 名誉教授 Per Tveit によって最初に、1950年代に軽量鋼材アーチとプレストレストコンクリート床版と組合せた

形で提案された。世界初のネットワークアーチ橋群は、ノルウェイの Steinjker Bridge (アーチ支間 79.9 m) と Bolstadstraumen Bridge (アーチ支間 83.8 m)、ドイツの Fehmarn Sound Bridge (アーチ支間 248 m) を含めて1960年代に建設された。以降では、鋼製のネットワークアーチ橋が世界中で建設された (表 - 1)。

表 - 1 近年建設された鋼製ネットワークアーチ橋の事例

| Bridge                       | Country        | Arch span length, ft | Year completed |
|------------------------------|----------------|----------------------|----------------|
| Bugrinsky Bridge             | Russia         | 1247                 | 2014           |
| Troja Bridge                 | Czech Republic | 657                  | 2014           |
| Lake Champlain Bridge        | United States  | 480                  | 2011           |
| The Brandangersundet Bridge  | Norway         | 722                  | 2010           |
| Florabrücke                  | Germany        | 435                  | 2010           |
| Blennerhassett Island Bridge | United States  | 878                  | 2008           |
| Palma del Río Bridge         | Spain          | 427                  | 2008           |
| The Providence River Bridge  | United States  | 400                  | 2007           |

Note: 1 ft = 0.305 m.

鋼製のネットワークアーチ橋は、工場製作された鋼製セグメントを用いて建設された。重量が軽いため、架設ヤードで床版部材ごと橋梁全体を組み立てて、輸送を行い架設することも良く行われた。典型的な施工順序は、以下のようになる。

1. タイおよび床版を支保工上で組み立てる。
2. アーチリブを支持するためのその他の仮設構造物を床版上で組み立てる。
3. すべてのアーチリブセグメントを架設し、適切に接合する。
4. ハンガーを架設し、必要に応じて緊張力を導入する。

ハンガーに所定の張力を導入するために、有限要素解析を用いた詳細なシミュレーションによる施工順序が検討された。この施工順序では、度重なる張力調整が必要になる場合もある。しかしながら、高次不静定構造のために、張力はモデル化する上での仮定、施工誤差および温度に大きく依存する。

2013年に完成した West Seventh Street Bridge は、おそらく世界初のコンクリートネットワークアーチ橋である。Tveitの草創期の示唆が高強度コンクリートアーチリブを用いてネットワークアーチ橋を造るというものであったにもかかわらず、筆者らは本橋より前にコンクリート製ネットワークアーチ橋が建設された記録を見出すことができなかった。それゆえ、West Seventh Street Bridge が世界初のコンクリートネットワークアーチ橋であると考えるのである。本橋のプロジェクトでは、コンクリートアーチのプレキャスト化は、現場での作業時間を大幅に減じるとともに、より高い品質管理を実現している。しかしながら、設計者は構造物のライフタイムにおけるもっともクリティカルな状態が施工中に生じることを予測した。構造物に生じる応力を予測するために、先進的な有限要素解析を用いる一方、万が一の施工中の損傷が依然として懸念された。そのため、施工中のアーチの挙動を評価するため現場計測実験を実施した。現場計測の一環として、アーチには計測器を設置してデータを収集し、アーチの安全性を確保し、設計上の仮定を検証するためにデータ解析が行われた。

本稿では、West Seventh Street Bridge の計測から得られた施工中の短期応力に着目した知見に関して報告する。革新的な橋梁の設計の概要に関して簡潔に報告する。計測器の取付け、モニタリングおよびデータ解析についても記述する。そして、最後に計測から得られた構造物の応力と設計値とのデータの比較に関して報告を行う。

## 2. West Seventh Street Bridge

新しい West Seventh Street Bridge は、フォートワース都心部と文化地区とを繋ぐ築100年の橋を架け替えるために設計された。その橋は4車線あり、トリニティ川の分岐点、多くの遊歩道を跨いでいる。

市職員にとって、架け替えられた橋の意匠はとても重要なことであった。テキサス州に新設された橋の大多数はPC桁橋であり、その橋種を採用することで事業を経済的に抑えることができた。しかしながら、新しい West Seventh Street Bridge は、市のシンボルとなり、さらに文化地区にある世界的に有名な5つの博物館への入り口として相応しいものであることを期待されていた。一方、高い交通需要のため、その新しい橋はできるだけ早く完成される必要があった。

現場の条件により、6つの同一長(49.83 m)同一形状の構造を用いた設計をすることができた。そのため、12個の同一形状プレキャスト、ネットワークアーチ橋で構成された革新的な工法(構造)を考案することができた。見た目の美しさという理由によりアーチ構造を採用することは決定されたが、全アーチ部の統一された設計とプレキャスト化により、著しく工事費を削減、開通までにかかる工期を短縮でき、PCアーチ構造物を活用可能にした。図-1にPCアーチ部の標準径間詳細図と幾何形状図を示す。

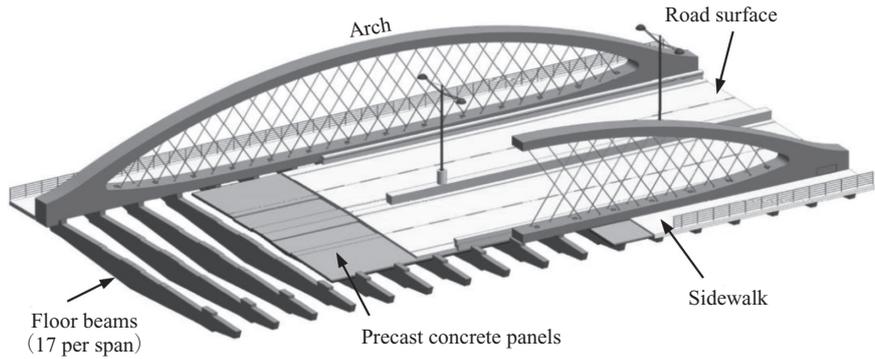
橋上には4車線と2歩道があり、歩道部は上部工を支

えるアーチの外側に配置されている。各コンクリートアーチには52本のハンガーが配置されており、アーチ内に2面配置されている。図-1に示すとおり、ハンガーは0.6 m間隔で配置されている。26本のハンガーは鉛直方向から35°傾いた配置となっている。これら向かい合った2面上に配置されているハンガーは、反対方向に傾いているため、結果的に典型的なネットワークアーチ橋と同じメッシュ形状となっている。

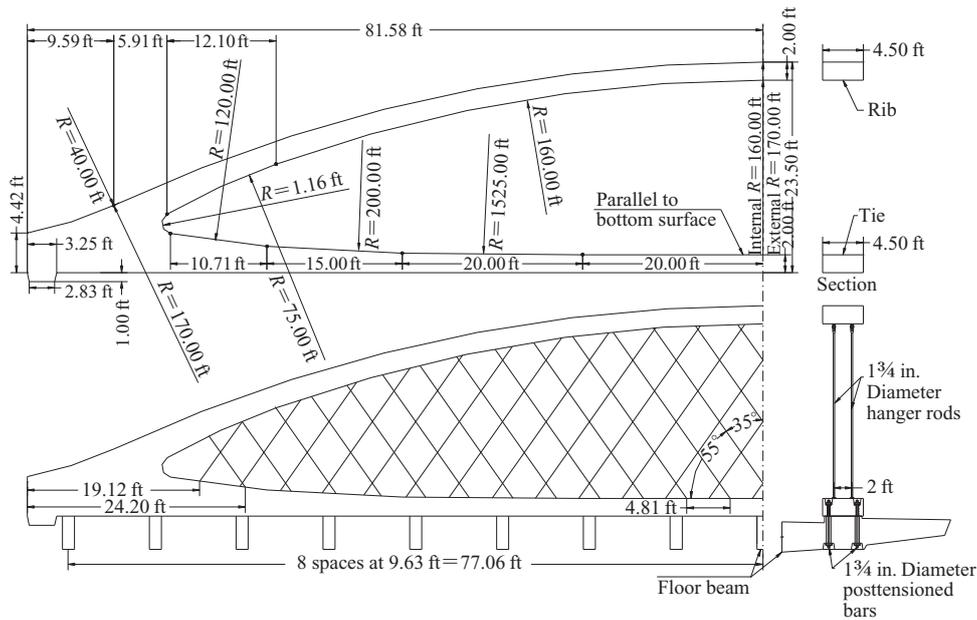
床版は、プレキャストのコンクリートパネルと、その上に後打ちされる場所打ちコンクリートから構成されている。床版は17本のPC横桁によって支持されており、PC鋼棒によってアーチ部から吊られている(図-1)。床版の梁は、プレストレス構造であり、支間中央の公称高さが1.7 m、そこから先細りの形状となってアーチ部での高さ0.9 m、端部の高さ0.53 mとなっている。これらの梁は、幅が0.4 mそして2.93 mの間隔で配置されている。プレキャストコンクリートアーチ部は、工事場所から1.6 km以内のヤードで製作されている。

West Seventh Street Bridge のアーチ部の施工ステップは次のとおりである。

1. アーチ部は橋に対して横倒しの状態で施工される。表-2にコンクリートアーチの配合を示す。
2. 回転中のひび割れを防ぐために、一次緊張はアーチ部になされている。リブ内の2組の緊張材は1430 MPa、タイの4組の緊張材は717 MPaに緊張された。それぞれの緊張材は19S15.7のケーブルで構成されている。図-2に緊張材の配置図を示す。
3. ハンガーを設置する。それぞれのハンガータイ部のシースを通り、取付け金具にねじ込まれている。ナットはハンガー部のタイ下面に取り付けられ、人力によって締められる。
4. アーチリブとタイの側面と底部を固定した6つのジャッキ設備によって、アーチ部を回転させることで所定の高さに設置する。これらの昇降フレームはアーチの中央部に対して対照的に配置されている(図-3)。昇降フレームは、リブ上と、タイ下面に配置されている一連の平衡装置と巻き上げロープからなる構台の機構によって支持されている。最初は、全ての昇降位置において同一高さまで引き上げられる。型枠を脱型すると、後方のみ(リブ部)巻き上げられる。アーチ部は、軸回転すること最終的な垂直配向にする(図-4(a))。アーチを90°回転したあと、アーチは側方に移動され、仮設支保工上に配置される。支保工はアーチの両端から2.1 m離れた位置で支持される。
5. 掛け違い部における緊張作業ができないため、緊張はプレキャストヤードで完成させておく必要があった。したがって、ポステンションの第2段階で、タイの緊張材は1430 MPaで緊張し、アーチリブの緊張材は717 MPaで緊張した。
6. ハンガーを緊張するために、上方のジャッキ作業を実施した(図-4(b))。油圧ジャッキは、のちにセッ



Details of a typical span (Courtesy of Joel Blok)



Geometry of the network arches

図 - 1 新しい West Seventh Street Bridge の標準径間詳細図・ネットワークアーチ幾何形状図

表 - 2 アーチ部コンクリート 配合表

| Parameter  | Quantity |
|--|----------|
| Required 56-day compressive strength, psi                  | 8 000    |
| Target 28-day compressive strength for mixture design, psi | 7 900    |
| Typical slump, in.   | 9        |
| Cementitious-material content, lb/ft <sup>3</sup>          | 25.9     |
| Fly ash replacement ratio (Class F), %                     | 25       |
| Water-cementitious material ratio                          | 0.36     |
| Aggregate/cement ratio                                     | 4.4      |
| Typical air content, %                                     | 1.4      |

Note: 1 in. = 25.4 mm; 1 ft = 0.305 m; 1 lb = 4.448 N; 1 psi = 6.895 kPa.

トされる横桁の位置でタイの下に配置され、タイを押し上げるために同時に作動させた。油圧ジャッキを作動させ、ハンガーのたるみが除去されたときに、ナットを締め付けた (図 - 4 (b))。油圧ジャッキはそのとき停止させた。結果として、タイの自重によりハンガーにプレストレスが作用する。上方のジャッキ作業中に、部材付け根付近のリブを固定し、過度

な引張応力を防ぐために、プレストレストコンクリートの架設用補強材 (strongbacks) は、上方のジャッキ作業前にリブに固定された (図 - 4 (c))。これらの架設用補強材は、すべての横桁を各スパンに取り付けるまでアーチに取り付けておいた。

7. いったんすべてのアーチと新しい橋脚が建設されると、すべてのアーチをプレキャストヤードから新しい橋脚へ動かした。各アーチは、自走式のモジュラートランスポーターによりプレキャストヤードから所定の位置に運搬された (図 - 4 (d))。アーチはクレーンで持ち上げられ、支承に設置された。
8. すべてのアーチを所定の位置に運搬し、支持させたとき、その道路を閉鎖し、古い橋梁はすべて取り壊された。横桁がその後設置され、新しい橋梁における床版の施工は交通への影響を最小限にするためにすぐに始められた。

この急速施工の措置は、120日間の通行止めとした。しかしながら、アーチはポストテンションやハンドリング操作があったため、設計チームは、施工中および供用

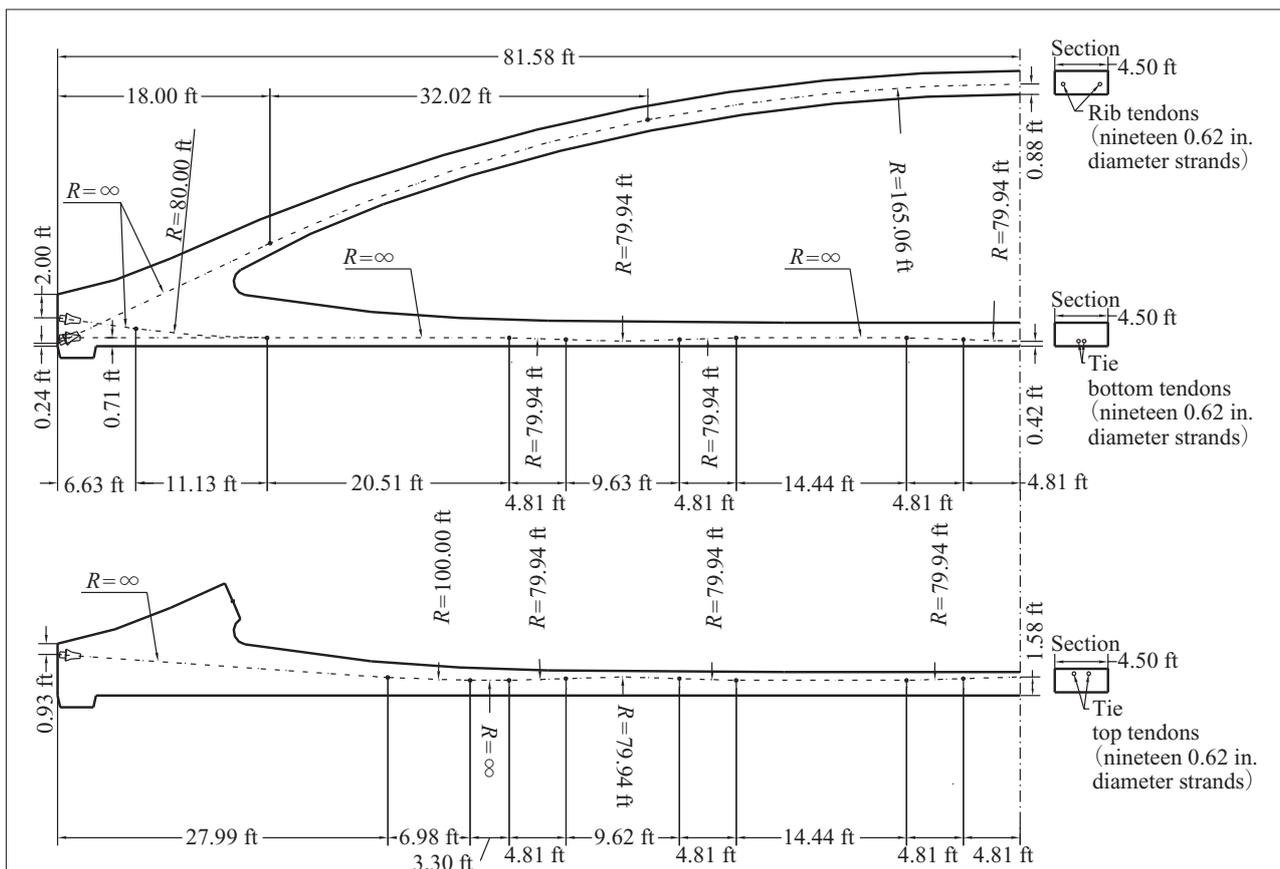


図 - 2 アーチ部 PC 鋼材配置図

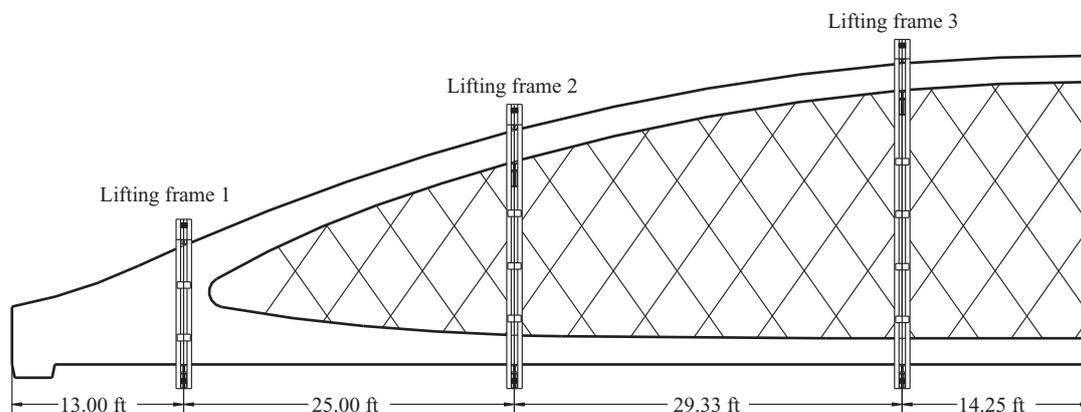


図 - 3 アーチ部回転用の昇降フレーム配置図

中にアーチが満足のいく性能を確保するために慎重に判断を下す必要があった。

回転と輸送を容易にするため、設計チームは、アーチリブやタイを可能なかぎりスレンダーにすることによってアーチの重量を最小化するように取り組んだ。さらに、アーチの重心を低くすることで、比較的に大きい7.6のアーチスパン/ライズ比を使用し、アーチクラウンでわずか7.16 mの高さとなった。アーチ高を低く経済的で美観を配慮したことにより、設計ではアーチリブに斜材を交差させなかった。しかしながら、橋梁の横方向の安定は、2つのアーチと横桁のモーメント剛結により作り出

されたフレーム作用により成り立たせた。

設計計算に関しては、技術者はアーチリブおよびタイを梁要素で3Dモデリングし、橋梁の解析モデルに使用した。アーチの付け根部を厚い面要素でモデリングし使用した。また、モデルはCEB-FIP 1990による分割施工や時間に依存したコンクリートの挙動の影響も加味した。ハンガーは棒要素を用いて3Dモデリングした。なぜなら、ハンガーには圧縮力に対する抵抗を期待してではなく、解析結果ではハンガーに予測した圧縮力とは非現実的な結果となった。そのような場合には、すべてのハンガーを引張状態となるようにハンガーの配置の修正を



(a) Arch rotation



(c) Arrangement of hydraulic rams and strongbacks during upward jacking



(b) Retightening the hanger nuts when the rams were activated



(d) Arch transportation

図 - 4 プレキャストコンクリートアーチの施工状況

行った。解析は繰返し実施された。

設計チームは、橋梁用解析ソフトで、ひび割れのない構造の初期固有値座屈解析を行い、AASHTO-LRFD-Bridge-Design-Specifications20に基づき、6車線の供用荷重と風荷重の組合せ供用荷重Ⅰとした場合の低次座屈モードの荷重係数が13.3となると予測した。

関連する座屈モードでは、リブの面外変形が見られ、アーチクラウンでは最大変形量となる。

AASHTOの強度Ⅲの荷重組合せに対して、荷重係数2を用いた非線形座屈解析による検討結果により、それらは横風によるものであることが分かった。

アーチクラウンでの最大面外変形量は50mmに抑えられ、道路の変位量はほぼ生じなかった。その結果、アーチ橋は座屈に対して安定な構造であることが見出されたが、建設時のひび割れ発生の可能性については問題が懸念された。

鉄筋コンクリート、プレストレスコンクリートにおいてひび割れは問題視される。アーチ施工中の潜在的なひび割れはリブの剛性を著しく低下させ、とくに横方向ブ

レースを使用しない場合、面外不安定な構造物となる。それゆえ、アーチ橋が大きな引張応力を受けず、ひび割れが生じないようにする対策が設計段階でなされることとなる。

リブは本来圧縮部材であるが、アーチを垂直方向に立たせるまで、橋を水平方向に保つことで、リブに圧縮力がかからないようにした。そうすることで、リブに過度な引張応力が加わるのがアーチを起き上がらせる段階となる。そのため、橋を起き上がらせる前に2つのリブ緊張材に1430MPaの緊張力を導入し、ひび割れのリスクを最小化する選択を設計チームは行った。

アーチを立たせる際に、死荷重によりリブへ圧縮力が伝わることとなり、プレストレスを導入する必要はなくなるが、その圧縮力は保障できるほど十分なものではない。特に、上方のジャッキ操作をしているときにそれが言える。そのため、設計チームは、不要なプレストレスが導入されることを避けながら、アーチリブに十分な圧縮力717MPaを導入した。建設中の部材の面内安定性もまた、重要なことである。タイ部材は、張力を介して、

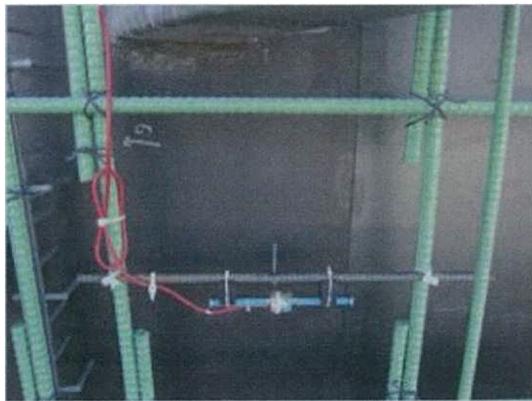
水平方向の力を伝達し、また、アーチ橋供用時の比較的高いプレストレスは、部材へひび割れが生じることを防ぐ要因ともなっている。しかしながら、死荷重により生じる緊張力は供用時に必要な緊張力の一部分となるため、残りの緊張力はポストテンションで与えることとした。タイの不安定さを考慮して、横方向に変位した後、緊張材がシースと接触するように、シース内部に小さな曲線を含ませるような設計とした。その結果、タイの二次変形が最小化することとなった。

設計チームにより、アーチ橋の不安定さを低減し、ひび割れが生じるリスクを最小限にする対策が取られたが、世界初の構造であったため、モデリングの前提条件や、応力計算の中に不確定要素が存在することとなった。一方、アーチハンドリング操作のための作業計画は主に受注者によって作られ、設計チームは直接関与していなかった。結果として、アーチ橋に過度な引張応力は生じることはなく、計測工を併用することで施工が可能とな

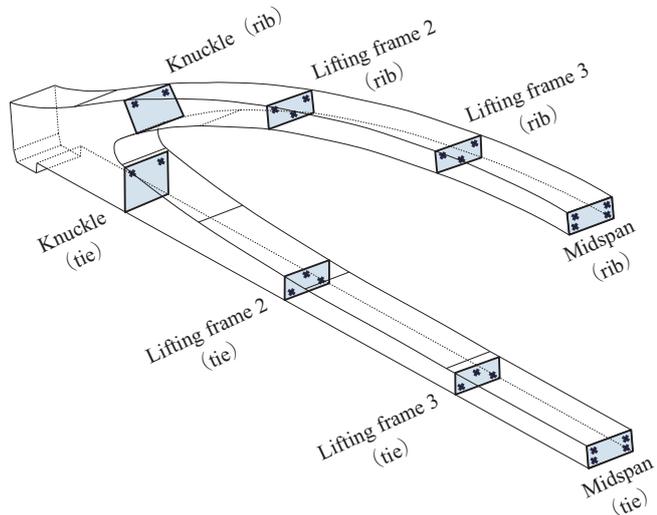
った。

### 3. 計 測

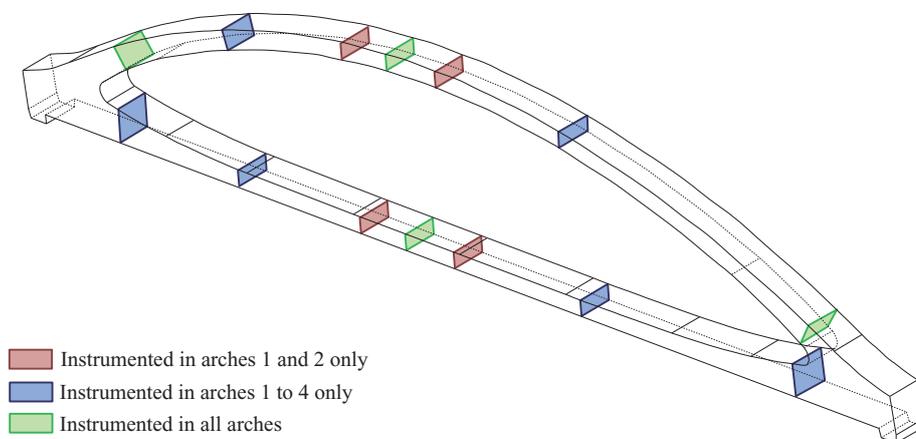
West Seventh Street Bridge は、224 個の振動ワイヤーゲージを使用して計測された。振動ワイヤーゲージは、ひずみの測定精度が  $1 \mu \varepsilon$  のひずみ変換機と温度の測定精度が摂氏  $0.5^\circ\text{C}$  の温度計で構成されている。振動ワイヤーゲージは、各アーチの型枠組立前に設置された。各振動ワイヤーゲージは、アーチの直角方向の鉄筋に固定した D10 の鉄筋に設置された。図 - 5 に示されるのは、コンクリートの打設に先立ち、アーチの鉄筋に設置した振動ワイヤーゲージである。また、最初に施工した 2 つのアーチに埋め込まれた振動ワイヤーゲージの位置を示している。計測する断面は、設計チームと連携し、支間中央断面および回転中昇降フレームの上になる断面、リブとタイの付け根部の断面を選択した。これらの断面の振動ワイヤーゲージの配置は、断面に発生すると予測され



A vibrating-wire gauge tied to the arch reinforcement



Arrangement of vibrating-wire gauges in different sections of the first two arches



Instrumented sections in different arches

図 - 5 アーチに設置した計測機器の詳細

るひずみに基づいて選択した。St. Vanant's の原理によると、非線形のひずみが分布する領域の乱れが、荷重または平面の不連続な位置からある深さの位置に存在すると仮定されている。ひずみ分布が乱れないと想定されている他の部分では、平面は保持され、ひずみ分布も線形となる。ひずみ分布が乱れていない領域では、線形補間または外挿法を断面の任意の位置のひずみと応力の計算に使用できる。しかし、乱れた領域ではひずみの分布が非線形となり、ひずみの線形補間または外挿法は無効となる。付け根部を除いたすべての計測断面を含む、構造物の乱れていない領域は、3～4個の振動ワイヤーゲージを使用して計測された(図-5)。その結果、それぞれの断面のすべての隅角部の応力は、平面保持の法則を用いて見つけることができた。しかしながら、接合部の領域では、ひずみの分布は非線形であると予想され、振動ワイヤーゲージは局所ひずみを示すと予想される。したがって、これらの断面の最大応力の発生が予想される位置に2つの振動ワイヤーゲージを設置した。

最初に製作した2つのアーチは、設計者が大きな応力を予測したすべての断面にゲージを設置した。設置する断面は、のちに製作するものほど、徐々に減らした。図-5は、それぞれのアーチでの設置位置を示している。

運搬中のアーチに対するモニタリングに対応させるために、配線のさばきの不要な無線データ収集ネットワークを使用した。埋め込まれた振動ワイヤーゲージの配線は収集ボックスに接続され、データを受信したのち、無線通信によりデータ収集システムに送られる。無線接続は、建設現場での長い配線を省略できるだけでなく、データロガーの必要チャンネル数も減少することができ

る。データ収集システムは、構造物の遠隔監視を有効にするセルラーモデムに接続されていた。

モニタリングは、橋梁の供用開始まで行った。施工のスピードに応じて、異なる計測速度が、振動ワイヤーゲージの計測で使用された。入手可能なインターフェイスアナライザーを有する1機の振動ワイヤーゲージの最大計測間隔は2秒に1回だったが、計測は長期にわたり行うため、計測間隔を延ばして設定した。いくつかのアーチが同時に施工中だった場合には、適切な計測間隔を満足させるため、より多くのデータロガーを設置した。このように配置した結果、150秒ごとのゲージの計測結果が研究者に与えられた。これは、ポストテンションのような急な施工中の変化にも対応可能であった。計測は、施工をしていないときでも、温度変化による影響や時間依存的な影響を捕捉するために1時間ごとに実施された。

※6号へと続く

*This article was first issued in PCI (Precast/Prestressed Concrete Institute) Journal, 2015, Volume 60, Number 5, page 30-70*

\* : 会誌編集委員会海外部会  
 秋山 博 (株) 銭高組  
 横田 剛 (株) ビーエス三菱  
 石井 優 (鹿島建設 (株))  
 濱崎 景太 (首都高速道路 (株))  
 田中 慎也 (株) IHI インフラ建設)

【2016年8月1日受付】



図書案内

PC 技術規準シリーズ

## 外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法 設計施工規準

定 価 4,860 円 / 送料 300 円

会員特価 4,000 円 / 送料 300 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編

技報堂出版