

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（後編） – Construction stresses in the world's first precast concrete network arch bridge (Part 2) –

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

4. コンクリートの機械的性質の推定

コンクリートの実際の弾性係数と圧縮強度は、データを処理する際に不可欠だった。そのため、材料試験プログラムでは、アーチに使用されるコンクリートの弾性係数 E_c と圧縮強度 f'_c の測定を行った。アーチで使用されるコンクリートの充填性を確認するために、施工業者は最初のアーチを打設する前にモックアップセグメントを製作した。モックアップで使用したコンクリートから $100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ の供試体を製作した。全48本の供試体は ASTM C469 にしたがって弾性係数の試験を行った。基準試験では8本の供試体を圧縮強度の40%まで載荷し、これらは弾性域に留まっているとみなされた。このため、40本の供試体は ASTM C39 にしたがって圧縮強度について試験を行った。これらの試験結果は式(1)を開発するために使用された。これは、高強度コンクリートの弾性係数と圧縮強度を関係付けた、一般的に使用される形式の式である。

$$E_c = 39\sqrt{f'_c} + 1350 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

E_c : コンクリートの弾性係数 (ksi)

f'_c : コンクリートの圧縮強度 (psi)

供試体とは異なる実構造物の硬化熱の影響を考慮するために、実構造物の弾性係数はマチュリティー法から得られた圧縮強度と式(1)に基づいて推定した。著者はアーチで使用されたコンクリートの最終の圧縮強度と関連付けるために、施工業者による調査結果を使用した。振動ワイヤーゲージにより測定された温度を使用して、リップ・タイ・接合部の3つの平均温度を任意の時間ごとに計算した。それらの温度と施工業者による調査結果を使用してコンクリートの圧縮強度を、リップ・タイ・接合部でそれぞれ計算した。しかしながら、リップ・タイおよび接合部の推定強度の差は、1次緊張時から施工完了までの間でわずかなことが分かったので、最初に製作したア

ーチの移動は材齢6日で行った。そのため、それらの3つの圧縮強度の平均値は圧縮強度と材齢を関連付ける相関式(2)を開発するために使用された。この方程式の開発では、GL2000として知られる Gardner と Lockman のモデルに使用されたものと同様の形式が使用された。

$$f'_c(t) = 7500 \left(\frac{t^{0.75}}{1.75 + 0.8t^{0.75}} \right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

t : コンクリートの材齢 (日)

この式は、それぞれの材齢の実構造物の弾性係数を推定するために式(1)と組み合わせられた。マチュリティー法の手順と式(1)(2)の開発に関連する詳細は他の文献でも確認することができる。

5. データ処理

計測から得られたデータを解釈するためにはかなりの努力が必要であった。振動ワイヤーゲージのひずみやそれぞれのセンサーの位置の温度を含む生データは、センサーが設置された断面の隅角部の応力を計算するために使用された。

応力計算の最初のステップはセンサーが配置された断面の隅角部のひずみを計算することだった。アーチの応力が乱れていない断面は、平面保持の仮定が成り立つため、断面の任意の位置のひずみは解析幾何学を用いて計算することができる。しかしながら、接合部のような乱れた領域では、ひずみの分布は非線形となるため、振動ワイヤーゲージを設置した箇所のみ計算することができる。

測定されたひずみには、温度変化やクリープ・収縮などの時間や環境の影響が含まれる。荷重による応力とひずみの関係を計算するためには、これらの要素はひずみの履歴から控除される必要があった。

応力計算によりクリープおよび収縮の影響を最小にするために、各施工段階のひずみの変化は、その段階に対

応する弾性係数によって別々に計算され乗じられる。

式(3)で表されるように、その全応力は、各段階の動作に応力の増分を追加することにより推定される。

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^n E_{ci} \Delta \varepsilon_i \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

- E_{ci} : i 番目施工段階のコンクリートの弾性係数
- $\Delta \varepsilon_i$: i 番目施工段階のコンクリートのひずみ変化
- σ : コンクリートの応力

この方法では、施工中以外に発生する応力変化を考慮しない。たとえば、プレストレス損失の影響は検出されない。著者らはアーチ応力の長期的な変化の影響を考慮するため、応力計算において、コンクリートの時間依存性変形を組み込む高度なデータ処理方法を用いた。

しかしながら、前述のような効果は、追って報告するが、本研究の焦点である短期応力変化に対しては、ほとんど影響を与えないことが予想された。

温度変化が応力計算に与える影響を排除するため、つねに同一温度のデータポイント間で比較を行った。各緊張材の緊張時における熱変化は無視できる程度であることから、プレストレス導入のような段階的な施工時に、各緊張材の応力変化を計算することが可能となるが、アーチの回転や輸送などによる応力変化は、作業前夜の値を取得し、比較をすることによって得た。温度の影響は、前と同じ温度での時間を特定することによって最小に抑えられた。正確にすべての振動ワイヤゲージの位置で同じ温度の2つのデータポイントを見つけることは現実

的ではなかった。しかし、次の基準が満たされた場合には、熱効果は2つのレコードの間で無視できるものと仮定した。両方のポイントは、一晚(日没後~日の出前)記録することにより、アーチへ熱を与えた際の太陽光の影響が最小に抑えられ、平均温度(振動ワイヤゲージ温度センサーで測定した平均測定結果)はレコード間で0.6℃以上の差は確認されなかった。また、温度センサーの測定値はレコード間で2.8℃異なっていた。

6. 結果と考察

6.1 プレストレスによる応答

図-6は、プレストレス一次緊張時の、一般的なアーチの応力変化を示す。また、図-7は、リブ緊張材緊張前のタイにおけるプレストレス二次緊張時の応力変化を示している。

計測では、リブとタイの内側に個々の緊張材の応力を検出することができた。計測結果により、構造の応答を評価するための各緊張材に対するアーチ橋の解析モデルが確認された。また、プレストレス導入されたリブは、リブにおける応力変化を比較することによって、リブ要素とタイ要素の相互作用を評価することができる。それは、逆の場合も同様である。

図-6および図-7はアーチリブとタイの応答がプレストレス導入中において比較的独立していたことを示している。各緊張材には、360MPa単位でプレストレスを導入した。プレストレス一次緊張時には、リブ中央において0.7MPaの応力増が各リブ緊張材に生じるが(図

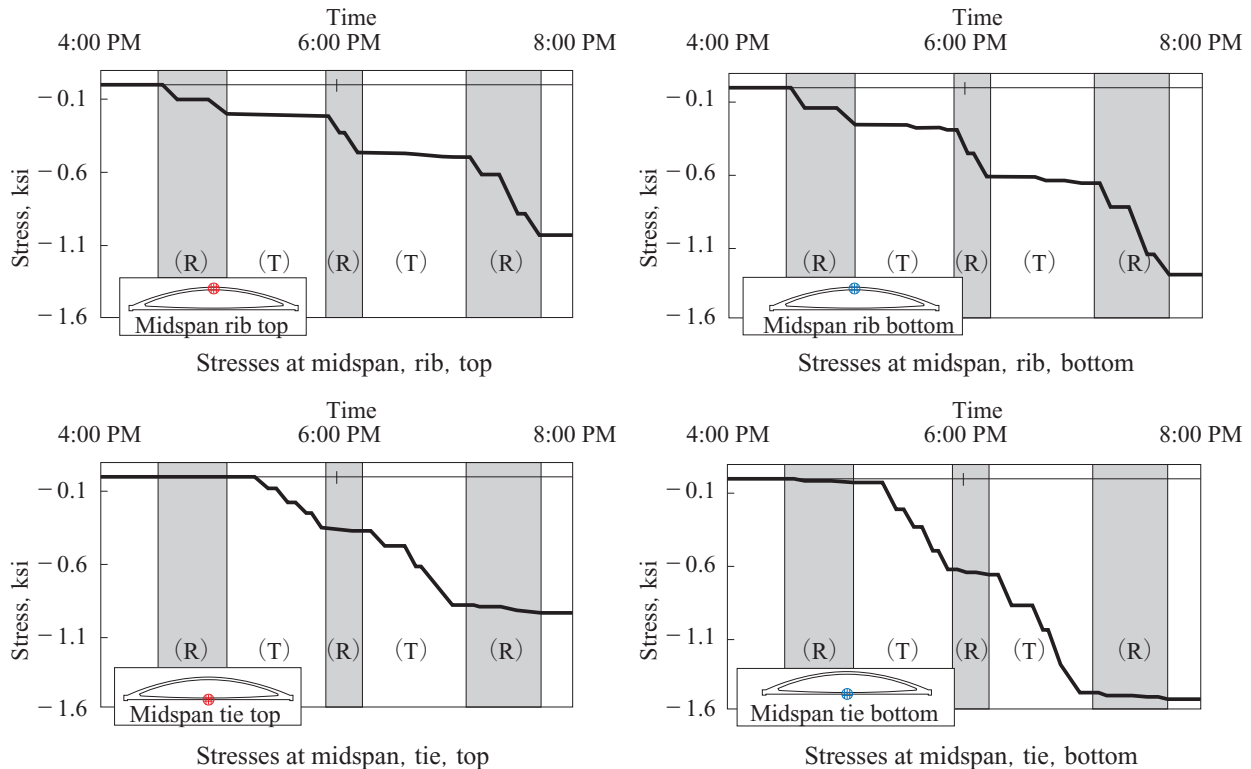


図-6 プレストレス一次緊張時における2ヒンジアーチへかかる応力

※ R : リブにプレストレスが生じる区間 ;

T : タイにプレストレスが生じる区間。1 ksi = 6.895 MPa

- 6 左上 R 区間), タイ中央においては, わずかな応力変化しか確認されない (図 - 6 左下 R 区間)。プレストレスの増加がリブに作用したとき, タイの最大応力変化はどの位置においても 0.14 MPa より小さくなる。さらに, プレストレス二次緊張時において, タイの応力変化は同様の傾向を示し, リブにおいてはわずかに変化していることを確認した (図 - 7)。

緊張時のリブとタイに働く小さな相互作用は, あとに働く外的な荷重に対するアーチの作用と対照的である。鉛直方向アーチでは, 外的な死荷重や活荷重によりアーチ作用を受ける。静的釣合いに支持点に鉛直反力を与えることでリブに圧縮力, タイに引張力を作用させる。プレストレスにおいても同様にリブに圧縮応力を与える。しかしながら, アーチや定着体の形状決定は, リブ定着体のアンカーがリブの図心から相対的に小さな偏心となるように慎重になされた。結果として, リブの内部応力とプレストレス力によるでの静的釣合いにより, タイ部材には大きなせん断力または軸力が, リブかタイのどちらか一方で大きな曲げモーメントが発生しない。一方, タイとリブの曲げ剛性がそれらの軸方向剛性より小さいため, ほかの部材に目立った曲げ応力を発生させないで軸方向変形がこれらの部材それぞれに起こる。剛性のあるアーチ部付け根ではリブとタイの変形による局所的な拘束が起こるが, これらの部材間の非常に小さい相互作用の影響はアーチ部付け根にほぼ限定され, 実質的にリブやタイの全体的な作用に影響を与えない。本稿の内容にはないが, 著者はアーチの有限要素シミュレーション

により確認している。

ほかに重要なことは, アーチリブの曲線的な形状にもかかわらず, プレストレスはこの部材に著しい曲げを引き起こさないことにある。この挙動はアーチの円形の輪郭と設計者によるケーブルや定着位置の慎重な選択によるものである。ポストテンションに対するアーチリブの作用は, 半径方向の力の影響による圧縮状態にある圧縮リングに挙動が似ている (図 - 8)。アーチ設計による構造特性はプレストレスによる持続荷重下のアーチリブに長期的な曲げ変形を減らすうえで重要であった。

6.2 回転による応答

図 - 9 に回転での3つのステージを示す。第1ステージでは, 回転の初めに吊位置が均等に持ち上がった段階で吊り上げる。第2ステージでは, アーチが昇降フレームによって支持されている間, アーチを垂直に起き上がらせる。第3ステージでは, 一時的な支持において昇降の組立てとその取付けからアーチを取外す。

図 - 10 に回転作業中の2つのアーチの支間中央での典型的な応力変化を示す。吊上げ時に, リブとタイでの作用はリフティングフレーム間の曲げにより成り立っている。しかしながら, 吊上げ時の応力変化の大きさは標準的に小さい。回転前のリブとタイの頂点に位置した A 点や E 点 (図 - 10) では, 吊上げ時に圧縮応力が増加する傾向がある。同様に, 回転前のリブやタイの底面に位置した C 点や E 点にも圧縮応力の増加を期待している。しかしながら, 図 - 10 では, 2つのアーチの吊上げ時に, G 点では圧縮応力が増加し, C 点では圧縮応力の

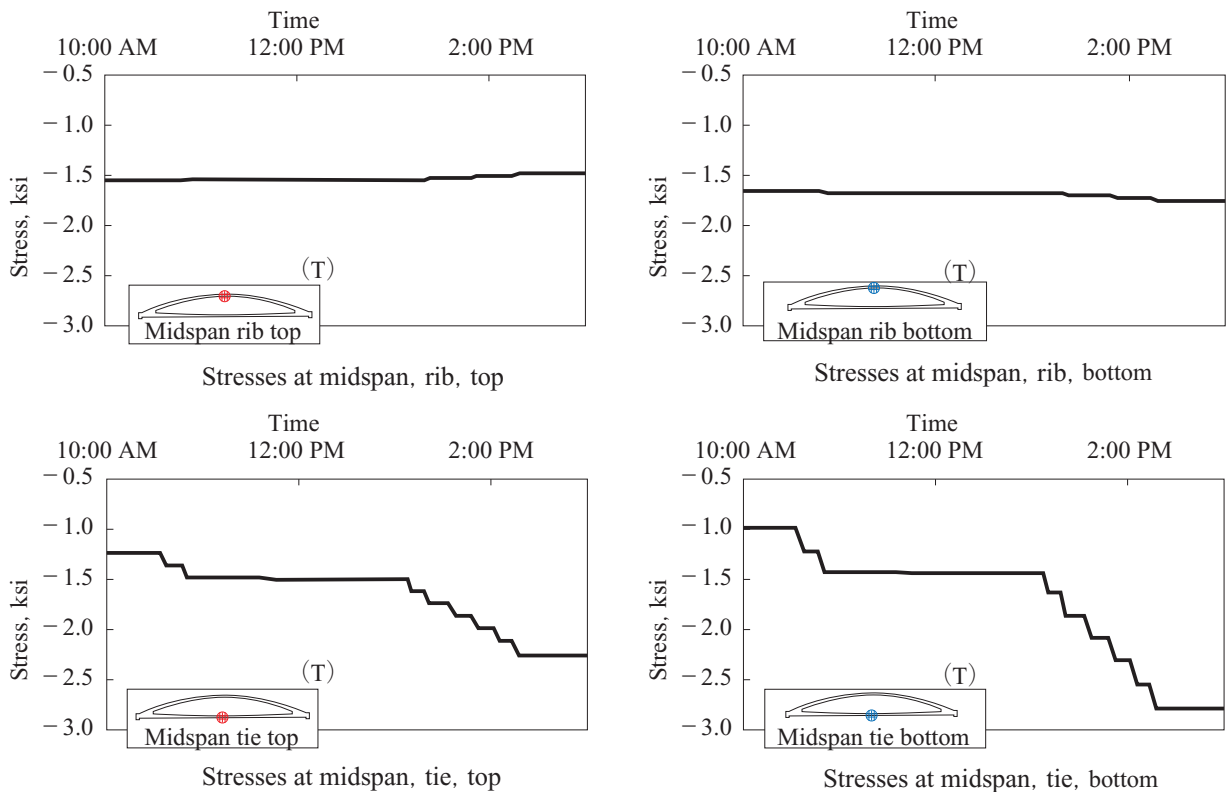


図 - 7 プレストレス二次緊張時における 2 ヒンジアーチへかかる応力
※ T: タイにプレストレスが生じる区間。1 ksi = 6.895 MPa

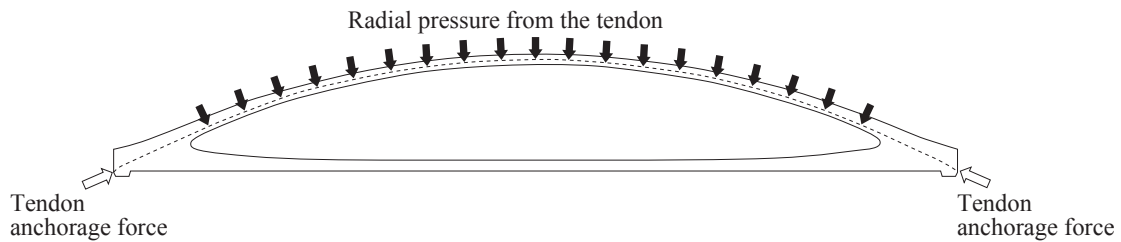


図 - 8 ポストテンションによるリブとアーチへの作用力

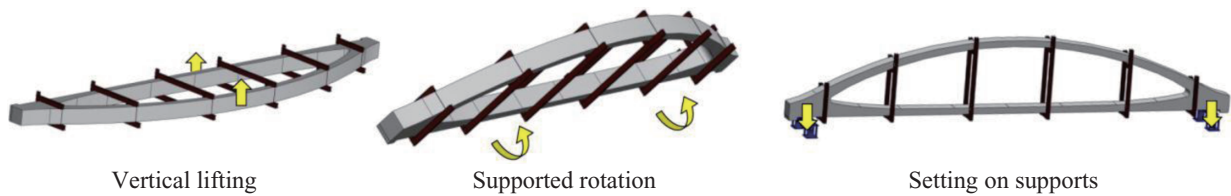


図 - 9 回転作業の3ステージ ※図中の鉛直材は架設時のリフティングフレームである

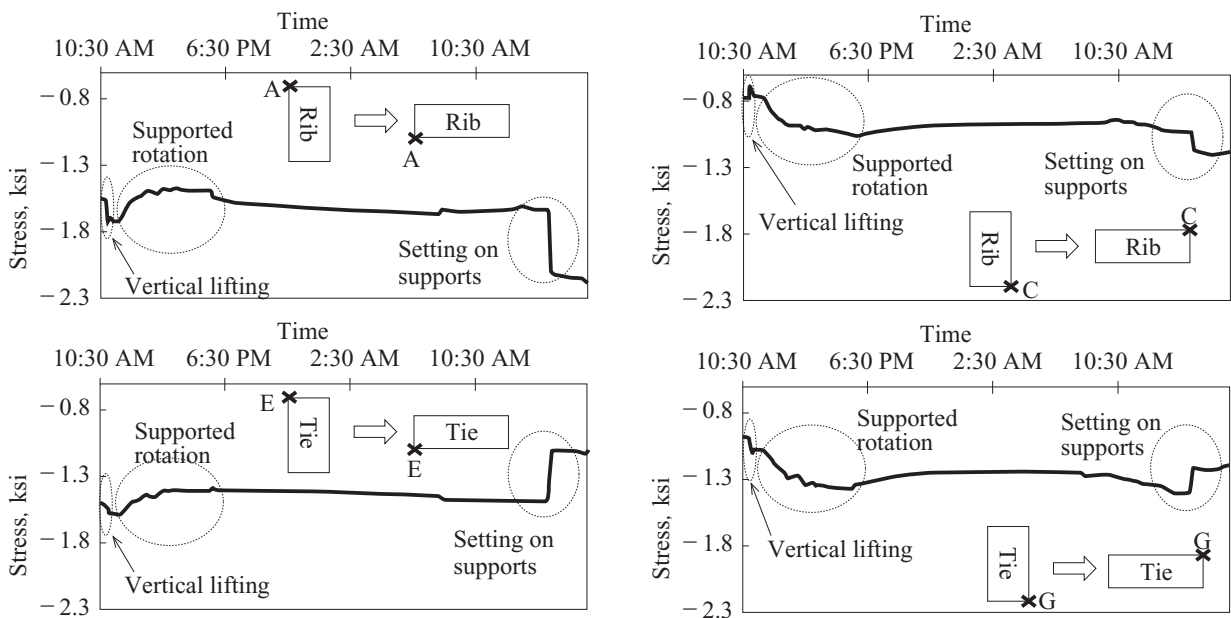


図 - 10 回転中のリブとタイでの支間中央の応力変動
 ※各グラフ中の×印は、応力を測定した角を示す。1 ksi = 6.895 MPa

一時的に減少していることを示している。言い換えれば、吊上げによりリブとタイのそれぞれにおける支間中央において内的全圧縮力が増加される。このことは鋼製型枠とアーチとの相互作用による可能性がある。吊上げ時にアーチは底枠から脱型される。したがってアーチと型枠の摩擦は取り除かれる。結果として、プレストレス力の局所的な再分配はアーチに生じたと思われる。

支持回転中の応力変化は緩やかで相対的に小さかった。アーチはこのステージ中に自重が載荷されているが、それは6つのリフティングフレームにより支持され、自重はアーチの長さ方向全体に分散されていた。したがって、アーチアクションは支持回転中に起こらない。このステージの兆候のほとんどは、支持回転中にリブとタイ部材が連続梁に似た挙動で二軸曲げによって生じる。

仮設支保工に載った状態の、アーチ部設置時の応力変化は、早くそして比較的大きいものであった。この状態の間、アーチアクションはフルに発揮されていた。そのため、この施工段階ではアーチリブ部における圧縮応力が著しく増加するに伴い、タイ部では圧縮応力は減少した。応力の変化が比較的大きいが、アーチ部は完成形における上載荷重と活荷重にも耐えられるよう、より安全に設計されている。その結果、これらの鉛直方向の回転に伴う応力に対して十分に耐える構造となっている。したがって、アーチ部の支持回転時の応力の計測は、アーチ部の耐力を保証するため、より重要であった。

回転時の応力を算出するために、設計チームはアーチ部の解析モデルを作成した。その解析モデルでは、アーチリブ部とタイ部はテーパー梁要素を用いており、リブ

部とタイ部の接合部領域ではシェル要素を用いて再現している。より現実的な解析結果を得るために、解析モデル上には、アーチ部の昇降・回転をする際用いられるすべてのリフティングフレーム、巻上げワイヤー、そして平衡装置を再現した。動的作用を考慮するために、作用する死荷重すべてに対して割増係数 1.5 が掛けられた。

図 - 11 に、アーチ部回転時に計測された応力度の最大値および最小値を示した。この施工段階では、どのアーチ部でも引張応力は計測されなかった。そのためアーチ部は回転中ひび割れのおそれはなかった。計測された応力度は、設計チームによる解析結果に対して、合理的に許容できる値であり、計測値と解析値との間で違いがある箇所については、主に解析結果がひび割れの可能性を過大に評価した箇所であった。

アーチ部の回転作業はゆっくり行われ、振動ワイヤージージひずみ測定と現場での計測からは、過大な動的作

用が起こる兆候を示さなかった。しかし、今後のプロジェクトにおいて（解析モデルを）潜在的に活用するためには、この現象に関する結論を出すため追加でより詳細な解析を行う必要がある。

6.3 ジャッキアップ

アーチ部とリブ部の接合部領域にとって、ジャッキアップ時が最も厳しい状態である。設計チームは、ジャッキアップのため油圧ラムが作動している際、『アーチ部が事前に補強されていない場合、接合部領域内のリブ部上端部において、引張力が発生する』と予想した。そのため、ジャッキアップ時に応力を常時計測することが、ひび割れを発生させないためにもっとも重要であった。

図 - 12 に、油圧ラム稼働中におけるアーチ部で計測された応力度を示す。この時点では、ハンガーのナットは再締め付けを行っていない状態である。接合部領域における発生応力は、設計時に予想された値に近いもので

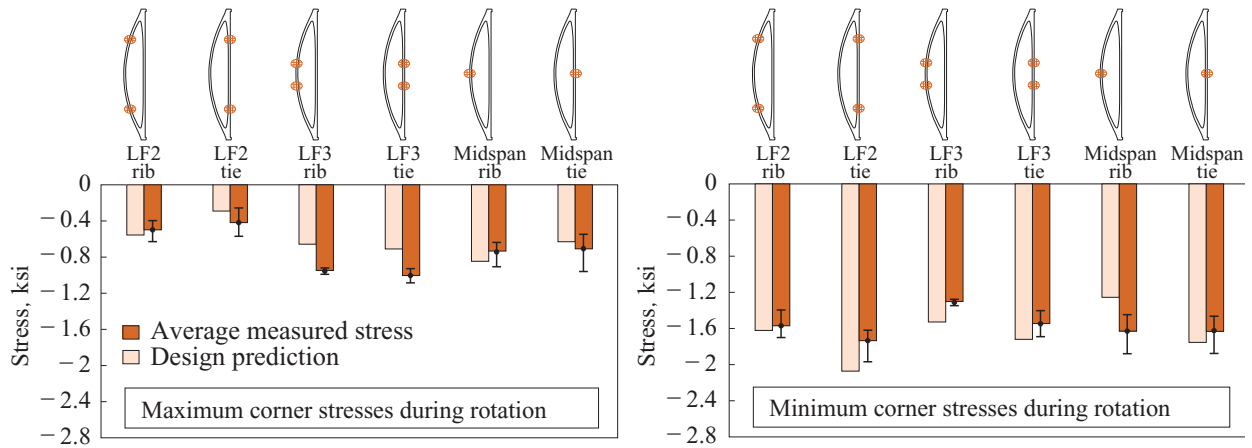


図 - 11 アーチ部回転時における隅角部応力の最大値および最小値
※黒い実線は異なるアーチ間での実測された応力範囲を示す。1 ksi = 6.85 MPa

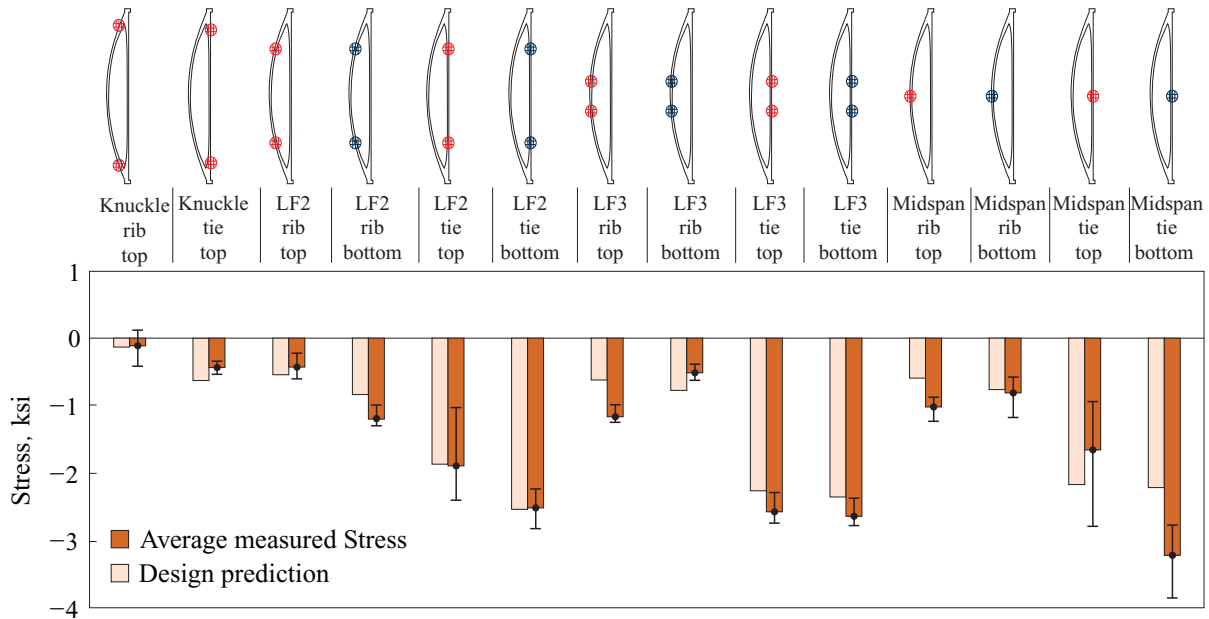


図 - 12 ジャッキアップ中におけるアーチ部の最大応力（油圧ラム解放前）
※黒い実線は異なるアーチ間での実測された応力範囲を示す。1 ksi = 6.85 MPa

あった。しかし、黒線で表示したとおり、異なるアーチ間の応力度の変動性は比較的に大きい。一般的に、接合部領域内のリブ部上端において圧縮応力が発生していることに対し、いくつかのアーチでは、同じ箇所において引張応力が発生した。これらの引張応力は、コンクリートのひび割れ発生応力に対して十分に低いものであり、アーチ部にひび割れが発生するおそれはなかった。タイ部の支間中央部に発生する応力度も、変動性の高いものであった(図 - 12)。タイ部下端に発生した応力は、解析値よりも大きかったが、コンクリートの圧縮応力度に対して 50% 低い値であった。

計測された応力度の変動性は驚くことではなかった。しかし、ジャッキアップ作業は同様の手順で行われてい

るにもかかわらず、ジャッキアップ作業前の手動によるハンガーの締付けにおいて異なる一連の未知な荷重が、各アーチごとに発生した。さらに、アーチ部は高次不静定構造であるため、ジャッキアップに先立って、温度および時間依存変形による異なる拘束力がハンガー部に発生する可能性があった。その結果、ジャッキアップは、ハンガーに発生する荷重を予測できない初期状態のものから予測可能な最終状態のものへと変化するように設計されているため、それぞれのアーチに対して多様な影響を与えることを予想されている。しかしながら、ジャッキアップによる応力は、ハンガーを段階的に調整する(鋼ネットワークアーチ橋施工での一般的な方法)際に発生する応力と比べて、より持続的である傾向がある。連続

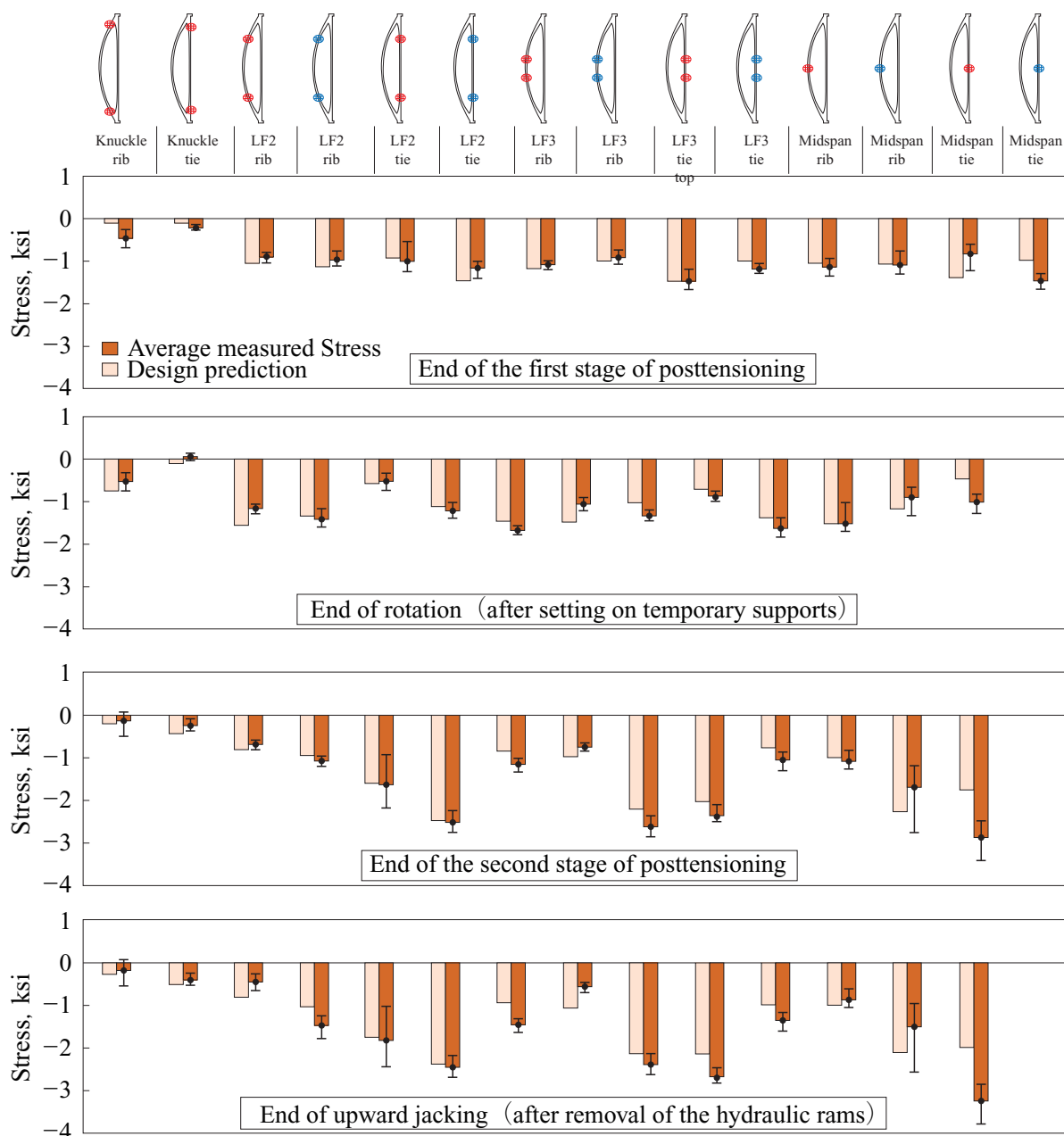


図 - 13 各施工段階完了後のアーチの応力状態
 ※黒い実線は異なるアーチ間での実測された応力範囲を示す。1 ksi = 6.85 MPa

的な応力載荷では、より多くの不確実性に加え、多様な現象が示される。より多くの不確実性というものは、解析モデル作成時に行う仮定とハンガーの時間依存応力によって発生していると思われる潜在温度の変化を想定したものである。

6.4 施工段階毎の応力

図 - 13 は、プレキャストヤードにおける主要な施工段階完了後のアーチの応力を示している。設計計算は、製作時の応力を予測するという点においておおむね良好な推定精度であった。異なるアーチ間でのコンクリート応力の測定値にはバラつきが見られたものの、設計計算は主要な応力の変化をとらえることができるとともに、部材移動中の安全も確保することができた。応力の計測値と設計値との差がもっとも大きかったのはタイの下縁であり、設計値はコンクリートの圧縮応力を低めに推定していた。しかしながら、コンクリートの応力は線形範囲にあり、差異としては大きな問題とはならないものであった。

橋梁完成時の累計応力はプレストレスと死荷重に大きく影響される。供用が開始されて交通解放された後、静的な活荷重テストが最も計測機器を多く取り付けた支間に対して、4台の砂を積んだトラックを用いて行われた（1台あたり約 220 kN）。計測機器を設置した箇所での活荷重による最大応力度は、約 1.4 MPa であり、図 - 13 に示した施工時応力度に対して比較的小さなレベルのものであった。活荷重試験に関する詳細は、別途報告する。

7. 結 論

本報告では、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における短期応力の評価に関して述べた。West Seventh Street Bridge は、アーチの挙動を把握し、安全性を確保するために施工期間を通じて埋設型振動ワイヤゲージを用いて応力モニタリングを実施した。本報告における主な結論は以下のとおりである。

1. 設計計算はプレストレス導入および部材の移動におけるアーチの挙動はおおむね精度良く推定できた。結果としてひび割れを誘発させるおそれのある引張応力が発生することなくつねに圧縮状態であり、圧縮強度の 50% 以下に収まっていた。計測された応力の平均値と設計値との差異は、仮定した弾性係数と実際との差や計測されたひずみから応力を求めることの困難さによるものであると考えられる。
2. 施工時の短期応力は同一のアーチであっても、とくに鉛直方向に回転させた場合に大きく相違する可能性があることが分かった。手作業によるハンガーの締付けの不確実性やアーチ間での異なる温度がこれらの差異に寄与している。本プロジェクトで観測された設計値と実測値との差異は安全性を脅かすものではなかった。しかしながら、モデル化の高度化の如何にかかわらず、信頼性の高いネットワークアーチの応力推定に

において不確実なハンガーの条件を考慮しなければならない。設計手法としては、ハンガー張力をパラメータにさまざまな条件を考慮して、予見不可能な剛性の分布があったとしても構造物に過大な応力を生じさせないようにするのが好ましい。

3. これらのアーチと同様にひび割れに対して敏感なその他の構造物の設計を完了させる前に材料に関する検討をとくに推奨する。弾性係数、クリープおよび収縮がコンクリートの応力に影響を及ぼす。したがって、設計にあたりこれらの設計パラメータの現実的な設定が重要となる。こうした検討は、しばしば設計初期段階では実用的でないにしても、最終のコンクリート配合が決定した段階で解析におけるパラメータの値を更新することは可能である。

筆者らが知るかぎりここに述べた研究内容は、あらゆるコンクリートタイドアーチの施工における最初の取組みとなるものである。本研究で得られたデータは将来のコンクリートアーチのモデル化において利用価値の高いものである。

8. 謝 辞

筆者らは、本研究に対して資金提供をいただいたテキサス州交通局に深く感謝いたします。また、以下に示す人々にはとくにお世話になりました。

- ・同橋を設計するとともにご指導いただいた同交通局のエンジニアである Dean Van Landuryt 氏と Courtney Holle 女史
- ・交通局のその他多くのエンジニアや代表者
- ・本研究において顕著な支援をいただいた施工業者である Sundent Construction
- ・研究の補助を担ったテキサス大学オースチン校の現役および修了された大学院生の Jose Gallardo, Ali Morovat, David Garber, Kostas Belivanis, Vasils Samaras および Helmal Patel の諸氏

なお本研究で得られた知見意見および推奨事項は筆者ら独自のものであり、テキサス州交通局の意向を受けたものではないここに付言します。

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) 錢高組
 横田 剛 (株) ビーエス三菱
 田中 慎也 (株) IHI インフラ建設
 濱崎 景太 (首都高速道路 株)
 石井 優 (鹿島建設 株)

【2016年10月14日受付】