

PCポステンT桁に関する 内部損傷と外観変状との関連性に関する分析

宇都宮光治¹・植田拓磨²・齊藤 暖²

¹ (一財)阪神高速道路技術センター調査研究部調査研究第一課

² 保全交通部保全調整・点検課

要約

筆者らは阪神高速道路の橋梁マネジメントシステムの高度化を目指し、外観変状から構造物の性能と劣化を適切に評価する方法について検討を進めてきた。

PCポストテンション方式T桁（以下、ポステンT桁と称す）については、大規模修繕事業の中で詳細調査が実施され、グラウト充填状況、PC鋼材の腐食状況およびひび割れ等の外観変状が把握されている。本検討では、これらの調査結果を活用し、PC鋼材の損傷と外観変状との関連性を分析し、PC桁の性能に影響があると考えられる外観変状を把握するとともに、今後の近接目視において、ポステンT桁のPC鋼材の損傷が懸念される状況等について整理した。

キーワード: 大規模修繕工事, PC桁, 外観変状, PC鋼材腐食

1. はじめに

筆者らは、昨年度より図-1に示す上縁定着を有したPCポストテンション方式T桁（以下、ポステンT桁と称す）に関して、大規模修繕・更新を考慮した阪神高速道路の橋梁マネジメントシステム（以下、H-BMSと称す）の理論構築を検討してきた。昨年度の検討では、損傷件数や近年の発生傾向より図-2に示す「ひび割れ0.2mm以上」の損傷に留意が必要と考えられた。

また、阪神高速道路では、平成27年度より池田線と東大阪線を対象にPC桁等大規模修繕工事1~4工区（以下、大規模修繕工事と称す）に着手している。これらの工事は、PC桁の健全性の調査を行い、その結果を受け補強設計を行う調査・設計を含んだ工事である¹⁾。実施される調査は、外観変状詳細調査、グラウト充填調査、微破壊調査（以下、PC鋼材腐食調査と称す）、グラウト未充填体積調査（以下、空圧法と称す）、コンクリート物性調査などであり、これらの調査結果を踏まえて健全性評価を行い対策方法を判断している¹⁾。

昨年度の検討において留意すべき損傷と位置付けた「ひび割れ0.2mm以上」の損傷発生要因については、個別に調査を行い判断する必要があると思われるが、PCグラウト充填不足の存在に伴うシーズやPC鋼材の腐食が要因として考えられることは様々な文献等²⁾で示されている。そこで、本検討では、大規模修繕工事で実施された、外観変状詳細調査およびPC鋼材腐食調査の結果を活用し、外観

変状とPC鋼材腐食の関連性を分析した。

本論文では、まず、外観変状詳細調査とPC鋼材腐食調査の結果を整理する。次に、調査結果に基づき、外観変状とPC鋼材腐食の関連性を定量的に示す。更に、維持管理手法の提案として、外観変状から得られる情報より、PC鋼材の腐食が懸念される事例を報告する（図-3参照）。

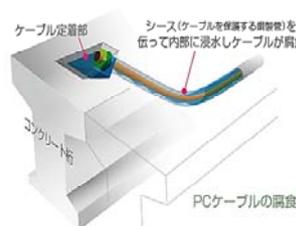


図-1 上縁定着を有したポステンT桁



図-2 ひび割れ0.2mm以上の損傷事例

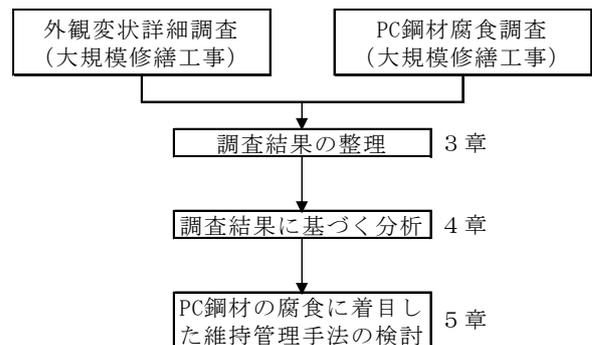


図-3 検討フロー

2. 調査概要（大規模修繕工事）

(1) 調査フロー

大規模修繕工事の調査フローを図-4に示す。当該フロー図は、外観変状詳細調査からPC鋼材腐食調査までを示すものである。実際の工事では、未充填体積調査やコンクリート物性調査などの結果を加味し、補修・補強や予防保全などの対策を判断している。

外観変状詳細調査では、近接目視および打音検査によりケーブル損傷が疑われる外観変状（ひび割れ、遊離石灰、空洞、漏水、錆汁等）の有無を確認している。ケーブル損傷が疑われる外観変状が確認される場合は、微破壊調査に進む。微破壊調査では、PC鋼材が配置されている箇所以小径の孔を明け、目視およびCCDカメラによりPC鋼材の状態を確認している。ケーブル損傷が疑われる外観変状が認められない場合は、インパクトエコー法によるグラウト充填状況の調査を実施し、充填不良の疑いがある場合は微破壊調査によりPC鋼材の状態を確認している。

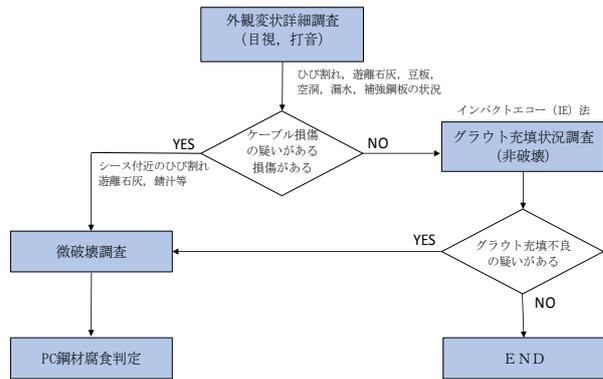


図-4 調査フロー（大規模修繕工事）



図-5 調査位置

(2) 対象数量

本検討で対象としている大規模修繕工事は、平成27年度に発注された東大阪線の1工区と池田線の3工区を合わせた4工区である。これら4工区の対象は126径間であるが、本論文の対象は検討スケジュールの関係上78径間である。

(3) PC鋼材腐食調査

a) 調査位置

1ケーブルに対する調査位置を図-5示す。調査箇所は、上縁定着ケーブルを対象に、主桁両端部のPC鋼材曲げ上げ部それぞれ2箇所である。

b) 腐食判定

PC鋼材腐食調査は、「プレストレスコンクリート構造物補修の手引き（案）平成21年9月プレストレス・コンクリート建設業協会³⁾」に基づき4段階で評価している（表-1）。ケーブル腐食状況については、グレードIが最も軽微な状態で質量減少率は1%未満相当である。グレードの数字が高くなるにつれて、腐食に伴う質量減少率は高くなり、グレードIVでは質量減少率10%程度以上に相当する。但し、実際の調査では質量を計測しているわけではなく、PC鋼材の外観状況より腐食グレードを判定している。

表-1 腐食判定

	ケーブル腐食状況
I	質量減少率1%未満に相当する腐食
II	質量減少率1～2.5%程度に相当する腐食
III	質量減少率10%程度未満に相当する腐食
IV	質量減少率10%程度以上に相当する腐食

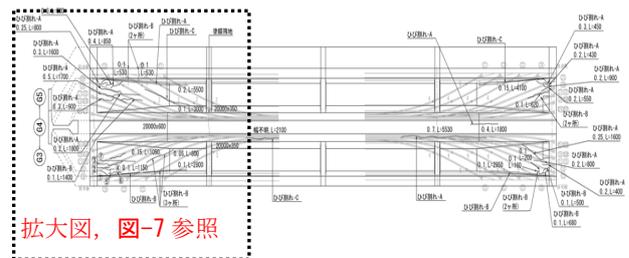


図-6 外観変状詳細調査（桁全体）

(4) 外観変状詳細調査

外観変状詳細調査は、目視や打音によりひび割れや漏水遊離石灰等の有無を確認している。調査結果については、図-6（拡大は図-7参照）に示す要領で桁の展開図に位置や形状を記録している。

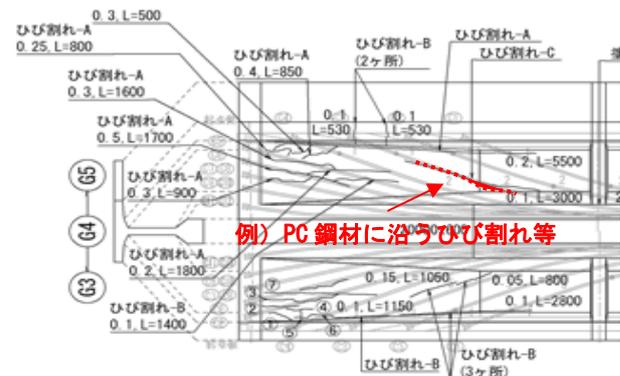


図-7 外観変状詳細調査（拡大図）

3. 調査結果の整理

(1) 外観変状詳細調査結果

外観変状については、図-6の通り桁単位で記録されている。しかし、PC鋼材腐食調査については、2.(3).a)で示した通り、主桁両端部のPC鋼材曲げ上げ部それぞれ2箇所である。したがって、本検討における外観変状については、主桁両端部のPC鋼材曲げ上げ部に沿って生じた損傷を抽出し集計した。抽出事例を図-7(図中の赤字)に示す。また集計結果は92件であった(表-2参照、表中の赤字)。

(2) PC鋼材腐食調査

PC鋼材腐食調査の結果を表-2に示す。調査総数は7260箇所である。その内、PC鋼材の腐食度Ⅰ～Ⅳの集計は2246箇所(調査総数の約31%)、腐食度Ⅱ～Ⅳの集計は220箇所(調査総数の約3%)であった。PC鋼材の腐食事例として、腐食度Ⅳの状況を図-8に示す。

表-2 調査結果

項目	a. 調査総数	b. 腐食Ⅰ～Ⅳ	c. 腐食Ⅱ～Ⅳ	b/a	c/a	PC鋼材に沿う外観変状数
件数	7260	2246	220	31%	3%	92

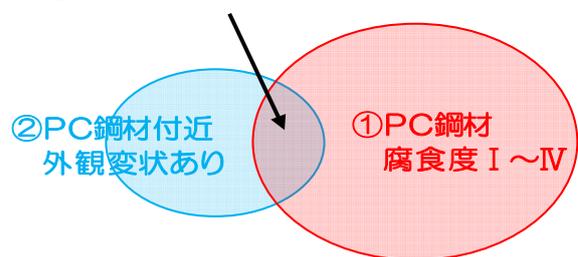


図-8 PC鋼材 腐食度Ⅳ

4. 調査結果に基づく分析

分析は、PC鋼材の腐食が有る箇所に外観変状が併発していた比率(以下、腐食に対する外観変状)と、外観変状が有る箇所にPC鋼材の腐食が併発していた比率(以下、外観変状に対する腐食)の2方向から分析する。この概念を図-9に示す。

③外観変状ありかつPC鋼材腐食あり



外観変状に対する腐食: ③/② ・ 腐食に対する外観変状: ③/①

図-9 分析の概念図

(1) 腐食に対する外観変状

腐食に対する外観変状の分析結果を図-10に示す。調査の結果、PC鋼材の腐食が確認された件数は、腐食度Ⅰ～Ⅳの合計で2246件(2026+193+24+3件)である。この内、外観変状の併発が確認されたのは61件(46+14+1)であった。比率は、3%(61/2246)である。同様の手法で、腐食度をⅡ以上とすると、腐食度Ⅱ～Ⅳの合計は220件(193+24+3)である。この内、外観変状の併発が確認されたのは15件(14+1)であった。比率は、7%(15/220)である。

項目	腐食度判定						合計
	I	II	III	IV	小計	OK	
外観変状有	46	14	1	0	61	31	92
外観変状無	1980	179	23	3	2185	4983	7168
合計	2026	193	24	3	2246	5014	7260

腐食度Ⅰ～Ⅳの外観変状率
⇒ 61/2246=0.03

腐食度Ⅱ～Ⅳの外観変状率
⇒ 15/220=0.07

図-10 腐食に対する外観変状 分析結果

(2) 外観変状に対する腐食

外観変状に対する腐食度の分析結果を図-11に示す。調査の結果、外観変状が確認された件数は合計で92件(46+14+1+31件)である。この内、PC鋼材の腐食を併発していたのは61件(46+14+1)であった。比率は、66%(61/92)である。同様の手法で、腐食度をⅡ以上とすると、外観変状が確認された件数92件に対して、PC鋼材の腐食を併発していたのは15件(14+1)であり、比率は16%(15/92)であった。

項目	腐食度判定						合計
	I	II	III	IV	小計	OK	
外観変状有	46	14	1	0	61	31	92
外観変状無	1980	179	23	3	2185	4983	7168
合計	2026	193	24	3	2246	5014	7260

外観変状箇所の腐食率
⇒ Ⅰ～Ⅳ: 61/92=0.66
⇒ Ⅱ～Ⅳ: 15/92=0.16

図-11 外観変状に対する腐食 分析結果

(3) 分析結果の整理

腐食に対する外観変状の分析結果より、腐食が

生じたPC鋼材の配置上に外観変状が生じる割合は低く、その程度は鋼材腐食度Ⅰ～Ⅳで3%程度、Ⅱ～Ⅳで7%程度であった(図-10参照)。一方、外観変状に対する腐食の分析結果では、PC鋼材沿いに外観変状がある場合の鋼材腐食率は比較的高く、その程度は鋼材腐食度Ⅰ～Ⅳで66%程度、Ⅱ～Ⅳで16%程度であった(図-11参照)。以上の結果より、外観変状からPC鋼材の腐食を判断することは難しいが、PC鋼材に沿う外観変状がある場合は、PC鋼材の腐食を抽出する手がかりになると考えられる。

また、今回の分析において集計した外観変状の内訳を表-3に示す。PC鋼材が腐食している場合に生じる外観変状として最多であるのは、ひび割れの39件（32+6+1，表中の赤枠）であった。更に、ひび割れ39件について、道路構造物の点検要領¹⁾に示されているひび割れ種別を確認した結果、明らかに判断できた場合と最も近い形状と判断した場合を含めて、図-12に示すひび割れ種別⑱が最多の35件であった。今後、更にデータを蓄積し分析する必要があるが、種別⑱が要注意箇所抽出の手がかりになる可能性があると考えている。

表-3 外観変状の内訳

項目	腐食度判定					計	
	I	II	III	IV	OK		
外観変状	ひび割れ	32	6	1	0	17	56
	浮き	2	0	0	0	7	9
	漏水遊離石灰	12	8	0	0	7	27
計	46	14	1	0	31	92	

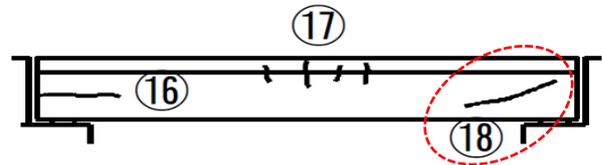


図-12 ひび割れ種別⑱

5. PC鋼材の腐食に着目した維持管理手法の検討

(1) 着目範囲の拡大（腐食度 I～IV）

前章では、PC鋼材の腐食が生じた箇所の外観変状、言い換えると局所的な損傷単位での分析を実施した。その結果、外観変状がPC鋼材の腐食を知る手がかりになり得ることを示したが（外観変状に対する腐食の分析より）、それはPC鋼材腐食総数に対しては極僅かな割合である。そこで、外観変状を伴わないPC鋼材の腐食箇所を抽出する手法を検討するため、着目範囲を損傷単位から、桁単位、径間単位と拡大し同様の分析を実施した。桁単位と径間単位の定義を表-4に、損傷単位も含めた分析結果を図-13に示す。

表-4 桁単位と径間単位の定義

桁単位	主桁両端部のPC鋼材曲げ上げ部にPC鋼材の腐食が確認された桁において、同範囲（主桁両端部のPC鋼材曲げ上げ部）に外観変状が認められるか。
径間単位	主桁両端部のPC鋼材曲げ上げ部にPC鋼材の腐食が確認された径間において、同範囲（主桁両端部のPC鋼材曲げ上げ部）に外観変状が認められるか。

図-13より、腐食に対する外観変状は、損傷単位の場合3%であるのに対して、桁単位では12%、径間単位では42%であった。以上の結果より、主桁端部のPC鋼材曲げ上げ部において、ひび割れや漏水遊離石灰等の外観変状がある場合、着目範囲を損傷単位から桁単位⇒径間単位と拡大させることで、PC鋼材の腐食有無について精度を向上させながら絞り込める可能性がある。但し、今回の検討では当該傾向が得られた正確な根拠や状況分析まで実施できていない。この点については今後の検討課題と考えている。

(2) 着目範囲の拡大（腐食度 II～IV）

本節では前節と同様に、着目範囲を損傷単位から桁単位⇒径間単位と拡大させて鋼材腐食との関連性を分析するが、鋼材腐食については、より重度な損傷との関連性を確認するため、腐食度 II 以上を対象とした。結果を図-14に示す。

腐食に対する外観変状の比率は、例えば桁単位では腐食度 I～IVの12%（図-13参照）に対して、腐食度 II～IVでは26%（図-14参照）になるなど若干高くなる傾向である。また、損傷単位で確認した鋼材腐食と外観変状の併発15件の外観変状内訳は、ひび割れ7件、漏水遊離石灰8件（53%，8/15）であった（表-3参照）。これに対し腐食度 I～IVの同件数は、ひび割れ39件、浮き2件、漏水遊離石灰20件（33%，20/61）であった（表-3参照）。

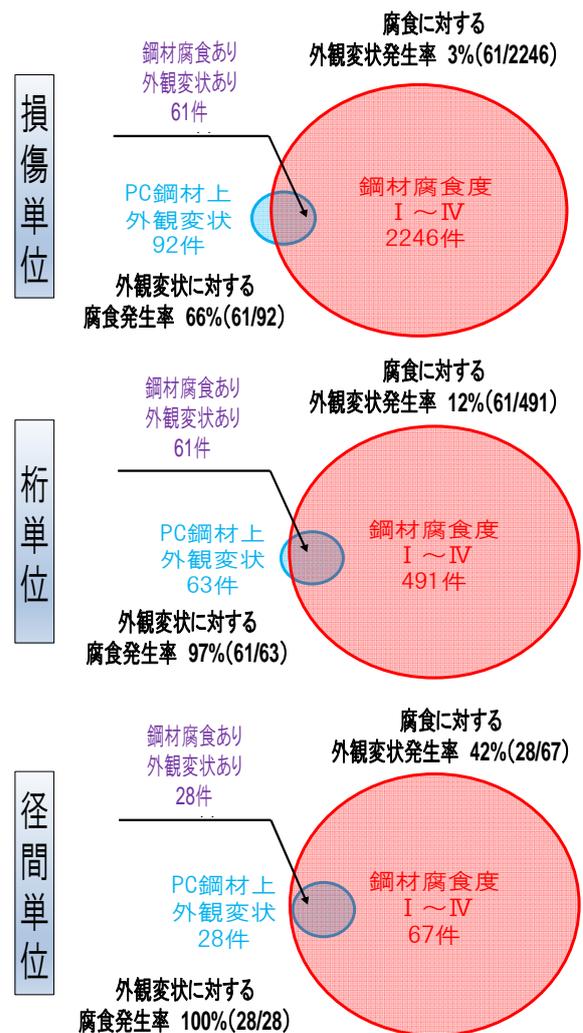


図-13 損傷⇒桁⇒径間単位での分析（腐食度 I～IV）

以上の結果より、腐食度をⅡ～Ⅳで分析すると、腐食に対する外観変状の比率は腐食度Ⅰ～Ⅳに比べて高くなること、加えて外観変状の項目は、腐食度Ⅰ～Ⅳに比べると、漏水遊離石灰の割合が高くなることを確認した。

(3) 径間単位での検計（定期点検）

これまでは、大規模修繕工事の外観変状詳細調査とPC鋼材腐食調査の結果を活用し分析を行った。本節では、外観変状のデータについて、より汎用的と考えられる定期点検結果を用いてPC鋼材腐食調査の結果と照合した。結果を図-15に示す。

図-15の左上及び右側の2つのグラフは定期点検の損傷ランク毎（左上：Aランク，右上：Bランク，右下：Cランク，1次判定結果）に集計した結果である。横軸は径間単位の腐食度Ⅱ～Ⅳの件数，縦軸はランク毎の延べ発生件数（径間単位）を示している。

損傷ランク毎では、総じて腐食度Ⅱ～Ⅳとの関連性は低く、定期点検の1次判定において損傷度が高いとされるAランクの集計においても、腐食度Ⅱ～Ⅳとの関連性はBCランクと同等である。

そこで、各ランクの損傷数を合計した全損傷件数と腐食度Ⅱ～Ⅳの関連性を確認した（図-15の左下）。結果として、損傷ランク毎の集計に比べて全損傷の集計は、腐食度Ⅱ～Ⅳとの関連性が高くなることを確認できた。これにより、定期点検の情報を用いて、腐食度Ⅱ～Ⅳを有した径間の絞込みに活用できる可能性があると考えられる。但し、要注意径間と判断するための基準等（総損傷件数の指標等）については、より詳細にデータを検証し検討したい。

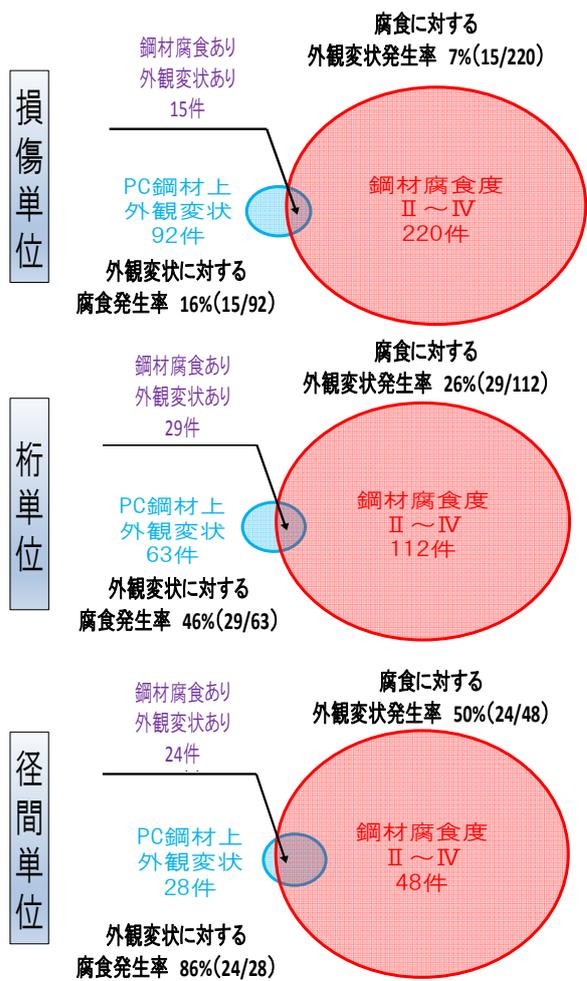


図-14 損傷⇒桁⇒径間単位での分析（腐食度Ⅱ～Ⅳ）

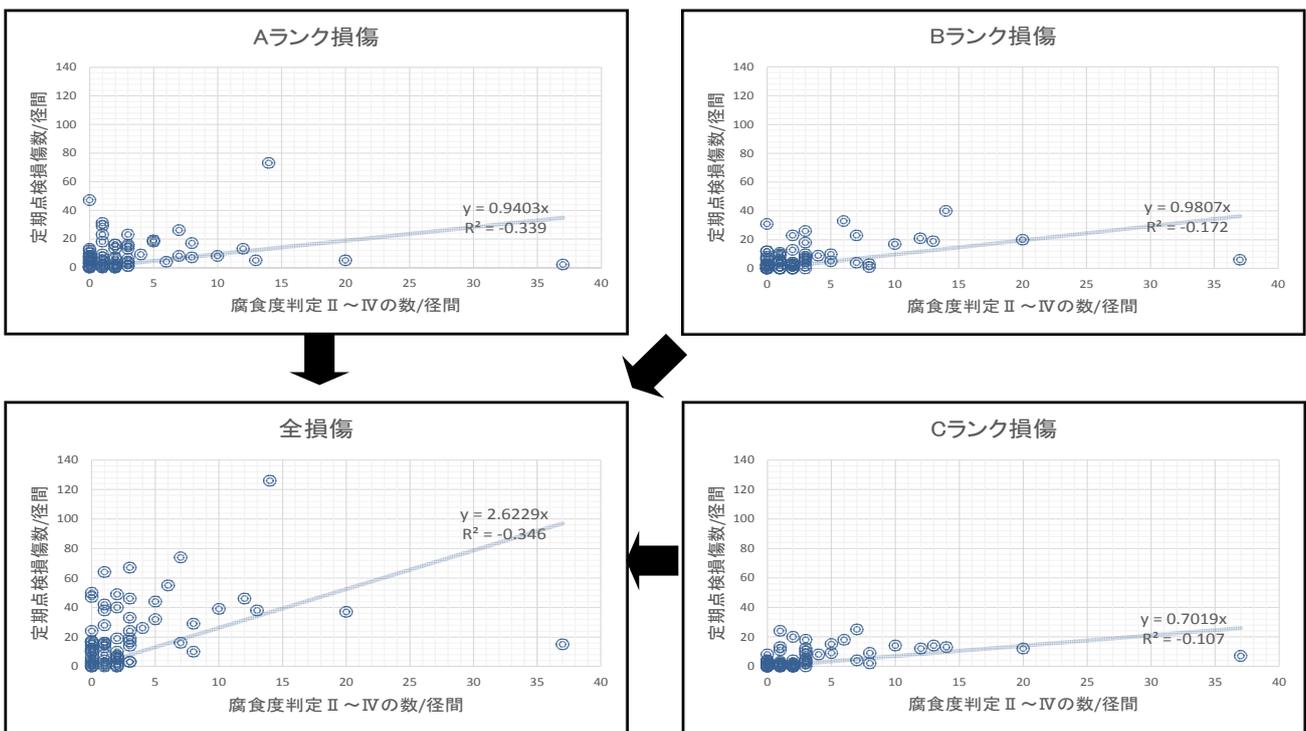


図-15 径間単位での検計 定期点検結果と鋼材腐食度Ⅱ～Ⅳ

6. まとめ

本論文の成果を下記に示す.

- 本検討では、大規模修繕工事で実施している外観変状詳細調査およびPC鋼材腐食調査の結果を整理し、双方の関連性を分析した.
- 腐食に対する外観変状の分析では、外観変状よりPC鋼材の腐食を判断することは難しいと考えられた.
- 一方、外観変状に対する腐食の分析結果では、PC鋼材に沿う外観変状は、PC鋼材の腐食総数に対する割合は低いものの、PC鋼材の腐食を抽出する手がかりになると考えられた.
- PC鋼材の腐食に着目した維持管理手法の検討として、外観変状を伴わないPC鋼材の腐食箇所の抽出方法を複数検討した.
- 上記の成果として、着目範囲を損傷単位から桁単位、径間単位と拡大させることや、定期点検の結果を活用した累積損傷数で、PC鋼材腐食有無について精度を向上させながら絞り込める可能性を示した.

7. おわりに

本検討で示した結果や傾向等について、根拠や指標等まで明確に示すことができていない部分があり課題と認識している. しかし、本検討での整理分析は、ポステンT桁の維持管理を効率的に行う上で一つのステップになると考えている. 今後も計画的に実施される大規模修繕工事の調査結果等をより詳細に分析し、課題解決や精度向上に努めていきたいと考えている.

参考文献

- 1) 山田洋太, 堀岡良則, 佐藤彰紀: PC桁等大規模修繕工事における詳細調査報告, 阪神高速道路第49回技術研究発表会論文集, 2017
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 維持管理編, 2013
- 3) プレストレス・コンクリート建設業協会: プレストレスコンクリート構造物補修の手引き (案), 2009. 9
- 4) 阪神高速道路(株): 道路構造物の点検要領, 2015. 7