

P C橋の初期変状分析と腹圧力によるひび割れ抑制対策

国立研究開発法人 土木研究所 正会員 工修 ○野田 翼
 国立研究開発法人 土木研究所 高瀬 弘
 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. 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. Under such circumstances, periodic inspection record from 2008 to 2012 is analyzed in this study. This study focuses on the effect of web pressure of PC steels installed in lower side of the slab in order to reduce the occurrence risk of cracks. This paper presents points of attention and countermeasures to reduce initial defects on PC bridges.

Key words : Periodic bridge inspection , Initial defects , Crack

1. はじめに

近年の橋梁定期点検結果によると、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。こうした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、でき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橋の変状に対して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、平成20年から24年の橋梁定期点検結果を分析し、PC橋の初期変状発生要因として下床版にPC鋼材が配置された場合の腹圧力の影響に着目し、変状抑制に対する留意点や方策について検討した。

2. 初回点検結果の整理と初期変状要因の分析

2.1 定期点検データ

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。

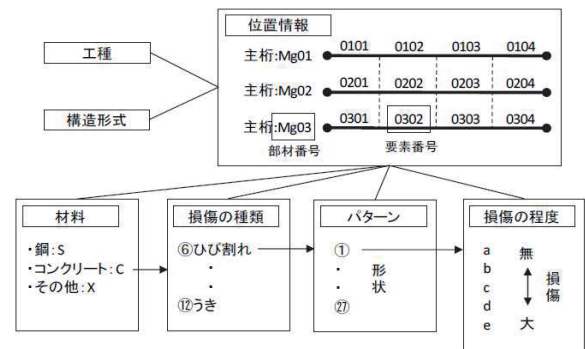


図-1 点検データの構成イメージ

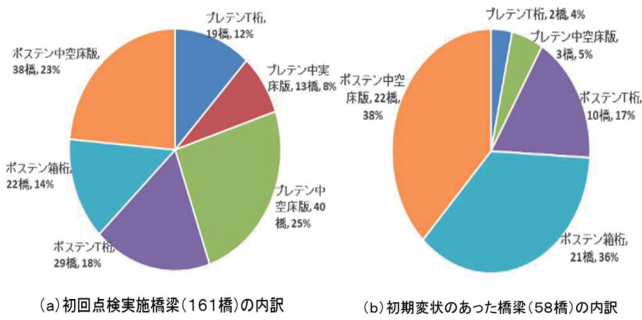


図-2 橋梁形式による内訳 (橋梁数)

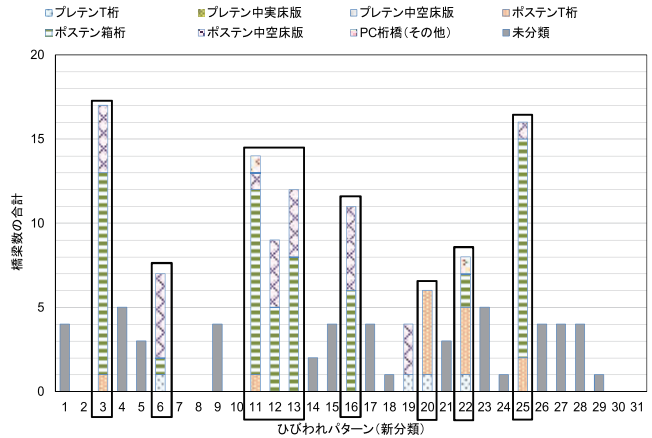


図-3 PC 橋の初期変状パターン分類 (初回点検)

表-1 主要な初期変状パターンと推定される要因

	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、シーズに沿ったひび割れ 	①PC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 ②PC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クリープ変形の拘束、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

2.2 初回点検結果の整理

平成 20～24 年に実施された橋梁定期点検と供用後 2 年以内に実施された初回点検の結果を対象に PC 橋の変状状況 (ひび割れ) に関して調査を行った。全定期点検データの対象橋梁は 8,434 橋 (20,743 径間) であり、その中で、ひび割れの発生していた橋梁は 2,756 橋 (8,190 径間) であった。初回点検データのみを対象とすると、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) であった。初回点検時から変状が生じていた橋梁割合 (35.0%) と全点検を対象として変状が生じていた橋梁の割合 (39.4%) が同程度であることから、PC 橋の変状については、多くの変状が橋梁

完成後の比較的間もない期間あるいは施工中に生じた可能性が高いと想定される。したがって、より高品質のPC橋の建設に向けて、初期変状を抑制することは効果的であると考えられる。

図-2 に初回点検が実施されていた橋梁および初期変状があった橋梁に対する橋梁形式ごとの橋梁数の内訳を示す。初期変状の発生している橋梁 (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、ポストテンション桁 (以下、ポステン桁) では 53 橋 (91%) であった。PC 橋の初期変状は、プレテン桁に比べて、ポステン桁において多く発生している。

図-3 に初回点検で記録された初期変状を 31 種類に分類した結果を示す。ここで、変状分類の基にした 31 種類の変状パターンは、橋梁定期点検要領 (案)¹⁾ に示されている上部構造の 20 種類のひび割れパターンに加えて、橋梁点検で「その他」として記録されたひび割れを新たに分類し、31 種類の変状パターンとして整理し直したものである²⁾。図-3 から、31 種類の初期変状パターンのうち、【3】【6】【11】【12】【13】【16】【20】【22】【25】 (図-3 中の黒枠) 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想定される主な要因について表-1 に示す。ひび割れが多く発生している箇所は、施工手順により新コンクリートが旧コンクリートの拘束を受けやすい部位 (後打ち部や施工継目)、マスコンクリートとなり易い部位 (柱頭部や支点部) および PC 鋼材の定着具付近や PC 鋼材に沿った部位であった。初期変状の発生部位や橋梁形式別の発生傾向などから、初期変状発生の主要因として、「外部拘束 (打継目)」「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。初期変状を抑制するためには、これらの項目が変状発生リスクに与える影響を評価し、抑制する方策について検討する必要があると考えられる。

3. 腹圧力による変状リスクを低減する方策についての検討

3.1 主桁下面の橋軸方向ひび割れについて

図-3 の結果から、初期変状パターンとして【3】が最も多い結果となっている。初期変状パターン【3】が発生していた構造形式は、「ポステン箱桁」が最も多く (12/17 橋)、そのうち桁高変化がある橋梁は 10 橋である。さらに 10 橋のうち下フランジに PC 鋼材が配置されていた橋梁は 5 橋あり、そのうち 4 橋で下床版に橋軸方向ひび割れが発生していた。このことから、下フランジに PC 鋼材が配置されている橋では、高い確率でひび割れが発生していることがわかった。そのため、初期変状パターン【3】の発生要因としては、構造的な要因である「桁高変化のある桁の下床版に PC 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して疑われた。

初期変状の発生要因が構造的な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ることにより、初期変状リスクを低減することが可能と考えられる。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、構造的な条件 (PC 鋼材緊張力、PC 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 腹圧力によるひび割れ

下床版に配置した PC 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 (桁外側) の中央部付近とウェブ近

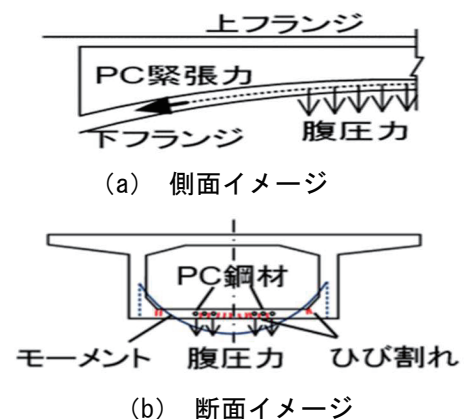


図-4 腹圧力の影響イメージ

傍（桁内側）には、腹圧力の影響により引張応力が生じる。ひび割れは、様々な要因が複合的に影響した結果により生じるものであるが、ひび割れが発生している4橋においては、初回点検による変状状況の傾向からも、腹圧力の影響が変状の主要因の一つであると考えられた。

3.3 腹圧力の検討実施有無

ひび割れが発生していた4橋のうち1橋は、断面方向設計で、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上で、鉄筋応力度 180N/mm^2 以下であることが照査されていた。しかし、その他3橋の橋梁においては、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かった。H24 道示³⁾では、曲線構造において、平面曲線に起因するプレストレス分力を考慮する事が望ましいことが規定されている。しかし、桁高変化がある場合に生じるプレストレスの鉛直分力（腹圧力）については規定されておらず、下床版の最小厚さの規定の解説において、配慮事項（十分な床版厚の確保、剛性の高い箇所（ウェブ近く）へのPC鋼材配置など）としての記述にとどまっている。明確な記述となっていないことが、設計者の判断により、この鉛直方向の腹圧力の考慮の有無のばらつきの原因の一つとなっているものと考えられる。

3.4 変状の有無と鉄筋応力度

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。検討は、設計計算において腹圧力を考慮してない橋梁においては、設計計算書で算出されている主桁断面位置での断面力（曲げモーメント）に、腹圧力による影響を加え、配置鉄筋面積で除すことにより検討断面位置での鉄筋応力度を算出し、この鉄筋応力度と対応する断面位置でのひび割れの有無（点検調書に基づく実績）を確認することにより実施した。検討対象は、平成20～24年度の初回点検において、腹圧力による影響がひび割れの主要因と想定された前述の4橋（橋梁No. 6, No. 9, No. 14, No. 19）に加え、平成25年度以降の点検結果から、同様に腹圧力の影響が主要因と想定されるひび割れを有する3橋梁（橋梁No. 23, No. 24, No. 25）を追加した計7橋、53断面とした。検討断面におけるひび割れ有無と鉄筋応力度の相関を図-5に示す。図-5より、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。また、鉄筋引張応力度が $120\sim 140\text{N/mm}^2$ 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 140N/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。

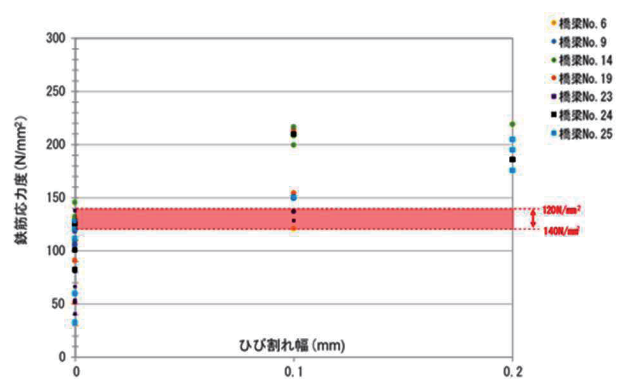


図-5 ひび割れの有無と鉄筋応力度の相関関係

3.5 構造的条件（PC鋼材緊張力、PC鋼材配置、鉄筋配置、床版支間など）による腹圧力の影響分析

3.5.1 検討方針

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多いポステン箱桁（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。なお、腹圧力抵抗幅は、標準の抵抗幅をブロック長 4m とし、比較として施工誤差により腹圧力が集中した場合（抵抗幅

1.0m、2.0m)を想定している。検討対象とした橋梁の構造諸元、構造概要図を図-6に示す。荷重、鉄筋配置および床版支間の検討パラメータを表-2に示す。

3.5.2 検討結果

図-7、図-8に②の標準ケース(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。なお、曲げひび割れ幅は、コンクリート標準示方書の算定式⁴⁾で算出した。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。検討結果より、下床版のシースに沿ったひび割れに対しては、構造的に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。

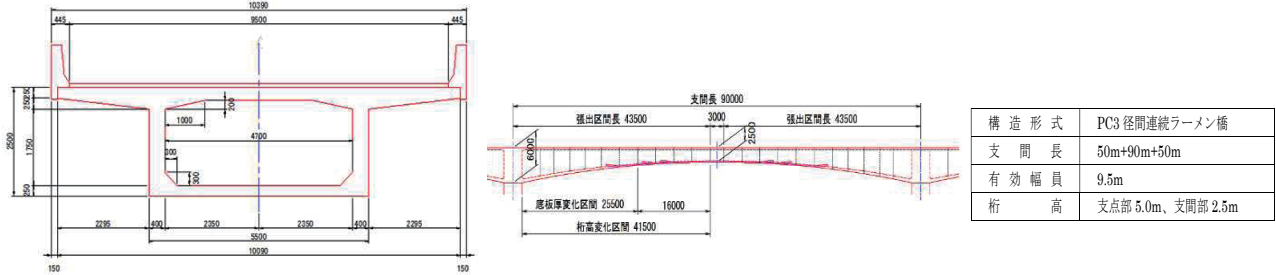


図-6 構造概要図および橋梁諸元

表-2 主要な初期変状パターンと推定される要因

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

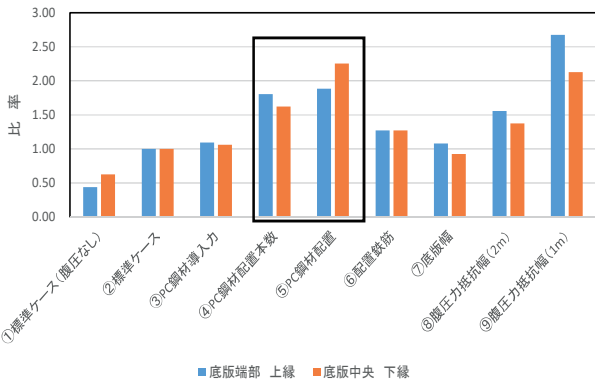


図-7 鉄筋応力度の比率(死荷重時)

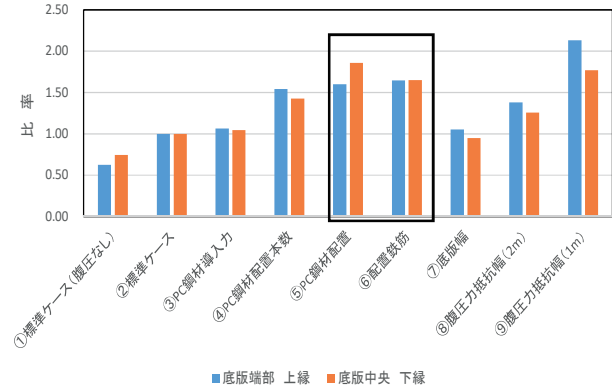


図-8 ひび割れ幅の比率(死荷重時)

3.6 PC鋼材配置に着目した腹圧力に対する下床版の検討

3.6.1 検討方針

ポステン箱桁を対象に、腹圧力により下床版に発生するひび割れの抑制を目的に、下床版のPC鋼材配置に着目して検討を行う。検討モデルは、図-6の支間中央断面とし、下床版厚は、全断面有効として抵抗することを前提に、コンクリートに発生する引張応力が $3\text{N}/\text{mm}^2$ 以下となる床版厚を設定する。鉄筋応力は、RC断面として算出し、その応力から曲げひび割れ幅を算出した。設計荷重は、H24道示³⁾に準じた荷重とする。検討ケースは、表-3に示すとおり、腹圧なし(ケース1)、腹圧有・PC鋼材ウェブ寄り(ケース2)、腹圧有・PC鋼材床版中央(ケース3)の3ケースとした。

表-3 各検討ケースの鉄筋応力度とひび割れ

検討ケース	配置鉄筋	荷重状態	鉄筋応力 (N/mm ²)		ひび割れ幅 (mm)	
			端部上縁	中央下縁	端部上縁	中央下縁
ケース 1: 腹圧なし (床版厚 190mm)	D13	死荷重時	39.5	57.7	0.079	0.100
		設計荷重時	129.3	76.4	0.182	0.121
	D16	死荷重時	50.3	73.5	0.127	0.164
		設計荷重時	164.6	97.3	0.309	0.202
ケース 2: 腹圧有 (PC 鋼材ウェブ寄り) (床版厚 220 mm)	D13	死荷重時	73.7	76.1	0.118	0.121
		設計荷重時	147.7	91.5	0.203	0.139
	D16	死荷重時	93.8	96.8	0.196	0.201
		設計荷重時	187.8	116.4	0.346	0.232
ケース 3: 腹圧有 (PC 鋼材床版中央) (床版厚 270 mm)	D13	死荷重時	106.2	137.0	0.155	0.191
		設計荷重時	163.3	148.9	0.221	0.204
	D16	死荷重時	69.8	90.0	0.113	0.136
		設計荷重時	107.3	97.8	0.155	0.144

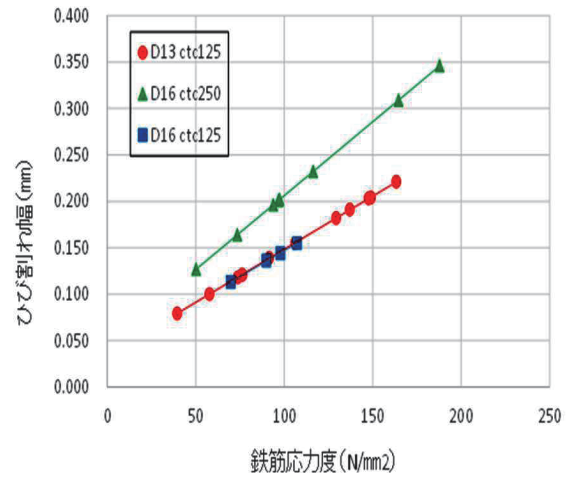


図-9 鉄筋応力度とひび割れ幅の関係

3.6.1 検討結果

各検討ケースの下床版の橋軸直角方向の鉄筋応力度とひび割れ幅を表-3に示す。また、表中の鉄筋応力度とひび割れ幅の関係を図-9に示す。表-3および図-9より、以下のことが分かる。配置鉄筋量 (D13, 配置間隔 125 mm) が同じ場合、PC 鋼材配置をウェブ寄りにしたケース 2の方が、下床版中央に配置したケース 3より、床版厚を 50 mm薄くしても死荷重時、設計荷重時の鉄筋応力度とひび割れ幅は小さい。鉄筋配置間隔が 125 mmの場合は、設計荷重時の鉄筋応力度を 140N/mm²以下にすれば、ひび割れ幅は 0.2 mm以下となる。鉄筋配置間隔が 250 mmの場合は、設計荷重時の鉄筋応力が 180N/mm²以下でも、ひび割れ幅は 0.3 mm以上となり、死荷重時の鉄筋応力度が 100N/mm²以下でも、ひび割れ幅は 0.2 mm以上となった。

4. まとめ

初期変状パターン【3】に分類された「主桁下面の橋軸方向ひび割れ」のうち、ひび割れが多く発生していたポステン箱桁に対して、その要因および変状発生リスクを抑制させる方策について初回点検結果を基に検討した結果、以下の方策が有効であると考えられる。

- 1) 腹圧力を低減する対策として、桁高変化がある箱桁断面の下床版にPC 鋼材を配置する場合は、できるだけウェブ近傍に配置し、下床版支間中央部には配置しない。また、下床版にPC 鋼材を配置する場合には、PC 鋼材の本数はできるだけ少なくする。
- 2) ひび割れの発生を抑制する対策として、鉄筋応力度を 140N/mm²程度に制限する。また、鉄筋の配置間隔を 125 mmにするなど配置間隔を小さくする。

なお、変状発生要因は、乾燥収縮や温度の影響なども想定されるので、上記の対策がひび割れを発生させないことを保証するものではないが、PC 鋼材配置の変更や鉄筋応力度の低減などの対策は、PC 鋼材の腹圧力に対して、下床版の形状変更なしに、ひび割れ発生リスクの低減が期待できる。

参考文献

- 1) 国土交通省 国道・防災課, 橋梁定期点検要領 (案) 平成 16 年 3 月
- 2) 土木研究所 共同研究報告書 第 468 号: プレストレストコンクリート橋における初期変状の影響評価と対策に関する共同研究報告書 (その 1), 2016.3
- 3) 公益社団法人日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 平成 24 年 3 月
- 4) (社) 土木学会, コンクリート標準示方書, 2012