

実橋における施工時挙動計測と再現解析によるひび割れ抑制対策の検討

国立研究開発法人 土木研究所 ○高瀬 弘  
 国立研究開発法人 土木研究所 正会員 工修 野田 翼  
 国土交通省 国土技術政策総合研究所 正会員 横田 剛

Abstract: According to recent periodic bridge inspection results, initial defects such as cracks and deformation have been reported on relatively new PC bridges. The cause can be considered that several factors such as design, construction materials, construction load and unfavorable temperature condition during the construction affected these bridges comprehensively. By analyzing those defects from initial and periodic inspection records, it was found that most of initial defects occurred on post-tensioned PC box girders of bridges which required separate construction and/or rapid construction. Therefore, behavior of PC box girder bridges constructed by overhanging method was measured by attaching strain gauges. This study presents the results, factors that increase risk of cracking, and countermeasures for reducing cracks on bridges to be constructed under the same conditions.

Keywords: Bridge periodic inspection, Crack, Behavior measurements

1. はじめに

近年、コンクリート橋の橋梁定期点検結果より、供用開始後2年以内に行われる初回点検までの間にひび割れや変形による変状(以降、初期変状)が報告されている。初期変状は、橋の耐荷・耐久性能の実現に好ましい状況ではないため、初期変状として多いひび割れに対する抑制対策を検討した。PC橋の定期点検および初回点検結果から初期変状を分析した結果、ポストテンション方式PC箱桁(以降、ポステン箱桁)で分割施工や急速施工を行う橋梁に初期変状のひび割れが多く発生していることがわかった。よって、本研究では初期変状原因特定のため、張出し架設中のポステン箱桁に計測機器を取付け、ひずみなどの挙動計測を行い、再現解析との関係から要因を分析した上で原因を特定し、初期変状のひび割れを抑制できる対策方法を検討した。

2. 定期点検および初回点検結果の整理とその要因

平成20~24年に実施された定期点検および初回点検の初期変状(ひび割れ)について、橋梁形式別とひび割れパターン別に分析を行った。その結果、ポステン桁に損傷が多く、特にポステン箱桁はほとんどの橋梁でひび割れが認められた(図-1)。ポステン箱桁で多いひび割れパターンとその推定要因を図-2に示す。主要要因は、新コンクリートに対する旧コンクリートによる拘束(施工打継目や隔壁などの後打ち

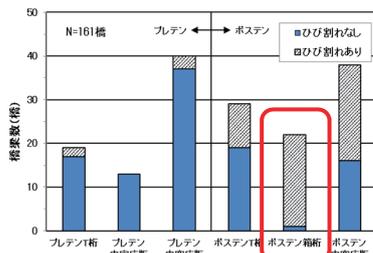


図-1 橋梁形式別ひび割れ発生傾向(初回点検)

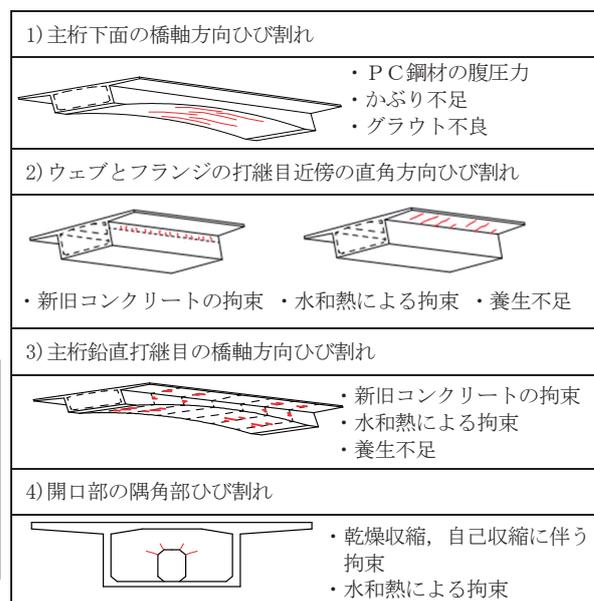


図-2 ポステン箱桁の主要ひび割れパターンと推定される要因

部)やマスコンクリートの水和熱による拘束であり、急速施工と分割施工を行う張出し架設がポステン箱桁に多いことが理由であると推測される。よって、ポステン箱桁の張出し架設工法を対象として施工中の挙動を実橋計測し、計測値と再現解析値との関係からひび割れ要因を分析・検討することとした。

### 3. 実橋における施工時挙動計測による初期変状発生要因の検討

#### 3.1 実橋における施工時挙動計測

平成26年度に工事を実施したPC4径間連続ラーメン箱桁橋(図-3)のA1からP1間に計測器を取付け、第2から第10ブロックの施工中の主桁鉄筋ひずみ、ウェブのコンクリートひずみ、コンクリート温度等(表-1)を1時間毎に計測した。

計測器は、施工時挙動が明確に変化し、傾向が把握しやすいため第2ブロックに計測機器(図-4、図-5)を取付けた。新ブロック側の打継部では、旧ブロックに拘束される方向を主な計測対象とし、主桁上下縁の中央位置とウェブ位置の鉄筋ひずみを計測した。

各ブロックの施工工程および施工サイクルは、表-2および表-3に示すとおりである。移動作業車の移動、コンクリートの打設、PC鋼材の緊張を1ブロック当たり8から10日間程度の施工で行うため、各施工段階に応じて構造系が変化し、施工時の挙動や応力も変化する。

表-1 計測項目

計測項目	計測機器
コンクリート温度	熱電対
施工打継目の鉄筋ひずみ	鉄筋ゲージ
主桁上下縁の鉄筋ひずみ (主桁中央とウェブ位置)	鉄筋ゲージ
ウェブのコンクリートひずみ	コンクリートゲージ
施工打継目の目開き	パイ型変位計

表-2 実橋張出し架設の施工工程

	移動作業車前進	生コン打設	PC鋼材緊張
第1ブロック			
第2ブロック	9/12 PM	9/22 AM	9/24 AM
第3ブロック	9/24 PM	10/01 AM	10/03 AM
第4ブロック	10/03 PM	10/09 AM	10/11 AM
第5ブロック	10/11 PM	10/17 AM	10/20 AM
第6ブロック	10/20 PM	10/24 AM	10/27 AM
第7ブロック	10/27 PM	11/02 AM	11/05 AM
第8ブロック	11/05 PM	11/10 AM	11/12 AM
第9ブロック	11/12 PM	11/18 AM	11/20 AM
第10ブロック	11/20 PM	11/26 AM	11/28 AM

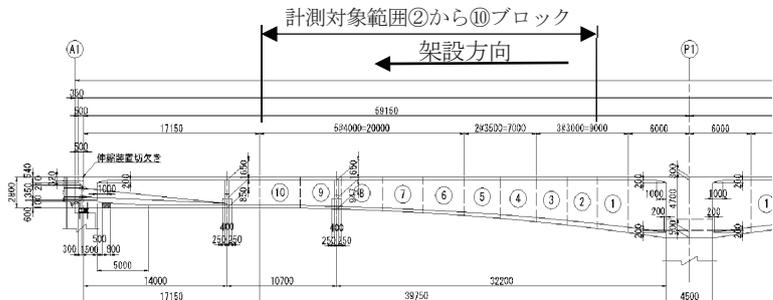


図-3 計測対象橋梁側面図

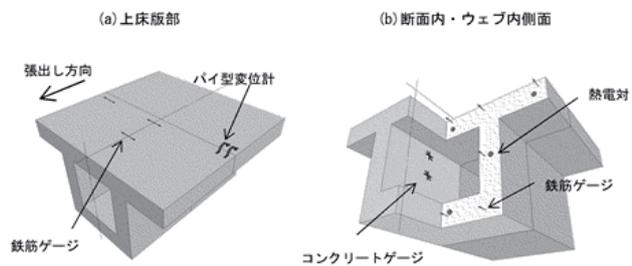


図-4 計測機器配置

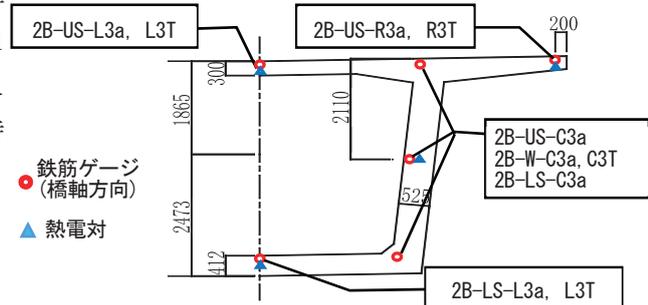


図-5 第2ブロック先端位置計測機器配置

表-3 実橋張出し架設の施工サイクル概要

ステップ	サイクル	施工概要
第2ブロック施工	移動作業車前進	
	生コン打設	
	架設PC鋼材緊張	
第3ブロック施工	移動作業車前進	

### 3. 2 実橋計測結果と設計計算結果の比較

実橋計測結果を整理するにあたり、まず張出し架設中は、構造系が変化する中での施工中の高さを管理する必要があるため、施工時挙動を再現した設計計算（施工時の上げ越し計算）を行っている。この設計計算結果と計測値の比較を行った（図-6）。なお設計計算は、施工時の上げ越し計算であるため、骨組みモデル（1本棒）であり、施工工程や施工サイクル、移動作業車や自重等の荷重変化は考慮しているが、コンクリートの強度や剛性の材齢に応じた影響、温度変化の影響は考慮していない。またクリープ・乾燥収縮がひずみに与える影響は、平成24年道路橋示方書に準じた一般的な値としている。

図-6に示す張出し架設中の主桁中央上下縁のコンクリート応力度は、計測結果が鉄筋ひずみとして与えられるため、コンクリート応力度に換算する際、鉄筋のヤング係数( $E_s$ )とコンクリートのヤング係数( $E_c$ )の比率 ( $n = E_s / E_c$ ) を  $n = 7$  と想定して算出したものである。

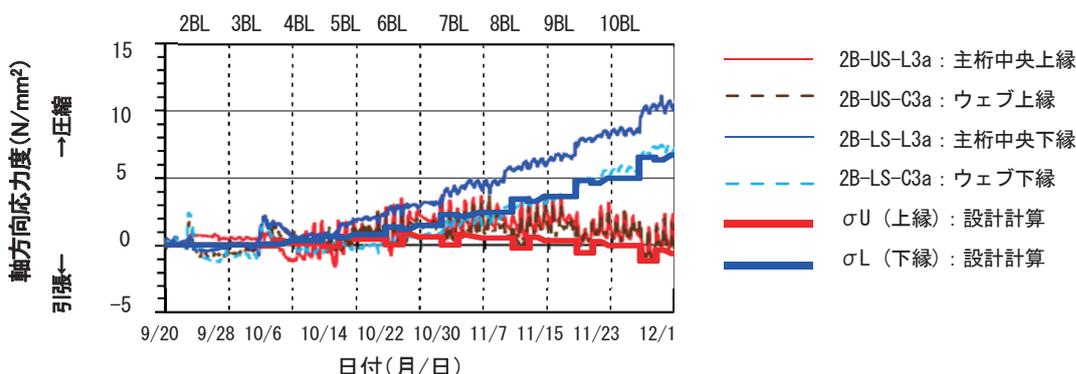


図-6 主桁上下縁の鉄筋ひずみを基にしたコンクリート応力度と設計計算の重ね合わせ

図-6に示す軸方向コンクリート応力度の圧縮側傾向は、日変動を除いた計測値と設計計算結果において、主桁中央下縁(2B-LS-L3a)を除き一致しており、コンクリート打設や移動作業車の移動等の施工時の荷重による影響は設計計算で正確に再現できていると考えられる。なお主桁中央下縁(2B-LS-L3a)が、ウェブ下縁(2B-LS-C3a)および設計計算( $\sigma_L$ )と乖離したのは、圧縮クリープや計測エラーが想定されるが、理由は明確でない。

引張側は、主桁中央上縁(2B-US-L3a)において第4および第5ブロック施工段階で $-2 \text{ N/mm}^2$ 程度の引張応力が発生している。これは、施工時荷重の影響に温度変化の影響が重複したことで発生したものと推測される。最大 $3 \text{ N/mm}^2$ 程度、日応力が変動しているが、これは直射日光で上床版が温められ主桁との温度差が生じたことにより上床版とウェブの温度膨張に差が生じたものなどが推測される。

以上より、引張応力に対しては、温度変化の影響が大きいことが比較結果から推測され、施工段階ごとに变化する自重、プレストレス力、移動作業車荷重などの影響は概ね一致しているが、設計計算に反映できていない温度変化と想定される応力変動が大きいいため、ひび割れリスクが高い状態となっている。

### 3. 3 施工時の架設手順および温度状態を考慮した再現解析

再現解析では、施工時荷重の影響に加えて、部材寸法や外気温等の環境条件を精度よく反映した温度応力解析（マスコンクリートの3次元立体温度応力解析 図-7）を行うことで、ひび割れ要因と対策を検討した。なお、施工箇所付近の外気温変化は、一般的に一定温度とすることが多いが、外気温の季節変動や日変動が部材の温度差に与える影響がひび割れに大きく関係していると考え、施工箇所の過去10年間の気象庁観測記録から季節変動と日変動

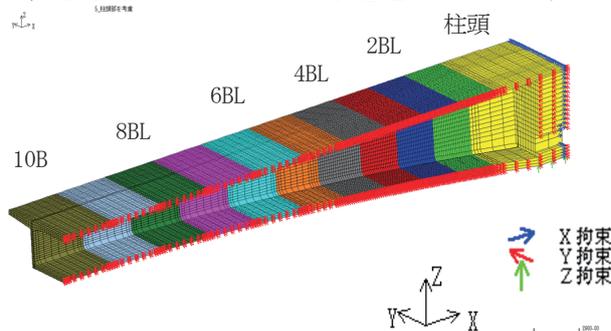


図-7 3次元立体温度応力解析による解析モデル

を整理し、年平均気温(11℃)と年間振幅温度(13℃)、日振幅温度(10℃)の正弦波形として設定した(図-8)。また、クリープ・乾燥収縮のひずみに与える影響やコンクリート配合に伴うコンクリートの発現強度、ヤング率の経時変化の影響を再現解析に考慮した。

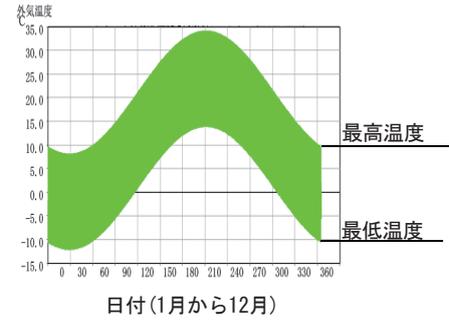


図-8 外気温の設定

### 3. 4 実橋計測結果と再現解析結果の重ね合わせと考察

第2ブロック先端位置で計測した橋軸方向鉄筋ひずみを応力度に換算した結果と再現解析結果を重ね合わせたものは図-9 のとおりであり、以下に考察を示す。なお図-9 で示す【設計計算】上下縁応力は、3. 2 で示した施工時の上げ越し計算によるコンクリート応力度である。

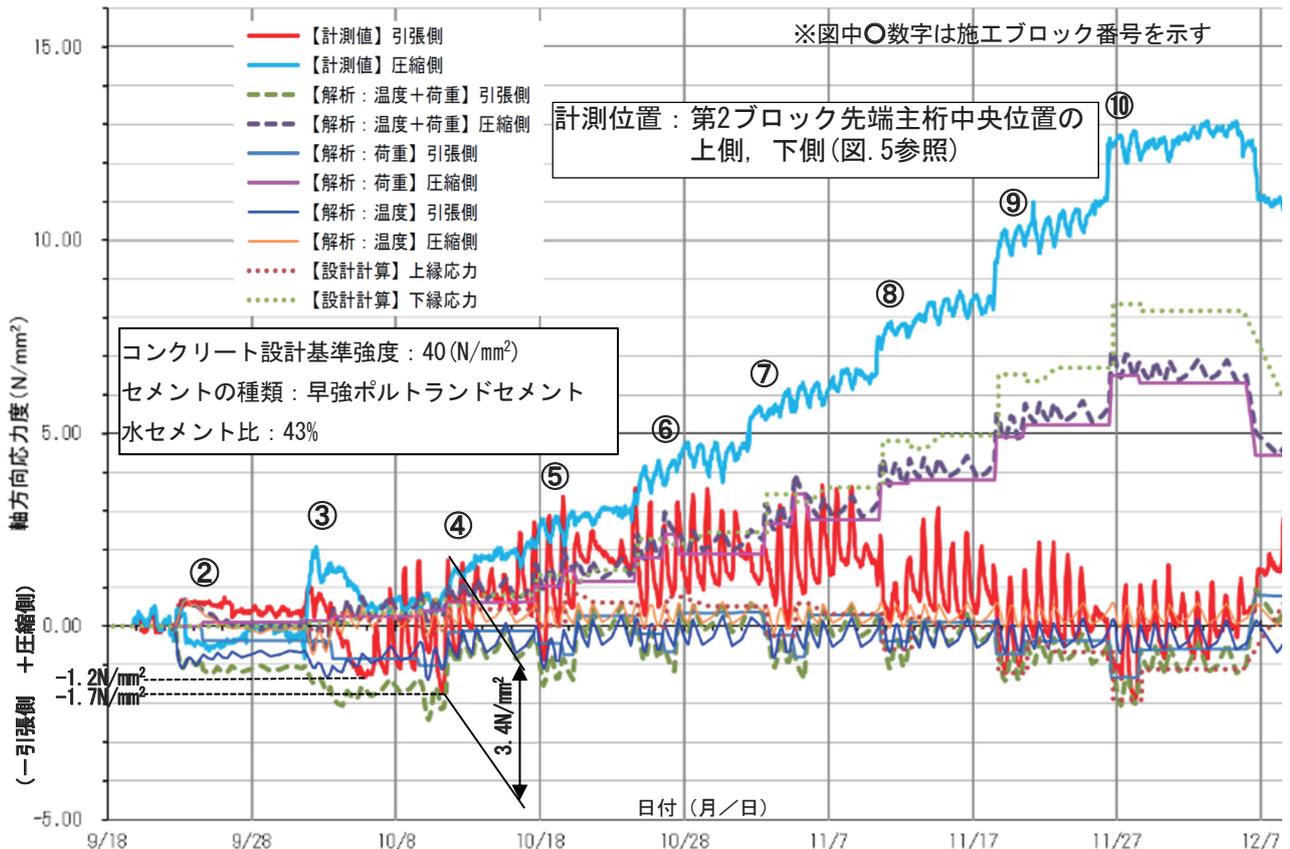


図-9 橋軸方向コンクリート応力度(計測値)と解析結果, 設計計算結果の重ね合わせ

図-9 より【計測値】引張側と【解析: 温度+荷重】引張側は、第3ブロック以降概ね同じ傾向を示している。第3ブロックの施工初期段階に【計測値】引張側で $-1.2\text{N/mm}^2$ 、第4ブロックで $-1.7\text{N/mm}^2$ の引張応力が発生しており、移動作業車が移動し隣接ブロックに荷重が载荷されるなど施工時荷重の影響に加えて、温度変化の影響が加味されると施工初期段階で大きな引張応力が発生したと推測される。それは、引張側の計測値と解析値はともに、1日ごとに応力変動しており、その応力変動が大きいこと(計測値1日当たり最大 $3.4\text{N/mm}^2$ 程度変動)、コンクリート打設後数日後に引張応力が発生していることから外気温変化の影響が部材同士の温度差に影響し、施工時荷重による応力と温度差による応力が、重複したときに引張応力が大きくなるものと想定した。

図-9 より施工初期段階の【計測値】引張側にて第4ブロックの $-1.7\text{N/mm}^2$ が計測された10月11日における解析結果による引張応力は、【解析: 温度+荷重】が $-2.2\text{N/mm}^2$ であり、【解析: 温度】の解析結果が $-1.1\text{N/mm}^2$ 、【解析: 荷重】の解析結果が $-1.1\text{N/mm}^2$ であり、引張応力の内訳は温度影響が5割、荷重影響が5割となっており、温度影響の占める割合が非常に高いことがわかる。

以上より、施工初期段階における施工時荷重によるコンクリート引張応力に温度差の影響が加味されることで大きな引張応力が発生している。また施工初期段階は、若材齢のためコンクリートの引張強度が低く、発生した引張応力が引張強度を超えるとひび割れが生じる。よって、経時的なコンクリート材料の変化の影響を考慮し、適切な安全率を確保した施工時許容応力度で制限することでひび割れリスクを抑制できる可能性が高くなると考えられる。

#### 4. 施工時許容応力度によるひび割れ抑制対策

平成 24 年道路橋示方書(以降 H24 道示)では、施工時荷重を考慮した場合の許容引張応力度はコンクリートの設計基準強度に応じて定められており、材齢 28 日における圧縮強度(設計基準強度)に対して決められたものである。

H24 道示<sup>1)</sup>における施工時荷重のプレストレストコンクリート構造に対する許容引張応力度は、設計基準強度が 30N/mm<sup>2</sup>の場合-2.2N/mm<sup>2</sup>、40N/mm<sup>2</sup>の場合-2.5N/mm<sup>2</sup>となっており、対象橋梁のコンクリート設計基準強度は 40 N/mm<sup>2</sup>であるため、施工時許容引張応力度は-2.5N/mm<sup>2</sup>である。しかし、施工初期段階の若材齢でコンクリート引張強度がまだ低い段階でも引張応力度(第4ブロック)は図-9より計測値で-1.7N/mm<sup>2</sup>、再現解析で-2.2N/mm<sup>2</sup>発生しており、施工時許容応力度に対して余裕がない結果となっている。H24 道示の施工時荷重の許容引張応力度は、28 日発現強度(設計基準強度)に対して規定されたものであるため、施工初期のコンクリート引張強度が低い段階では、その時点の発現強度に対応した引張強度に対して応力余裕がなければひび割れリスクが高いこととなる。なお、ひび割れの発生した橋梁の事例では、設計時に許容引張応力度-2.5N/mm<sup>2</sup>に対して、-1.9 N/mm<sup>2</sup>の引張応力が発生しており、28 日発現強度未満の時点の引張強度に対して応力余裕がないことがひび割れ発生要因となっていた。

以上より施工時許容応力度は、材齢、温度依存性、セメントの種類、水セメント比を考慮できるコンクリート圧縮強度式(1)とその圧縮強度を基にした引張強度式(3)に対し、H24 道示<sup>1)</sup>の許容応力度と同程度の安全率を確保することで、H24 道示<sup>1)</sup>と同程度の安全率が確保できるとした。

H24 道示<sup>2)</sup>のコンクリート引張強度式(3)は、若材齢を含めたコンクリートの材齢に応じた圧縮強度試験と割裂引張強度試験を基に整理していることが確認できているので、施工時許容応力度の安全率は設計基準強度に対して定められた H24 道示<sup>1)</sup>の安全率と同等が確保されればよいと考えられる。

以下に施工時引張許容応力度の算定方法を示す。

##### 1) 圧縮強度予測式

材齢、温度依存性、セメントの種類、水セメント比を考慮できるコンクリートの圧縮強度の推定は、日本コンクリート工学会<sup>3)</sup>の式(1)を用いる。

$$f'_c(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b(t_e - S_f)} f'_c(t_n) \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

##### 2) 有効材齢 $t_e$

有効材齢は温度の影響を考慮した等価材齢であり日本コンクリート工学会<sup>3)</sup>の式(2)を用いる

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \dots \dots \dots \text{式(2)}$$

##### 3) 引張強度予測式

$$\sigma_{ct} = 0.23 \sigma_c^{\frac{2}{3}} \dots \dots \dots \text{式(3)}$$

コンクリートの曲げ引張強度は、H24 道示<sup>2)</sup>の式(3)を用い、 $\sigma_c$ は式(1)の  $f'_c(t_e)$ を用いる。

- $t_e$  : 有効材齢 (日)
- $t_n$  : 20°C水中で養生したコンクリートの管理材齢 (日)
- $f'_c(t_e)$  : 有効材齢  $t_e$  における圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $a, b$  : セメントの種類および管理材齢に応じた圧縮強度を示す係数
- $S_f$  : セメントの種類に応じた硬化原点に対応する有効材齢 (日)
- $f'_c(t_n)$  : 管理材齢  $t_n$  における圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_{ct}$  : コンクリートの曲げ引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_c$  : コンクリートの圧縮強度 (=  $f'_c(t_e)$ )
- $\Delta t_i$  : 一定のコンクリート温度が継続する期間 (日)
- $T(\Delta t_i)$  :  $\Delta t_i$ の間継続するコンクリート温度 (°C)
- $T_0$  : 1°C

$\sigma_c$ に用いる圧縮強度は、コンクリート道路橋施工便覧<sup>4)</sup>の配合強度の考え方より、品質の不均一を排除するため変動係数による割り増し係数を考慮するものとする。

4)安全率

コンクリート引張強度式(3)に対して H24 道示<sup>1)</sup>の許容応力度(表-4)と同等の安全率を確保することで施工時許容引張応力度を設定する。曲げ引張強度の安全率 1.7 は、元来荷重状態が短期間しか作用しないことを条件として決められたものであることから、施工中の安全率も同等であると考えた。

表-4 H24道示の設計基準強度に対する許容応力度の比率一覧

応力度の種類	比率 (設計基準強度 / 許容応力度)
曲げ圧縮強度	3.0
軸圧縮強度	3.5
プレストレス導入直後の曲げ圧縮強度	1.7
プレストレス導入直後の軸圧縮強度	2.0
曲げ引張強度	1.7
斜引張強度	2.55 (=1.7×1.5)

図-10 に施工中のコンクリート応力度(計測値と解析値), 提案した施工時許容引張応力度, コンクリート引張強度の関係を示した。10月11日においてコンクリート打設2日後の温度降下時に、 $-1.7\text{N/mm}^2$ の大きな引張応力が発生しており、施工時許容引張応力度は、この段階(図-10 丸印箇所)が最も発生応力度と許容応力度が近づき、施工時許容引張応力度は満足できており計測においてもひび割れは発生していない。また【解析】引張側では、第4ブロック施工時に許容引張応力度を超える引張応力が発生している。計測位置が第2ブロック先端であり、第3・4ブロックの施工時荷重の影響で引張応力が発生しやすい状況に加えて、温度応力が最も大きいときが重複した影響で計測と解析が乖離した。外気温は、解析では平均気温の変動としたが、実際の外気温との乖離やひび割れ発生箇所は外気に接するコンクリート表面部のため外気温の影響を受けやすいことが計測と解析の乖離した原因と推測される。今回計測値は、解析値および許容引張応力度より小さくなったが、大きくなる可能性もある。そのため、コンクリートの最高到達温度を低減するなどの温度応力を抑制する対策を別途検討する必要がある。

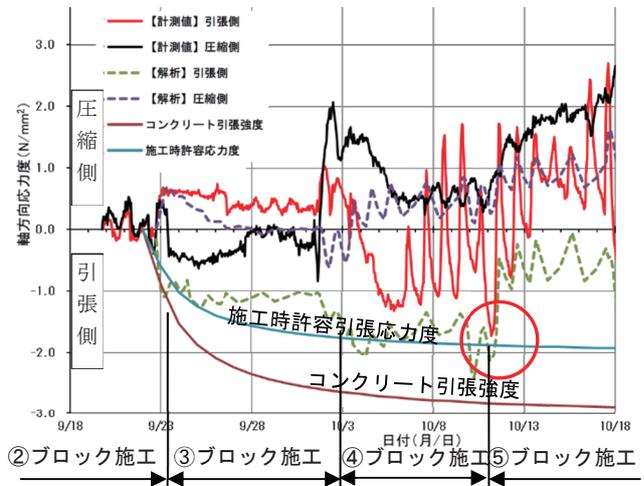


図-10 橋軸方向コンクリート応力度と施工時許容応力度(図-9の施工初期段階の拡大図)

5. まとめ

初期ひび割れの影響は、PC 箱桁による実橋の挙動計測と再現解析 (立体温度応力解析) の結果から、施工時荷重に加えて温度差の影響が重複した場合に大きな引張応力が発生し、若材齢時のコンクリート引張強度に対してひび割れ発生リスクが高いことを示した。そのため、初期変状のひび割れ抑制対策は、経時的なコンクリート材料の変化の影響を考慮できるコンクリート圧縮強度式(1)を基にした施工時許容応力度で制限することで初期ひび割れリスクを抑制できる可能性が高くなることを提案した。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編, 公益社団法人日本道路協会, pp. 126-127, 2012年
- 2) 道路橋示方書・同解説 IV下部構造編, 公益社団法人日本道路協会, p. 186, 2012年
- 3) マスコンクリートのひび割れ制御指針, 公益社団法人日本コンクリート工学会, pp. 43-48, 2016年
- 4) コンクリート道路橋施工便覧, 公益社団法人日本道路協会, pp. 195-197, 1998年