

道路橋既設ポストテンションPC桁の グラウト充填不良に対する補修について

玄海 彰則¹・崎谷 和也²

¹近畿地方整備局 兵庫国道事務所 洲本維持出張所 (〒656-0021兵庫県洲本市塩屋2-1-57)

²オリエンタル白石(株) 大阪支店 施工技術部 (〒550-0002 大阪市西区江戸堀一丁目9番1号)

ポストテンション方式の構造物において、P C グラウトはP C 鋼材と構造物の一体化及びP C 鋼材の腐食からの保護が役割であるが、高度成長期に施工されたポストテンションT桁の主ケーブルにおいてグラウトの充填不良が確認され、橋自体の耐久性に大きく疑義が生じている。この充填不良に対しての調査ならびに補修方法については、道路橋での既往の事例が少なく、工法も確立されていない。そこで補修が必要な実橋において、これらの調査方法ならびに補修方法について検討・実験等により検証しながら施工し、今後の維持管理に活かすべく効率的・経済的かつ確実な手法について紹介するものである。

キーワード P C グラウト、充填不良、調査及び補修方法、維持管理、長寿命化

1. はじめに

1970年代に建設された国道2号姫路バイパスのポストテンション方式P C 橋(船場川側道橋(上、下)、水尾川橋(上、下)、玉手高架橋/5橋)において、定期点検時にひび割れ幅が0.2mmを超える変状が確認され、詳細調査、橋梁ドクターによる診断ならびに緊急的なひび割れ注入等の補修工事を実施してきた。ひび割れの主たる原因は、アルカリ骨材反応による劣化(以下、A S R劣化)ならびに主ケーブルのグラウト充填不良であると詳細調査により判明している。船場川側道橋における変状状況を写真-1に、コア採取によるコンクリート物性試験結果を表-1に示す。



【主桁下ラジ部ひび割れ(橋軸方向)】

【主桁端部ひび割れ】

写真-1 変状状況写真

表-1 コンクリート物性試験結果

部 位		圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)
G1主桁	端部	38.8	1.38
	支間中央	37.5	1.78
G6主桁	端部	36.1	0.79
	支間中央	37.9	0.66
設計値		40.0	3.10

表-1に示すように、A S R劣化の特徴的な性状である圧縮強度に比較して静弾性係数の低下が著しいことが確認された。また同時に、このA S R劣化を増長させた要因として、グラウト充填不良によるコンクリート内部への水分供給が想定された。

このグラウト充填不良は、P C 構造物として保有すべき「P C 鋼材の腐食からの防護」、「P C 鋼材と構造物の一体化」の性能を損なうものであり、橋自体の耐久性に大きく疑義を生じさせる。しかし、このグラウト充填不良に対しての調査ならびに補修方法については、道路橋での既往の事例が少なく、工法も確立されていない。そのため、本工事では、調査方法ならびに補修方法について、産・官・学による「国道2号線P C 上部工の補修に関わる補修検討会」を立ち上げて、現地検分・検討・審議のうえ、具体的な補修方針を決定し、同時進行で工事(調査工・補修工)を実施した。

2. 事前調査によるグラウト充填不良状況

船場川側道橋の主ケーブル配置を、図-1に示す。

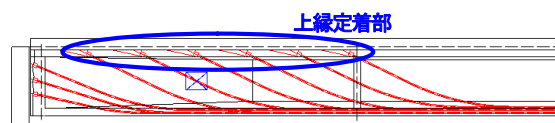


図-1 主ケーブル配置側面図

本橋のケーブル配置は、1994年改訂前の建設省標準設計に準拠して、主桁上縁定着ケーブルが配置されている。

また、本橋は橋面上の防水層についても未設置であった。

写真-2に、詳細調査におけるX線透過法によるグラウト充填状況を示す。本工事でのグラウト充填不良の特徴として、右側写真に示すように、既設グラウトが不十分に充填されていることであり、左側写真のような完全未充填に比較して排気ホースが挿入し難いため、グラウト再充填補修がより一層、困難な状況にあった。

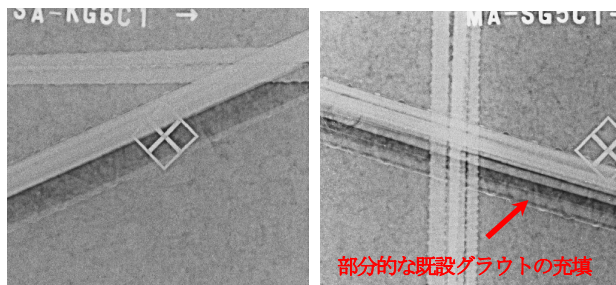


写真-2 X線透過法によるグラウト充填状況

本検討会では、再充填後の再劣化抑制や上記の既設グラウトの充填状況等を勘案して、調査項目・方法ならびに施工方法を計画・審議・検証した。

3. 本工事 調査・施工フロー

本工事における調査・施工フローを図-2に示す。

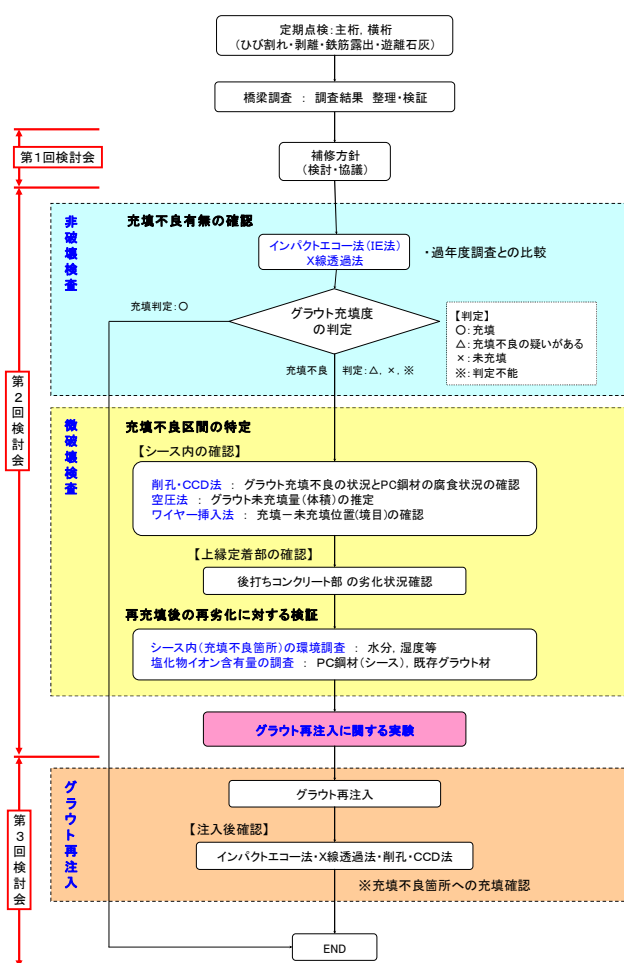


図-2 調査・施工フロー

グラウト充填不良の調査にあたっては、従前のX線透過法に比較して経済的である「インパクトエコー法」を採用した。充填不良箇所については「削孔・CCD法」による検証を実施し、且つ検出精度を確認する目的として部分的に「X線透過法」による検証を実施した。

また、凍結防止材の散布が実施されてきた路線であることより、充填不良部に、塩化物イオンの侵入も懸念されたため、「再充填後の再劣化に対する検証」として、既設グラウトの塩化物イオン含有量測定を含むシース内環境調査を実施した。

グラウト再充填に先立ち、a)写真-2(右)に示すような状況下での確実な再充填方法、b)再充填グラウト材の適正な粘性、c)本工事での架橋条件や主ケーブル配置形状に即したグラウト注入機器の選定も含めた再充填方法、d)再充填に対する作業手順の確立を目的とした実験を実施して補修方法を確立し、不測の事態も想定した施工手順を計画・審議の上、実構造物での施工を行った。

実験に基づいた実構造物で、グラウト再充填の後、再充填前と同様に、充填調査を実施した。

4. グラウト充填調査

1)インパクトエコー法(IE法)

本法は衝撃弾性波法の一つに分類され、桁側面から送られた弾性波の反射波形を測定し、シース管内の空隙を推定する調査方法である。調査状況ならびに調査結果である出力波形を写真-3に示す。



写真-3 IE法 調査状況・出力波形例

2)削孔(φ25)・CCD法及びX線透過法

削孔・CCD法およびX線透過法による直接的な検証を実施した箇所において、IE法で充填(○)と判定し、削孔・CCD法による検証で充填不良となる危険側の誤判定は皆無であった。一方、IE法で充填不良(×, △, ※)と判定し、削孔・CCD法による検証で充填されていた箇所は、全数の9%程度であり、高い中率であった。

削孔・CCD法での調査状況を写真-4に示す。



写真-4 削孔・CCD法 調査状況

本工事における削孔・CCD法による判定基準として、**図-3**にグラウト充填度を、**写真-5**にPC鋼材腐食度を示す。

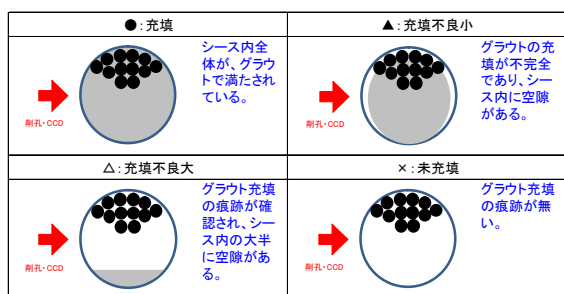


図-3 グラウト充填度 判定基準



写真-5 PC鋼材腐食度 判定基準

また本工事では、グラウト充填調査として、一般的に使用されているX線透過法についても、併用して調査を実施した。その調査状況および判定例を**写真-6**に示す。

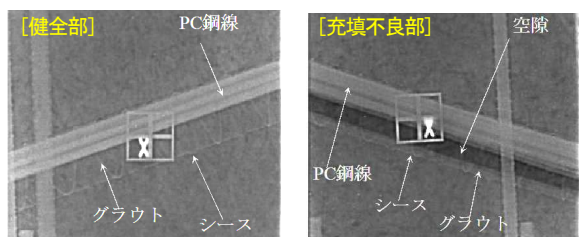


写真-6 X線透過法 調査状況および判定例

3) 空圧法

グラウト再充填を実施するにあたり、再充填量の事前推定は、施工管理において重要となる。本工事では、シース管内のグラウト充填不良部分に単位時間当たり一定量の空気を送り込み、その圧力変化と時間の関係により、グラウト充填不良部分の体積を推定する空圧法により、グラウト再充填量の推定を行った。**写真-7**に、空圧法の調査状況・機器ならびに出力波形例を示す。



写真-7 空圧法 調査状況・機器および出力波形例

4) シース内環境調査、塩化物含有量測定

グラウト再充填後においても、PC鋼材表面に一定量の塩化物イオンが付着していると、再劣化が生じることが懸念された。本工事では、削孔・CCD法による調査で

鋼材腐食度Ⅲ以上と判定したケーブルを抽出して、既存グラウトならびに鋼材表面錆部の塩化物イオン含有量の測定を行った。これらの測定結果、本橋におけるPC鋼材の腐食は、凍結防止材等の塩化物イオンに由来するものではなかったため、塩化物イオンに対する対策は実施しなかった。

5) 調査結果

・グラウト充填

グラウト充填調査全数 (N=544) に対して、270箇所でグラウト充填不良が確認された。橋梁毎での不良率については、バラツキが大きく、38.5~74.4%であった。

表-2に、橋梁ごとの調査結果一覧を示す。

表-2 調査結果一覧

橋梁名等 (調査対象数量)		船場川		玉手	水尾川		合計 (544)
		上り (144)	下り (144)	上り (96)	上り (80)	下り (80)	
過年度調査済		22	0	15	23	0	60
IE法 判定	充填(○)	37	56	15	9	16	133
	充填不良 の可能性(△)	30	52	25	17	26	150
	充填不良(×)	33	24	21	23	12	113
	評価不能(※)	22	12	20	8	26	88
	計	122	144	81	57	80	484
削孔・CCD法 対象数量	IE法の判定 △、×、※	85	88	66	48	64	351
	過年度調査 (未充填判定)	14	0	0	18	0	32
	IE法・過年度調査 ○判定 試験削孔	2	6	6	5	1	20
	計	101	94	72	71	65	403
削孔・CCD法 判定	充填(●)	36	45	35	10	7	133
	充填不良小(▲)	15	12	9	15	8	59
	充填不良大(△)	50	36	28	46	49	209
	未充填(×)	0	1	0	0	1	2
	計	101	94	72	71	65	403
ケーブル 腐食度	I (黒皮又は薄い錆)	54	37	57	42	48	238
	II (部分的浮き錆)	18	6	4	21	11	60
	III (全周又は全長に浮き錆)	1	0	0	4	1	6
	計	73	43	61	67	60	304
空圧法の 実施数量	削孔法の判定 ×、△、▲	65	49	37	61	58	270
シース内の 環境調査	湿度	65	49	37	61	58	270
	グラウト採取 塩分調査	4	4	4	4	4	20
	水分採取 塩分調査	2	0	0	2	3	7
X線透過調査		6	6	7	7	7	33
上縁定着部 後打ちコンクリート 劣化状況確認		1	1	0	0	0	2
グラウト 充填不良	削孔法の判定 ×、△、▲ (%)	114 (39.6%)	37 (38.5%)	119 (74.4%)	270 (49.6%)		

※ 青枠 IE法検出精度対象箇所、赤枠 橋梁別 グラウト充填不良率

・上縁定着部および橋面部

船場川側道橋は、片側に3.5mのマウントアップの歩道を有しているが、アスファルト舗装下に、碎石等が敷設

されており、主桁天端部の上縁定着部が雨水を滞留させる状態であった。また、伸縮装置部からの漏水も確認され、端部定着部にも水が供給される状態であった。

5. グラウト再充填に関する実験

1) 実験概要

グラウト再充填にあたっては、シース内に残留空気を生じさせないように、確実にグラウトを注入させる必要がある。また、図-3に示すように、本工事でのグラウト充填不良部分の形態は、多種多様であることが確認された。そこで、既往のグラウト再充填の事例より、図-4に示す方法を、グラウト再充填の基本計画として、a)最上部への充填性、b)排気ホース(極細径ホース)の挿入可否、c)排気ホース設置不可部での充填方法、d)注入機器の選定、e)実施工に対する作業手順の確立、f)再充填時のコア削孔部の気密性・耐圧性・充填性の検証を目的として試験体を作成し実験を実施した。写真-8に、実験時の状況を示す。



写真-8 再充填実験状況

2) 実験結果

① 注入方法(最上部への充填性)

排気ホースが最上部まで挿入が可能なケースにおいては、注入機器(自然流下、電動ポンプ、真空ポンプ)によらず、最上部までのグラウト再充填が可能であった。また、排気ホースが既存グラウトにより設置出来ないケースや最上部まで到達できないケースについては、真空ポンプ併用による電動ポンプでの加圧注入とすることに

より、グラウト再充填度の向上が図れた。

② 排気ホースの挿入可否

注入・排気孔からシース内に確実に排気ホース(極細径ホース)を挿入するために必要となるコア削孔径は、シースかぶり[100mm以上→コア削孔φ90]、[100mm未満→コア削孔φ60]であることを確認した。

③ 再充填時のコア削孔部の気密性・耐圧性・充填性の検証

従前のグラウト再充填においては、グラウト再充填用削孔部に、グラウトホース等を埋め込んで、モルタル等により蓋を設置していた。本工事では、グラウト再充填性の向上させるため、加圧注入や真空注入を実施することより、従来のモルタル等での蓋構造に対して、耐圧性ならびに気密性が懸念された。そこで、図-5や写真-9に示すような高強度モルタルキャップを使用した。また、この高強度モルタルキャップの使用により、コア削孔部の充填性の向上も図れた。

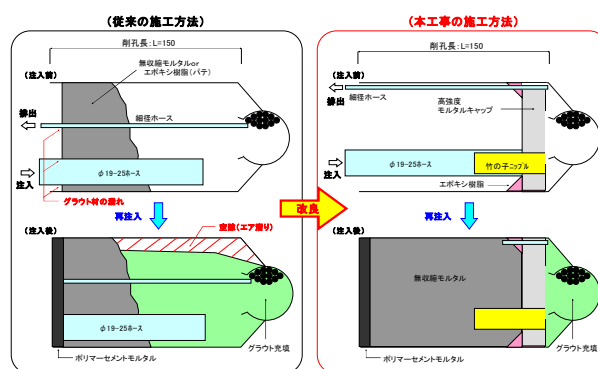


図-5 コア削孔部の処理方法概念図

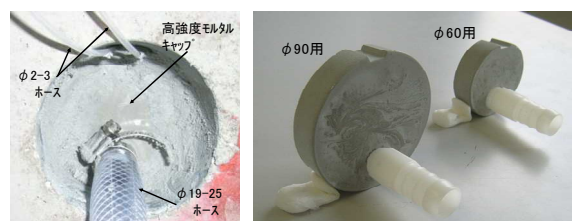


写真-9 高強度モルタルキャップ

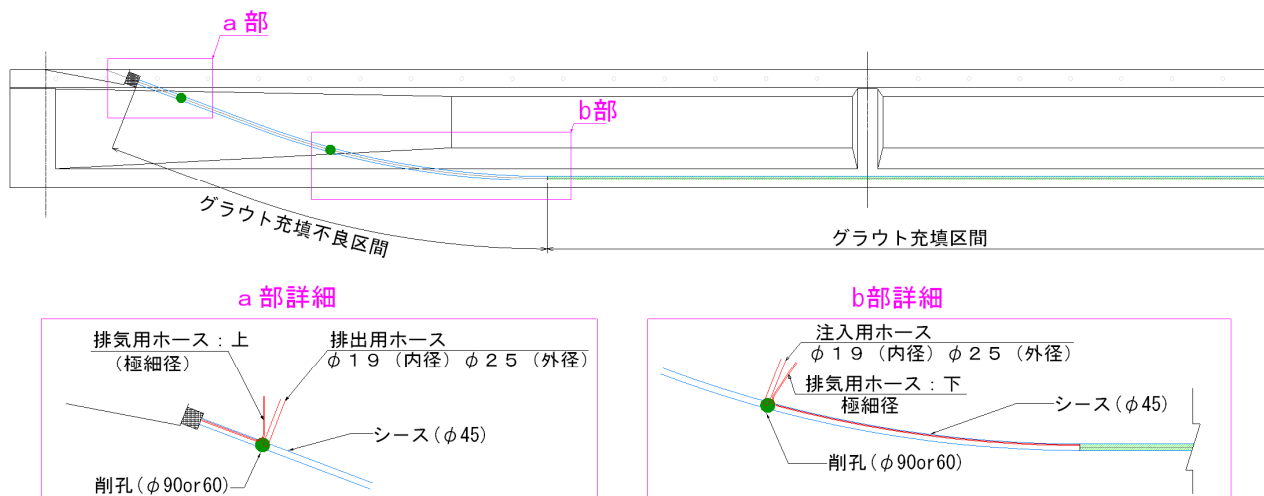


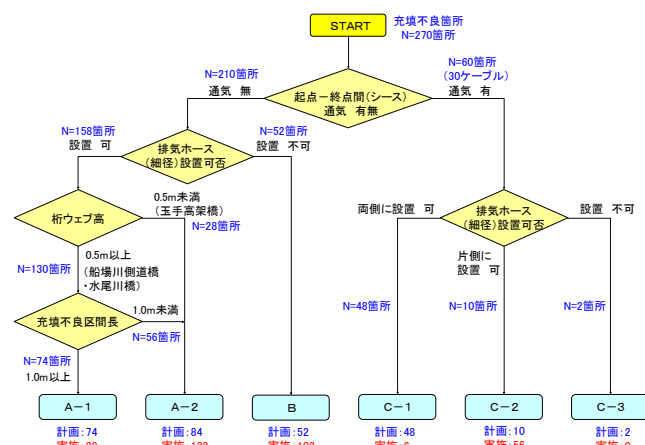
図-4 グラウト再充填基本計画図

6. グラウト再充填

1) グラウト再充填

前述の実験結果により、電動ポンプによる加圧注入を基本とし、排気ホース挿入不可部へは、真空ポンプによりシース内を真空状態に保ち、真空+加圧注入とした。

注入方法については、排気ホースの挿入可否や起終点の通気の有無等により、図-6に示す注入方法選定フローにより、各箇所注入方法を選定した。また、実注入では、注入・排出孔をφ90 or 60で削孔（事前調査はφ25）した後、排気ホースの挿入可否や通気の有無により、再度、注入方法（タイプA～C）を再選定した。



Aタイプ:排気ホース挿入可能(加圧注入), Bタイプ:排気ホース挿入不可(真空+加圧注入)

Cタイプ:起終点通気有 (加圧注入or真空+加圧注入)

図-6 注入方法選定フロー

2) グラウト再注入管理

従来のグラウト再注入では、グラウト材の注入孔等からの漏れの有無・排出孔からのグラウト材の排出確認を目視確認し注入管理していた。

本工事では、グラウト再注入の管理精度を向上させるため、注入前・作業中・完了時において、管理項目を追加し、グラウト材の注入状況やシース内圧力を随時確認しながら再注入を実施した。

〔従来の管理項目〕：再注入作業中、完了時

①漏れ確認：注入孔等からグラウト材の漏れ有無

②排出確認：排出側からグラウト材排出の有無

〔追加した管理項目〕

③エアー確認：小型コンプレッサー

シース内および削孔部の気密性・耐圧性の確保

④流量確認：グラウト流量計（計量単位 0.10）

充填不良部分の再注入推定量（空圧法）と実注入量を比較・確認することによる管理

⑤圧力確認：グラウトポンプ圧力計

0.3 Mpa→0.5 Mpa→0.7 Mpaの順に低速で最大0.7 Mpaまで再注入圧力管理

⑥真空確認：真空タンク圧力計

シース内真空度を-0.07 Mpa以上の確保

写真-10に、再注入時の管理状況を示す。

①〔注入確認〕:注入孔等からの漏れ確認



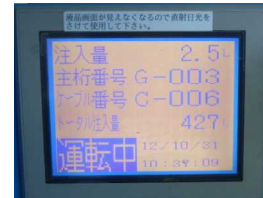
②〔排出確認〕



③〔エアー確認〕



④〔流量確認〕



⑤〔圧力確認〕:注入ポンプ圧力計



⑥〔真空確認〕:真空タンク圧力計



写真-10 再充填時の管理状況

4) グラウト再充填完了後の充填確認

グラウト再充填補修の完了後、IE法での反射波形やX線透過法での画像を、再充填前後で比較した。その結果、補修前のグラウト充填不良部に、確実にグラウトが再充填されていることが確認できた。写真-11に、再充填前後のX線透過法の画像を示す。

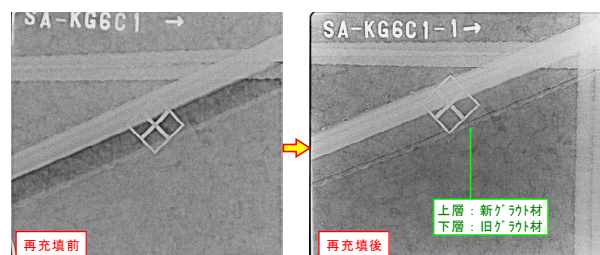


写真-11 再充填確認(X線透過法)

また、削孔部上方側に排気ホース挿入が不可となった箇所においても、削孔・CCD法によりシース内を確認した結果、グラウトが最上部まで充填されていることを確認した。写真-12に確認状況を示す。

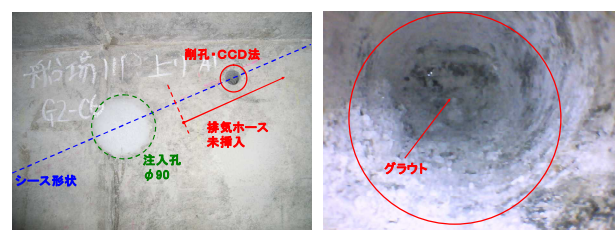


写真-12 排気ホース設置不可部の再充填確認

7. まとめ

1)グラウト充填調査

グラウト充填不良ケーブルの検出は非破壊検査の「インパクトエコー法」で実施し、充填ケーブルを充填不良等と判定するケースは若干数（約9%）あったものの、充填不良ケーブルを充填ケーブルと危険側に誤判定するケースは皆無であり、実構造物での適用が可能であることが確認できた。充填不良区間の特定には、微破壊検査「 $\phi 25$ 削孔」を行い「目視・CCD調査（空隙状況、PC鋼材腐食状況）」「空圧法（空隙体積測定）」「ワイヤー挿入法（充填・未充填境界確認）」を実施して、グラウト再充填方法のタイプ選定に活用した。また、「目視・CCD調査」によるPC鋼材腐食状況調査と合わせて「シース内の環境調査（水分、湿度、塩化物）」を実施し、PC鋼材腐食対策の必要性を判断した。

2)グラウト再充填結果

検討会で決定した再注入方法に基づき実施した後、「インパクトエコー法」や「X線透過法」による再充填後の検証を行った結果、当初に確認されていたシース内の空隙部に、グラウトが充填されていることを確認した。本工事での事例により、当該橋梁の条件下ではあるが既設ポストテンションPC桁のグラウト充填不良に対する実橋による調査・補修方法が確立できた。

本件で得られた知見をもとに、図-7に示すグラウト充填不良に対する補修フロー（案）を作成した。

8. 今後の課題

橋梁の長寿命化には、橋梁前後も含めた防水対策が重要となる。特に、本橋のような上縁定着部面への防水層の設置、伸縮装置部の漏水防止は、PC定着部の保護の観点からも重要となる。また、グラウト再充填については、以下の事項が今後の課題であると考えられる。

- 1) 本工事では、「IE法」を採用してグラウト充填不良ケーブルの検出を実施した。本方法では検出が不可能であった箇所（主桁にひび割れが多い箇所）もあった。この手法の、更なる改良による適用範囲の拡大ならびに検出精度の向上が期待される。
- 2) 本橋梁のグラウト充填不良箇所のPC鋼材は、腐食度判定において、全て腐食度IV未満であった。また、腐食錆を採取・分析した結果においても、塩化物イオンに由来した腐食でなかった。凍結防止材散布地域や海岸部近傍の橋梁では、塩化物の侵入によるPC鋼材の腐食に対する対策方法の検討が必要である。

なお、本論文は2012年度に姫路河川国道事務所に於いて実施した内容をもとに報告したものである。

謝辞: 本稿の場を借り、検討会においてご指導・ご助言を頂いた「森川英典教授（神戸大学大学院）」、「鎌田敏郎教授（大阪大学大学院）」、「服部篤史准教授（京都大学大学院）」、「プレストレスト・コンクリート建設業協会」各委員の方々に感謝の意を表する。

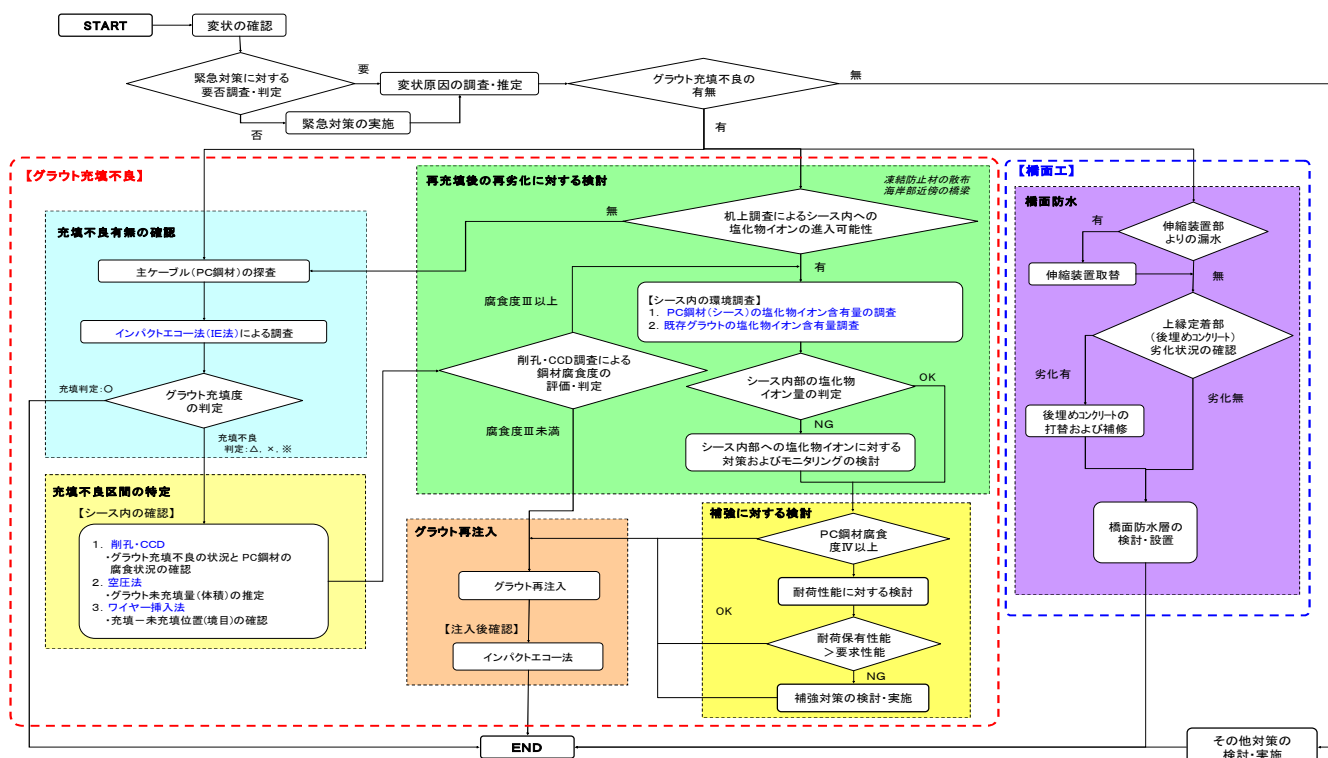


図-7 グラウト充填不良に対する補修フロー（案）