

論文・報告

PCT 枠の健全度調査と長期保全対策

Inspection of PCT Girder Structural Integrity and Long-Term Maintenance Measures

細木 智実 ^{*1}

HOSOKI Satomi

春日井 久 ^{*2}

KASUGAI Hisashi

原 愛美 ^{*3}

HARA Manami

丸山 輝芳 ^{*4}

MARUYAMA Teruyoshi

高林 紳一 ^{*4}

TAKABAYASHI Shinichi

北野 勇一 ^{*5}

KITANO Yuichi

本工事は、竣工から約 50 年経過した高速道路に架かるポストテンション方式 PC 単純 T 枠橋において確認されたグラウト充填不足、PC 鋼材の破断、および間詰床版の浮きやはく離に対し、長期的な健全性を確保することを目的に防錆グラウト再注入、外ケーブル補強および断面修復工法を実施するものである。

PCT 枠については、コンクリートの健全度調査や主ケーブル全鋼材について削孔にてグラウト充填調査を実施し、健全度判定のうち外ケーブル補強による既設主桁への分配効率を考慮して補強鋼材容量を決定した。また、間詰床版は、はつりによる断面欠損時に制限値を満足しない照査結果となつたため、はつり困難部の補修として内圧充填接合補強工法(IPH 工法)を採用した。本稿は、これら PCT 枠の健全度調査と補強・補修における検討ならびに施工について報告する。

キーワード：PCT 枠橋、グラウト充填調査、外ケーブル補強、はつり困難部、内圧充填接合補強工法

1. はじめに

対象橋梁は、竣工から約 50 年が経過した橋長 20 m のポストテンション方式 PC 単純 T 枠橋(以下、PCT 枠橋)である。本橋は冬季に氷点下 10 °C まで下がる寒冷地に位置し、凍結防止剤が多く散布される環境にある。また、橋面防水は未設置である。過年度の調査にて一部の主桁に PC グラウト充填不足による PC 鋼材破断が確認されたため、外ケーブル補強を行う計画であった。ただし、過年度の調査は、既設 PC 鋼材の 10 % を対象にしたものであり、外ケーブル補強を行うにあたり、主桁の健全度を把握するため、全 PC 鋼材について調査を行う必要があった。

また、過年度の調査にて間詰床版のコンクリートに浮きやはく離等が確認されていたため、ウォータージェットにて既設コンクリートの脆弱部を第 2 鉄筋背面まではつり出し(以下、はつり)，その後、鉄筋の防錆処理、断面修復を行う計画であった。しかし、はつりにより断面欠損を生じると橋軸直角方向の PC 床版として応力度の制限値を超過するおそれがあった。

そこで、本工事では、主桁の健全度調査を実施するとともに、調査結果を外ケーブル補強設計に反映し、補強工事を実施することとした。また、間詰床版劣化部の補修にあたり、劣化状況の調査とはつり時の応力を検討するとともに、はつり困難部の補修方法について検討した。

2. 工事概要

(1) 橋梁諸元

構造形式：ポストテンション方式 PC 単純 T 枠橋
橋 長：20.000 m (P1-A2 道路中心線上)
桁 長：19.255 m (P1-A2 下り線)
有効幅員：8.500 m
活荷重：建設時 TL-20 補強後 B 活荷重
竣工年次：昭和 49 年 (1974 年)
既設鋼材：(主)12-φ 7 mm × 6 本 ※上縁定着 2 本
(横)12-φ 5 mm, φ 23 mm ctc 500

(2) 橋梁概要

本橋の断面図を図 1、側面図を図 2 に示す。本橋は 6 主桁であり、1 主桁当り 12-φ 7 mm の PC 鋼線が 6 本配置されている。うち 2 本は上縁定着、残り 4 本は端部定着となっている。また、床版横縫めは、12-φ 5 mm の PC 鋼線(斜角部：φ 23 mm の PC 鋼棒)が 500 mm 間隔で配置されている。

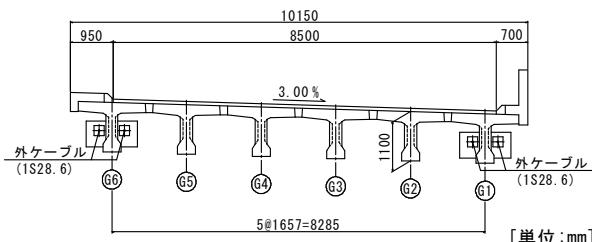


図 1 断面図

*1 川田建設株名古屋支店技術部技術課 主任

*2 川田建設株名古屋支店技術部技術課 課長

*3 川田建設株名古屋支店工事部工事課

*4 川田建設株名古屋支店工事部工事課 担当工事長

*5 川田建設株式会社技術部技術課 担当部長

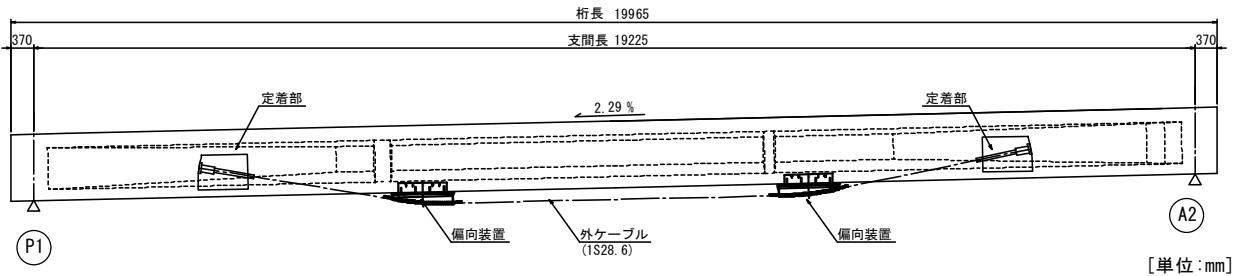
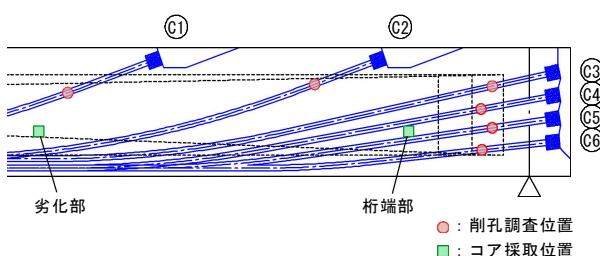
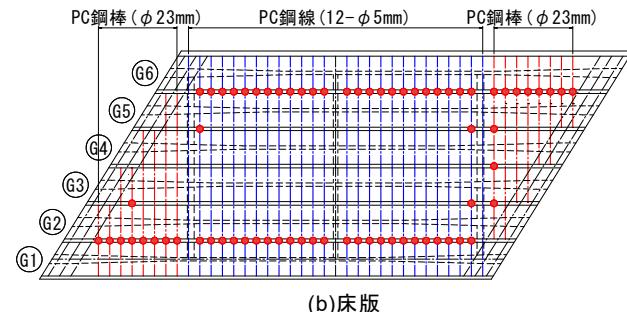


図 2 側面図(外ケーブル補強)



(a) 主桁



(b) 床版

表 1 工事概要

工種	主桁	床版	受注後の変更点
取壊し工(WJはつり)	○	○	検討の結果、床版は内圧充填接合補強を実施
ひび割れ注入工	○	○	同上
断面修復工	○	○	同上
グラウト充填調査	○	-	床版横縫め鋼材も調査対象に追加
グラウト再注入工	○	-	マクロセル腐食対策として防錆グラウトに変更
外ケーブル補強工	○(G1)	-	調査の結果、G1桁とG6桁に実施

(3) 工事概要

本工事の主な工種を表 1 に示す。過年度の調査では、G1 桁上縁定着ケーブル 1 本の破断が確認され、G1 桁に對し外ケーブル補強を行う計画であった。

3. 健全度調査

(1) 健全度調査の方法

本工事では、表 2 に示すとおり、コンクリートの健全度調査および PC グラウト充填調査を実施した。コンクリート健全度調査は、表面塩分量を携帯型蛍光 X 線分析計、その他は、コア採取により行った。

PC グラウト充填調査は、図 3 に示すとおり、主ケーブル全数(36 本/6 主桁)の定着部両端近傍 72 箇所を調査した。また、床版横縫めは外桁側間詰部(G1-G2 間と G5-G6 間)を削孔調査し、充填不足があれば内側へ順次調査するオセロ方式¹⁾を採用した。また、PC 鋼材の健全度は CCD カメラにより撮影した PC 鋼材の状況から判定した。

(2) コンクリートの健全度

(a) 圧縮強度・静弾性係数

圧縮強度試験の結果、48.3~60.9 N/mm² であり、設計基準強度(40 N/mm²)を上回った。なお、静弾性係数は、

表 2 調査項目

調査項目	調査・試験方法	数量	備考
コンクリート 健全度	圧縮強度試験	3	コア採取(劣化部+健全部)
	中性化試験	3	同上
	表面塩分量	12	携帯型蛍光 X 線分析計(5点/箇所)
	塩分浸透量	4	電位差滴定法(5深度/本)
PC グラウト 充填状況	主ケーブル 鋼材探査	72	6ケーブル×6主桁×終点
	削孔・CCD 調査	72	同上
	床版横縫め 鋼材探査	71	初回64箇所+追加7箇所
	削孔・CCD 調査	71	同上
空隙量	主ケーブル ワイヤー法	14	充填不足箇所
	真空法	14	同上
	床版横縫め ワイヤー法	5	充填不足箇所
	真空法	5	同上
PC 鋼材 健全度	主ケーブル 削孔・CCD 調査	72	PC グラウト充填調査孔を流用
	漏洩磁束法	4	破断判定箇所+健全箇所
	床版横縫め 削孔・CCD 調査	71	PC グラウト充填調査孔を流用

桁端部で 20 kN/mm² 程度と設計値(35 kN/mm²)と比べ低く、ASR の可能性が考えられたが、桁端部以外は設計値を上回ったことから、補強への影響は無いと判断した。

(b) 中性化

中性化深さは最大で 6.0 mm であり、中性化による影響は無いと判断した。

(c) 塩化物イオン

表面塩分量は、主桁・床版ともに 3.0 kg/m³ 以上と高い数値を示した。塩分浸透量は、橋面からの漏水が顕著であった桁端部の鋼材位置において、0.81 kg/m³ であり表面と比べ低い値であった。一方、床版間詰部は鋼材位置の塩化物イオン量が 7.91 kg/m³ と高い結果となった(表 3)。これは、橋面防水が無く、凍結防止剤由来の塩化物を含む雨水が打継目や鉄筋腐食による水平ひび割れに沿って浸透したためと推測する(図 4)。

表3 塩化物イオン試験結果

調査箇所		塩化物イオン量 (kg/m^3)		
		0~10mm	10~20mm	20~30mm
主桁	桁端部	2.13	2.40	0.81
	劣化部	0.29	0.12	0.14
間詰床版	1	0.69	2.19	7.91
	2	2.12	2.90	—

※鉄筋のかぶり30mm
※「—」は試料が採取できなかったため

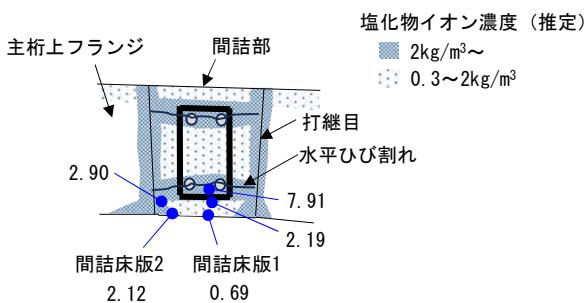


図4 床版への塩分浸透イメージ

表4 PC グラウト充填状況の調査結果

PCグラウト 充填不足 箇所数						
主ケーブル		P1側		A2側		合計
						(充填不足の割合)
上縁定着	C1	0 / 6		3 / 6		6 / 24 (25.0%)
	C2	0 / 6		3 / 6		
端部定着	C3	0 / 6		1 / 6		8 / 48 (16.7%)
	C4	1 / 6		2 / 6		
	C5	0 / 6		3 / 6		
	C6	0 / 6		1 / 6		
合計		1 / 36		13 / 36		14 / 72 (19.4%)
床版横締め G1 - G2 - G3 - G4 - G5 - G6 合計 (充填不足の割合)						
PC鋼棒	N4	×	×	-	-	2 / 16 (12.5%)
	N36	-	×	×	×	
	上記以外	○	○	○	○	
PC鋼線	N10	○	○	○	×	2 / 24 (8.3%)
	N34	×	○	○	○	
	上記以外	○	○	○	○	
合計						4 / 40 (10.0%)

「×」:充填不足 「○」:充填 「-」:途中定着のため調査なし

※床版横締めの合計は、本数表記としている。

(3) PC グラウト充填状況

グラウト充填状況の調査結果を表4に示す。

主ケーブルは、全72箇所の内、充填不足14箇所であり、充填不足の割合は約19%であった。充填不足の傾向は、上縁定着が端部定着と比べ若干高く、その多くが縦断勾配の高いA2側で生じていた。

床版横締めは、40本の内、4本の充填不足を確認した。充填不足について、目立った傾向はないものの全長にわたりグラウトを充填した痕跡が見られない鋼材が1本あった。

(4) PC鋼材の健全度

調査の結果、中桁は比較的健全だったが、外桁(G1桁、



写真1 PC鋼材の状況(健全度5相当)

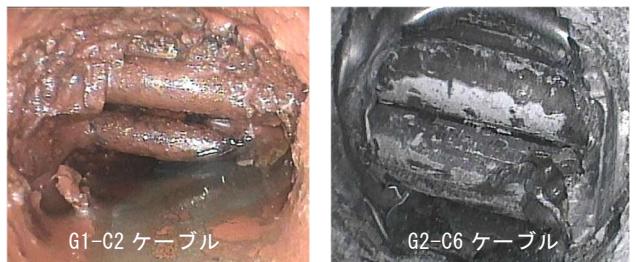


写真2 滞水状況(健全度2)



写真3 腐食なし(健全度0)



写真4 床版下面の劣化状況

G6桁)上縁定着1本に健全度5相当(PC鋼材の破断、表5参照)が確認された(写真1)。これは、橋面防水が実施されていないため、橋面の凍結防止剤を含む雨水などが、上縁定着部からシース内に侵入したと推測した。一方、上縁定着のシース内が常時水で満たされていた箇所はいずれも軽微な腐食であった。これは、酸素の供給が少ないこと、水素イオン濃度が高く維持されていたことなどにより、腐食が進行しづらい環境であったものと推察される(写真2)。また、端部定着は充填不足であっても、水の供給がなく乾燥状態にあり健全度が2を超えるものは確認されなかった(写真3)。以上より、外桁(G1桁、G6桁)の1本のPC鋼材によるプレストレスの一部または大部分が低下していると推定した。

床版横締めは、グラウト充填不足と鋼材の減肉が確認された1本を除き、横締めPC鋼材は概ね健全であった。また、超音波法による応力測定²⁾を実施した結果、間詰部の床版下面の推定応力は3.0~4.6 N/mm²であり、設計値3.1 N/mm²を概ね確保していた。

(5) 床版部の劣化状況調査

床版下面の劣化調査状況を写真4に示す。たたき点検前の写真4(a)のとおり、床版下面が広範囲に湿った状況であり、間詰部には錆汁、コンクリートの浮きが多数確

表 5 PC 鋼材の腐食状況から補強設計への反映方法

健全度	PC鋼材の腐食状況	質量減少率 の目安	断面積	引張強さ	弾性係数	終局ひずみ	補強設計への反映
0	錆がない	-	Ap	σ_{pu}	Ep	制限なし	耐荷性能への影響なし (プレストレスの低減なし)
1	錆があるが薄錆である	1%程度未満				0.015	
2	点状の錆が目立つ	1~2.5%程度				0.84 σ_{pu} /Ep	
3	断面欠損が目立つ	10%程度未満				0	プレストレスを低減する
4	PC鋼材の径が小さくなっている	10%程度以上	0			プレストレスを0とみなす	
5	PC鋼材が破断している	-					

認された。これは、橋面防水が実施されていないため、雨水などが間詰部の打継目より浸透し、長年の間に既設コンクリートの内部に水分が蓄積されたものと推測された。また、たたき点検を行った結果、床版下面の大半は浮きがない状態であり、浮きが生じていた箇所は間詰部の数箇所であった。間詰部の浮きがある箇所でたたき点検を行った結果、写真 4(b)のように内部鉄筋が著しく腐食している状況が確認された。

4. 主桁の外ケーブル補強設計

健全度調査の結果、外桁(G1 桁, G6 桁)に主ケーブル 1 本の破断により不足したプレストレスを補うため、また、活荷重の増加(建設時 TL-20 から現行 B 活荷重)に対応するため、外ケーブル補強設計を実施した。補強設計にあたり、(1)補強設計への健全度評価の反映、(2)外ケーブルによる 2 次プレストレスへの対応が課題であった。

(1) 補強設計への健全度評価の反映

調査では、PC 鋼材の腐食状況を確認しているのみであり、設計で必要な PC 鋼材の断面積、引張強さ等を直接確認したものではない。この点に関し既往研究を参考に、PC 鋼材の腐食状況から補強設計への反映を表 5 に示す 5 段階で評価することにした³⁾。具体的に「健全度 0~2」は、腐食が軽微であることから、耐荷性能への影響はないものとし、プレストレスの低減は行わないこととした。「健全度 3」は、プレストレスの低減、「健全度 4~5」は、PC 鋼材は破断しているものとみなし、当該 PC 鋼材のプレストレスを 0 とした。しかし、健全度調査は定着部付近でのみ実施しており、支間中央付近では、空隙量調査の結果から充填と推定されたため、PC 鋼材が健全である可能性もある。この場合、当該ケーブルのプレストレスを 0 として外ケーブル補強量を決定すると死荷重時に主桁下縁でオーバープレストレスとなるおそれがある。そのため、既設主ケーブルが健全状態である場合(健全ケース)と、ケーブル全長にわたり破断の影響が想定される場合(破断ケース)の 2 ケースについて検討した。

(2) 外ケーブルによる 2 次プレストレスへの対応

PCT 桁橋は、格子構造として挙動する多主桁橋であるため、特定の主桁を外ケーブルにより補強する場合、他の桁へのプレストレスの影響を考慮する必要がある⁴⁾。

全主桁に対し外ケーブル補強を行う場合は、棒解析にて簡易的に検討できる。一方、本橋の場合は経済性を考慮し、一部の主桁(G1, G6 の 2 主桁)に対し外ケーブル補強を実施することとした。このため、立体格子解析にて、未補強の主桁へのプレストレスの分配を考慮した。

解析の結果、全主桁(6 主桁)に対し、外ケーブル補強を実施する場合、1S19.3(断面積 243.7 mm², 引張強さ 451 kN 以上)相当で許容値を満足した。一方、破断した主桁のみ(G1, G6 の 2 主桁)を補強する場合、プレストレスの分配により、補強する主桁へのプレストレスの導入量が棒解析と比較し 55 %程度減少したことから、外ケーブル容量を 1S28.6(断面積 532.4 mm², 引張強さ 949 kN 以上)とした。外ケーブル補強設計の結果例を表 6 に示す。

表 6 外ケーブル補強設計の結果(G1 桁支間中央)

コンクリート応力度 (N/mm ²)	健全ケース		破断ケース	
	上縁	下縁	上縁	下縁
1 死荷重	5.44	-11.75	5.44	-11.75
2 活荷重(B 活荷重)	4.28	-8.97	4.28	-8.97
3 既設プレストレス	-3.19	18.99	-2.66	15.83
4=1+2+3 現況(設計荷重時)	6.53	-1.73	7.06	-4.89
判定(-1.5 ≤ σ_{ca} ≤ 14.0)	OK	NG	OK	NG
5 構成プレストレス 1 次	-2.51	9.97	-2.51	9.97
6 構成プレストレス 2 次	1.44	-5.68	1.44	-5.68
7=1+3+5+6 構成(死荷重時)	1.18	11.53	1.71	8.37
判定(-1.5 ≤ σ_{ca} ≤ 14.0)	OK	OK	OK	OK
8=4+5+6 構成(設計荷重時)	5.46	2.56	5.99	-0.60
判定(-1.5 ≤ σ_{ca} ≤ 14.0)	OK	OK	OK	OK

5. 床版の補修検討

(1) 床版劣化部のはつり時の応力検討

はつりによる断面欠損の影響を検討した結果を表 7 に示す。床版厚 200 mm に対して、床版支間中央である間詰部の第 2 鉄筋(深さ 61 mm)まではつりを行うと、死荷重状態で床版上縁のコンクリート応力度が制限値を超過する結果となった。また、40 mm までのはつりでは第 1 鉄筋の半分程度までとなり(図 5), 既設コンクリートに浸透した塩分とそれに伴う脆弱部を十分に除去できないため、補修後に再劣化の懸念がある。

表 7 はつりによる間詰部の照査結果

コンクリート応力度 (N/mm ²)	はつり深さ 61mm		はつり深さ 40mm	
	上縁	下縁	上縁	下縁
死荷重	0.50	-0.50	0.38	-0.38
活荷重	4.99	-4.99	3.76	-3.76
プレストレス	-2.58	9.47	-0.37	6.36
合成応力度(死荷重時)	-2.08	8.97	0.01	5.98
判定(0.0 ≤ σ _{ca} ≤ 10.0)	NG	OK	OK	OK
合成応力度(設計荷重時)	2.91	3.98	3.77	2.22
判定(0.0 ≤ σ _{ca} ≤ 10.0)	OK	OK	OK	OK

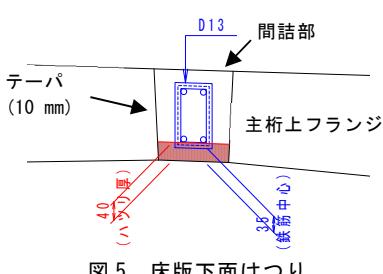


図 5 床版下面はつり

以上より、本橋床版の間詰部に関しては、はつりが困難であることが判明した。

(2) はつり困難部の補修方法

本橋の床版は、グラウト充填調査の結果より横締めPC鋼材とプレストレスに問題がない一方で、間詰部の内部鉄筋の一部で著しく腐食していることが確認された。ただし、浮きが確認された箇所は少なく、床版下面がはく落するような状況に至っていない。この理由は、図4に示すように、主桁上フランジと間詰部の打継目や間詰部の一部の内部鉄筋に沿って塩分が浸透しているものの、その他の大半の部位には現時点では塩分がそれほど浸透していないものと考えられた。また、主桁と間詰部にテーパがあり(図5)、床版下面に段差が生じていないことから、プレストレスによるくさび効果が発揮されていると考え、間詰部の抜落ちリスクもないと判断した。このため、はつりにより健全部を除去することでPC構造へのダメージを与えないことを念頭に補修方法を検討した。検討の結果、床版の弱点部に浸透した塩分がこれ以上拡散しないことに加え、ひび割れ等の弱点部を補強することを目的に樹脂注入して床版コンクリートを一体化することができる内圧充填接合補強工法⁵⁾を採用した。

本工事でははつりを行わないため、既設コンクリートに浸入した塩分を除去できない。この対策として、本橋床版間詰部の浮き部で確認された鋼材近傍の局所的な塩化物イオン量 7.91 kg/m³は例外とし、塩化物イオン濃度 3 kg/m³以下に必要な防錆効果を得るため、床版下面より亜硝酸リチウム 40 %水溶液を 400 g/m²塗布することとした。

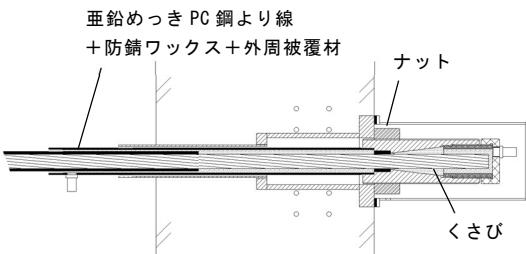


図 6 外ケーブル概要図

表 8 緊張順序

緊張順序	内容
STEP1	G6桁 設計値の50%まで緊張
STEP2	G1桁 設計値の100%まで緊張
STEP3	G6桁 設計値の100%まで緊張

表 9 緊張方法

緊張方法	内容(G1桁の場合)
STEP1	5Mpaまで緊張
STEP2	1次緊張(くさび式定着)※設計値
STEP3	セットロス発生
STEP4	2次緊張(ねじ式定着)※設計値+2Mpa程度
STEP5	2次緊張(ねじ式定着)※設計値
STEP6	ナットの緩み確認
STEP7	緊張完了

※STEP6で緩みがあれば、締め付け後、再度緊張



写真 5 緊張作業状況

6. 外ケーブル補強工事

外ケーブル用緊張材は、凍結防止剤による塩分供給のリスクを考慮し、防錆性能に優れる多重防錆仕様(亜鉛めっき+防錆材+PE被覆)のものを採用した。なお、再緊張や張力調整を可能とするため、くさび、ねじ併用の定着方式とした(図6)。

(1) 緊張方法および緊張管理

外ケーブルの緊張にあたり、格子構造であることから、天秤効果により反対側の外桁への悪影響が懸念されたため、緊張順序の工夫により対応した(表8)。また、緊張中にナットの緩みやなじみによる緊張力の低下を想定し、表9に示すステップにて張力調整を適切に行いながら緊張作業を実施した。

(2) 緊張力計測

外ケーブル緊張状況を写真5に示す。緊張中にはロー

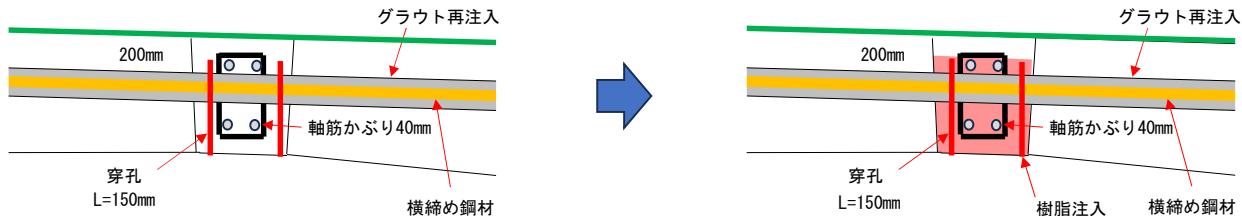


図 7 内圧充填接合補強工法のための穿孔・樹脂注入

ドセルにより緊張力の測定を実施した。その結果、外桁外側のケーブルは、緊張力が抜ける傾向であったため、外桁外側にある片側の外ケーブルのみ再緊張を実施した。G1 桁外ケーブルの緊張力は、G1 桁緊張後と G6 桁緊張後の差は 0.5 %未満の変動であり、設計値に概ね一致することを確認した。

7. 補修工事

(1) 防錆グラウト再注入

グラウト充填不足に対し、防錆効果やコスト比較の結果、KK グラウト注入工法⁶⁾によるグラウト再注入を実施した(写真 6, 7)。なお、使用するグラウト材は、凍結防止剤散布による塩害環境下であることから、残留塩分に起因するマクロセル腐食リスクを考慮し、PC 鋼材の腐食抑制効果のある防錆剤を混和した KK グラウトとした。

(2) 床版はつり困難部の補修

今回の施工では、横締め PC 鋼材のグラウトに充填不足部があったため、先行してグラウトの再注入を行った後、内圧充填接合補強工法にて樹脂注入を行った(図 7)。樹脂注入は、間詰めコンクリート部に 25 箇所/m²となるよう、鉄筋及び横締め PC 鋼材位置を避けて穿孔(径 φ 7 mm、深さ 150 mm)し、エポキシ樹脂注入を行った(写真 8)。施工にあたっては、平均気温 3 ℃での冬期施工であったため、ジェットヒーターを用い、施工期間中は常に 5 ℃以上の環境を保つように管理を行った。

本工事施工完了後、実施工部からコアを採取し、エポキシ樹脂の充填確認として、採取したコア表面にブラックライトを照射する方法にて行った。写真 9 に示すように、ひび割れ部等の微細な欠損部にエポキシ樹脂が注入されていることが確認された。

8. おわりに

主桁 PC 鋼材が複数箇所で破断している PCT 桁橋について、主桁の健全度調査を実施したうえで外ケーブル補強設計を実施し、さらに所要の補強効果が得られることを実橋において検証できた。

本稿が PCT 桁橋の主ケーブル破断に対する外ケーブル補強や間詰部等のはつり困難部に生じた劣化に対する補修方法の一助になれば幸いである。



写真 6 再注入状況



写真 7 グラウト注入確認



写真 8 樹脂注入状況



写真 9 注入後確認状況

最後に、親身なご指導と多大なご協力を賜りました関係者各位に対し、深く感謝の意を表し結びとする。

参考文献

- 1) 春日井ら：PCT 桁橋床版横締め鋼材の調査と間詰床版の耐荷力評価および下面補強工事の報告、川田技報、Vol.44、論文・報告 6-1、2025.1
- 2) 北野ら：プレストレス推定方法の提案～既設 PC 橋の応力状態を非破壊かつ簡易に知る～、川田技報、Vol.44、技術紹介 10-1、2025.1
- 3) (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会、プレストレストコンクリート構造物の補修の手引き[PC グラウト再注入工法]、p.46、2020.4
- 4) (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会、プレストレストコンクリート構造物の補修の手引き[外ケーブル工法・外ケーブル補強工法]、pp.40-42、2023.8
- 5) 渡邊ら：内圧充填接合補強工法によるコンクリート中の樹脂充填性能と補修効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.34, No.2、pp.1465-1470、2012
- 6) 北野ら：グラウト未充填橋梁の延命化技術の開発～PC 鋼材の腐食抑制効果を向上させた KK グラウト注入工法～、川田技報 vol.39、2020