

2章 PC橋における初期変状の実態と原因推定

2.1 検討概要

本章では、近年の道路橋の点検データに基づくPC橋の損傷実態の整理や原因分析を行い、本研究で対象とするPC橋の初期変状を示す。

橋梁定期点検結果ならびに昨今の不具合事例の内容から、比較的初期の段階で発生したと考えられるひび割れが確認されている。そこで、初期段階において何らかの原因で生じたと考えられる変状を抽出し、ひび割れパターン・原因を整理する。

以下に検討概要を示す。

2.2 定期点検データに基づくひび割れパターンの整理では、各地方整備局において2008年度～2012年度に実施された橋梁定期点検結果から、初回点検及び初回点検を含む全点検のデータをもとにPC橋の損傷実態を整理する。

2.3 定期点検データに基づくプレテン桁とポステン桁の損傷事例と原因分析では、架橋実績の多いPC-T桁について、プレテンション桁とポストテンション桁に区分し、損傷事例を整理した上で、使用材料（コンクリート強度、水セメント比等）、製作場所（工場製作／現場製作）やプレストレス導入方法など、両者の設計や施工方法の違いに基づき、それぞれ特徴的な損傷の原因分析を行った。

2.4 急曲線を有するPC橋の損傷事例と原因分析では、2.2で収集したPC橋の初回点検結果のうち、特に初期変状の程度が顕著で、耐荷性能や耐久性能に影響を及ぼすと考えられる事例を抽出し、原因分析を行った。

2.5 本研究で対象とする初期変状では、2.2～2.4の結果を踏まえ、PC橋の初期変状のうち耐荷性能や耐久性能への影響が懸念され、早急に対応を図るのが望ましいと考えられる主要な項目を抽出し、本共同研究において対象とする検討課題を整理した。

2.2 定期点検データに基づくひび割れパターンの整理

(1) 目的

近年のPC橋における定期点検データをもとに、構造形式ごとの損傷実態、並びにその中で初期変状に該当する変状の発生傾向を整理する。

(2) 対象及び集計方法

対象は、各地方整備局が管理するPC橋の定期点検結果のうち2011年4月時点の定期点検結果（初回点検を含む）とした。

集計は、橋毎に作成されている点検カルテから、橋梁定期点検要領（案）（平成16年3月国土交通省）に示されている上部構造のひび割れパターン「①～⑳」（表-2.2.2、表-2.2.3）及び点検カルテ作成時に、それらのパターンに分類されなかったパターンのひび割れ「他」について、構造形式ごとに機械的に抽出し分類したものである。

なお、以降において「全点検」とは、上記対象のうち各橋の最新の点検結果をいう。また、「初回点検」とは「全点検」のうち、供用後初めて行われた定期点検をいう。

(3) 調査結果

1) 全点検結果

PC 橋の定期点検結果（全点検）のひび割れパターン分類を表-2.2.1、構造形式毎のひび割れパターンについてひび割れ発生径間数で集計した結果を図-2.2.1～図-2.2.6に示す。対象としたPC 橋は、8,434 橋（20,743 径間）中、ひびわれの発生していた 2,756 橋（8,190 径間）である。

表-2.2.1 PC 橋の定期点検結果のひび割れパターン分類（全点検）

構造形式	ひび割れパターン(径間)																				合計	総径間数		
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑳	他			不明	
プレテンT桁	54	104	13	117	219	31	16	32	22	11	288	5	0	20	4	0	53	227	43	33	778	290	2,360	8,574
プレテン中実床版	43	244	5	10	4	5	1	0	4	1	1	2	0	1	0	0	8	1	6	1	84	76	497	3,304
プレテン中空床版	16	109	8	16	2	5	0	0	3	6	2	0	2	0	2	0	8	0	0	0	59	36	274	1,413
ポステンT桁	113	497	14	102	49	40	3	3	32	23	184	8	2	20	16	0	89	82	61	107	931	380	2,756	3,874
ポステン箱桁	33	181	20	55	14	5	0	5	12	11	25	4	24	0	1	0	38	11	3	18	261	98	819	795
ポステン中空床版	86	308	34	142	77	8	0	0	15	6	5	0	1	1	3	42	27	6	4	15	598	105	1,484	2,783
																							8,190	20,743

※プレテン中実床版は「プレテン床版」とした。

プレテンT桁

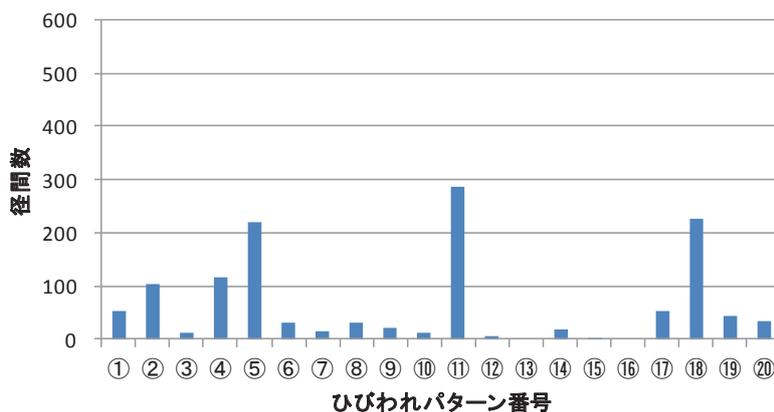


図-2.2.1 ひび割れ発生径間数（プレテンT桁）

プレテン中実床版

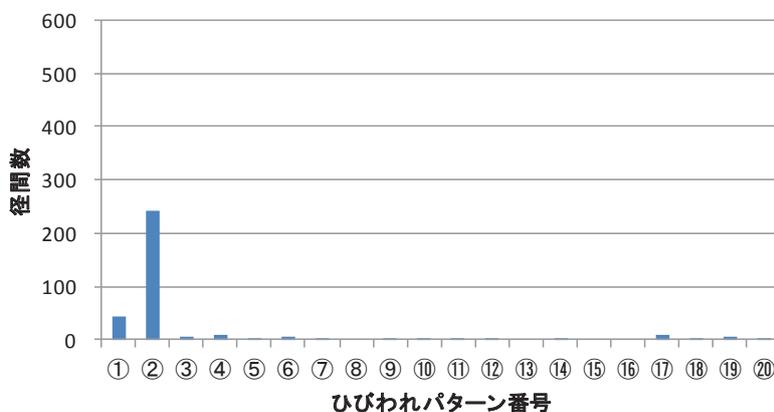


図-2.2.2 ひび割れ発生径間数（プレテン中実床版）

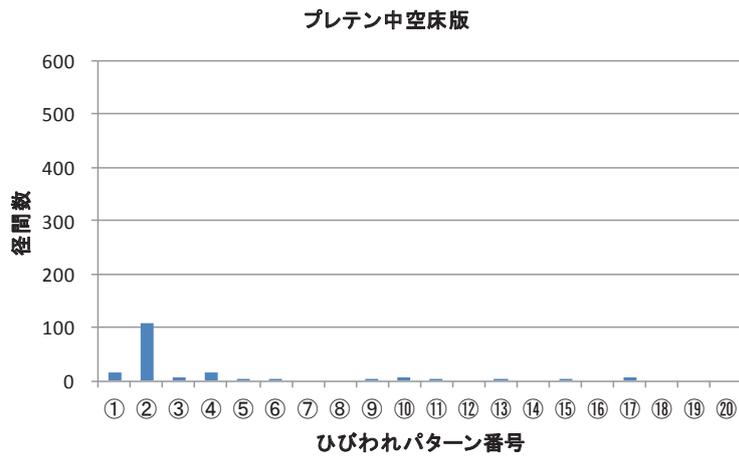


図-2.2.3 ひび割れ発生径間数（プレテン中空床版）

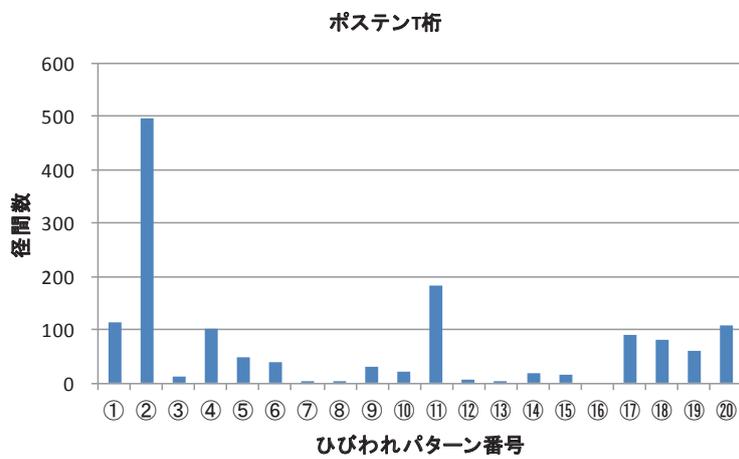


図-2.2.4 ひび割れ発生径間数（ポステンT桁）

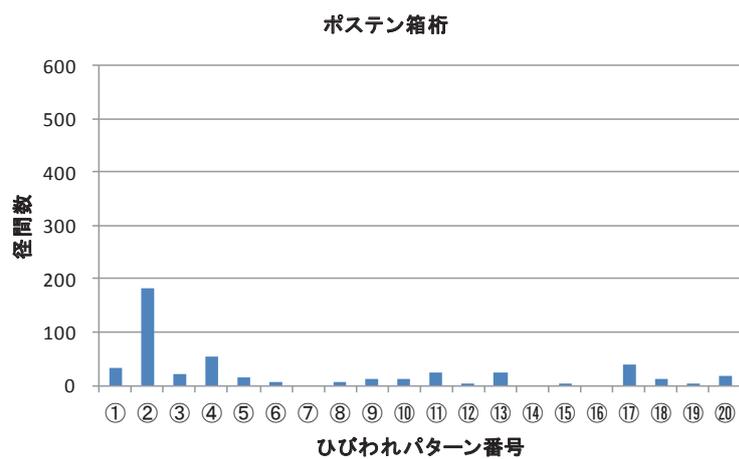


図-2.2.5 ひび割れ発生径間数（ポステン箱桁）

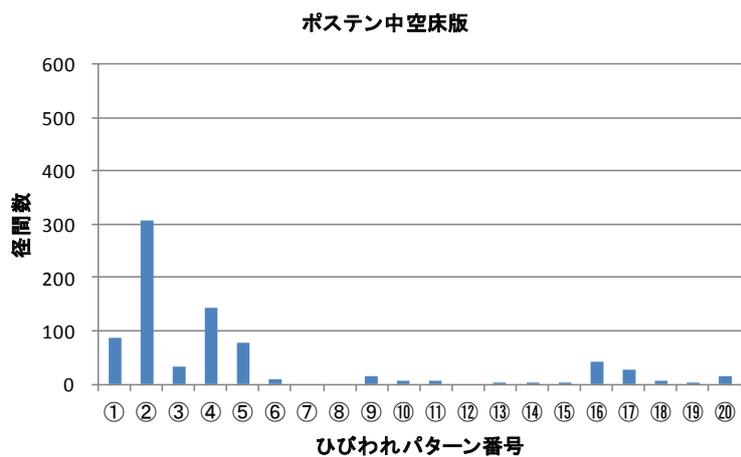


図-2.2.6 ひび割れ発生径間数（ポステン中空床版）

表-2.2.2 橋梁定期点検要領（案）のひびわれパターン分類（RC，PC共通）

位置	ひびわれパターン
支間中央部	①主桁直角方向の桁下面および側面の鉛直ひびわれ
	②主桁下面縦方向ひびわれ
支間1/4部	③主桁直角方向の桁下面および側面の鉛直ひびわれ
支 点 部	④支点付近の腹部に斜めに発生しているひびわれ
	⑤支承上桁下面・側面に鉛直に発生しているひびわれ
	⑥支承上から斜めに側面に発生しているひびわれ
	⑦ゲルバー部のひびわれ
そ の 他	⑧連続桁中間支点部の上側の鉛直ひびわれ
	⑨亀甲状，くもの巣状のひびわれ
	⑩桁の腹部に規則的な間隔で鉛直方向のひびわれ
	⑪ウェブと上フランジの接合点付近の水平方向のひびわれ
	⑫桁全体に斜め45°方向のひびわれ

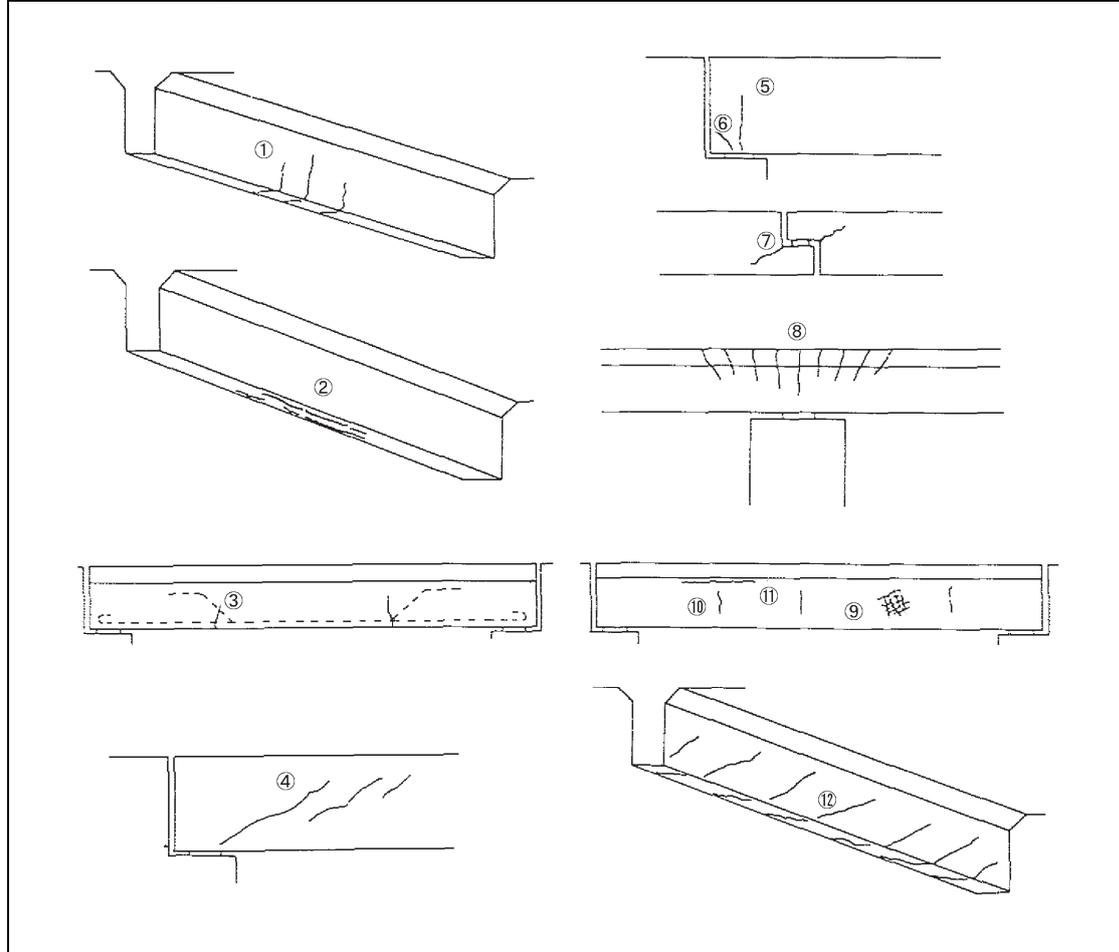


表-2.2.3 橋梁定期点検要領（案）のひびわれパターン分類（PCのみ）

位 置	ひ び わ れ パ タ ー ン
支間中央部	⑬変断面桁の下フランジのPC鋼材に沿ったひびわれ ⑭主桁上フランジ付近
支間1/4部	⑭PC連続中間支点付近の反局部のPC鋼材に沿ったひびわれ ⑮PC連続中間支点付近の反局部のPC鋼材曲げ上げに沿ったひびわれ
支 点 部	⑲主桁の腹部に水平なひびわれ
そ の 他	⑯PC鋼材定着部付近 ⑰PC鋼材が集中している付近 ⑳シーすに沿って生じるひびわれ

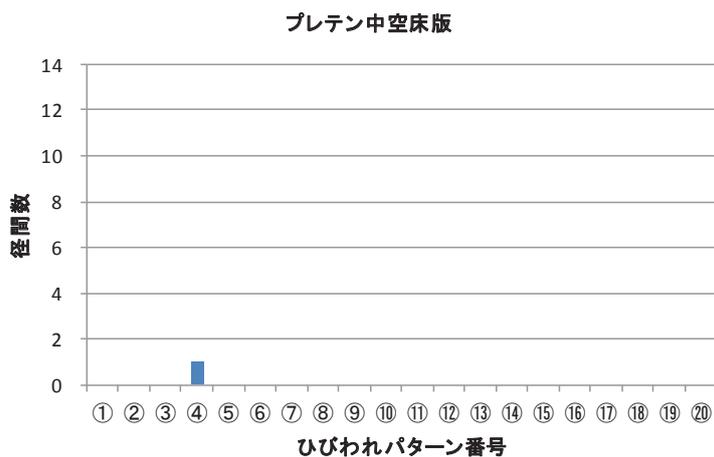


図-2.2.9 ひび割れ発生径間数（プレテン中空床版）

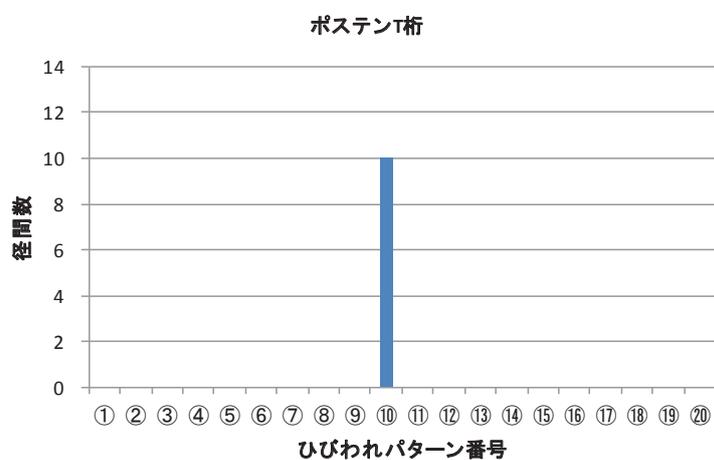


図-2.2.10 ひび割れ発生径間数（ポステンT桁）

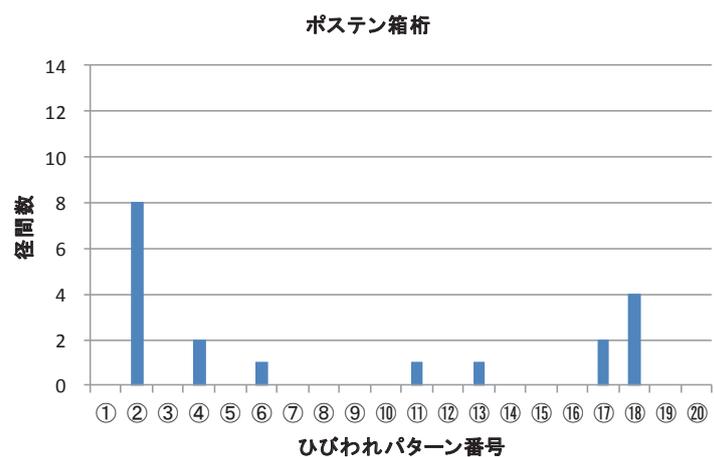


図-2.2.11 ひび割れ発生径間数（ポステン箱桁）

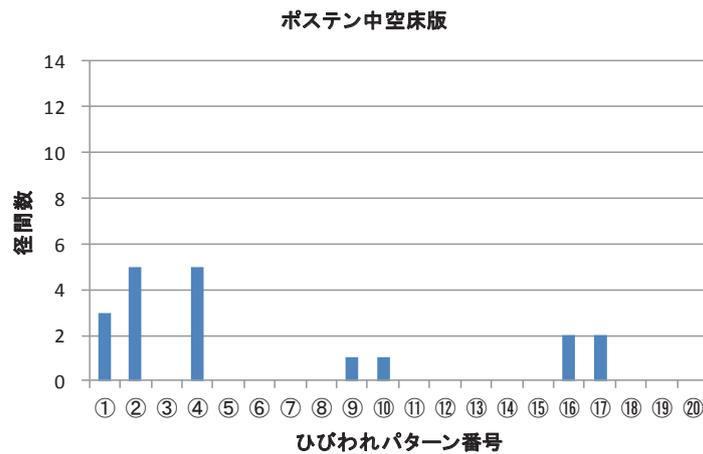


図-2. 2. 12 ひび割れ発生径間数（ポステン中空床版）

初回点検結果と全点検結果（最新の点検結果）を比較すると、初回点検時に比べてひび割れ発生径間数が増えていることが確認された。初回点検結果では、ひび割れパターン①、②、④、⑩、⑱が比較的多いが、「他」、「不明」に位置付けされている数が非常に多い。H16年度版の国の定期点検要領におけるひび割れパターン分類では、分類が困難なひび割れ性状のものが多くわかる。そこで、これらの点検調書を個々に確認し、ひび割れパターンの分類作業を再度実施した。

図-2.2.13にPC橋のひび割れ発生傾向を示す。全点検、初回点検ともに約3割のPC橋でひび割れが生じているが、図-2.2.13の(a)と(b)を比較すると、ポステン桁において初期ひび割れが多い。また、その傾向は全点検の場合でも同様である。初回点検の構造形式に着目した場合、ポストテンション方式ではT桁よりも箱桁や中空床版のほうがひび割れが発生している比率が高い傾向である。

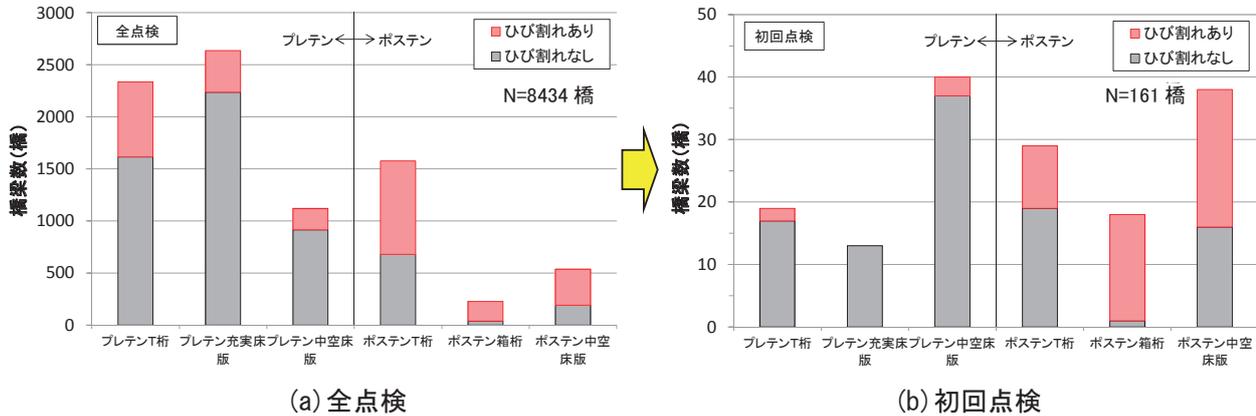


図-2.2.13 PC橋のひび割れ発生傾向

そこで、初回点検を実施した161橋のうち、ひび割れを生じていた58橋について詳細なひび割れパターンについて検討を行った。その際、点検者及び記録者において、ひび割れパターンが判断できない「その他」に分類されているものが多く、ひび割れパターンの分類違いも見られた(表-2.2.5)。これら20パターンに分類できないひび割れは、これまで点検者が最も近いと判断したパターンに無理矢理分類されるか、無理な分類を避け「その他」とのひび割れパターンとして記録されるかのいずれかであり、原因不明のひび割れとして扱われる場合があった。

ひび割れパターンに分類することの意義は、ひび割れパターンを分析することにより、ひび割れ発生原因を解明することであるから、このような実情は好ましいものではない。そのため、これらの点検調書を再確認し、【1】～【31】の新しいひび割れパターン(以下、新分類のひび割れパターンとする)を設定して再分類を行った(新分類のひび割れパターンは表-2.2.6～表-2.2.9参照)。

表-2.2.5 点検調書リスト抽出【初回点検、ひび割れパターン「①～⑳」】

施設完成年度		架設竣工年		点検年度
2008	H20	2006	H18	
2004	H16	2004	H16	H20
2002	H14	2002	H14	H17
2007	H19	2006	H18	H20
		2003	H15	H20
		2004	H16	H20
		2003	H15	H20
2001		2002	H14	H18
2005	H17	2004	H16	H18
		2006	H18	H21
2008		2007	H19	H20
		2003	H15	H19
		2003	H15	H19
2008		2008	H20	H21
2006	H18	2006	H18	
2008		2008	H20	H21
2008	H20	2008	H20	H21
2008	H20	2008	H20	H21
2008	H20	2007	H19	
2007	H19	2007	H19	H21
2002	H14	2003	H15	H16
2007	H19	2007	H19	
2007	H19	2007	H19	
2007	H19	2007	H19	H20
2008	H20	2007	H19	H20
2007	H19	2007	H19	H20
2007	H19	2007	H19	H20
2004	H16	2004	H16	
1995	H7	1995	H7	H16

ひび割れパターン「①～⑳」

施設完成年度		架設竣工年		点検年度
2008	H20	2006	S14	H21
2000	H12	2000	H12	H17
2007	H19	2005	H17	H20
2008	H20	2006	H18	H21
2008	H20	2005	H17	H21
2007	H19	2007	H19	H21
2003	H15	2003	H15	H17
2008	H20	2007	H19	H21
2006	H18	2002	H14	H18
2005	H17	2005	H17	H20
2006	H18	2006	H18	H20
2002	H14	2002	H14	H17
2008	H20	2006	H18	H21
2008	H20	2005	H17	H21
2008	H20	2005	H17	H21
2008	H20	2007	H19	H21
2006	H18	2005	H17	H20
2007	H19	2007	H19	H21
2004	H16	2004	H16	H20
2007	H19	2007	H19	H21
2007	H19	2007	H19	H21
2005	H17	2005	H17	H21
2005	H17	2005	H17	H21
2006	H18	2006	H18	H21
2006	H18	2006	H18	H20
2006	H18	2006	H18	H20
2004	H16	2004	H16	H20

ひび割れパターン「その他」

ひび割れパターン内訳を図-2.2.14に示す。初回点検でひび割れが発生している橋梁数が5橋を超えたひび割れパターンは表-2.2.6～表-2.2.9に示す31種類のひび割れパターンのうち、赤枠で囲んだ9パターンであった。これらのパターンの多くは、外部拘束(打継目や後打ち部)、内部拘束(水和熱)、乾燥収縮が要因と考えられるものであるが、一部は斜め引張応力超過やPC定着部の割裂、支承の回転拘束など構造的な要因の可能性も考えられるものである。

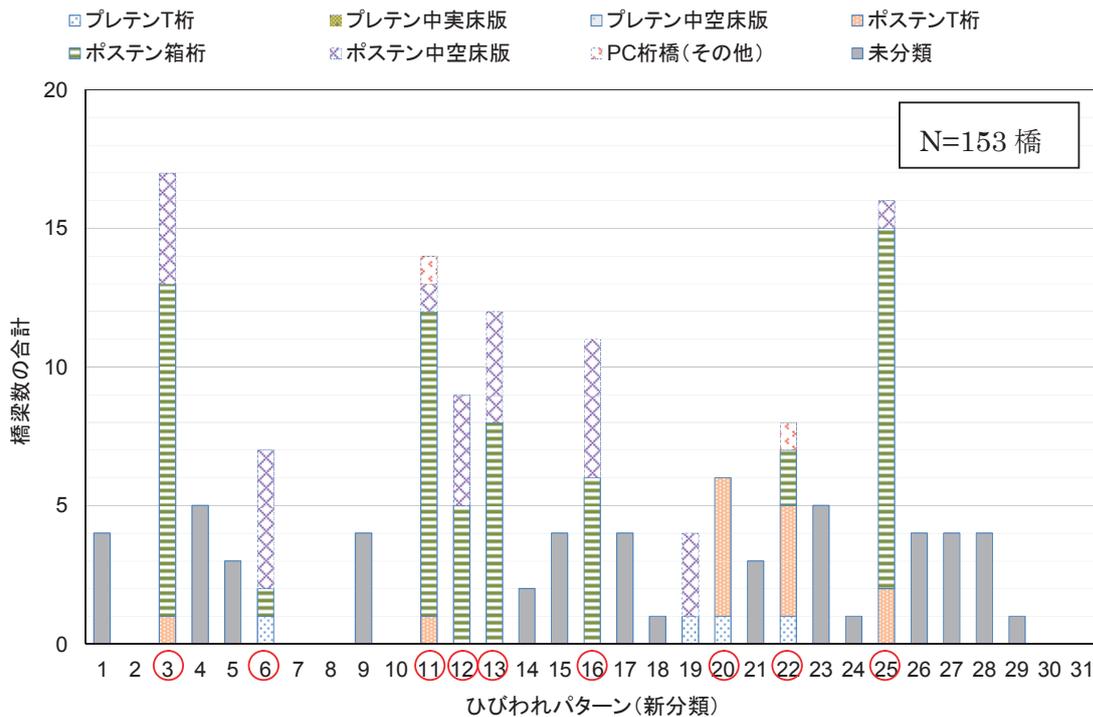


図-2.2.14 PC橋のひび割れパターン内訳 (初回点検_ひび割れパターン新分類)

表-2.2.6 PC橋の特徴的なひび割れパターン (新分類) と発生要因 (1)

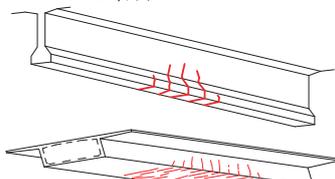
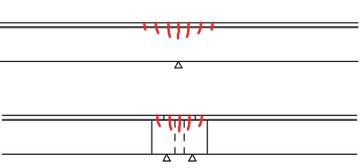
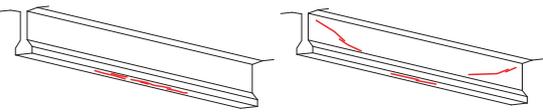
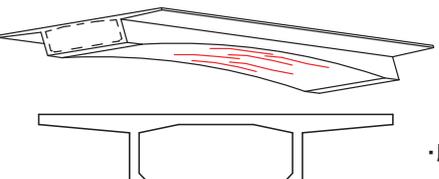
<p>【1】主桁直角方向の桁下面および側面の鉛直ひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・曲げ応力超過 ・プレストレス損失 ・支保工沈下 	<p>【2】連続桁中間支点部の上側の鉛直ひびわれ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・曲げ応力超過 ・プレストレス損失
<p>【3】主桁下面の橋軸方向ひび割れ 主桁側面のシースに沿ったひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・主鉄筋の腐食 ・シースのかぶり不足 ・グラウト不良 ・ASR 	<p>【4】変断面桁の下フランジのPC鋼材に沿ったひびわれ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・腹圧力

表-2.2.7 PC 橋の特徴的なひび割れパターン（新分類）と発生要因（2）

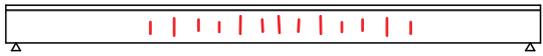
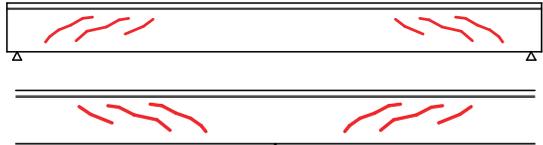
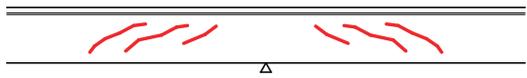
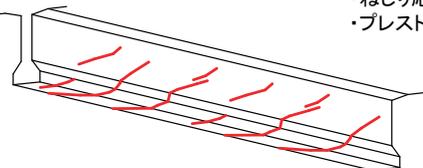
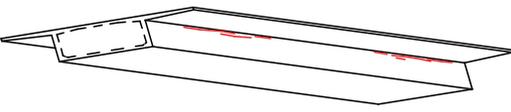
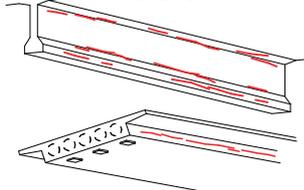
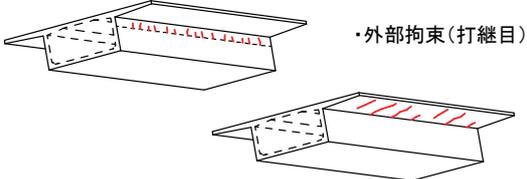
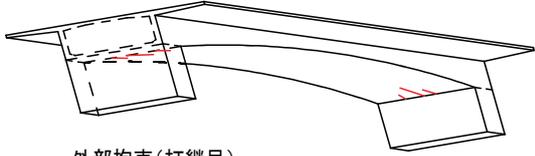
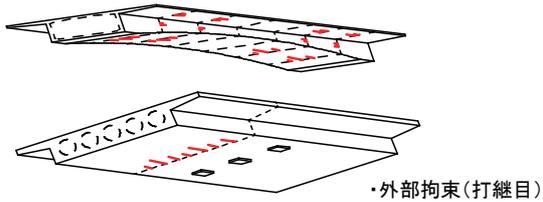
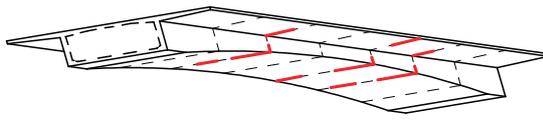
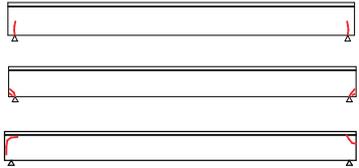
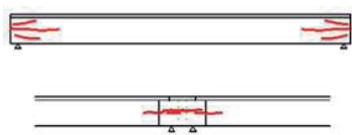
<p>【5】 桁の腹部に規則的な間隔で鉛直方向のひびわれ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・スターラップの腐食 ・かぶり不足 	<p>【6】 支点付近のウェブ斜めひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・斜め引張応力超過 ・プレストレス損失 ・支保工沈下
<p>【7】 中間支点付近の PC 鋼材に沿ったひびわれ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・シースのかぶり不足 ・グラウト不良 ・ASR 	<p>【8】 桁全体に斜め 45° 方向のひびわれ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・ねじり応力超過 ・プレストレス損失
<p>【9】 ウェブと上フランジの接合点付近の水平方向のひびわれ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの沈降 ・コールドジョイント 	<p>【10】 主桁側面（腹部）に水平方向に発生しているひびわれ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの沈降 ・乾燥収縮 ・温度応力 ・ASR
<p>【11】 ウェブとフランジの打継目近傍の直角方向ひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・外部拘束(打継目) 	<p>【12】 柱頭部主桁下面の橋軸方向ひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・外部拘束(打継目) ・内部拘束(水和熱)
<p>【13】 主桁鉛直打継目の橋軸方向ひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・外部拘束(打継目) 	<p>【14】 打継ぎ面に発生するひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・接合部の引張応力超過 ・接合部の施工不良
<p>【15】 主桁側面に支承上から発生している鉛直もしくは斜めひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・支承部の拘束 ・支圧応力超過 ・桁変形の拘束 	<p>【16】 端支点部ウェブの水平～放射状ひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・PC 定着部割裂 ・ASR ・内部拘束(水和熱)

表-2.2.8 PC橋の特徴的なひび割れパターン（新分類）と発生要因（3）

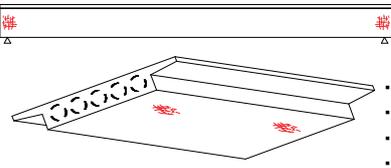
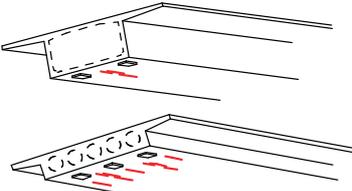
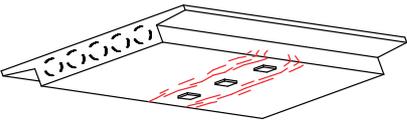
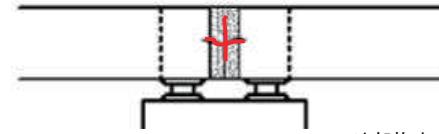
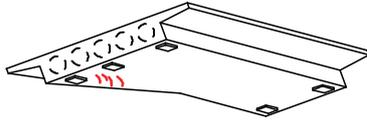
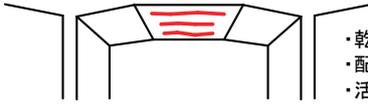
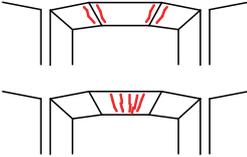
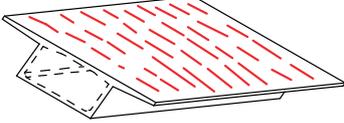
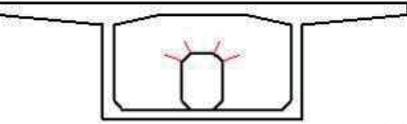
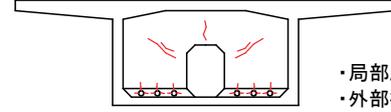
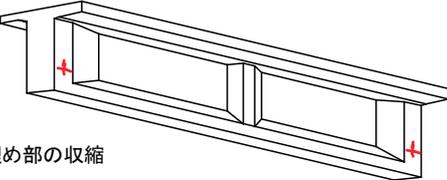
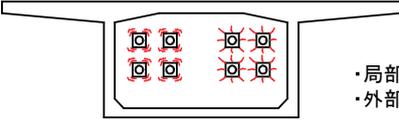
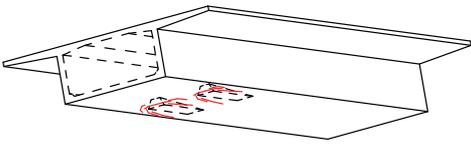
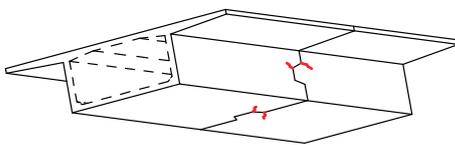
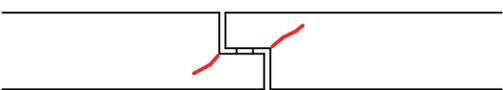
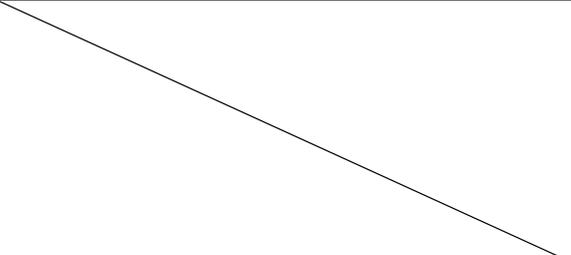
<p>【17】 亀甲状、くもの巣状の表面微細ひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・ASR ・凍害 ・初期の養生不足 ・充填不良 	<p>【18】 端支点横桁下面の橋軸方向ひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・支承部の横方向拘束 ・内部拘束(水和熱)
<p>【19】 桁下面の直角方向および桁腹の鉛直方向ひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・桁の回転、伸縮の拘束 	<p>【20】 桁下面の直角方向および腹部の鉛直方向ひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・外部拘束(後打ち部)
<p>【21】 拡幅を有する主桁の拡幅部下面に発生しているひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・引張応力超過 ・応力集中 	<p>【22】 連続床版下面に発生している橋軸方向ひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・乾燥収縮 ・配力筋方向の補強 ・活荷重の超過
<p>【23】 主桁側面に支承上から発生している鉛直もしくは斜めひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・曲げ応力超過 ・プレストレス損失 ・活荷重の超過 	<p>【24】 規則的な間隔で床版上面に発生している橋軸直角方向ひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの沈降 ・乾燥収縮 ・横方向鉄筋の腐食
<p>【25】 横桁部、開口部のひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・外部拘束(後打ち部) ・内部拘束(水和熱) 	<p>【26】 偏向部あるいは偏向壁に発生している鉛直・斜め・水平方向のひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・局部応力 ・外部拘束(後打ち部) ・内部拘束(水和熱)
<p>【27】 桁腹部に発生している鉛直方向と水平方向のひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・後埋め部の収縮 	<p>【28】 定着部付近に発生している鉛直・斜め・水平方向のひび割れ</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・局部支圧応力 ・外部拘束(後打ち部)

表-2.2.9 PC 橋の特徴的なひび割れパターン（新分類）と発生要因（4）

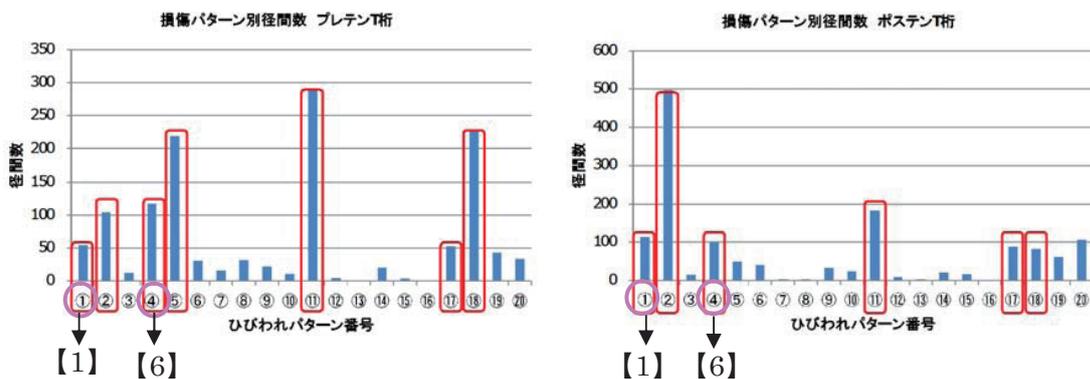
<p>【29】PC 鋼材定着部（定着突起）付近に発生しているひび割れ</p>  <p>・定着具背面への橋軸方向引張応力</p>	<p>【30】コンクリートせん断キー基部から斜めに発生しているひび割れ</p>  <p>・過大なせん断力作用 ・せん断キーのせん断耐力不足</p>
<p>【31】ゲルバー部のひびわれ</p>  <p>・応力超過 ・ゲルバー支承の水平移動拘束</p>	

2.3 定期点検データに基づくプレテン桁とポステン桁の損傷事例と原因分析

2.3.1 検討概要

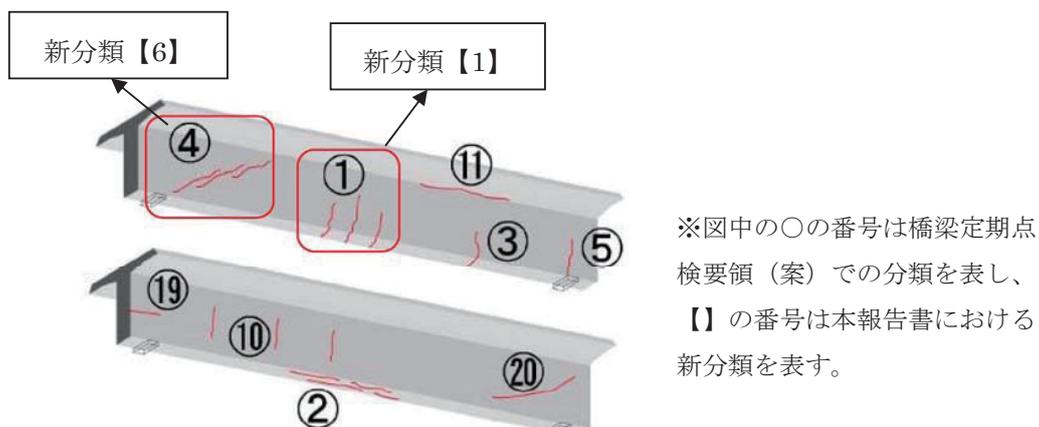
2.2では、各地方整備局が管理するPC橋のうち、2008年度から2012年度に行った8,434橋(20,743径間)の橋梁点検結果(全点検)をもとに、ひび割れの発生していた2,756橋(8,190径間)の構造形式ごとにひび割れパターンを分析した(表-2.2.1)。この表をもとに、PC橋としての架設実績が多く、支保工施工などに比べて施工的な要因が少ないと考えられるプレテンT桁橋、ポステンT桁橋のひび割れパターンの分類を抽出して図-2.3.1に示す。図より、プレテンT桁橋、ポステンT桁橋とも、構造的に有害と考えられるひび割れパターン【1】(曲げひび割れ)や、ひび割れパターン【6】(せん断ひび割れ)の発生事例が比較的多いことが分かる。

本章では、ひび割れパターン【1】とパターン【6】のひび割れに着目し、それらのひび割れ発生とその要因分析を行い、ひび割れ発生のリスクを低減するための、設計における留意点、現行基準での不明確な内容や項目を整理する。



(a) プレテンT桁橋

(b) ポステンT桁橋



※図中の○の番号は橋梁定期点検要領(案)での分類を表し、【】の番号は本報告書における新分類を表す。

(c) ひび割れパターン

図-2.3.1 コンクリート主桁のひび割れ発生の特徴

2.3.2 原因分析を行う橋梁の選定

原因分析を行う橋梁は、橋梁点検結果の中でひび割れパターン【1】（曲げひび割れ）、ひび割れパターン【6】（せん断ひび割れ）が発生しているプレテン T 桁橋、ポステン T 桁橋のうち、設計荷重（施工年度）、平面形状などに着目し、以下の項目で抽出した。

① 橋梁形式

プレテンション方式 T 桁橋、ポステンション方式 T 桁橋

② 構造形式

単純桁

③ 設計荷重

設計活荷重 TL-20（平成 5 年度以前の設計）

設計活荷重：A 活荷重、B 活荷重（平成 6 年度以降の設計）

④ 平面形状

直橋

斜橋・曲線橋

⑤ 損傷の程度

損傷の程度は、比較的損傷度が大きな損傷度 b 以上の橋梁を選定する。

⑥ ひび割れのパターン

パターン【1】、パターン【6】

損傷原因を調査する橋梁のリストを表-2.3.1 に示す。

プレテン T 桁橋やポステン T 桁橋は、プレキャストの主桁を現場打ちの横桁や床版で一体化する構造である。そのため、主桁に初期変状（ひび割れパターン【1】、【6】）を起こす要因としては、主桁そのものの要因（プレストレス不足、部材厚の不足、鉄筋量不足、材料の不具合、製作・運搬・架設方法の不具合等）、橋体完成後の構造的要因（平面形状によるねじり等）、供用後の環境要因（塩害等）が考えられる。

本検討では、初期変状を起こす要因を究明するため、橋梁の平面形状と、主桁の断面形状（PC 鋼材の種類や配置を含む）に着目して、表-2.3.1 の橋梁の点検結果を以下の項目で統計的に分析する。

① 橋梁の平面形状

ひび割れは主桁に作用するせん断力やねじりモーメントによってひび割れる可能性があるが、斜橋や曲線橋においては、斜角や 1 径間の交角の大きさに影響され、直橋よりねじりモーメントが大きくなることでひび割れの発生する可能性が高くなると考えられる。そこで、橋梁の平面形状とひび割れパターンとの相関性を確認する。

表-2.3.1 損傷原因を調査する橋梁リスト

整理番号	資料No. (新)	損傷程度	ひび割れ分類番号 国交省の 点検要領 H16.3に よる番号	支間長	架設竣工年	構造形式	橋長	総経間数	平面形状	全幅員	設計基準上部	設計活荷重
【プレテン桁】												
1	b	11	(1)	11.66	1989	DI	1直橋(直角橋)	14.7	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20	
2	b	11	(1)	13.4	1983	DI	1斜橋+曲線橋	16	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20	
3	1-9	b	(1)	17.7	2002	DI	2斜橋	5	平成8年	1共通編3コンクリート橋	A活荷重	
4	b	11	(1)	16.3	1993	DI	連続PCレテテ桁橋	37	15.4	平成元年	1共通編2鋼橋	TL-20
5	1-1	d	(1)	16.7	1985	DI	単純PCレテテ桁橋	19.4	27.8	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
6	1-10	b	(1)	19.3	1994	DI	単純PCレテテ桁橋	20	18.3	平成元年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
7	d	11	(1)	19.6	1988	DI	単純PCレテテ桁橋	61	10.5	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
8	b	11	(1)	19.6	1988	DI	単純PCレテテ桁橋	61	10.5	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
9	b	11	(1)	19.9	1987	DI	単純PCレテテ桁橋	21.5	24.5	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
10	1-3	c	(1)	21.0	1984	DI	単純PCレテテ桁橋	21.7	10.4	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
11	1-11	b	(1)	19.8	1989	DI	PC単純PCレテテ桁橋	20.5	9.7	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
12	1-6	d	(6)	20.2	1985	DI	単純PCレテテ桁橋	20.86	10.1	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
13	c	14	(6)	20.5	1991	DI	単純PCレテテ桁橋	21.2	8.4	平成元年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
14	b	14	(6)	20.8	1987	DI	単純PCレテテ桁橋	21.5	10	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
(合計6橋)												
【ポステン桁】												
15	1-8	c	(1)	23.4	1993	DI	単純PCボステテ桁橋4連	96.5	8.2	平成元年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
1	d	11	(1)	21.5	1989	DI	単純PCボステテ桁橋	22.3	13.4	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
2	b	11	(1)	22.0	1989	DI	単純PCボステテ桁橋3連	68.34	9.3	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
3	b	11	(1)	24.7	1983	DI	単純PCボステテ桁橋2連	63.59	8.3	昭和47年	1共通編2鋼橋	TL-20
4	d	11	(1)	25.3	1994	DI	単純PCボステテ桁橋	26.1	6.1	平成元年	1共通編3コンクリート橋	TL-14
5	b	11	(1)	25.7	1989	DI	単純PCボステテ桁橋8連	221.98	12.2	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
6	b	11	(1)	25.7	1983	DI	単純PCボステテ桁橋8連	221.98	12.1	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
7	2-1	c	(1)	27.4	1994	DI	単純PCボステテ桁橋	28.2	10.2	平成6年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
8	b	11	(1)	33.1	2002	DI	単純PCボステテ桁橋	34	11.9	平成8年	1共通編2鋼橋	TL-20
9	b	14	(6)	23.0	1986	DI	単純PCボステテ桁橋3連	74	18	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
10	c	14	(6)	24.4	1989	DI	単純PCボステテ桁橋	25.15	20.81	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
11	2-2	d	(6)	25.7	1987	DI	単純PCボステテ桁橋	26.5	12.8	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
12	2-3	c	(6)	26.8	1995	DI	単純PCボステテ桁橋	27.68	11	平成6年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
13	2-4	e	(6)	27.2	1983	DI	PC単純PCボステテ桁橋 3連	83.84	15.2	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
14	2-5	c	(6)	27.4	1995	DI	単純PCボステテ桁橋	28.2	10.2	平成6年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
15	2-6	d	(6)	28.5	1987	DI	PC単純PCボステテ桁橋	29.3	12.05	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
16	c	14	(6)	28.8	1987	DI	単純PCボステテ桁橋	29.3	12.05	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
17	b	14	(6)	29.4	1988	DI	単純PCボステテ桁橋	30.9	12.8	平成8年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
18	d	14	(6)	30.1	1983	DI	単純PCボステテ桁橋	60.7	23	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
19	b	14	(6)	30.8	1986	DI	単純PCボステテ桁橋	63.3	12.8	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
20	2-7	c	(6)	31.4	1988	DI	単純PCボステテ桁橋	34.4	10	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
21	2-8	d	(6)	33.1	1988	DI	単純PCボステテ桁橋・2連	67.8	13.95	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
22	2-9	c	(6)	33.1	2001	DI	単純PCボステテ桁橋	34.1	14	平成8年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
23	2-10	c	(6)	33.7	1988	DI	単純PCボステテ桁橋	34.5	16.1	平成8年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
24	b	14	(6)	33.9	1982	C3	PC単純PCボステテ桁橋	173.2	12.55	昭和53年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
25	2-11	c	(6)	36.1	2005	DI	単純PCボステテ桁橋	37	12.5	平成14年	1共通編3コンクリート橋	TL-20
(合計8橋)												

※原因調査を行う橋梁は、損傷程度がc、d、eを基本とするが、適応するものがない場合Hbの橋梁とする。凡例：
 ※構造形式は全て単純桁である。

は詳細調査橋梁

② 主桁の断面形状

プレテン T 桁橋は、基本的に JIS に準じて設計されている。また、ポステン T 桁橋は、旧建設省制定の標準設計に準じて設計されている場合が多い。そのため、プレテン T 桁橋、ポステン T 桁橋とも、設計時期に応じた JIS や標準設計に準じて設計されている可能性が高い。

そこで、橋梁調査表の竣工年および適用設計基準をもとに、適用されている JIS や標準設計より主桁の断面形状（PC 鋼材の種類や配置を含む）を推定し、ひび割れパターンとの相関性を確認する。

2.3.3 統計的なひび割れ発生の原因分析

(1) 橋梁の平面形状による分析

1) プレテン T 桁橋

ひび割れの原因分析を行うプレテン T 桁橋の平面形状の分類を図-2.3.2 に示す。平面形状の分類では、直橋とそれ以外の平面形状として、直橋と斜橋・曲線橋に分類した。対象橋梁は、直橋が 5 橋、斜橋・曲線橋が 9 橋と斜橋・曲線橋の割合が多い。

新分類のひび割れパターン【1】とひび割れパターン【6】に関する橋梁の平面形状の分類を図-2.3.3、図-2.3.4 に示す。図中の () 内の数値は、各平面形状の橋梁数に対する割合を示す。図-2.3.3、図-2.3.4 より、ひび割れパターン【1】は直橋、斜橋・曲線とも、ひび割れパターン【6】に比べてひび割れの発生している橋梁の割合が多いことがわかる。また、ひび割れパターン【6】については、斜橋・曲線橋の発生割合が、直橋より多い。ただし、データ数が少なく差もわずかであり、詳細は不明である。

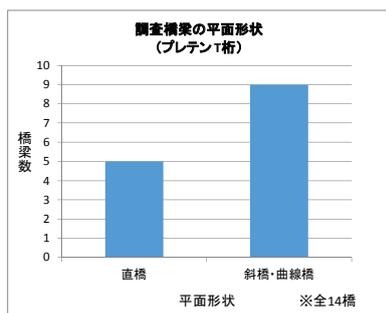


図-2.3.2 調査橋梁の平面形状

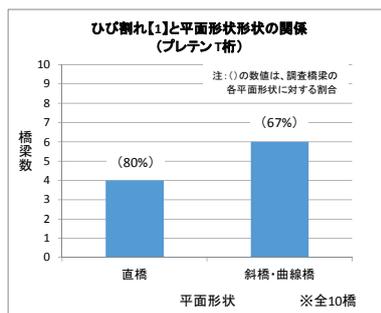


図-2.3.3 ひび割れ【1】と平面形状の関係

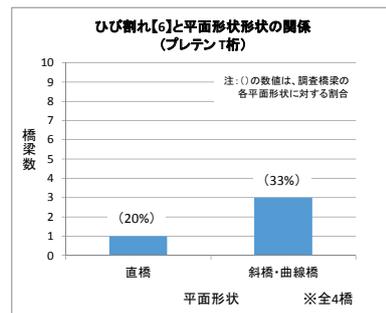


図-2.3.4 ひび割れ【6】と平面形状の関係

2) ポステン T 桁橋

ひび割れの原因分析を行うポステン T 桁橋の平面形状の分類を図-2.3.5 に示す。対象橋梁は、直橋が 9 橋、斜橋・曲線橋が 17 橋と斜橋・曲線橋の割合が多い。

ひび割れパターン【1】とひび割れパターン【6】に関する、橋梁の平面形状の分類を図-2.3.6、図-2.3.7に示す。図中の () 内の数値は、各平面形状の橋梁数に対する割合を示す。

図-2.3.6、図-2.3.7 より、ひび割れパターン【1】は直橋、斜橋・曲線橋とも、ひび割れパターン【6】に比べてひび割れの発生している橋梁の割合が若干少ないことがわかる。また、ひび割れパターン【6】については、斜橋・曲線橋の発生割合が直橋より少し多く、発生橋梁数も多いことがわかる。ただし、データ数が少ないため、ひび割れパターン【6】と平面形状の相関性については、この分析だけでは不明である。

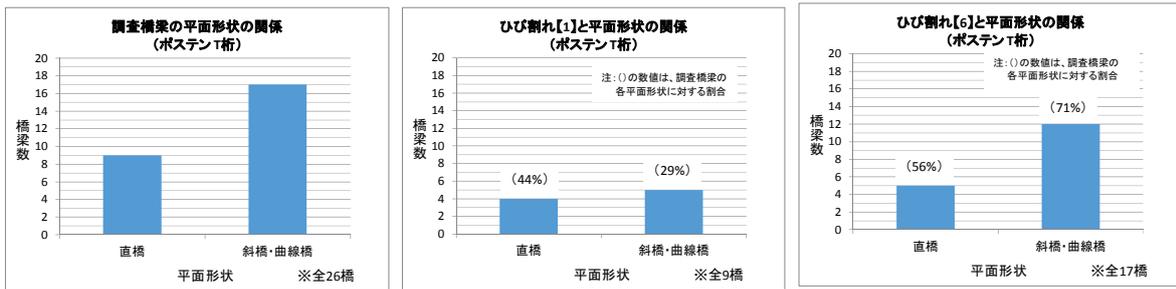


図-2.3.5 調査橋梁の平面形状 図-2.3.6 ひび割れ【1】と平面形状の関係 図-2.3.7 ひび割れ【6】と平面形状の関係

(2) 主桁の断面形状による分析

1) プレテンT桁橋

プレテンT桁橋のJIS桁の変遷を表-2.3.2に示す。

プレテンT桁橋は、基本的にJISに準じているため、調査橋梁の桁断面を竣工年度および適用示方書から推定した。調査橋梁の主桁断面形状の分類を図-2.3.8に示す。

ひび割れが発生している調査橋梁の主桁断面の割合は、バルブ断面(昭和55年改正)が79%を占めており、ストレート断面(平成3年改正)が14%、ストレート断面(平成7年改正)が7%である。

ひび割れパターン【1】とひび割れパターン【6】に関する主桁の断面形状の分類を図-2.3.9、図-2.3.10に示す。

図-2.3.9より、ひび割れパターン【1】は、バルブ断面、ストレート断面のいずれも発生している。図-2.3.10より、ひび割れパターン【6】は、バルブ断面(昭和55年改正)のみに発生し、平成3年改正や平成7年改正の桁では発生していない。表-2.3.2に示すように、バルブ断面(昭和55年改正)のウェブ厚150mmに比べて、平成3年改正の断面のウェブ厚は240mm、平成7年改正の断面は300mmと1.6~2.0倍のウェブ厚さがある。そのため、ウェブ厚の厚い平成3年改正や平成7年改正の桁では、ウェブに発生するコンクリートのせん断応力が小さく、ウェブにせん断ひび割れが発生しなかったと考えられる。

なお、JIS桁の標準図(支間20mのプレテンT桁)では、表-2.3.2に示す3種類の桁の支点から桁高の1/2離れたせん断照査位置のスターラップは、いずれも鉄筋径はD10であり、配置間隔は150~160mmとほとんど差が見られなかった。

表-2.3.2 プレテンT桁橋の変遷

項目	昭和55年改正 (1980年)	平成3年改正 (1991年)	平成7年改正 (1995年)
JIS番号	JIS A5316	JIS A5316	JIS A5313-1995
断面寸法			
活荷重	T-20、T-14	T-20、T-14	A、B活荷重
適用支間	10～21m	14～21m	18～24m
コンクリート強度	500kgf/cm ² 以上	500kgf/cm ² 以上	500kgf/cm ² 以上
PC鋼材	SWPR7A 12.4mm	SWPR7B 15.2mm	SWPR7BN 15.2mm

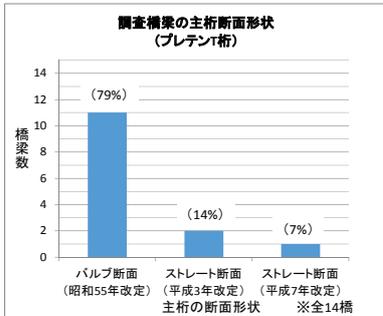


図-2.3.8 調査橋梁の主桁断面形状

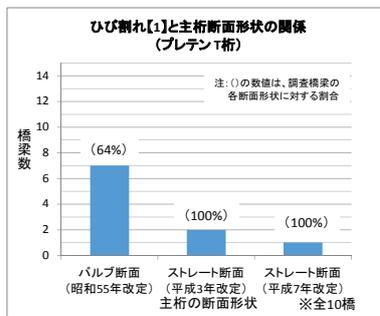


図-2.3.9 ひび割れ【1】と主桁断面形状の関係

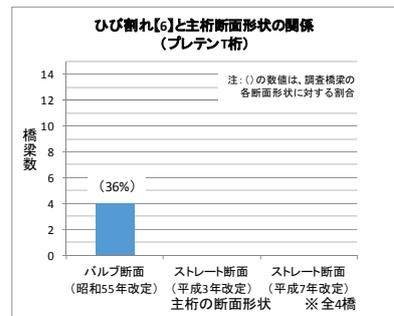


図-2.3.10 ひび割れ【6】と主桁断面形状の関係

2) ポステンT桁橋

旧建設省標準「ポストテンションPC単純Tげた」の主桁断面形状の変遷を表-2.3.3に示す。ポステンT桁橋は、基本的に旧建設省制定の標準図を参考として設計していたため、調査橋梁の桁断面形状を竣工年度および適用示方書から推定した。調査橋梁の主桁断面形状の分類を図-2.3.11に示す。なお、旧建設省の標準図では、適用支間長により主ケーブルの種類を変えていたため、図-2.3.11の分類では、適用支間長による分類も行っている。

ひび割れが発生している調査橋梁の主桁断面の割合は、バルブ断面（昭和55年改正）の支間27m以下が38%、支間28m以上が35%、ストレート断面（平成4年改正）の支間25m以上、38m以下が27%である。

ひび割れパターン【1】とひび割れパターン【6】に関する主桁の断面形状の分類を図-2.3.12、図-2.3.13に示す。図-2.3.12より、ひび割れパターン【1】は、支間27m以下のバルブ断面（昭和55年改正）に多く発生しているが、支間28m以上のバルブ断面（昭和55年改正）やストレート断面（平成4年改正）にはほとんど発生していない。支間27m以下のバルブ断面は、表-2.3.3に示すように、支間28m以上のバルブ断面やストレート断面と異なり、小容量のケーブル（12φ7mm）を下フランジに多数配置し、上縁と桁端に定着している。点検調査を

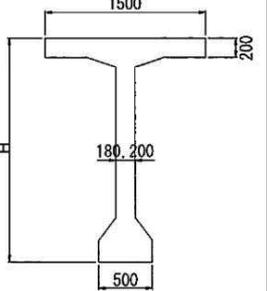
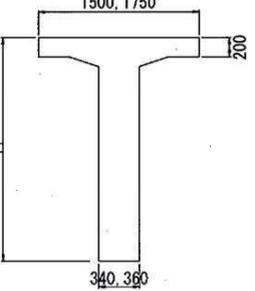
確認していない段階であるため、あくまでも推定であるが、下フランジに多数ケーブルを配置していることによるコンクリートの充填不良や、上縁に定着している PC ケーブルから雨水等が侵入することによるケーブルの腐食がひび割れパターン【1】の発生に影響している可能性が考えられる。

図-2.3.13 より、ひび割れパターン【6】については、支間 28m 以上のバルブ断面（昭和 55 年改正）やストレート断面（平成 4 年改正）に多く発生している。

表-2.3.3 に示すように、支間 28m 以上のバルブ断面では主ケーブル 12T12.4 を、ストレート断面では主ケーブル 12S12.7B を桁端に定着している。一方、支間 27m 以下のバルブ断面では、主ケーブル 12φ7 を桁端や上縁に定着している。このことより、ひび割れパターン【6】の発生には、主桁の断面形状や主ケーブルの種類が影響している可能性が考えられる。

なお、旧建設省の標準図（支間 25m、30m、35m のポステン T 桁）では、表-2.3.3 に示す 2 種類の桁の支点から桁高の 1/2 離れたせん断照査位置のスターラップは、どちらも鉄筋径は D13 であり、配置間隔は 150mm と差が見られなかった。

表-2.3.3 ポステン T 桁橋の変遷

項目	年度	昭和55年改正 (1980年)	平成4年改正 (1992年)
断面寸法			
活荷重		TL-20、TL-14	B活荷重
適用支間		20~40m	20~45m
コンクリート強度		400kgf/cm ² 以上	400kgf/cm ² 以上
PC鋼材		<ul style="list-style-type: none"> 支間L≤27mの場合 PCケーブル 12φ7 支間L≥28mの場合 PCケーブル 12T12.4 	<ul style="list-style-type: none"> 支間L≤25mの場合 PCケーブル 7S12.7B 支間25m<L≤38mの場合 PCケーブル 12S12.7B 支間38m<Lの場合 PCケーブル 12S15.2B

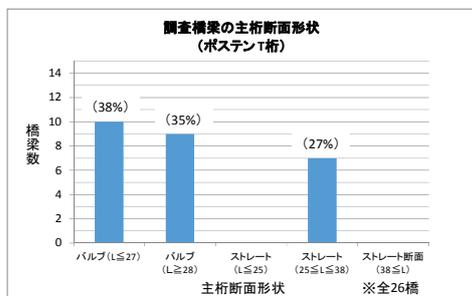


図-2.3.11 調査橋梁の主桁断面形状

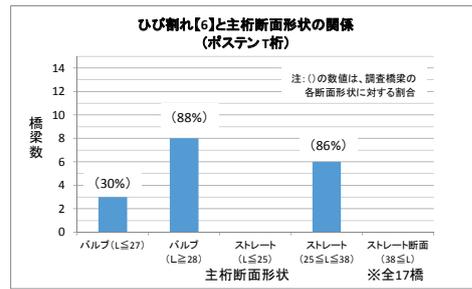
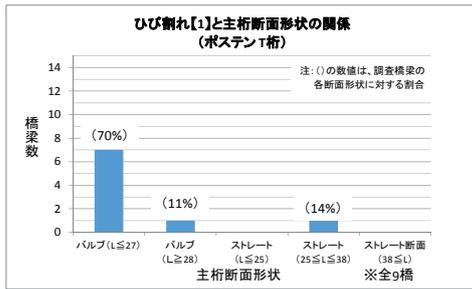


図-2.3.12 ひび割れ【1】と主桁断面形状の関係 図-2.3.13 ひび割れ【6】と主桁断面形状の関係

橋梁点検結果の中で、ひび割れパターン【1】（曲げひび割れ）とひび割れパターン【6】（せん断ひび割れ）の発生している橋梁を抽出し、そのひび割れの発生原因を橋梁の平面形状や主桁の断面形状で分析した。その結果、データ数は少ないが以下のような傾向がみられた。

- ・プレテンT桁橋、ポステンT桁橋とも、ひび割れパターン【6】の発生している橋梁は、直橋よりも斜橋・曲線橋の方が若干多い。
- ・プレテンT桁橋、ポステンT桁橋とも、ひび割れパターン【1】は、直橋、斜橋・曲線橋とも同程度に発生している。
- ・プレテンT桁橋のひび割れパターン【6】は、バルブ断面（昭和55年改正）の橋梁に多く発生しており、バルブ断面（平成3年改正）やストレート断面（平成7年改正）の橋梁には、発生していない。
- ・ポステンT桁橋のひび割れパターン【1】は、支間27m以下のバルブ断面（昭和55年改正）の橋梁に多く発生している。
- ・ポステンT桁橋のひび割れパターン【6】は、支間28m以上のバルブ断面（昭和55年改正）の橋梁やストレート断面（平成4年改正）の橋梁に多く発生している。

以上より、限られた定期点検結果の分析ではあるが、プレテンT桁橋やポステンT桁橋のひび割れの発生の原因としては、以下のことが考えられる。

- ・プレテンT桁橋のひび割れパターン【6】（せん断ひび割れ）は、設計活荷重（TL-20）のウェブ厚150mmのバルブ断面に発生しており、せん断耐力が相対的に不足していた可能性が考えられる。
- ・ポステンT桁橋のひび割れパターン【1】（曲げひび割れ）は、支間27m以下のバルブ断面に多く発生している。支間27m以下のバルブ断面は小容量のケーブル（12φ7mm）を下フランジに多数配置し、主ケーブルを上縁に定着している。下フランジに多数ケーブルを配置していることによるコンクリートの充填不良や、上縁に定着しているPCケーブルからの雨水等の侵入によるケーブルの腐食が、ひび割れ発生に影響した可能性がある。
- ・ポステンT桁橋のひび割れパターン【6】（せん断ひび割れ）は、主ケーブル（12φ7）を桁端や上縁に定着した支間27m以下のバルブ断面（昭和55年改正）の橋梁に比べて、主ケーブル（12T12.4）を桁端に定着した支間28m以上のバルブ断面（昭和55年改正）や主ケーブル（12S12.7B）を桁端に定着したストレート断面（平成4年改正）の橋梁に多く

発生している。主ケーブル（12φ7）に比べて、主ケーブル（12T12.4）や（12S12.7B）は大容量の定着圧力である。このことより、ひび割れパターン【6】の発生には、主桁の断面形状や主ケーブルの大容量化の定着圧力が影響している可能性がある。

2.3.4 点検調書による原因分析

表-2.3.1の調査橋梁リストより、設計荷重、平面形状、ひび割れパターンに着目し、プレテン T 桁橋、ポステン T 桁橋から損傷程度の大きなもの（b 以上）を選定し（表-2.3.1の黄色着色）、点検調書の損傷図や損傷写真からひび割れ発生の原因について分析を行った。原因分析は、調書の所見によらず、本研究において再分析を行った。対象とした橋梁のリストと原因分析結果の総括表を表-2.3.4に示す。対象橋梁はプレテン T 桁橋 6 橋、ポステン T 桁橋 8 橋である。

点検調書による原因分析を整理すると、以下のようになる。

(1) プレテン T 桁橋

1) ひび割れパターン【1】（曲げひび割れ）

- ・ひび割れパターン【1】と判定されている橋梁の中で、資料 No.1-1 は単純桁の支間部の上床版とウェブ上部にひび割れが発生しているため、曲げひび割れの可能性は低いと考えられる。
- ・資料 No.1-3 の曲げひび割れは、RC 構造の枝桁に発生していることより、荷重による曲げひび割れと共に、枝桁の両端が横桁と主桁に拘束されるため、コンクリート硬化時の温度応力による引張応力が乾燥収縮により増大したこともひび割れ原因の一つと推察できる。

2) ひび割れパターン【6】（せん断ひび割れ）

- ・ひび割れパターン【6】の2橋のうち、資料No.1-6のひび割れは、桁端のウェブ側面の上方に斜め方向や水平方向に発生していることから、せん断耐荷力が不足することによるせん断ひび割れ【6】ではなく、桁端部のひび割れパターン【16】のようである。また、同様のひび割れが、資料No.1-3にも確認できた。これらの橋梁は、いずれもバルブ断面（昭和55年改定）であり、ウェブ幅が150mmと薄いため、PC鋼材の付着力とコンクリート硬化時の水和熱による温度応力による引張応力が乾燥収縮により増大したこともひび割れ発生の原因の一つと推察できるが、詳細な解析検討が必要と考える。

(2) ポステン T 桁橋

1) ひび割れパターン【1】（曲げひび割れ）

- ・統計的分析では、支間 27m 以下のバルブ断面（昭和 55 年改正）にひび割れパターン【1】が多く発生していたが、資料 No.2-1 の点検調書ではひび割れパターン【1】の発生は確認できなかった。

2) ひび割れパターン【6】（せん断ひび割れ）

- ・ひび割れパターン【6】の記載のあった全 7 橋には、ひび割れパターン【6】ではなく、全橋の桁端のウェブにひび割れパターン【16】のひび割れのようである。このひび割れは、PC 鋼材の定着部の圧力による引張応力やコンクリート硬化時の温度応力による引張応力が、乾燥収縮により増大したこともひび割れ原因の一つと推察できるが、詳細な解析検討が必要と考える。

- ・ 詳細調査を行った橋梁では、桁端部のひび割れ【16】は、桁形状（バルブ断面、ストレート断面）や平面形状（直橋、斜橋・曲線橋）に関係なく、ほぼ全ての橋梁に発生している。
- ・ 下フランジ下面の桁軸方向のひび割れ【3】は資料 No.2-6 や No.2-10 に発生していた。このひび割れについては、参考文献¹⁾ で解析的に原因究明を行っており、その結果、①プレストレス力による横方向ひずみ、②グラウト注入圧の過大による横方向ひずみ、③グラウトの膨張圧、④コンクリートとグラウトの熱膨張係数の差による内圧などの4つの要因に、クリープや乾燥収縮の影響が加わり、ひび割れが発生したと報告されている。

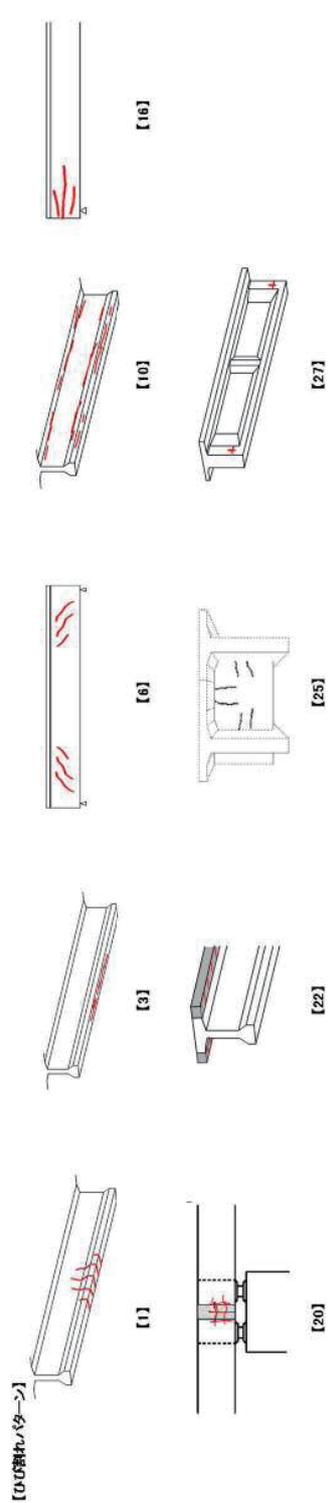
表-2.3.4 プレテンションI桁橋、ポストテンションI桁橋のひび割れ原因分析結果

資料No.		ひび割れ分類番号		構造形式	支間長 (m)	架設竣工年	橋長 (m)	総径間数	全幅員 (m)	平面形状	適用道路橋示方書	設計活荷重	桁形状		分析したひび割れパターン			
		国交省の点検要領H16.3による番号	新分類番号										ハルブ断面	ストレート断面	主桁に発生するひび割れ	中間系品間桁に発生するひび割れ	床版に発生するひび割れ	
1-1	5	11	[1]	単軸プレテンI桁橋	18.74	1985	19.40	1	27.80	斜橋	昭和53年	TL-20	○	○	○	○	○	○
1-3	10	11	[1]	単軸プレテンI桁橋	21.00	1984	21.70	1	10.40	斜橋	昭和53年	TL-20	○	○	○	○	○	○
1-6	17	14	[6]	単軸プレテンI桁橋	20.20	1985	20.86	1	10.10	直橋	昭和53年	TL-20	○	○	○	○	○	○
1-9	3	11	[1]	2層連続プレテン桁橋	17.70	2002	37.00	2	5.00	斜橋	平成8年	A活荷重	○	○	○	○	○	○
1-10	6	11	[1]	単軸プレテンI桁橋	19.30	1994	20.00	1	18.30	直橋	平成元年	TL-20	○	○	○	○	○	○
1-11	16	14	[6]	単軸プレテンI桁橋	19.80	1989	20.80	1	9.70	直橋	昭和53年	TL-20	○	○	○	○	○	○

2.ポストテンションI桁橋

資料No.		ひび割れ分類番号		構造形式	支間長 (m)	架設竣工年	橋長 (m)	総径間数	全幅員 (m)	平面形状	適用道路橋示方書	設計活荷重	桁形状		分析したひび割れパターン			
		国交省の点検要領H16.3による番号	新分類番号										ハルブ断面 (SSS改正) L ≤ 27m L ≥ 28m	ストレート断面	主桁に発生するひび割れ	床版に発生するひび割れ	床版に発生するひび割れ	
1-8	20	14	[6]	単軸ポストテンI桁橋	23.39	1993	96.50	4	8.20	直橋	平成元年	TL-20	○	○	○	○	○	○
2-1	7	11	[1]	単軸ポストテンI桁橋	27.40	1994	28.20	1	10.20	直橋	平成6年	TL-20	○	○	○	○	○	○
2-2	12	14	[6]	単軸ポストテンI桁橋	25.70	1987	26.50	1	12.80	斜橋	昭和53年	TL-20	○	○	○	○	○	○
2-3	13	14	[6]	単軸ポストテンI桁橋	26.90	1995	27.88	1	11.00	斜橋	平成6年	B活荷重	○	○	○	○	○	○
2-5	15	14	[6]	単軸ポストテンI桁橋	27.40	1997	28.20	1	10.20	直橋	平成6年	B活荷重	○	○	○	○	○	○
2-6	17	14	[6]	単軸ポストテンI桁橋	28.50	1989	29.30	1	12.10	斜橋	昭和53年	TL-20	○	○	○	○	○	○
2-9	24	14	[6]	単軸ポストテンI桁橋	33.20	不明	34.10	1	14.00	斜橋	平成8年	B活荷重	○	○	○	○	○	○
2-10	25	14	[6]	単軸ポストテンI桁橋	33.70	1998	34.50	1	16.10	斜橋	平成8年	B活荷重	○	○	○	○	○	○

※1: 支間長が27mを超過するため、支間長28mのハルブ桁と同じ桁端定着と判定した。
 ※2: 支間長は27m以下であるが、H16年より標準設計に上乗定着がなくなったため、支間長28mのハルブ桁と同じ桁端定着と判定した。
 ※3: 支間長が27mを超過し、H16年より標準設計より上乗定着がなくなったため、支間長28mのハルブ桁と同じ桁端定着と判定した。



2.3.5 まとめと今後の検討課題

プレテンT桁橋、ポステンT桁橋の橋梁点検結果の統計的分析と点検調書による原因分析のまとめ、および今後の検討課題を以下に示す。

- ・プレテンT桁橋では、統計的にはバルブ断面（昭和55年改正）にひび割れパターン【6】（せん断ひび割れ）が多かった。ひび割れパターン【6】の発生したプレテンT桁橋の詳細調査を行ったが、ひび割れパターン【6】は確認できず、桁端部に発生するひび割れ【16】が確認できた。このひび割れは、ウェブ厚が150mmと薄いバルブ断面に発生しているため、PC鋼材の付着力による引張応力やコンクリート硬化時の温度応力による引張応力が、乾燥収縮により増大したこともひび割れ原因の一つと疑われる。

また、ウェブ幅を厚くしたストレート断面（平成3年改正）や（平成7年改定）のプレテンT桁橋には、ひび割れパターン【6】（せん断ひび割れ）は発生していないため、現行基準で設計したプレテンT桁橋は、せん断ひび割れに対して大きく改善されていると考えられる。

- ・ひび割れパターン【6】（せん断ひび割れ）の発生していたポステンT桁橋の詳細調査を行ったが、ひび割れパターン【6】は確認できず、桁端のウェブにひび割れパターン【16】のひび割れが確認できた。このひび割れは、支間27m以下のバルブ断面（昭和55年改正）の橋梁に比べて、支間28m以上のバルブ断面（昭和55年改正）の橋梁やストレート断面（平成4年改正）の橋梁に多く発生していた。

支間27m以下のバルブ断面の橋梁では、主ケーブル12φ7を桁端と上縁に分散して定着している。一方、支間28m以上のバルブ断面の橋梁は主ケーブル12T12.4を桁端に定着し、ストレート断面の橋梁は主ケーブル12S12.7Bを桁端に定着している。

主ケーブルの引張荷重は、12φ7の700kNに対して、12T12.4は1,918kN、12S12.7Bは2,201kNと、2.74～3.14倍の大きさになる。

したがって、ひび割れパターン【16】の発生には、大容量の定着圧力の影響が考えられる。また、コンクリート硬化時の温度応力による引張応力が、乾燥収縮により増大したこともひび割れ原因の一つと推察できるが、詳細な解析検討が必要と考える。

2.4 急曲線を有する PC 橋の損傷事例と原因分析

2.4.1 検討概要

PC 橋のうち、急曲線を有する橋梁は、直線橋に比べて、死荷重や活荷重によるねじりモーメントが過大となる傾向がある。また、平面曲線に起因するプレストレスの水平分力（腹圧力）も作用するため、初期変状の発生リスクが想定される急曲線を有する PC 橋を選定し、その橋梁の点検結果をふまえて初期変状の発生状況とその要因分析を行う。その分析結果をふまえて、初期変状のリスクを低減するための、設計における留意点や現行基準での不明な内容や項目を整理する。

H24 年道路橋示方書Ⅲ編 15.3 の条文 (2) では、「1 支間あたりの交角が 30° 以下の曲線構造における曲げモーメント及びせん断力の算出は、曲線長を支間とする直線橋とみなして行うことができる。」としている。一方、15.3 (2) の解説では、曲線構造の構造解析方法の目安として、「1 支間あたりの交角 ϕ が $30^\circ < \phi \leq 45^\circ$ 程度の場合は、全ての断面力は、曲線の影響を考慮して求める。」、「交角 ϕ が 45° 程度 $< \phi$ の場合は、立体有限要素法解析や曲げねじり理論等のそり拘束ねじりの影響を考慮できる方法によって解析するのがよい。」としている。この交角の影響は構造形式により異なるが、H6 年道路橋設計便覧 18.1.1 の表-18.1.1 では、単純の T 桁橋においては、交角 ϕ が 15° 以上の PC 構造では、立体薄肉構造解析により特別に検討するのがよいと記載している。また、床版橋や箱桁橋においては、単純桁では交角 ϕ が 30° 以上の構造、連続桁では交角 ϕ が 45° 以上の構造では、立体薄肉構造解析により特別に検討するのがよいと記載している。

そこで、曲線の影響を考慮して設計された交角 ϕ が 30° を越える曲線の箱桁橋を対象に橋梁点検を行い、初期変状の発生状況を確認し、原因分析を行った。

初期変状の調査を行った橋梁の構造概要は以下の通りである。

構造形式：4 径間連続 PC2 室箱桁橋

平面曲線：曲線橋 (R=50.0m)

交 角： $\phi = 57^\circ$

桁構造：主方向：PC 構造 (内ケーブル)

横方向：RC 構造

施工方法：1 径間ずつの分割施工 (支保工施工)

2.4.2 ひび割れの発生状況

対象橋梁の現地調査を行い、初期変状（ひび割れ）の発生状況を目視点検した。

対象橋梁のひび割れの発生状況を表-2.4.1 に、ひび割れ発生位置の模式図を図-2.4.1 に示す。

表-2.4.1 初期変状（ひび割れ）の発生状況

発生部位	ひび割れ番号	発生場所	ひび割れ方向	最大ひび割れ幅	備考
上床版	①	全般（標準部）	橋軸方向	0.15mm	漏水なし
	②	曲率内側（曲線部）	橋軸方向	0.15mm	漏水なし
ウェブ	③	支間 1/4 付近	斜め方向（PC鋼材方向）	0.15mm	
	④	桁端部	水平方向	0.20mm	
下床版	⑤	曲率の小さい側のPC鋼材曲げ上げ部	橋軸方向	0.50mm	
中間横桁	⑥	開口部の上部	斜め方向	0.35mm	
	⑦	開口部付近	放射状	0.15mm	

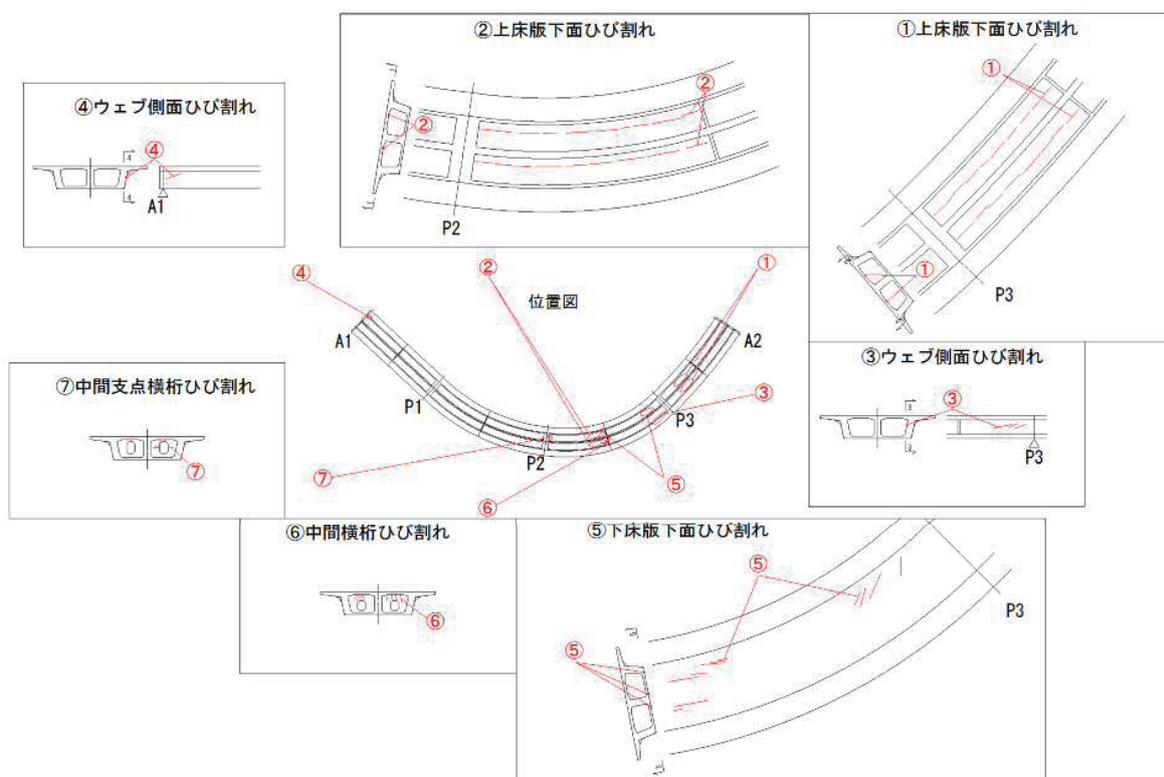


図-2.4.1 ひび割れ模式図

2.4.3 ひび割れの発生原因

ひび割れの発生原因について、設計図面や設計計算書からは、以下のような要因が影響している可能性が考えられる。

(1) ねじりの影響

上床版の橋軸方向のひび割れ①、②、下床版の橋軸方向のひび割れ⑤の発生原因は、ねじりモーメントによる可能性がある。ねじりによるひび割れは、基本的には図-2.4.2のように斜め方向に発生するが、本橋では橋軸方向にひび割れが発生している。本橋の床版の橋軸方向はPC構造であり、橋軸直角方向はRC構造である。そのため、ねじれによるひび割れが、斜め方向からプレストレスの作用しない橋軸方向に向きを変えて発生した可能性がある。

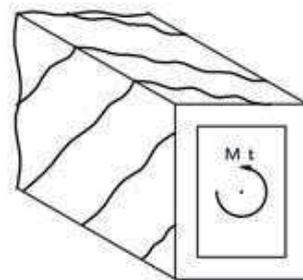


図-2.4.2 ねじりを受ける箱桁断面

(2) 平面曲線に起因するプレストレス力の水平力（腹圧力）

上下床版の橋軸方向のひび割れ①、②、⑤、ウェブの斜め方向のひび割れ③の発生原因は、平面曲線に起因するプレストレス力の水平腹圧力の可能性がある。

図-2.4.3に腹圧力を考慮した横方向曲げモーメント図（H6年コンクリート道路橋設計便覧（以下、設計便覧とする） 図-18.1.13）を示す。図のように曲線内側の床版に正曲げモーメントが作用するため、上床版下面の軸方向に発生したひび割れ②の発生位置では引張りが生じるリスクがあり、腹圧力はひび割れ②の要因の可能性がある。

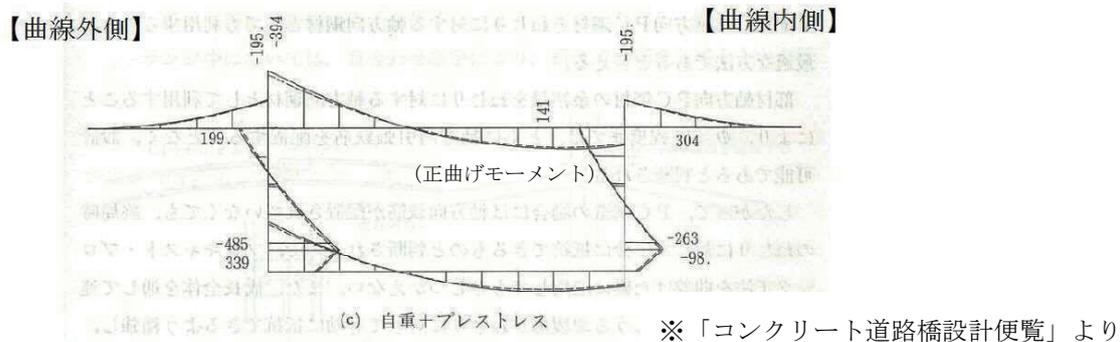


図-2.4.3 腹圧力を考慮した横方向曲げモーメント図

(3) 施工ステップを考慮した構造解析

上下床版のひび割れ①、②、⑤とウェブの斜め方向のひび割れ③の発生原因は、本橋が分割して施工されているため、施工時の構造系変化にともなうねじりモーメントなどの断面力が設計と異なる可能性がある。

(4) 中間横桁の設計

本橋は、曲線箱桁橋のため、横桁部にねじりモーメントによる大きな断面力が発生する。中間横桁開口上部のひび割れ⑥は、斜め方向に並行に発生しているため、主方向のねじりモーメントにより横桁断面方向に引張りが生じ、ひび割れが発生した可能性がある。

(5) 温度応力

支間 1/4 付近のウェブ斜め方向のひび割れ③は、施工目地部に発生していることから、主ケーブルのカップラーシース等による断面欠損が大きい部分において、新旧打ち継目の拘束による引張りコンクリート硬化時の温度応力が生じ、ひび割れが発生した可能性がある。

(6) 定着圧力

桁端付近の水平方向のひび割れ④は、PC 鋼材の定着圧力による定着具背面の引張応力と端部横桁のコンクリート硬化時の温度応力によりひび割れが発生した可能性がある。

(7) 乾燥収縮

中間支点横桁開口部の放射状のひび割れ⑦は、中間支点横桁の乾燥収縮を上下床版、ウェブが拘束したために引張が生じ、断面欠損部の開口部周囲にひび割れが発生した可能性がある。

上記の要因とひび割れの種類を整理すると表-2.4.2 のようになる。

表-2.4.2 ひび割れの要因と種類

要 因	ひび割れ番号
(1) ねじりの影響	① ② ⑤
(2) 曲線に起因するプレストレス力の水平力	① ② ③ ⑤
(3) 施工ステップを考慮した構造解析	① ② ③ ⑤
(4) 中間横桁の設計	⑥
(5) 温度応力	③
(6) 定着圧力	④
(7) 乾燥収縮	⑦

以上より、急曲線を有する橋梁を対象に初期変状の調査を行い、原因分析を行った結果、初期変状の要因としては複数の要因が考えられる。

曲線橋は、主桁の軸線の偏心によりねじりモーメントが発生することに加え、荷重の偏載荷や斜角などによってもねじりの影響を受ける。また、平面曲線に沿って配置される PC 鋼材のプレストレスによる水平力の影響も大きいと考えられる。そこで、表-2.4.2 の要因の中で平面曲線の影響が比較的大きいと考えられる (1) ~ (4) について、現行の「H24 年道路橋示方書」「H6 年コンクリート道路橋設計便覧」の内容について整理する。

2.4.4 「H24 年道路橋示方書」、「H6 年コンクリート道路橋設計便覧」に基づく設計

(1) ねじりモーメントに対する照査項目（主方向の設計=PC 部材）

1) 各荷重時に対する検討項目

各荷重時の検討項目は表-2.4.3 の通りである。

表-2.4.3 各荷重時の検討項目

	ねじり 補強鉄筋	斜引張 応力度	平成 24 年 道路橋示方書	備考
設計荷重時	—	○	4.4.3 (p.165)	ねじりのみ、ねじり+せん断
終局荷重時	○	—	4.4.4 (p.169)	ねじりのみ、ねじり+せん断

2) 設計荷重時の斜引張応力度について

せん断力とねじりモーメントに対する照査は、設計便覧 7.7.1 では、通常はせん断力の照査位置について検討する方法が示されている。各部位に考慮する応力度は表-2.4.4 の通りである。

H24 道路橋示方書Ⅲ編（以下、道示とする）4.3.3 (4) の解説では、プレストレストコンクリート構造のせん断力により部材断面に生じるコンクリートの斜引張応力度は、断面内の位置によりその値が変化するが、一般に断面図心位置で最大となることから断面図心位置とウェブ幅が最も薄い位置で照査することとされている。一方、ねじりに対しては、箱桁断面では、閉合したウェブとフランジにせん断流によるせん断力が生じるので両部材について照査することが道示 4.4.1 (1)、(2) で示されている。また、床版部の斜引張応力度の照査では、他の応力に対して余裕がある場合には床版横締めによる有効プレストレスを考慮できるようになる。これは、道示 4.4.4 (3) にも解説されている。床版横締めによる有効プレストレスの考慮の方法はウェブの斜引張応力度算出時の鉛直締めの取り扱いと同じである。

表-2.4.4 各部位に考慮する応力度

部位	主方向応力度 (軸方向プレ含む)	せん断力による せん断応力度	ねじりによる せん断応力度	軸直角方向 プレストレス
上床版	○	—	○	○ (床版横締)
ウェブ	○	○	○	○ (鉛直締)
下床版	○	—	○	—

3) 終局荷重作用時のねじり補強鉄筋について

ねじりモーメント単体で軸方向鉄筋量、横方向鉄筋量を算出する。軸方向鉄筋は、曲げ破壊必要鉄筋と合わせて配置する。ウェブのスターラップは斜引張鉄筋必要量と合わせて配置する。

4) 施工時の検討

設計便覧 18.1.3 (2) 3 (P.388) にも「押し出しや張出し施工の橋梁のように、施工時と完成時でねじり角の方向が異なる場合は、施工時についても検討する必要がある。」と記載されているとおり、施工法が異なる固定支保工による分割施工する場合でも、図-2.4.4 のように施

工時と完成時のねじり角の方向が異なる場合には、施工時についても検討することが必要である。

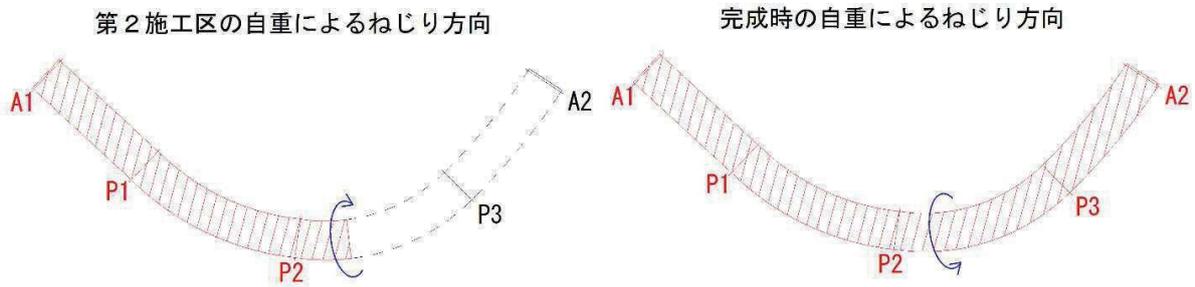


図-2.4.4 施工時と完成時のねじり方向（分割施工）

(2) 曲線桁橋としての照査について（設計便覧 第18章 曲線桁橋）

1) 断面設計について

設計便覧の第18章の18.1.1～18.1.2までは解析モデルや荷重載荷法の説明があり、主に「主方向の設計」に使うねじりモーメントの算出要領を示している。これにより算出したねじりモーメントを使って前記の主方向の設計を行うこととなる。

また、18.1.3では、「曲線桁の断面設計」について示しており、18.1.3(1)3)では、箱桁橋の断面設計の例を詳述している。ここでは、主方向の発生応力（死荷重、プレストレス）により、曲線の影響で箱桁の断面方向に腹圧力が作用するため、これを考慮した横方向の曲げモーメントの算出について説明している。

具体的には、箱桁の横方向の設計に対して、腹圧力の影響を足し合わせて照査することとなる。（図-2.4.5～2.4.7、表-2.4.5参照）

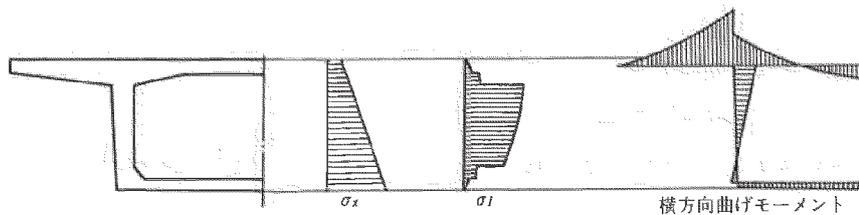


図-2.4.5 台形ウェブ箱桁断面の利点（設計便覧 図-18.1.11）

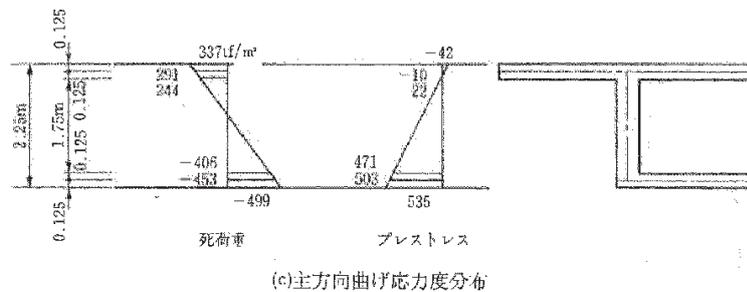


図-2.4.6 腹圧が作用する場合の横方向解析モデルと主方向曲げ応力度分布（設計便覧 図-18.1.12）

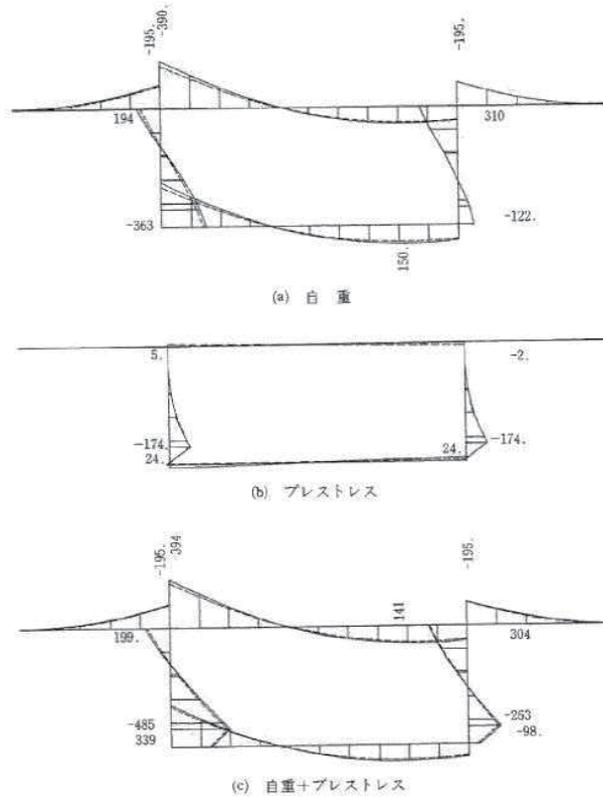


図-2.4.7 腹圧力を考慮した横方向曲げモーメント (設計便覧 図-18.1.13)

表-2.4.5 横方向解析における作用荷重 (設計便覧 表-18.1.5)

表-18.1.5 横方向解析における作用荷重

	死荷重 (自重) (tf/m)	プレストレス (tf/m)
鉛直方向	上床版、下床版 $w = 0.25 \times 2.5 = 0.625$ 腹版 $w = 0.40 \times 2.5 = 1.00$ 	
水平方向(上下床版)	上床版 $h_u = \sigma \cdot t / R = 291 \times 0.25 / 50.0 = 1.455$ 下床版 $h_d = -453 \times 0.25 / 50.0 = -2.265$ 	上床版 $h_u = -10 \times 0.25 / 50.0 = -0.05$ 下床版 $h_d = 503 \times 0.25 / 50.0 = 2.515$
水平方向(腹版)	$q_{ic} = \sigma \cdot t / R = (244 - 405) \times 0.4 / 50.0 = 1.952 - 3.248$ 	$q_{wp} = (22 - 471) \times 0.4 / 50.0 = 0.176 - 3.768$ $P_H = P / R = 499 / 50.0 = 9.98 \text{ tf}$

σ : 部材応力, t : 部材厚, R : 曲線半径

(3) 設計計算書の確認

対象橋梁の設計計算書の内容を精査した結果、以下のことが明らかになった。

・プレストレストコンクリート構造では、せん断力により部材断面に生じるコンクリートのせん断応力度は、床版部にも発生するものの、一般にウェブ断面のみでせん断力を負担するものとして照査している。一方で、ねじりに対しては、箱桁断面を構成する床版部も有効断面とみなしせん断応力度の照査を行う。対象橋梁では設計荷重時に上下床版に対するせん断とねじりに対する照査はされていないが、設計荷重時の上下床版に対するねじりによるせん断応力度を試算した結果、許容値を満足している。このため、必要な部材寸法は確保されているものと考えられる。

・終局時で決定する補強鉄筋については、軸方向鉄筋およびスターラップについては、曲げ・せん断・ねじりを考慮した上で設定されている。上下床版の横方向鉄筋については、曲げとねじりを考慮して設定されるが、入手した資料の中では計算過程が不明であった。

・横方向の設計においても、設計荷重時の箱桁断面の設計は行われている。また、床版横方向鉄筋は、横方向の断面設計による必要鉄筋量が配置されている。

・平面曲線に起因するプレストレスの腹圧力に対する検討がされていない。道路橋示方書 15.4 の条文では、「横方向の設計にあたっては、平面曲線に起因するプレストレス力の水平分力を考慮するのが望ましい。」とある。腹圧力は、主桁の平面曲線に限らず、桁の平行曲線とプレストレスの圧力線が一致しない場合に発生する。また、斜ウェブを有する箱桁橋では、ウェブ内に配置した橋軸方向の PC 鋼材が曲上げられている場合、プレストレスの鉛直分力によって生じる断面力について検討する必要がある。特に、対象橋梁は、1 径間当りの交角が 50° 近い急曲線を有する箱桁橋であるため、平面曲線に起因するプレストレスによる腹圧力の影響が大きいと考えられるため、これを考慮して検討する必要がある。

・設計計算書を確認する限りでは施工時の検討がなされているかは不明であった。道路橋施工便覧では、押出し施工や張出し施工の橋梁のように施工時と完成時でねじり角の方向が異なる場合は、施工時についても検討することを記載しているが、本橋のように固定支保工による分割施工においても、施工時と完成時のねじり角の方向が異なる場合には、施工時の検討を行う必要があると考えられる。

2.4.5 まとめ

急曲線を有する PC 橋の初期変状の原因分析結果より、曲線橋における初期変状(ひび割れ)に対する設計の留意点をまとめると以下ようになる。

- ねじりモーメントの作用する箱桁橋においては、床版部にもねじりモーメントに対する横方向鉄筋が必要である。また、床版部には横方向の曲げモーメントに対する横方向鉄筋も必要である。しかし、実橋の挙動を考えた場合、例えば、立体 FEM 解析を行ったとして、死荷重のねじりによる床版横方向応力度と、床版自重・橋面荷重による床版横方向応力度は足し合わされて発生するものと考えられる。対象橋梁では、主方向と横方向の設計でそれぞれ算出された必要鉄筋量は配置されていたものの、床版部にひび割れが確認されている。このため、ねじりの影響を受ける曲線橋において、主方向のねじりモーメントによる床版横方向鉄筋応力度と床版横方向設計による床版応力度の照査を共通の配置鉄筋で行っている場合は、横方向鉄筋が不足する可能性が考えられる。
- 曲線橋においては、平面曲線に起因する腹圧力により、上下床版やウェブに横方向の曲げモーメントが作用する。この腹圧力は曲率やプレストレス力により変化するが、腹圧力を設計に考慮しない場合には、横方向鉄筋やスターラップが不足する可能性がある。
- 固定支保工による分割施工においても、施工時と完成時のねじり角の方向が異なる場合は、施工時の構造検討を行わないとひび割れ発生リスクが増加する可能性がある。

2.5 本研究で対象とする初期変状

2.2～2.4の検討において、以下が確認された。

- 1) 初回点検結果から、ひび割れパターン【3】【6】【11】【12】【13】【16】【20】【22】【25】の割合が大きい。主な要因は、外部拘束（打継目や後打ち部）、内部拘束（水和熱）、乾燥収縮の可能性が高いと考えられるが、一部で斜め引張応力超過やPC定着部の割裂、支承の回転拘束など構造的な要因の可能性も考えられる。
- 2) 初回点検結果のうち、曲線の厳しいPC曲線箱桁橋のひび割れ原因分析の結果、腹圧力とねじりの足し合せや床版横方向曲げとねじりの足し合せなど、現行基準において配慮されるべき事項が十分に検討されていなかったことが原因と考えられるひび割れがあった。

以上のとおり、外部拘束や内部拘束など施工時の一時的な荷重や、設計的な配慮不足、構造的な要因等によって初期変状が発生していると考えられる。

PC橋の品質低下要因を材料、設計、施工、維持管理に分類すると、図-2.5.1のようになる。このうち材料に関する部分については、これまでもASRや凍害などに対して、道示やJIS等で対応が図られてきており、さらに、乾燥収縮やクリープなど、材料特性に起因すると考えられる設計の前提条件に関するものは、昨今の骨材収縮に関する損傷事例等を契機として検討が進められている。

本研究は、PC橋の初期変状に対しての原因究明と対策（案）の検討を目的としていることから、図-2.5.1に示す設計及び施工に分類される事項について検討の対象とする。

本研究で検討の対象とする設計・施工において配慮すべき事項を表-2.5.1に示す。

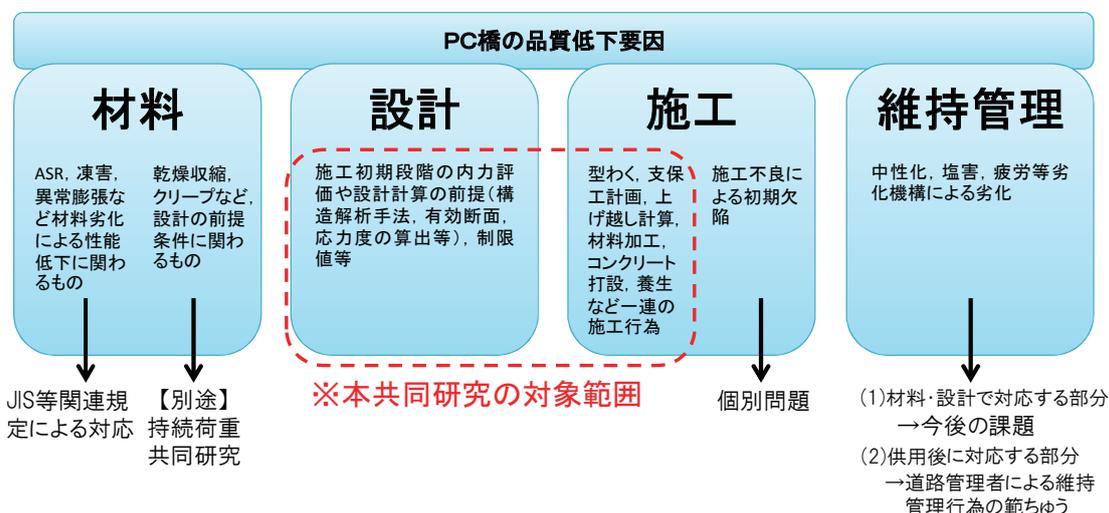


図-2.5.1 PC橋の品質低下要因

表-2.5.1 設計・施工において配慮すべき事項

番号	問題・課題	対応の方向性	検討内容
1	設計者による既往基準の簡略化や独自の判断、配慮不足などによって十分に検討がなされていない設計の項目がある。 (例) 主方向横方向の影響組合せ、局所応力（定着端）、支点周り	既往文献調査、初期変状の防止のために配慮されている現行基準における配慮事項とその変遷のとりまとめ、およびそれらへの対応方針の整理	ひび割れを防ぐために規定されている設計・施工基準の変遷を整理し、ひび割れパターンごとに分析 ⇒3章 施工時における初期変状防止策の調査（文献収集および諸基準類の動向調査） ⇒4章
2	施工時の一時的な荷重や打継目条件等によりプレストレスが導入されていない施工段階で変状が生じる場合がある。 (例) 打継目地、コンクリート硬化時の水和熱	施工時照査における制限値の設定	【実橋施工計測】 ・片持ち張出架設 ・固定支保工架設 【FEM解析】 ・温度応力解析 ・施工時応力解析 ⇒5章
3	施工時の拘束により生じた残留応力と供用初期段階に載荷された外力による応力の相互作用により変状が生じる可能性がある。	残留応力に対する補強鉄筋の配置	
4	曲線橋、斜橋では施工段階での変状（ひび割れ等）が発生している。施工系から完成系に至る複合作用、施工時支保工たわみ、施工目地部（打継部）に配慮した設計段階における施工時の応力制御、構造特性（曲線；断面と軸方向作用の重ね合わせ（ねじり+せん断）、断面形状）	設計時点における配慮事項の規定	変状が生じた症例を分析し、問題・課題を抽出したうえ、対応策を検討 ⇒2.4
5	プレテンT桁、ポステンT桁の曲げやせん断ひび割れ	桁端部のFEMや温度解析	本報告書の範囲外

【参考文献】

- 1) 櫻井義之、国富康志、谷口秀明、木村嘉富：PCT桁橋の桁下面に発生した縦ひび割れ原因に関する解析的検討、第23回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.85-90、2014.10