

# 橋梁修繕（本庄橋）における トラブル対応事例について

井上 裕司<sup>1</sup>・縣 聡<sup>2</sup>

<sup>1</sup>高島土木事務所 道路計画課

<sup>2</sup>長浜土木事務所木之本支所 河川砂防課

滋賀県では、2011年に策定された橋梁長寿命化修繕計画に基づく橋梁修繕を鋭意進めているが、既設構造物を修繕する場合、施工時に様々な問題が生じることが多い。特に、高度成長期に施工されたポストテンション方式の橋梁では、PCグラウトの充填不良が確認されており、調査・補修の事例も数多くある。

本稿では、橋梁修繕の工事中に確認されたグラウト充填不良や主桁のたわみ（逆キャンバー）といったトラブルへの対応事例について、本庄橋を例に紹介するものである。

キーワード PCグラウト、充填不良、載荷試験、プレストレス低下、外ケーブル補強

## 1. 本庄橋の概要

本庄橋は、一般県道南船木西万木線（高島市安曇川町北船木～南船木地先）にある安曇川南流にかかる橋梁であり、1970年（昭和45年）に架設され、主に地域の生活道路として利用されている。以下に、本庄橋の橋梁緒元（表-1）、断面図（図-1）、側面図（図-2）を示す。

本庄橋では、2011年に策定された滋賀県橋梁長寿命化修繕計画に基づき橋梁修繕を実施しており、2014年8月～2015年3月に第一期工事として床版防水、伸縮装置取替え、ひび割れ注入、断面修復などが完了している。

しかしながら、工事中にグラウト充填不良や主桁のたわみ（逆キャンバー）が確認され、プレストレスの低下が懸念された。本稿では、橋梁修繕で確認されたトラブルへの対応事例として、次の3点について報告する。

- グラウト充填不良への対応
- 連続静的載荷試験による現況耐荷力の評価
- プレストレス低下への対応

表-1 橋梁緒元

橋長	130.000m
桁長	31.175m+32.930m+32.930m+32.965m
幅員	6.000m
設計活荷重	TL-14
上部工形式	PC4径間単純純ポストテンションT桁橋
下部工形式	橋台：逆T型橋台 / 橋脚：壁式橋脚
基礎工形式	杭基礎
竣工年	1970年（昭和45年）8月

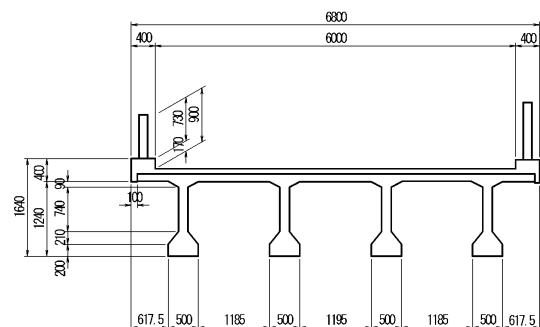


図-1 断面図

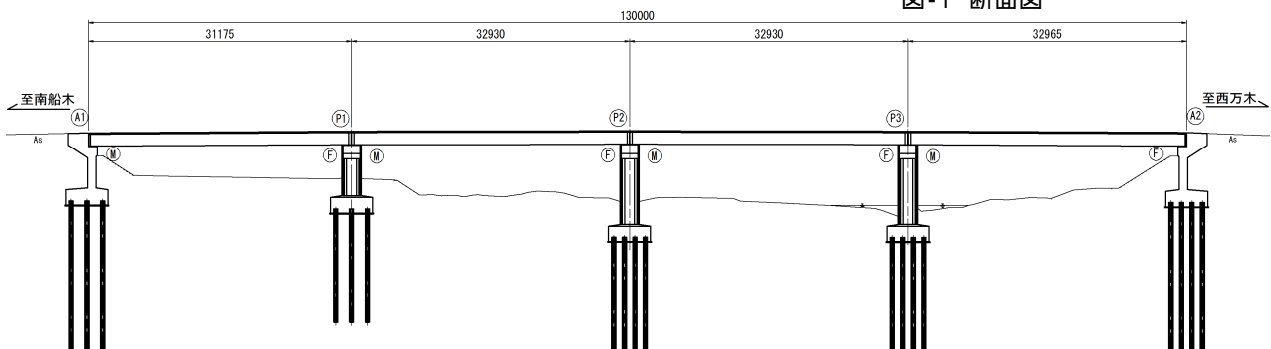


図-2 側面図

## 2. グラウト充填不良への対応

### (1) グラウト充填度調査

#### a) 調査内容と対象範囲

主桁、床版および横桁に対して実施したグラウト充填度調査の内容を表-2に示す。

次に、調査対象範囲を図-3に示す。主桁・主ケーブルは第1径間（A1-P1間）の曲上げ部（A1側）を調査対象とし、床版と横桁の横締めは第1径間の半分を調査対象とした。なお、1径間分のグラウト注入量を推定する際には、各調査結果を約2倍することとした。

#### b) 調査結果

グラウト充填度調査の結果を表-3に示す。

主桁・主ケーブルでは、削孔・CCDカメラ法やX線透過法により充填不良が確認されたものが8本、インパクトエコー法で充填不良の可能性があると判定されたものが3本あり、グラウト充填不良率は34%であった。

床版横締めでは、削孔・CCDカメラ法により充填不良が確認されたものが2本、衝撃弾性波法で充填不良の可能性があると判定されたもの（伝播速度4,800m/sec以上）と考えられるものが14本あり、グラウト充填不良率は64%であった。

横桁横締めでは、インパクトエコー法で充填不良の可能性があると判定された2本のうち1本について削孔・CCDカメラ法で調査したところ充填不良が確認された。

### (2) グラウト再注入対策（注入工法の選定）

塩化物調査の結果、本庄橋のPCケーブルでは、調査箇所ほぼ全てにおいて液体検知管の測定上限値である200mg/l以上の塩化物イオンが確認されている。

このため、亜硝酸リチウム水溶液を注入し、腐食したPC鋼材中の塩化物イオンを除去して鋼材表面を再不動態化することができるリパッシブ工法（NETIS登録技術KT-120108-A 特許：No.5312526）を採用することとした。

### (3) 施工時に生じた問題点

#### a) 主桁下フランジ部のグラウト充填不良

リパッシブ工法では、水溶液注入時の漏水箇所を調査するため、通気確認工としてシース内の真空度が測定される。しかし、主桁の通気確認において、「通気あり」となったシースの存在（19本/140本）が確認され、下フランジ部（水平箇所）のグラウト充填不良が疑われた。

今回のグラウト再注入では、一般的に充填不良が発生しやすい主桁両端の曲上げ部を対象としていたことから、想定外の事象に遭遇することとなった。この事象に対する調査・対策方法が確立していないなかで工事を進めるために、施工調整会議を開催し、発注者と設計・施工会社で検討を重ねたうえで、対策方法を決定した。

具体的には、下フランジ部（水平箇所）のシース内を一定間隔で削孔調査し、シース内の途中で閉塞したグラ

表-2 グラウト充填度調査の内容

調査方法	調査部位	調査目的
インパクトエコー法	主桁・横桁	充填状況の判定
X線透過法	主桁	充填状況の確認
衝撃弾性波法	床版	充填状況の判定
削孔・CCDカメラ法	主桁・床版・横桁	充填・腐食状況の確認
空圧法	主桁・床版・横桁	空隙体積の推定
液体検知管	主桁・床版・横桁	塩化物イオンの測定

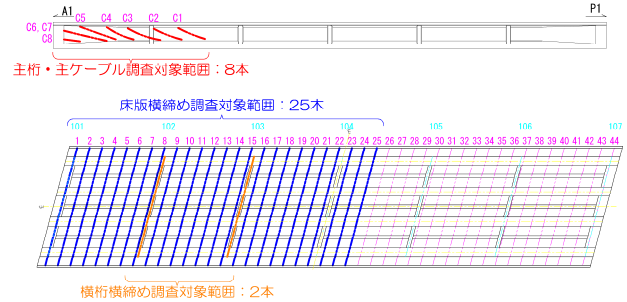


図-3 調査対象範囲

表-3 グラウト充填度調査の結果

調査部位		充填不良箇所 / 調査実施箇所	充填不良率	充填不良体積(平均)
主桁	G1	5 / 8	34%	1.49L / 箇所
	G2	3 / 8		
	G3	0 / 8		
	G4	3 / 8		
床版横締め		16 / 25	64%	2.24L / 本
横桁横締め		2 / 2	100%	0.60L / 本

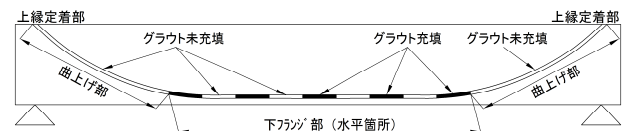


図-4 主桁のグラウト充填状況

表-4 グラウト充填不良率の比較

	A1-P1間		P1-P2間	P2-P3間	P3-A2間	合計 (施工時)
	調査時	施工時	施工時	施工時	施工時	
主桁	34% (11 / 32)	70% (45 / 64)	54% (39 / 72)	35% (25 / 72)	68% (49 / 72)	56% (158 / 280)
床版	64% (16 / 25)	73% (32 / 44)	13% (6 / 47)	0% (0 / 47)	2% (1 / 47)	21% (39 / 185)
横桁	100% (2 / 2)	29% (2 / 7)	86% (6 / 7)	43% (3 / 7)	43% (3 / 7)	50% (14 / 28)

ウトに囲まれた空隙（小部屋）が確認できた箇所について、グラウト再注入の対象とすることとした（図-4）。

#### b) グラウト充填度調査の精度

実際の施工時には、すべてのPCケーブルについてグラウト充填度調査を行ってから施工を開始しているため、調査時と施工時の調査結果を比較した（表-4）。

グラウト充填不良率については、調査時と施工時ではらつきが大きい結果となった。特に、床版については、A1-P1間に充填不良が集中していた。このように、部分的な調査では、橋梁全体のグラウト充填状況を把握するのが難しいことが確認された。

また、PCケーブル1本（箇所）当たりのグラウト充填不良体積については、主桁が1.51L/箇所、床版が4.54L/本、横桁が2.39L/本とすべて増加傾向にあった。これは、前述したように、シース内にグラウトの途中閉塞があることが要因の一つと考えられた。

### 3. 連続静的載荷試験による現況耐荷力の評価

#### (1) 試験概要

##### a) 試験目的

本庄橋では、主桁が鉛直下方向にたわむ現象（逆キャンパー）が確認されており、主桁の支間中央付近に曲げ作用が原因と想定されるひび割れも確認されているため、本庄橋の耐荷性能を把握し、一般車両の通行に関する健全性評価を行うことを目的とした。

##### b) 試験方法

主桁の曲げひび割れ開口時の応力度を算出し、残存プレストレスを推定するために連続静的載荷試験（以下、「載荷試験」という。）によるひずみ計測を行う。

荷重を漸増させながらひび割れを跨ぐひずみゲージと、ひび割れ横のひずみゲージの値を記録する。実橋の載荷試験の場合、定点での荷重増加が困難であることから、載荷試験車の位置を桁端部から支間中央部に移動させながら、計測位置の曲げモーメントを増加させる手法で、間接的に荷重増加を表現する（図-5）。

試験結果で得られたひび割れが開口する載荷位置に対して算出される支間中央部の曲げ応力度でプレストレスが相殺されたとして、その値となるプレストレスを逆算し、復元設計からの低下の程度を把握する。

##### c) 試験対象径間と載荷位置

載荷試験の対象径間は、ひび割れ調査を行った結果、最少のひび割れ箇所数を有する第1径間（A1-P1間）と、最多のひび割れ箇所数を有する第3径間（P2-P3間）とした。なお、載荷試験の対象桁については、第1径間（A1-P1間）はひび割れの少ないG1・G2桁、第3径間（P2-P3間）はひび割れの多いG1・G4桁とした（表-5）。

また、載荷試験車の位置は、着目した主桁上に試験車の車輪が載るように配置した（図-6）。

##### d) ひずみゲージ

主桁のひずみを計測するために、支間中央部の曲げひび割れに対してひずみゲージを設置する。

ひずみゲージは、ひび割れを跨ぐように設置するもの

と、ひび割れ横に設置するものの2種類を設置する。ひび割れを跨ぐように設置したひずみゲージは、ひび割れが開口するまではひずみ勾配に変化がなく、開口するとひずみ勾配が急勾配となる。ひび割れ横に設置したひずみゲージは、ひび割れが開口するまではひずみ勾配に変化がなく、開口するとひずみ勾配が緩くなる（図-7）。

これらのひずみと荷重の関係から、ひび割れが開口を始める荷重位置を確認する。

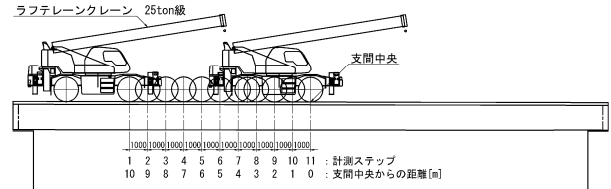


図-5 載荷試験の概要図

表-5 試験対象径間と載荷位置

調査箇所	ひび割れ箇所数			
	A1-P1	P1-P2	P2-P3	P3-A2
G1	1	8	17	9
G2	1	10	0	2
G3	3	8	0	1
G4	9	9	15	6

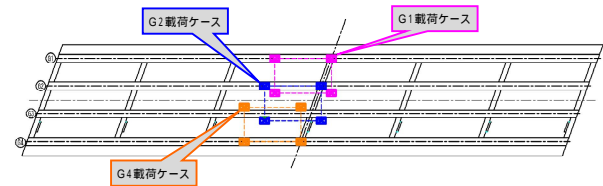


図-6 載荷試験車の位置

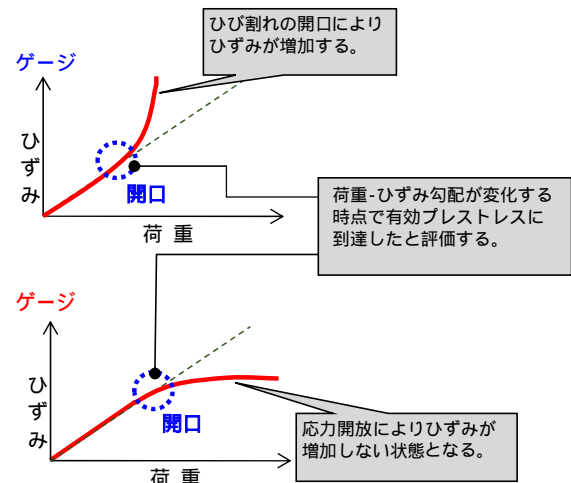
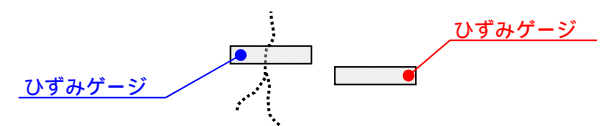


図-7 ひずみゲージの設置方法

(2)試験結果

荷重試験により得られたひずみと計測ステップの関係を図-8、表-6に示す。

ひび割れを跨ぐひずみゲージは、ひずみ値のばらつきが大きいので、ひび割れが開口を始める荷重位置（計測ステップ）と発生ひずみ値については、ひび割れを跨がないひずみゲージの値を用いることとした。

また、P2-P3間G4桁のゲージの計測結果は、ひび割れ開口による応力解放が再現されていないため、特異値として扱う。そのため、ゲージによる荷重試験車の位置は、P2-P3間G1桁の荷重試験結果におけるゲージとゲージの差を基に設定した。

(3)現況耐力の評価

ひび割れが開口を始める荷重位置での再現計算を行い、ひび割れが開口し始める時点での曲げモーメントを算出した。これと復元設計（T14-2台荷重）で算定した支間中央部の曲げモーメントを比較したところ、現況耐力はT6.5程度であると評価できた（表-6）。

(4)通行規制（重量制限）の実施

前節の結果をふまえて、現況の本庄橋では設計荷重を満足できないため、平成27年5月1日より本庄橋の通行規制（車両総重量5tを超える車両の通行禁止）を開始した。

通行規制にあたっては、道路法第95条の2第1項の規定に基づく公安協議、関係機関への協議・資料提供、迂回路看板の設置、プレス発表などを行った。

なお、通行規制は、平成28年12月に解除予定である。

4.プレストレス低下への対応

(1)残存プレストレスについて

荷重試験で実施した残存プレストレスの調査では、プレストレスが10～20%程度不足する結果となったが、ひび割れ箇所数とプレストレスの減少に相関関係はみられなかった（表-7）。また、本試験は、4主桁×4径間＝16主桁のうち4主桁のみを対象としており、橋梁全体の残存プレストレスを正確に把握したとは言い難い。

このため、「滋賀県橋梁維持管理テクニカルアドバイスに関する協定書」に基づく学識経験者からの技術的助言指導の内容をふまえ、コア切込み法（応力解放法）によるプレストレス調査を実施し、主桁ごとに残存プレストレスを評価して、補強設計を進めることとした。

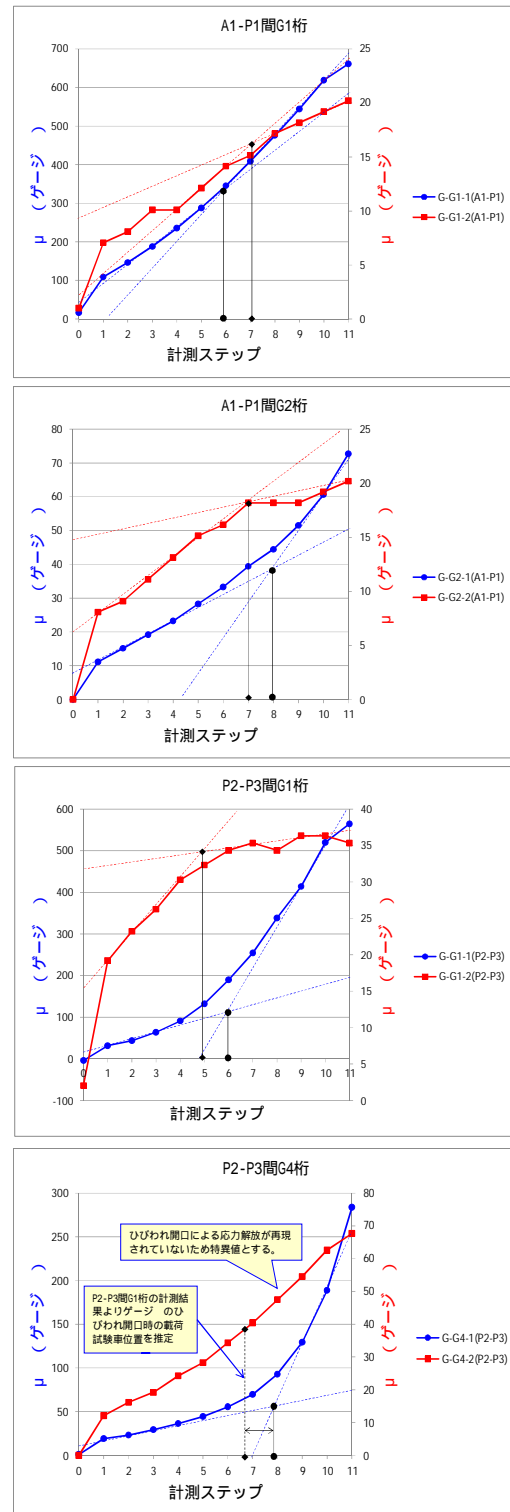


図-8 ひずみと計測ステップの関係

表-6 荷重試験結果と現況耐力の評価

	ひび割れ箇所数	ひび割れ開口時の荷重試験位置とひずみ		曲げモーメント(kN・m)		比率 /	許容荷重 (T14換算)	
		支間中央からの距離	ひずみ	ひび割れ開口時	T14-2台荷重時			
A1-P1 径間	G1	1	3.9m	16 μ	664.16	718.33	0.925	T12.9
	G2	1	4.0m	18 μ	282.02	608.14	0.464	T6.5
P2-P3 径間	G1	17	6.1m	35 μ	577.42	757.53	0.762	T10.7
	G4	15	4.3m	39 μ	667.52	737.15	0.906	T12.7



(2)コア切込み法（特許：No.5095258）による残存プレ  
ストレス調査

a)調査方法

主桁には通常プレストレスによる圧縮ひずみが作用して  
おり、コアドリルによる切込み（50×18mm）を入れる  
ことで、切込み部表層の圧縮ひずみが解放される。

コア切込み法は、この解放ひずみをひずみゲージで測  
定することで作用応力を推定する手法であり、2方向の  
ひずみを計測することで乾燥収縮などの誤差要因を軽減  
できる特徴がある（図-9）。

b)調査結果

載荷試験とコア切込み法による残存プレストレス率  
（ロス率）の調査結果を表-7に示す。

載荷試験とコア切込み法の調査結果に明確な相関関係  
はみられないが、コア切込み法のほうが残存プレスト  
レス率が低くなる結果となった。今回の補強設計では、安  
全側の設計とするため、各径間をグルーピングしたう  
えで、最大のロス率を設計ロス率とすることとした。

シースが過密かつ不均一に配置されており、貫通削孔が  
できないことが判明した（図-13）。

表-7 残存プレストレス率（ロス率）

	ひび割れ箇所数	載荷試験		コア切込み法		設計ロス率 (%)	
		残存Pe (%)	ロス率 (%)	残存Pe (%)	ロス率 (%)		
A1-P1 径間	G1	1	90%	10%	74%	26%	30%
	G2	1	82%	18%	82%	18%	
	G3	3	-	-	77%	23%	
	G4	9	-	-	103%	-3%	
P1-P2 径間	G1	8	-	-	75%	25%	40%
	G2	10	-	-	69%	31%	
	G3	8	-	-	82%	18%	
	G4	9	-	-	74%	26%	
P2-P3 径間	G1	17	87%	13%	76%	24%	40%
	G2	0	-	-	63%	37%	
	G3	0	-	-	73%	27%	
	G4	17	88%	12%	76%	24%	
P3-A2 径間	G1	9	-	-	76%	24%	40%
	G2	2	-	-	73%	27%	
	G3	1	-	-	71%	29%	
	G4	6	-	-	68%	32%	

(3)補強工法の選定

補強工法として、外ケーブル補強工法、鋼板接着  
工法、炭素繊維シート接着工法が挙げられる。

今回の補強設計では、構造的、施工性、維持管理性、  
経済性の4項目で重み付けして点数化した結果、補強後  
もコンクリート表面の経年観察が可能な外ケーブル工法  
を採用することとした。

図-10、図-11に補強概要図を示す。

(4)施工時に生じた問題点

今回の外ケーブル補強では、定着部ブラケットにおい  
て横締めPC鋼棒（NAPP60T）を設置するため、主桁の貫  
通削孔（110）を予定していた（図-12）。

しかし、施工前のRCレーダー探査により既設の鉄筋と

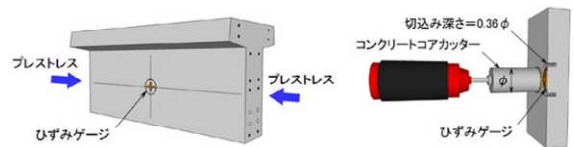


図-9 コア切込み法の概要

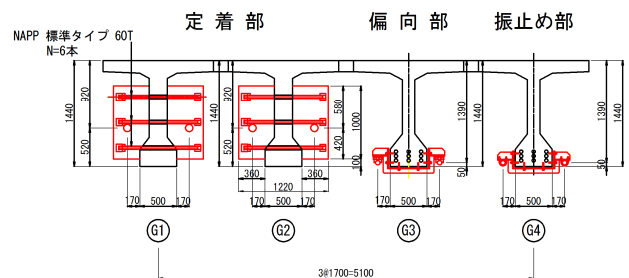


図-10 補強概要図（断面図）

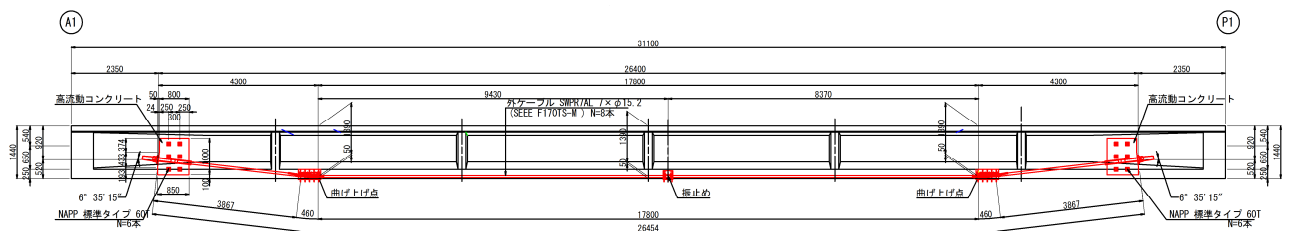


図-11 補強概要図（側面図）

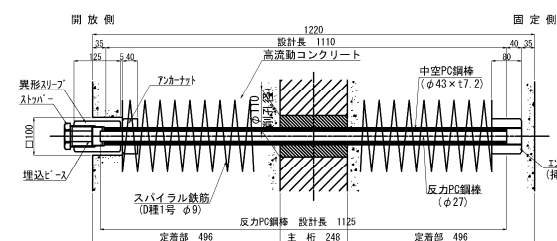


図-12 横締めPC鋼棒詳細図（NAPP60T）

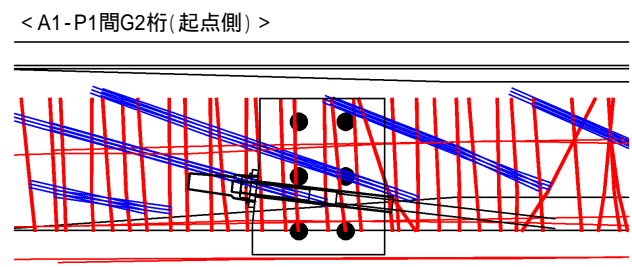


図-13 既設の鉄筋やシースとの干渉状況

これを受け、ブラケット形状の変更を試みたが、既設の鉄筋やシースを避けてNAPPを配置すると横長な形状となってしまう、浮き上がりの照査で安全性を満足しない結果となった(図-14)。このため、NAPPの規格と本数を変更し、削孔径を小さくすることで、既設の鉄筋やシースを避ける対応をとることとした(図-15)。

## 5.まとめ

今回のポストテンション方式の橋梁修繕におけるトラブル対応事例から得られた教訓を以下に整理する。

県内でこれから実施されていく橋梁修繕において、この教訓を参考にして、適時適切に橋梁長寿命化を図っていきたいと考える。

### (1)グラウト充填不良について

ポストテンション方式の橋梁を修繕する場合、変状状況や建設時期、構造形式、架橋環境を考慮したうえで、設計段階で非破壊調査(インパクトエコー法など)や微破壊調査(削孔・CCDカメラ法)の導入を検討すべきである。なお、調査時と施工時で充填不良率や充填不良体積に大きな差異を生じさせないために、径間毎に調査を行うなどグラウト充填度調査に工夫が必要と考える。

また、主桁の曲上げ部だけを調査対象とするのではなく、下フランジ部(水平箇所)に充填不良があることや、シース内に途中閉塞があることにも留意したい。

### (2)載荷試験について

プレストレス低下が懸念される場合や定期点検で判定区分が(緊急措置段階)となった場合、直ちに通行止めや通行規制などの措置を検討する必要がある。

しかしながら、当該道路の利用状況や迂回路の有無によっては、道路管理者として安全性と利便性のトレードオフに対処しなければならない。

その場合、本事例のような載荷試験によって現況耐力を評価し、技術的な根拠をもって通行規制の必要性を判断することも対応手法の一つとして選択肢に入れることを考えたい。

### (3)外ケーブル補強について

今回の外ケーブル補強では、グラウト再注入を適切に実施したうえで残存プレストレスを評価(期待)することとし、載荷試験やコア切込み法(応力解放法)による調査結果から残存プレストレスを推定して、安全側の設計ロス率とした。なお、残存プレストレスの推定にあたっては、様々な手法が研究・開発されているため、各手法の特性をふまえて適切な設計ロス率となるように配慮されたい。

また、既設の鉄筋やシースの配置状況により、主桁の貫通削孔ができないといった設計見直しによる工事の中

< A1-P1間G2桁(起点側) > ○:浮き上がりの照査でOUT

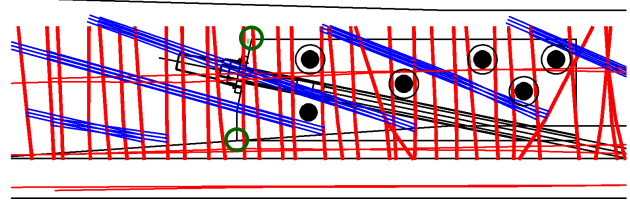


図-14 ブラケット形状の変更図(NAPP60T)

< A1-P1間G2桁(起点側) >  
規格:60T 40S 本数:6本 10本 削孔径: 110 75

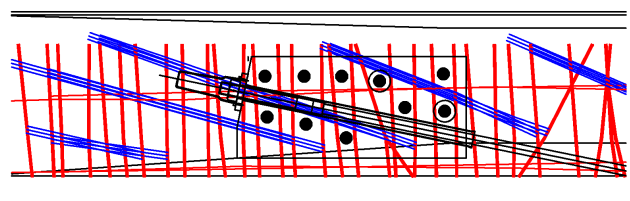


図-15 ブラケット形状の変更図(NAPP40S)

断を回避するためには、設計段階でRCレーダー探査を導入するなど、可能なかぎり既設構造物の現況に応じた設計としていきたいと考える。

### (4)修繕工事のあり方について

今回の事例では、グラウト再注入工事で注入量や箇所数の変更が必要となったり、外ケーブル補強工事で定着部ブラケットの設計見直しが必要になるといった工事内容の大幅な変更が生じることとなった。

これは橋梁長寿命化をはじめとする修繕工事が抱える大きな問題の一つであり、設計・施工一括発注や詳細設計付き工事発注など、調達方式を検討することも解決策の一つになると感じた。

謝辞: 本庄橋の橋梁修繕を進めるにあたり、技術的な助言指導をいただいた立命館大学の伊津野和行教授、川崎佑磨准教授、設計・施工を担当いただいた各受注業者様には事業の進捗にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1)大日本コンサルタント株式会社:平成26年度 第82-33号 南船木西万木線道路補修設計委託
- 2)大日本コンサルタント株式会社:平成26年度 第82-34号 南船木西万木線道路補修設計委託
- 3)株式会社日本構造橋梁研究所:平成27年度 第B851-12号 南船木西万木線補助道路修繕設計業務委託
- 4)オリエンタル白石株式会社:平成27年度 第B851-13号 南船木西万木線補助道路修繕設計委託