

既設 PC 橋のグラウト充填不足調査と補修検討について

大日本コンサルタント (株) ○ 西宏将
 長岡国道事務所 管理第二課 矢澤修一
 長岡国道事務所 管理第二課 松島智也
 大日本コンサルタント (株) 杉野亨

1. はじめに

本橋は昭和 52 年に竣工した橋梁であり、橋梁形式は鋼単純箱桁及び PC ポステン単純 T 桁 5 連である。令和元年度の補修工事で主桁側面の「うき」をはつったところ、シースの欠損とグラウト不良、PC ケーブルの腐食が確認された(写真-1)。

グラウトの充填不足により PC ケーブルの腐食や破断が生じた場合、橋の耐久性や耐荷性能に影響を及ぼす可能性がある。そこで、本橋におけるグラウト充填の有無を確認するために、主桁への影響が少ない非破壊での調査を実施した。なお、グラウトの充填不良が確認された第 6 径間以外においても、充填不良の可能性が懸念されたため、全ポステン T 桁(第 2~6 径間)を調査対象とした。

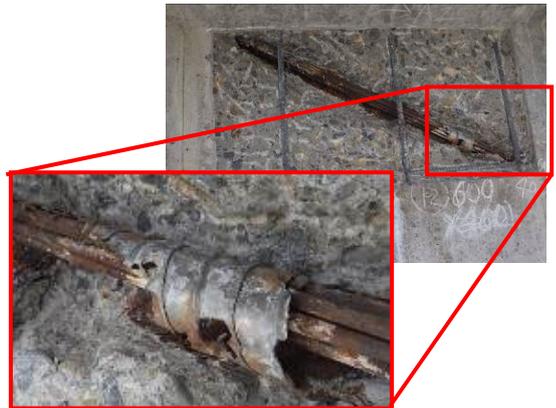


写真-1 グラウト不良と腐食状況

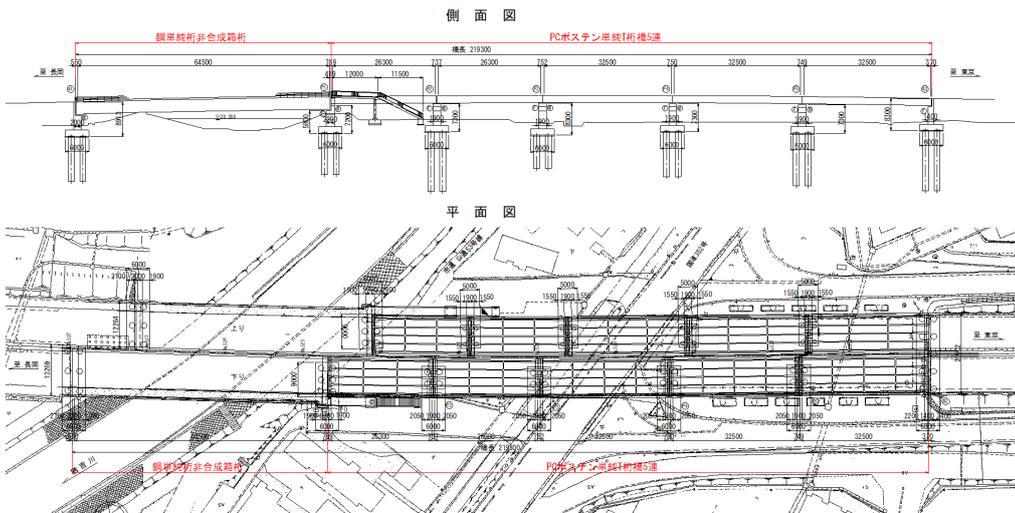


図-1 全体一般図

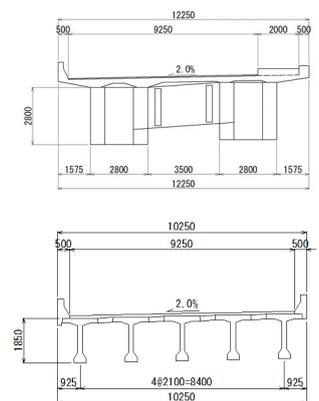


図-2 横断面図

2. 調査方法

2.1 非破壊調査

微破壊調査による目視確認は構造物の削孔が伴うため、主桁への影響を考慮し非破壊での調査を基本とした。非破壊での調査方法として、X 線透過法やインパクトエコー法(以下、IE 法)等があり、比較検討により作業性や経済性に優れた IE 法を採用した。

IE 法は、コンクリート表面に打撃を行い、反射した弾性波の卓越周波数 f (Hz) よりグラウトの充填状況について評価する方法である。グラウトが充填されている場合、シースの近傍 (f_1) とシースの位置 (f_2) で計測した卓越周波数が同程度となる。一方、充填不良の場合、両者の値に相違が生じる(図-3)。この原理を利用し、グラウトの充填状況の確認を行った。

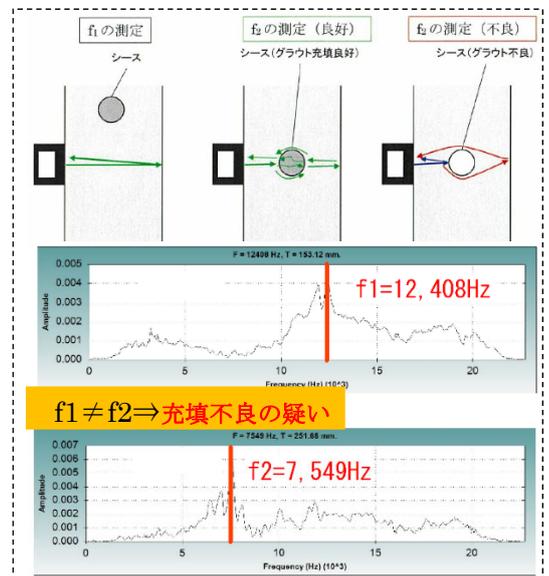


図-3 IE 法 測定原理

なお、既往の知見より定着部近傍でグラウトが充填不足となりやすいことが知られている(図-4)。本橋においても同様の傾向であると想定されたため、ケーブルの上段中段下段3箇所の計測を基本とした(図-5)。

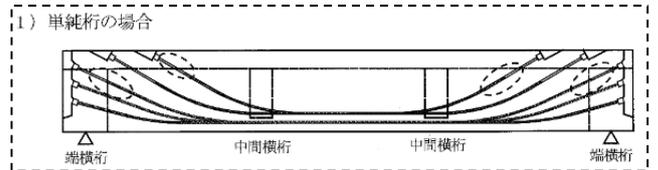


図-4 グラウト不良の例

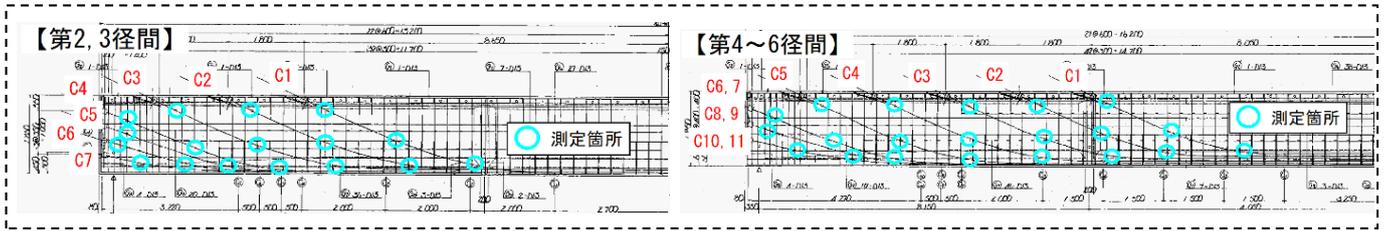


図-5 IE法測定箇所

2.2 微破壊調査

既往の調査指針において、非破壊と微破壊を組み合わせた調査が推奨されていることや、IE法は振動数の比率のみで充填不良を評価する基準がないため、閾値となる比率の設定を目的とし、微破壊調査を併用した。調査はIE法の結果を踏まえ、下記の方針より精査した23箇所を選定した。

- ・ f_2/f_1 値の相対差5%ごとの区分で1箇所以上確認する。(図-6)
- ・ 充填不良の判断閾値となることが想定される、 f_2/f_1 値 0.85 未満の4区分で調査箇所を多く選定する。
- ・ 充填不足は、定着部近傍で生じやすいと考えられるため、IE法の上段調査箇所での確認を基本とする。
- ・ IE法における上段中段の数値に対して、下段の数値が低い箇所についても確認を行う。

表-1 調査数量

調査内容	第2径間	第3径間	第4径間	第5径間	第6径間	合計
非破壊調査 (IE法)	170	170	270	270	270	1150
微破壊調査 (削孔調査)	3	5	0	8	7	23

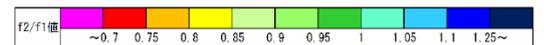


図-6 f_2/f_1 値区分分け

2.3 グラウト充填不良の判定方法

本調査での各ケーブルにおけるグラウトの充填不良について判断のフローを図-7に示す。基本はIE法の調査結果より、グラウト充填の有無を確認する。ただし、閾値設定のために微破壊調査を実施した箇所については、IE法の結果に関わらず、微破壊調査による結果を正とした。

3. IE法による非破壊調査結果

結果の傾向を考察する上で、第2径間での調査結果を代表して表-2に示す。上縁定着のケーブル(C1~C3)において、 f_2/f_1 値が0.85未満となる箇所が多く見られた。この結果は全径間で同様であり、特に上縁定着のケーブルや定着部付近の箇所で比率が低下する傾向であった。

表-2 IE法調査結果 【第2径間】

定着	測点	第2径間									
		2-G1起	2-G1終	2-G2起	2-G2終	2-G3起	2-G3終	2-G4起	2-G4終	2-G5起	2-G5終
上縁定着	C1上	0.547	0.832	0.867	0.810	0.820	0.821	0.807	0.780	0.850	0.898
	C1中	0.608	0.890	0.876	0.858	0.948	0.889	0.861	0.802	0.974	0.882
	C1下	0.801	0.978	0.949	0.832	0.996	0.924	0.926	0.876	0.930	0.961
	C2上	0.847	0.983	0.925	0.819	1.018	0.988	1.019	0.983	1.005	0.991
	C2中	0.838	0.942	0.832	0.860	0.995	0.968	0.939	0.930	0.995	0.939
	C2下	0.911	0.908	0.869	0.856	0.943	0.943	0.877	0.952	0.952	0.925
端部定着	C3上	0.991	1.056	1.095	0.988	1.298	0.982	0.952	0.996	1.071	0.979
	C3中	0.987	1.007	0.991	0.989	1.078	0.984	0.979	0.993	0.991	0.993
	C3下	1.034	1.005	1.003	0.951	1.004	1.013	1.010	0.957	1.000	0.962
	C4上	0.873	0.960	0.987	0.977	0.800	0.885	0.930	1.014	0.976	0.836
	C4中	0.988	0.979	1.133	1.057	1.023	0.995	1.024	1.117	1.022	1.012
	C4下	1.006	1.027	0.992	0.945	1.007	0.986	1.027	0.886	1.030	0.987
端部定着	C5上	1.093	0.960	0.838	1.013	0.984	1.000	1.028	1.069	1.040	0.996
	C5中	1.007	0.997	0.979	1.009	1.053	1.055	1.038	0.991	0.990	1.056
	C6上	0.968	1.017	0.945	0.987	0.766	0.912	1.025	1.056	0.987	1.013
	C6中	0.983	1.045	0.997	0.961	0.999	1.004	0.993	1.130	0.987	0.990
	C7中	0.831	1.066	0.852	0.987	0.781	0.872	0.876	0.794	0.846	0.817

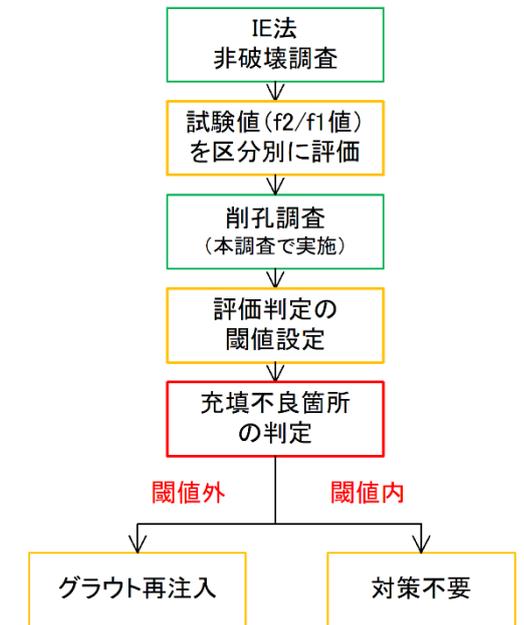


図-7 グラウト不良箇所 判定フロー

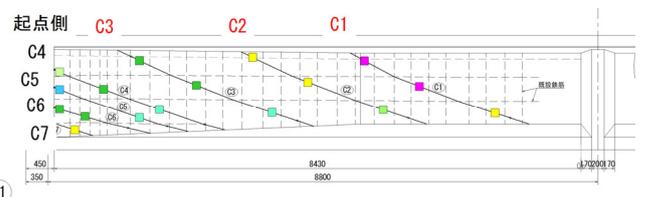


図-8 主桁側面図【第2径間, G1 起点側】

4. 微破壊調査結果

実施した全 23 箇所での調査結果を表-3 に示す。充填状況の評価について、断面全体を充填されている場合は良好とし、充填が半分以上の場合は不十分、半分以上の場合は、充填不良として評価した。(写真-3)

調査結果より、0.75~0.85 未満の範囲において充填状況が不十分、不良であることが確認されたため、0.75~0.85 未満を充填不良の閾値として設定した(図-9)。

0.75 未満や 1.25 以上の箇所は外観変状等がみられ、非破壊調査においてグラウトの充填不良以外の影響と考えられるため、特異点として判定した。なお、微破壊調査箇所以外の特異点における充填の有無については、補修工事時に確認することとした。

また、IE 法の調査結果において上段中段が良好であるが、下段での比率(f_2/f_1 値)のみが低い箇所でも充填不良が確認された。充填不良が生じやすい定着部近傍以外でも、グラウト不良が生じることを確認できた。

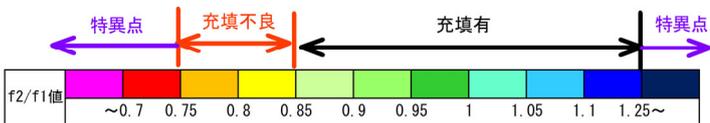


図-9 閾値設定

5. グラウト不良箇所の判定

微破壊調査で設定した閾値より、グラウト不良箇所及び再充填箇所の選定を行った(表-4)。非破壊調査において、充填が確認された箇所までをグラウトの充填有と判断し設定した。基本的には水平区間はグラウトが充填されているものとするが、ケーブル 1 本の内、上中下段で未充填であった場合は、水平区間についても未充填範囲として設定した。

6. 調査結果に対する考察

本調査における 1150 箇所の非破壊調査(IE 法)より、183 箇所 (16%) のグラウト不良が確認された(図-11)。径間別で比較すると、ケーブル長さが比較的長い第 4~6 径間側で充填不良箇所が比較的多く確認されており、ケーブルの延長が施工性に影響し、充填不足が生じた可能性が考えられる。(図-12)。

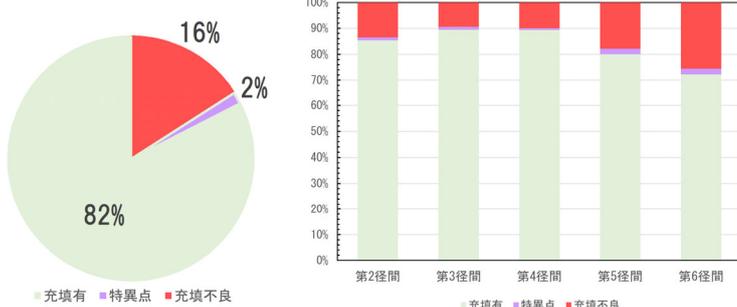


図-11 グラウト不良箇所割合

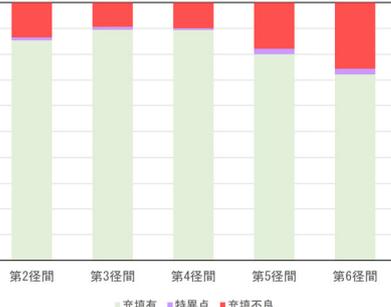


図-12 径間別調査結果

表-3 微破壊調査結果

f_2/f_1 値の区分	削孔内視鏡調査				
	1箇所目	2箇所目	3箇所目	4箇所目	5箇所目
0.70未満	第2径間-G1-起点-C1-上段	第5径間-G2-起点-C2-上段	第5径間-G4-起点-C3-上段	第6径間-G3-終点-C7-下段	第6径間-G5-起点-C2-上段
0.70以上 0.75未満	第3径間-G2-終点-C1-上段	第5径間-G2-終点-C1-上段	第6径間-G5-終点-C1-下段		
0.75以上 0.80未満	第3径間-G1-終点-C1-上段	第6径間-G1-終点-C3-上段	第6径間-G2-終点-C4-下段	第6径間-G3-終点-C2-下段	
0.80以上 0.85未満	第2径間-G2-終点-C2-上段	第3径間-G2-終点-C1-上段	第5径間-G1-起点-C1-上段	第6径間-G1-終点-C2-上段	
0.85以上 0.90未満	第2径間-G2-終点-C2-下段	第5径間-G1-起点-C1-上段			
0.90以上 0.95未満	第3径間-G1-起点-C2-上段				
0.95以上 1.00未満	第5径間-G3-終点-C1-上段				
1.00以上 1.05未満	第3径間-G4-終点-C3-上段				
1.05以上 1.10未満					
1.10以上 1.25未満	第5径間-G4-起点-C10-中段				
1.25以上	第5径間-G2-起点-C4-中段				

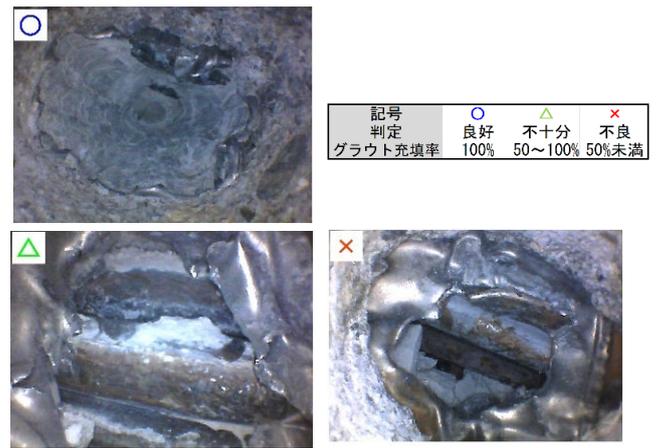


写真-2 微破壊調査状況

表-4 グラウト不良箇所一覧【第2径間】

定着	測点	第2径間									
		2-G1起	2-G1終	2-G2起	2-G2終	2-G3起	2-G3終	2-G4起	2-G4終	2-G5起	2-G5終
上線定着	C1上	0.547	0.832	0.867	0.810	0.820	0.821	0.807	0.780	0.850	0.898
	C1中	0.808	0.890	0.876	0.858	0.948	0.889	0.861	0.802	0.974	0.882
	C1下	0.801	0.978	0.949	0.832	0.996	0.924	0.926	0.876	0.930	0.961
	C2上	0.847	0.983	0.925	0.819	1.018	0.988	1.019	0.983	1.005	0.991
	C2中	0.838	0.942	0.832	0.860	0.995	0.968	0.939	0.930	0.995	0.939
	C2下	0.911	0.908	0.869	0.856	0.943	0.943	0.877	0.952	0.952	0.925
端部定着	C3上	0.991	1.056	1.095	0.988	1.298	0.982	0.952	0.996	1.071	0.979
	C3中	0.987	1.007	0.991	0.989	1.078	0.984	0.979	0.993	0.991	0.993
	C3下	1.034	1.005	1.003	0.951	1.004	1.013	1.010	0.957	1.000	0.962
	C4上	0.873	0.960	0.987	0.977	0.800	0.885	0.930	1.014	0.976	0.836
	C4中	0.988	0.979	1.133	1.057	1.023	0.995	1.024	1.117	1.022	1.012
	C4下	1.006	1.027	0.992	0.945	1.007	0.986	1.027	0.886	1.030	0.987
端部定着	C5上	1.093	0.960	0.838	1.013	0.984	1.000	1.028	1.069	1.040	0.996
	C5中	1.007	0.997	0.979	1.009	1.053	1.055	1.038	0.991	0.990	1.056
	C6上	0.968	1.017	0.945	0.987	0.768	0.912	1.025	1.056	0.987	1.013
	C6中	0.983	1.045	0.997	0.961	0.999	1.004	0.993	1.130	0.987	0.990
	C7中	0.831	1.066	0.852	0.987	0.781	0.872	0.876	0.794	0.846	0.817

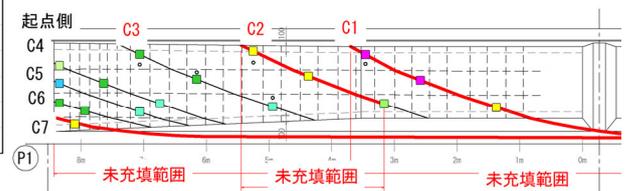


図-10 主桁側面図(不良箇所反映)【第2径間, G1】

また、ケーブルの定着位置別で比較すると端部定着部より、上縁定着部において充填不良箇所が集中する結果となり、既往の知見と同様の傾向であった（図-13, 14）。

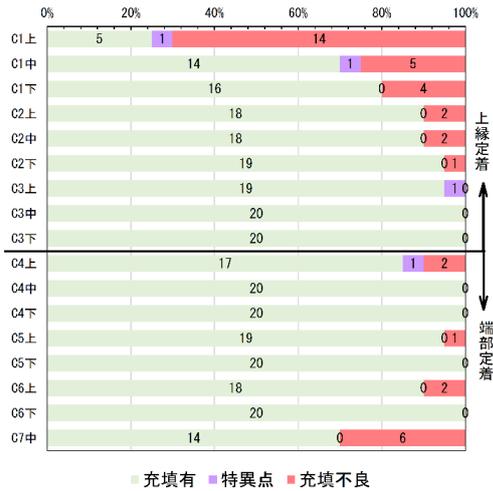


図-13 ケーブル別調査結果(第2,3径間)

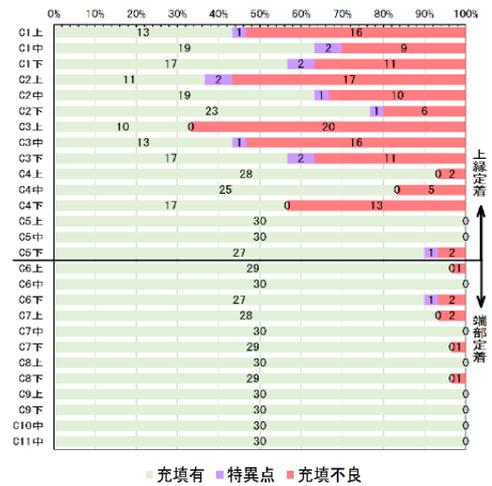


図-14 ケーブル別調査結果(第4~6径間)

7. 補修工法の検討

再注入に用いる材料は、一般的に新設時の仕様に準じた材料を使用するが、本橋は塩害環境下であり、橋面からの塩分の浸透によって空洞箇所に塩化物イオンを含有していると考えられる。塩化物イオンが含まれる場合、再充填箇所と当初充填箇所において電位差が生じ、PC鋼材の腐食を助長する可能性があることから、塩害対応の材料および工法を含めた比較検討を行った。

代表的な塩害対応の材料、工法については、「リパッシブ工法」、「PC-rev工法」、「KKグラウト工法」が挙げられる。上記の工法について比較検討を行い、再注入の確実性や施工性、塩害等の再劣化対策を考慮し「PC-rev工法」を採用した。(表-5)

表-5 再注入工法比較

検討案	第1案：従来工法	第2案：リパッシブ工法	第3案：PC-rev工法	第4案：KKグラウト工法
NETIS番号	-	KT-120108-VR	KT-180080-A	KT-180107-A
概要図				
施工性	・第2,4案と比べて施工手順が少なく、施工性に優れる。	・グラウト充填前に垂流防止用フォームを必要とする必要があり、施工手順が増える。	・第2,4案と比べて施工手順が少なく、施工性に優れる。	・グラウト充填前に既グラウトを注入する必要があるため、施工手順が増える。
施工精度	・修繕箇所による空洞長の測定となるため、第2案と比べてやや施工精度に劣る。	・修繕箇所による空洞長の測定となるため、第2案と比べてやや施工精度に劣る。	・真空状態による空洞発生が少なく、空洞の発生精度が他案と比べて高い。	・修繕箇所による空洞長の測定となるため、第2案と比べてやや施工精度に劣る。
再劣化対策	・塩害環境下において、再劣化の可能性が高い。	・垂流防止用フォームによる空洞対策やマクロセル腐食に対して抑制効果があり、再劣化対策として優れる。	・カルシウムアルミネートによる防錆効果やマクロセル腐食に対して抑制効果があり、再劣化対策として優れる。	・修繕箇所による空洞発生やマクロセル腐食に対して抑制効果があり、再劣化対策として優れる。
施工実績	・一般的に用いられる材料であるため、施工実績多岐。	・50件以上の施工実績あり。	・25件以上の施工実績あり。・過年度調査データにおいて、グラウト再注入を実施し、調査にて効果が良好であることを確認。	・施工実績は1件のみ。
【施工費】(千円)	15,900 (1.00)	34,000 (2.14)	16,600 (1.05)	26,800 (1.69)
評価	・経済性で優れるものの、再劣化の可能性が高いため、不採用とする。	・第2案と比べて、施工精度や経済性に劣るため、不採用とする。	・施工精度や安全性に優れ、再劣化防止工法の中で最も経済性に優れる本案を採用する。	・第2案と比べて、施工精度や経済性に劣るため、不採用とする。

8. まとめ

調査の結果以下のことが分かった。

- ・調査 1,150 カ所のうち、183 カ所 (16%) でグラウト不良箇所が確認された。
- ・グラウトの再注入が必要な延長は調査結果から 352.9m と推定され、ケーブル全長のうち 11% となった。
- ・充填不良が生じやすい定着部以外の調査位置でも、充填不足が確認された。
- ・ケーブルの延長が長い方が、充填不良が生じやすい傾向がある。
- ・本橋ではグラウト不良箇所の大部分で腐食が確認されたが、断面欠損や破断したケーブルはなかった。
- ・IE法と削孔調査の併用により、精度良く判定できることが分かった。

本報告が、今後の同種の調査補修に参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンスセンター、一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：撤去橋梁を用いた既設 PC 橋の診断技術高度化に関する共同研究報告書, p.1, 2016.
- 2) 一般社団法人プレストレスト・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.31, 2022.
- 3) 公益財団法人プレストレスト・コンクリート工学会：既設ポストテンション橋の PC 鋼材調査及び補修・補強指針, pp.22-23, 2016.