

PC橋の施工初期段階における内力評価に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：平 25～平 29
担当チーム：橋梁構造研究グループ
研究担当者：石田雅博、野田 翼

【要旨】

近年、PC橋の橋梁定期点検結果及び初回点検結果によると、供用年数が比較的新しいPC橋において、ひび割れや変形などの変状（以下、初期変状）が報告されている。PC橋の変状は、設計や使用材料、施工時荷重や温度などの施工条件、環境条件の影響などのいくつかの好ましくない条件が重なり、複合的に作用した結果として変状が生じたものと考えられ、複数の要因が複雑に関連して生じるものであり、その要因特定は困難である。しかしながら、ひび割れなどの変状は、出来るだけ無いほうが望ましく、より高品質のPC橋を構築していくためには、供用年数が比較的新しいPC橋の変状抑制に努めていく必要がある。このような背景のもと、本研究では初期変状のひび割れ対策として、桁高が変化した下床版に対する腹圧力、張出し架設工法における施工時コンクリート許容応力度、桁端部のPC鋼材定着具の配置に着目し、それぞれの初期変状ひび割れ発生リスクを抑制する対策を検討したので、ここで報告する。

キーワード：橋梁定期点検、初期変状、ひび割れ、腹圧力、施工時許容応力度

1. はじめに

コンクリート橋におけるひび割れ対策は、道路橋示方書において 1950 年代から現在に至るまで様々な抑制対策が図られてきた。しかし、近年、橋梁点検結果が充実してきた中で分析してみると初期変状としてひび割れ発生がある要因にあることがわかった。それは、箱桁で桁高が変化し、下床版にPC鋼材が配置されていると腹圧力により橋軸方向に高確率でひび割れが生じていること、また張出し架設のようにコンクリート打設後数日で鋼材緊張、脱型を行う急速施工が標準化した工事では、若材齢コンクリートに施工時荷重に温度変化が重複することで、引張応力が発生しひび割れが発生しやすい状況にあること、さらに桁端部のPC鋼材定着具は配置、応力が複雑で局部的な引張応力やマスコンクリートによる温度応力の影響があるがわかった。よって、これら初期変状の要因に対するひび割れ対策を検討したので、ここで報告する。

2. PC橋の初期変状実態および要因推定

2. 1 PC橋における初期変状実態の整理

初期変状の実態は、橋梁定期点検と供用開始後 2 年以内に行われる初回点検結果のひび割れによる変状を、点検データから整理分析して把握することとした。

橋梁定期点検要領（案）¹⁾の運用実施から 8 年が経過し供用後 2 年以内実施する初回点検結果のデータも

蓄積されてきている。ここでは、平成 20～24 年の橋梁点検データに基づき実施した PC 橋の初期変状の実態分析の結果について示す。なお、平成 16 年に制定された橋梁定期点検要領（案）¹⁾では、国が管理する道路橋は、技術者が工学的判断により行う部材単位の対策区

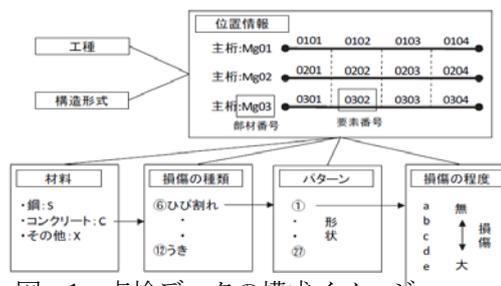


図-1 点検データの構成イメージ

分の判定に加えて、部材をさらに細分化した要素単位で損傷の種類と程度を記号化し記録することを定めている。

全ての要素は部材番号と要素番号を持ち、部材番号と要素番号には橋梁内における要素の部材種別や位置情報が含まれるので、点検データを部材の最小評価単位である要素毎に、工種・構造形式・材料・損傷の種類・損傷のパターン・損傷の程度を紐付けして整理することを可能としている。図-1 に定期点検要領における点検データの構成イメージを示す。

初期変状の実態整理は、図-1 の橋梁点検結果の点検調査書から損傷の種類として「ひび割れ」を、損傷パ

ターンの区分として「ひび割れパターン」を抽出し橋梁形式毎に整理を行った(図-2)。なおひび割れパターンは、橋梁定期点検要領(案)¹⁾のパターン数では不足したため別途パターン数を増やし全31種類のパターン数(図-3、表-1)で整理した。

2. 2 PC橋における初期変状の要因分析及び推定

(1) 初期変状の分析結果

橋梁点検結果と初回点検結果の分析結果を示す。

- 1) 全定期点検データの対象橋梁 8,434 橋(20,743 径間)中、ひび割れの発生していた橋梁は 2,756 橋(8,190 径間)で変状の割合は 39.4%。
- 2) 初回点検データの対象橋梁 161 橋(548 径間)中、ひび割れが発生していた橋梁は 58 橋(192 径間)で変状の割合は 35.0%。
- 3) 変状の割合は、定期点検、初回点検ともに 35%以上と高い割合でともに大きな差はない。

以上の結果より、PC橋の変状は多くの変状が橋梁完成後の比較的時間もない期間あるいは施工中に高い割合で生じた可能性が高いと想定される。

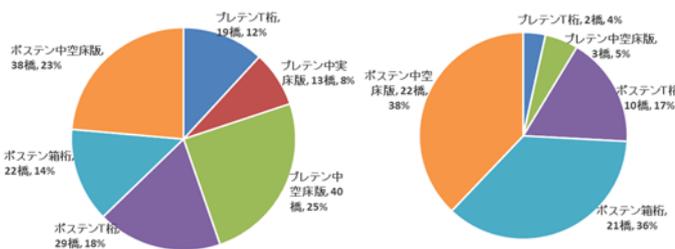


図-2 初期変状のあった橋梁形式による分類

(2) 橋梁形式毎の分析結果

次に初期変状の発生している初回点検結果を実施した橋梁(58 橋)のうちプレテンション桁(以下、プレテン桁)は5 橋(9%)であるのに対して、ポステ

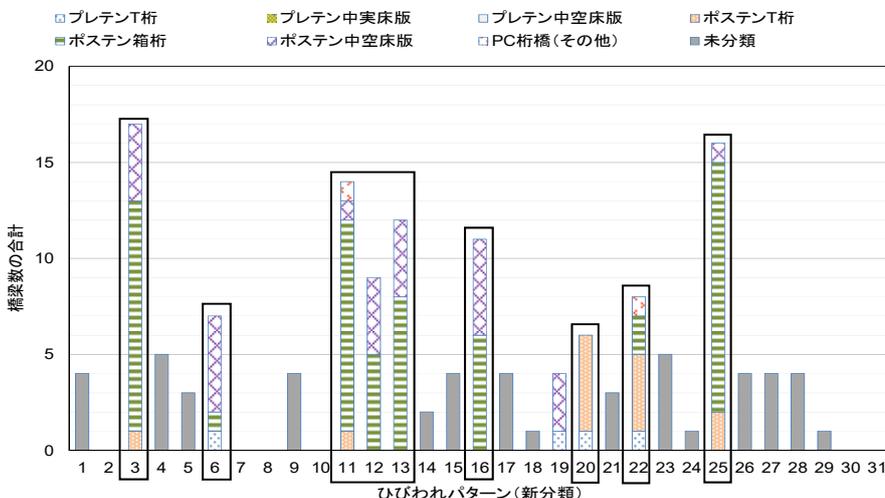


図-3 PC橋の初期変状ひびわれパターン(初回点検)

ンション桁(以下、ポステン桁)は53 橋(91%)でありPC橋の初期変状は、プレテン桁に比べて、ポステン桁に多く発生している。この結果から、PC橋の初期変状は、そのほとんどがポステン桁において発生していることがわかる。

(3) ひび割れパターンの分析結果及び要因推定

31種類のひび割れパターンのうち、【3】【6】【11】【12】【13】【16】【20】【22】【25](図-3の黒枠)の9パターンのひび割れが多く、その中でもポステン箱桁の割合が多くなっていることが分かる。これらのひび割れパターンとその推定される主要な初期変状を発生させた要因を表-1に示す。

この推定される要因から設計・施工に大きく依存しているものとして考えると、「外部拘束(打継ぎ目)」「内部拘束(水和熱)」「PC鋼材配置(局所応力、プレストレス分力)」「施工条件(環境条件、養生期間、架設方法など)」の影響が大きいと考えられる。

ここでは、この中からひび割れパターン【3】と【11】【12】【13】と【16】のひび割れパターンに着目し、その要因について対策を検討することとした。

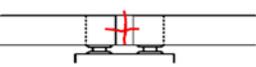
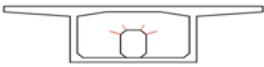
【3】のひび割れパターンは、桁高変化のある橋梁で下床版にPC鋼材を配置した箱桁に多く発生していることから、腹圧力の影響が原因と推定される。腹圧力の影響は、いままで道路橋示方書(以下、道示)の構造細目等に対応してきており、設計照査が明確になっておらず、ひび割れ対策として新たに検討すべきと考えられるため、次項3.として腹圧力によるひび割れ対策を検討することとした。

【11~13】のひび割れパターンは、ポステン方式のコンクリート打継ぎ目における新コンクリートの外部拘束、水和熱に伴う内部拘束、養生不足であり急速施工を行うことが標準となっている張出し架設工法

に多く発生している。道示に施工時許容応力度に関する規定はあるが、それを守っていてもひび割れが生じている橋がある状況である。よって、さらなる品質向上を目指し、次項4.としてひび割れ対策を検討することとした。

【16】のひび割れパターンは、桁端部のPC鋼材定着具背面に生じる局所的な引張応力、マスコンクリートの影響、定着配置上の課題と推測され、次項5.としてひび割れ対策を検討することとした。

表-1 主要な初期変状のひび割れパターンと原因と初期変状リスクを抑制することが可能

初期変状が多いひび割れパターン		推定される主な要因
【3】	主桁下面の橋軸方向ひび割れ、シースに沿ったひび割れ 	① P C鋼材の腹圧力 ② かぶり不足、グラウト不良等
【6】	支点付近のウェブ斜めひび割れ 	① 支保工沈下、コンクリートの打設順序、打ち重ね時間調整不備等
【11】	ウェブとフランジの打継ぎ目近傍の直角方向ひび割れ 	① 新コンクリートの拘束 ② 水和熱による拘束 ③ 養生不足
【12】	ラーメン橋柱頭部 	① 新コンクリートの拘束 ② 水和熱による拘束 ③ 養生不足
【13】	主桁鉛直打継ぎ目の橋軸方向ひび割れ 	① 新コンクリートの拘束 ② 水和熱による拘束 ③ 養生不足
【16】	端支点部ウェブの水平～放射状ひび割れ 	① 水和熱による拘束 ② P C鋼材定着部の局部応力
【20】	中間支点連結部 桁下面の直角方向、ウェブ鉛直方向ひび割れ 	① クリーブ変形の拘束、支承機能低下による拘束 ② 連結部の応力集中
【22】	床版下面直角方向ひび割れ 	① 乾燥収縮、自己収縮に伴う拘束 ② コンクリートの締固め不足
【25】	開口部の隅角部ひび割れ 	① 乾燥収縮、自己収縮に伴う拘束 ② 水和熱による拘束

3. 腹圧力による初期変状抑制対策

3. 1 主桁下面腹圧力による初期変状発生要因推定

初期変状ひび割れパターン【3】の発生要因は、桁高変化のある桁の下床版にP C鋼材を配置することにより生じた腹圧力が初期変状発生の主要因と推測された。

下床版に配置したP C鋼材にプレストレス力(緊張力)が導入されると、桁高変化があることによりプレストレス力の鉛直分力である下向きの腹圧力が発生する(図-4(a))。この腹圧力により下床版には、下床版支間中央部で正の曲げモーメント、ウェブ付近で負の曲げモーメントが生じることになり(図-4(b))、下床版の中央部付近とウェブ近傍には、腹圧力の影響により引張応力が生じる。ひび割れは、初回点検によるひび割れパターンの傾向からも腹圧力の影響が主要因の一つであると考えられた。

初期変状の発生要因が構造的要因に起因するものであれば、設計段階においてその影響を適切に考慮す

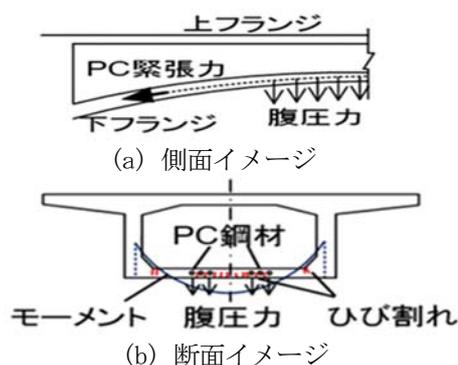


図-4 腹圧力の影響イメージ

るものと考えられる。そのため、初回点検において「腹圧力」の影響が主要因と疑われた変状事例を分析するとともに、構造的条件(P C鋼材緊張力、P C鋼材配置、鉄筋配置、下床版支間など)が変状発生に与える影響について検討を実施した。

3. 2 腹圧力の設計照査の実態

初回点検結果より、腹圧力の影響が疑われるひび割

れが発生していた4橋に対して、腹圧力により下床版に曲げモーメントが生じることを考慮した設計（鉄筋応力度 $180\text{N}/\text{mm}^2$ 以下で制限）を1橋は実施していたが、その他3橋は構造条件から腹圧力が生じることになるものの、腹圧力の影響を考慮した設計は実施されていない。よって、腹圧力による設計照査が明確になっていないことがひび割れ発生の一つの原因と推測される。

3.3 腹圧力によるひび割れ抑制として下床版鉄筋応力度の制限

点検データより、下床版に生じたひび割れ位置は、腹圧力の大きさに関係する下床版に配置したケーブル本数の変化位置および下床版に配置した鉄筋量の変化位置付近であった。配置するケーブル本数および鉄筋量の変化位置付近は、鉄筋の引張応力度の急変箇所となると考えられ、この位置においてひび割れが発生したと考えられる。この傾向は、ひび割れが発生している橋梁のひび割れ発生位置においても概ね同様の傾向であり、ひび割れ発生の有無と鉄筋の発生応力度に相関があることが想定された。そこで、ひび割れの有無と鉄筋応力度の相関について把握するための検討を実施した。図-5に検討結果を示すが、下床版の鉄筋の発生応力度と、コンクリートのひび割れ発生の有無に高い相関があるといえる。鉄筋引張応力度が $120\sim 140\text{N}/\text{mm}^2$ を境界に、ひび割れ発生の有無が概ね区分されている。このことから、下床版に配置する鉄筋応力度を $140\text{N}/\text{mm}^2$ 程度に制限すれば、変状抑制に効果があるものと考えられる。

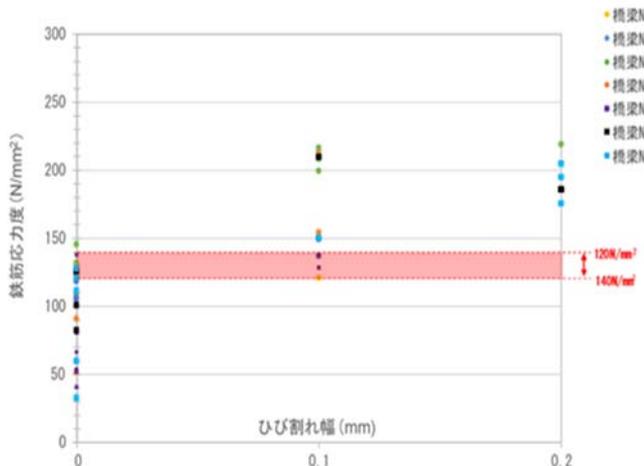


図-5 ひび割れの有無と鉄筋応力度の相関関係

3.4 構造的条件による腹圧力影響検討

下床版下面のシーすに沿ったひび割れが発生した事例のポステン箱桁（張出し施工）を対象に、作用荷重（PC鋼材緊張力、PC鋼材配置など）や床版支間

などをパラメータとして試設計を行い、下床版の変状の影響要因を鉄筋応力やひび割れ幅に着目して比較検討した。PC3 径間連続ラーメン橋で桁高が2.5mから6.0mに変化する中央支間90mの橋梁を検討対象とし、作用荷重、鉄筋配置および床版支間の検討パラメータを表-2に示したような組合せで検討を行った。

解析ケース	腹圧力	PC緊張力	PC鋼材本数	PC鋼材配置	鉄筋	下床版支間	腹圧力抵抗幅
①標準(腹圧無し)	無し	—	—	—	—	—	—
②標準(腹圧考慮)	有り	設計時	3本	ウェブ寄り	D13 ctc125mm	4.7m	4m
③PC鋼材導入力	有り	緊張時	3本	ウェブ寄り	D13 ctc125mm	4.7m	4m
④PC鋼材本数	有り	設計時	5本	ウェブ寄り	D13 ctc125mm	4.7m	4m
⑤PC鋼材配置	有り	設計時	3本	床版中央	D13 ctc125mm	4.7m	4m
⑥配置鉄筋	有り	設計時	3本	ウェブ寄り	D16 ctc250mm	4.7m	4m
⑦下床版幅	有り	設計時	3本	ウェブ寄り	D13 ctc125mm	5.95m	4m
⑧腹圧力抵抗幅(1m)	有り	設計時	3本	ウェブ寄り	D13 ctc125mm	4.7m	1m
⑨腹圧力抵抗幅(2m)	有り	設計時	3本	ウェブ寄り	D13 ctc125mm	4.7m	2m

図-6、図-7に②標準ケース（腹圧考慮）に対する各検討ケースの鉄筋応力度およびひび割れ幅の比率を示す。曲げひび割れ幅は、コンクリート標準示方書の算定式²⁾で算出した。この検討で、構造的要因としては、鉄筋応力度に対しては④PC鋼材本数⑤PC鋼材配置、ひび割れ幅に対しては、⑤PC鋼材配置、⑥配置鉄筋（配置間隔）の影響が大きいことが分かる。⑧⑨腹圧力抵抗幅については、施工誤差により腹圧力が集中した場合を想定している。この検討結果より、下床版のシーすに沿ったひび割れに対しては、構造的には⑤PC鋼材配置（下床版中央配置）の影響が大きいことがわかった。したがって、下床版のPC鋼材の中央配置は避け、ウェブ近傍配置することがよいことがわかった。

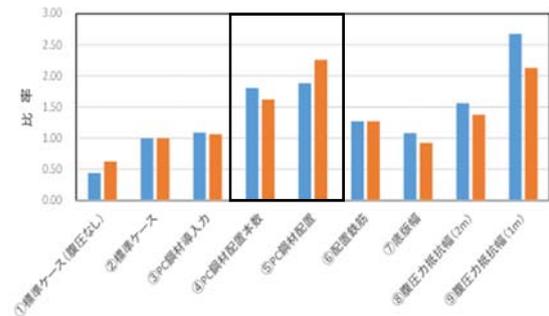


図-6 鉄筋応力度の比率（死荷重時）

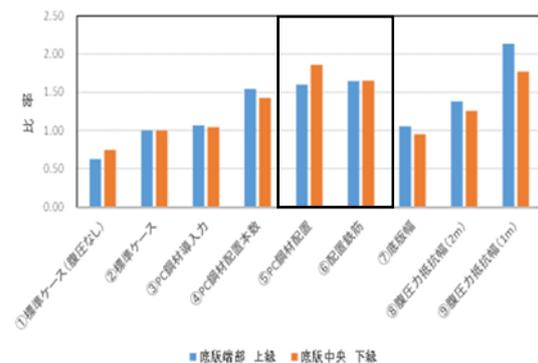


図-7 ひび割れ幅の比率（死荷重時）

4. コンクリートの施工時許容応力度による初期変状抑制対策

4. 1 実橋における施工時挙動計測と初期変状要因推定の検討

初期変状ひび割れパターン【11～13】は、ポステン方式のPC橋における初期変状は、コンクリート打継ぎ目における新コンクリートの外部拘束、水和熱に伴う内部拘束、養生不足が主な原因と推定され、張出し架設工法に多く発生している。そこで、初期変状のひび割れ要因を詳細に検討するにあたり、施工中の張出し架設工法のPC箱桁橋に計測器を取付けひずみ等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。

4. 2 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-8)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-3)を1時間毎に計測した。計測器は、第2ブロックの図-9、図-10 に示す位置に取付けた。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(図-10)。

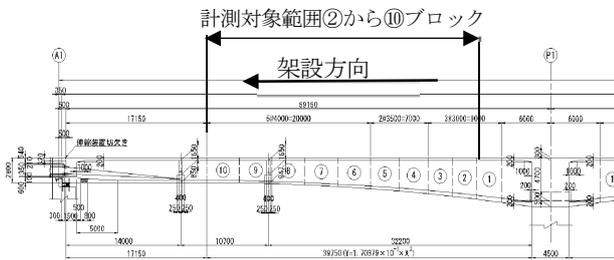


図-8 計測対象橋梁側面図

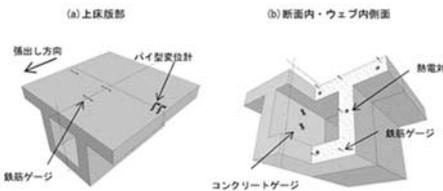


図-9 計測機器配置

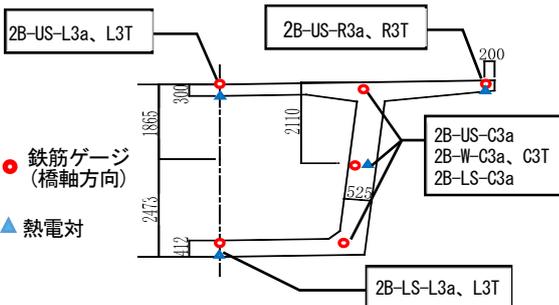


図-10 第2ブロック先端位置計測機器配置

表-3 計測対象橋梁側面図

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

各ブロックの施工工程および施工サイクルは、表-4 および表-5 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構造的特徴を有している。

表-4 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

表-5 実橋張出し架設の施工工程

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	

4. 3 架設手順および温度状態を考慮した再現解析

再現解析は、各ブロックの施工工程および施工サイクルによる施工時荷重等の応力変動の影響に加えて、部材寸法や外気温等の環境条件を反映した温度解析(マスコンクリートの3次元立体温度応力解析)(図-11)にて再現解析を行うことでひび割れ要因と対策を検討した。

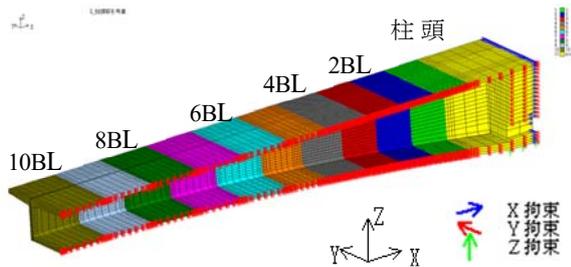


図-11 3次元立体温度応力解析による解析モデル

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日変動と季節変動を整理し、年平均気温(11°C)と年間振幅温度(10°C)を設定した(図-12)。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。

4. 4 実橋計測と再現解析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-13のとおりである。設計計算は、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。

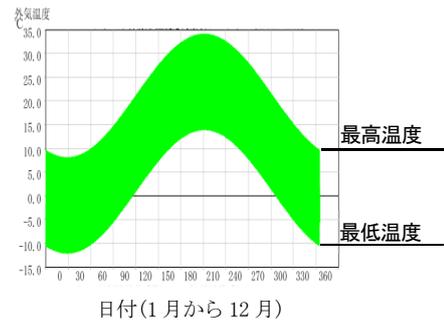


図-12 外気温の設定

考察

引張側の計測値と解析結果は、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で -1.2N/mm^2 、第4ブロックで -1.7N/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載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。また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、その応力変動は大きく(計測値1日当たり最大 3.4N/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、重複したものと推測した。

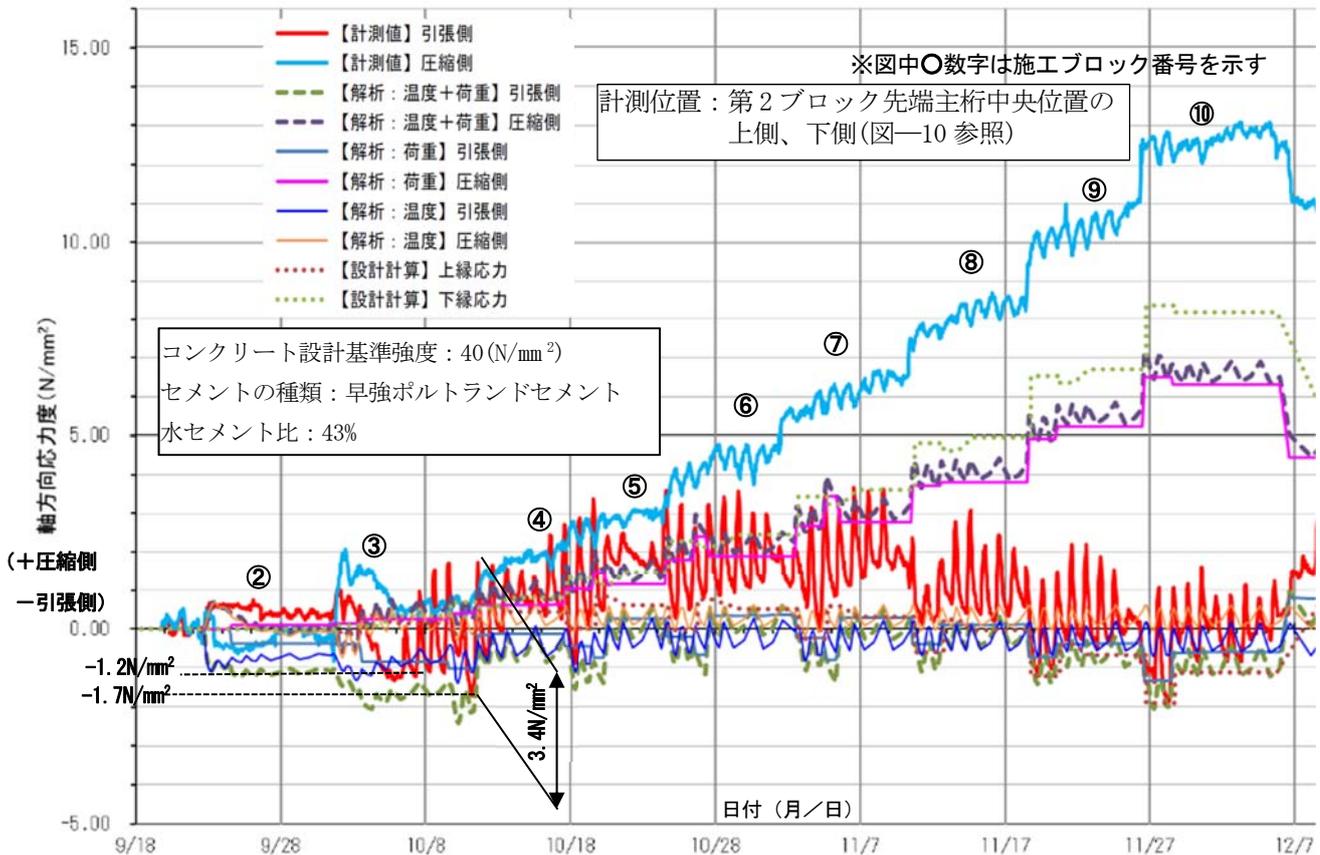


図-13 橋軸方向コンクリート応力度(計測値)と解析結果、設計計算結果の重ね合わせ

また、図-13より施工初期段階のコンクリート引張応力度（第4ブロックの -1.7N/mm^2 ）が計測された10月11日における解析結果は、温度時+荷重時が -2.2N/mm^2 であり、温度影響のみの解析結果が -1.1N/mm^2 、荷重影響のみの解析結果が -1.1N/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ことが要因である。また施工初期段階は、若材齢でありコンクリートの引張強度は低いため、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を考慮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。

4.5 施工時許容応力度による初期変状抑制対策

平成24年道路橋示方書(以降 H24 道示)では、施工時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^2 の場合 -2.2N/mm^2 、 40N/mm^2 の場合 -2.5N/mm^2 となっており、図-13で示される施工初期段階の若材齢でコンクリート引張強度が低い段階でも引張応力度（第4ブロック）は計測値で -1.7N/mm^2 、再現解析で -2.2N/mm^2 発生しており、H24 道示の許容引張応力度（ -2.5N/mm^2 ）に対して余裕がない結果となっている。よって、H24 道示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で設計を行った場合、応力余裕がなければひび割れリスクが非常に高いこととなる。

そのため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 道示と同程度の安全率が確保できるとした。

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³⁾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³⁾の式(2)を用いる

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

3) 引張強度予測式

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

図-14に施工中のコンクリート応力度（計測値と解析値）、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、 -1.7N/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-14 丸印箇所）が最も発生応力度と許容応力度が近づき、施工時許容応力度は満足できている。また、工事結果としてひび割れは発生していないため、施工時許容応力度の設定は妥当である。

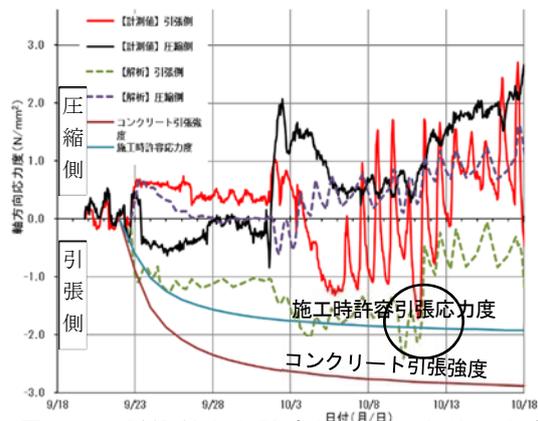


図-14 計測値から設定したコンクリート応力度と施工時許容応力度

5. 桁端部のPC鋼材定着具付近の初期変状抑制対策

5.1 桁端部PC鋼材定着具付近の初期変状発生要因の推定

初期変状ひび割れパターン【16】は、表-6に示すポステン方式の桁端部PC鋼材定着具に多いひび割れを示しており、推定される要因は以下の通りである。

表-6 桁端部PC鋼材定着具付近に生じるひび割れパターン

PC主桁 端支点部 連結支点部	主桁のウェブ又は連結部横締め跡内コンクリートに発生する水平方向のひび割れ	
PC主桁 支点部	主桁ウェブに発生している放射状のひび割れ	

(1) 桁端部に定着されるP C鋼材定着具背面の局部応力の影響

P C橋の桁端部は、大きな緊張力が定着具に導入されると定着具背面において局部的に引張応力が発生すると、その影響によりひび割れが発生する可能性がある。また、桁端部は桁切り欠き、緊張作業のために必要となる主ケーブルや横締めケーブルの箱抜きによって、応力は複雑となり局部応力が発生しやすい。

(2) 支点横桁部のマスコンクリートによる水和熱の影響

P C橋の端横桁は、部材が厚くマスコンクリート部材となり、主桁・横桁・張出し床版など複雑な形状から温度応力は複雑となる。

(3) 桁端部の各部材干渉の影響

桁端部は、P C鋼材定着具、補強鉄筋、横締め鋼材、支承アンカーボルトなど各部材が集中して配置されることから干渉問題が起こりやすく、補強鉄筋が物理的に重なり設計の有効性に問題が生じる、縁端においてかぶりが確保できていないなどの問題が発生することがある。図-15 は、斜角のある橋梁において、定着具の設計施工基準に示される縁端距離や中心間隔を守ったのに、補強鉄筋が重なり、端部のかぶりが確保できていない(黒丸印で示す)一事例である。

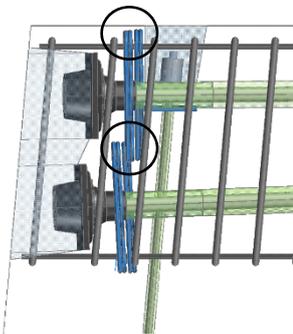


図-15 桁端部P C鋼材定着具付近で干渉した事例

5. 2 桁端部P C鋼材定着具付近の初期変状抑制対策

初期変状のひび割れ発生要因の推定から、その抑制対策を検討する。

(1) プレストレス導入に伴う局部応力によるひび割れ防止対策

プレストレス導入に伴う局部応力によるひび割れを防止するためには、発生する局部応力を緩和させる

対策が有効である。具体的には以下のような対策が考えられる(図-16)。

- ・ 定着具縁端距離の大きくし、配置中心間隔を広げる
- ・ 定着力の面外方向分力を減少させるような主P C鋼材の平面配置形状とする。
- ・ 応力の流れがスムーズとなるような定着具切欠き形状(緩やかな階段形状)とする。

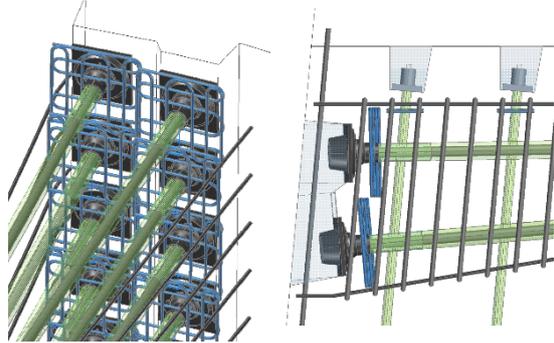


図-16 桁端部P C鋼材定着具付近の干渉を避けるように配置を見直した事例

(2) 温度応力によるひび割れ防止対策

温度応力によるひび割れを防止するためには、水和熱に伴うコンクリート内外の温度差を緩和させる対策が有効である。以下のような対策事例が考えられる。

- ・ 養生期間を延長することにより、部材表面の急激な温度変化を避ける。また、脱型に伴う内外温度差(応力)発生時点の抵抗側(コンクリート表層部)の強度を高くする。
- ・ 発熱性の低いセメントに変更する。
- ・ パイプクーリングなどコンクリート中心温度を強制的に冷却する。
- ・ 補強鉄筋を追加する。

(3) 3次元CADによる部材配置の検討

P C鋼材定着具は、図-16に示すような斜角があり、定着具切欠き形状が階段状に設置されると、非常に複雑となり干渉している場合(図-15)がある。このような場合、図-16に示すように3次元CADを活用し、各部材の配置を再現し、各部材同士の干渉を避けると共に、定着具の設計施工基準に示す構造細目を遵守し、補強筋等も適切に配置できる構造とすることが望ましい。

6. まとめ

PC橋の初期変状によるひび割れの主要な要因と抑制対策として、(1)から(3)を提案した。

(1) 腹圧力によるひび割れ抑制対策

1) ひび割れ発生の要因

- ・桁高変化のある下床版で、中央付近にPC鋼材を配置した橋梁は高い確率でひび割れが生じており、腹圧力が原因と推測される。
- ・腹圧力によりひび割れが生じた橋梁のほとんどで腹圧力による応力照査を行っていなかった。腹圧力による設計照査が明確になっていないことも要因である。

2) ひび割れ抑制対策

- ・下フランジに作用する腹圧力によるひび割れは、鉄筋応力度を $140\text{N}/\text{mm}^2$ 程度に制限した応力照査を行うことでひび割れ発生を抑制できる。
- ・PC鋼材は、下床版中央配置を避け、ウェブ近傍に配置することが効果的である。

(2) 張出し架設工法における施工中のコンクリート許容応力度によるひび割れ抑制対策

1) ひび割れ発生の要因

張出し架設工法における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)の結果からコンクリート打設後数日において、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する。

2) ひび割れ抑制対策

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とその圧縮強度を基にした引張強度式に対し、道示の許容応力度と同程度の安全率を確保することで、ひび割れ抑制できる。

(3) 桁端部PC鋼材定着具付近のひび割れ抑制対策

1) ひび割れ発生の要因

- ・PC鋼材定着具の背面は、大きな緊張力により局部的に引張応力が発生する。
- ・PC橋の端横桁は、部材が厚くマスコンクリート部材となり、水和熱に伴う温度応力によりひび割れを発生させる可能性がある。
- ・PC鋼材定着具は、切欠き、横締め、アンカーボルトなど取合いが複雑となり、各部材が重なり、かぶりが確保できていないなどの課題が生じる場合がある。

2) ひび割れ抑制対策

- ・定着具の縁端距離の大きくし、配置中心間隔を広げる。
- ・応力の流れがスムーズとなるような定着具切欠き形状とする。
- ・3次元CADを活用し、各部材の配置を再現し、各部材同士の干渉を避けると共に、定着具の設計施工基準に示す構造細目を遵守し、補強筋等も適切に配置できる構造とする。
- ・温度応力に対しては、水和熱に伴うコンクリート内外の温度差を緩和させる対策が有効である。

なお本研究結果は、平成29年度改訂の道路橋示方書Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編の解説に記載され、PC橋の設計・施工の設計基準に反映されている。

謝辞

本研究にあたり、国土交通省国土技術政策総合研究所、一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会、国立研究開発法人土木研究所による共同研究として行われたもので、ご協力いただいた関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省 国道・防災課、「橋梁定期点検要領(案)」、2004.3
- 2) (社)土木学会、「2012年制定コンクリート標準示方書 設計編」、pp.223-226、2012.12
- 3) (社)日本コンクリート工学会、「マスコンクリートのひび割れ制御指針2016」、pp.43-48、2016.11

REDUCTION MEASURES TO DEFORMATION OF INITIAL STAGE OF PC BRIDGE

Research Period : FY2013-2016

Research Team : Bridge and Structural
Technology

Author : Masahiro Ishida

Tsubasa Noda

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. In addition, identifying specific factor is difficult since several factors affected complicatedly. However, reducing cracks for relatively new PC bridges is required to maintain high quality bridges, ideally preventing any cracks is desirable. Against this backdrop, in this research, as the measures to reduce cracks of the initial deformation, the abdominal pressure against the lower slab where the girder height changed, the allowable stress of concrete at the time of construction in the cantilever method, the Arrangement of the post-tensioned anchoring devices, we studied measures the risk of occurrence of each initial deformed crack, so we report here.

Key words: crack, abdominal pressure, allowable stress in construction, post-tensioned anchoring devices