

劣化要因の面的調査手法を用いたPCI桁の効率的維持管理手法の提案

八千代エンジニアリング(株) 正会員 修士(工学) ○伊藤 均
法政大学 博士(工学) 溝渕 利明

Abstract : Some PC structures have deterioration, and already they have serious structural performance decline. On the other hand, municipalities manage a large number of bridges, and are required to do efficient maintenance by observation maintenance. Therefore, we propose simple and distribution survey method and application of structural performance simple evaluation method for analysis of survey result. Thereby, we can grasp structural performance constantly. Target structure is PCI girders deteriorated by salt damage, and survey method is based on the high frequency distribution evaluation of deterioration, and their analysis. High frequency distribution evaluation is performed by combining the electromagnetic wave radar method and the fluorescent X-ray method.

Key words : Observation maintenance, PC structural performance prediction, Distribution evaluation

1. 序論

近年、国内の道路橋の一部で構造安全性に関する問題として耐荷性能の低下が確認されている¹⁾。道路橋は、経年劣化に伴い耐荷性能が低下した場合、通行規制や耐荷性能回復のための維持管理、または更新などの対策が必要となる。今後、老朽化橋梁数の増加に伴い、通行規制橋梁の増加、維持管理・更新費用増加が想定されるが、一方では維持管理に携わる人員も減少傾向にあることから、費用、時間の不足が維持管理を行う上での課題とされており、維持管理費用縮減や作業効率化が求められている²⁾。

これは日本国内の大多数の橋梁を管理している市町村で顕著である。表-1は橋梁点検による健全度判定区分であり、基本的には健全度Ⅲ、Ⅳと判定された橋梁に対して修繕が計画される。しかしながら、平成30年時点での報告によると、市町村においては、表-2に示すとおり、橋梁定期点検による健全度把握は実施されているものの、修繕着手済みの比率は低く、健全度Ⅲ、Ⅳと判定された橋梁では、過去3年において約87%が未修繕、健全度Ⅱと判定された橋梁では、98%が未修繕である。つまり、橋梁定期点検と修繕は対応して実施されることが望ましいものの、修繕のために費用、時間が不足しているものと考えられる。

一方で、橋梁定期点検において同一健全度と判定された橋梁の劣化状況は一樣では無い。健全度判定は橋梁毎の代表値であるため、たとえば、全体に劣

表-1 健全度判定区分

判定区分	定義
I 健全	道路橋の機能に支障が生じていない状態
II 予防保全段階	道路橋の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態
III 早期措置段階	道路橋の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態
IV 緊急措置段階	道路橋の機能に支障が生じている、または生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態

表-2 市町村における橋梁定期点検結果と修繕の進捗(橋梁数)³⁾

	点検結果					健全度 Ⅲ・Ⅳ			健全度 Ⅱ		
	I	II	III	IV	計	対象橋梁	修繕着手済 H29報告	比率	対象橋梁	修繕着手済 H29報告	比率
H26	11,481	15,840	5,029	101	32,451	5,130	1,064	0.21	15,840		
H27	35,271	47,701	9,420	130	92,522	9,550	1,223	0.13	47,701		
H28	57,138	64,507	11,911	140	133,696	12,051	1,089	0.09	64,507		
H29	60,480	64,210	9,596	141	134,427						
					393,096	26,731	3,376	0.13	128,048	2,413	0.02

化を生じ、構造安全性低下の大きい橋梁がある一方で、劣化程度は同等でも劣化発生が部分的な橋梁もある。この場合、劣化の程度のみから修繕実施を判定するのではなく、劣化の程度と分布から修繕実施を判定することにより、要修繕橋梁を絞り込むことができると考える。また、架橋環境に着目すると、同一健全度でも架橋環境が厳しい箇所（塩害環境など）に位置する橋梁は、一般環境に位置する橋梁とは今後の健全度の低下傾向は異なることが考えられる。この場合、健全性評価に架橋環境は反映されないため、橋梁長寿命化修繕計画では、健全性評価と架橋環境を個別評価した上で総合評価を行い、優先度として評価されることがある。しかしながら、この場合も、橋梁毎の相対的な優先度は評価しているものの、各橋梁の適切な修繕時期を示すものではない。もちろん、劣化発生が部分的な橋梁や、劣化の程度が低くても架橋環境が厳しい箇所に位置する橋梁に対しても、早期に修繕することが望ましいが、費用、時間が不足する場合は管理橋梁を分類し、たとえば、小規模橋梁（構造が単純、対策規模が小さい、観察が容易など）では、維持管理費用、時間を低減することも必要であると考えられる。

塩害に関しては、調査、解析などについて多くの報告がなされているが、それらを用いた観察維持管理のための手法構築に至っていないと考える。そこで、本論文では市町村が管理する橋梁のうち、劣化進行速度の速い、塩害を生じる小規模 PCI 桁橋を対象とし、効率的維持管理としての観察維持管理を適用するための手法提案を行う。

2. 小規模PCI桁橋の効率的維持管理手法

2.1 観察維持管理

道路橋のうち、PC 橋は経年劣化により PC 鋼材の断面積減少や材料性能に変化を生じ、それに伴い耐荷性能が低下した場合、維持管理として、通行規制や耐荷性能回復のための修繕、または更新などの対策が必要となる。橋梁に対して実施される修繕の目的は、橋梁に求められる性能の維持または回復である。修繕実施の時期を設定する維持管理手法には、劣化が顕在化する前に対策を行う予防維持管理、性能の低下の程度に応じて対策を行う事後維持管理のほか、観察維持管理がある。このうち、費用、時間の低減が可能と考えられる観察維持管理は、仮設構造物のように設計耐用期間の短いものや、対策をとることが難しいものに適用が考えられる維持管理手法であるが、修繕の目的を考えた場合、設計耐用期間中の性能が維持管理限界を下回らないことを定期的を確認することができれば、橋梁に対しても観察維持管理の適用も可能となると考える。

図-1 に日本国内の市町村が管理し、塩害劣化を生じる環境に位置する PCI 桁橋の橋梁点検結果を示す。この橋梁が位置する地域は年間平均気温 16℃以上の温暖な気候で、地域の大部分は海に面しており、

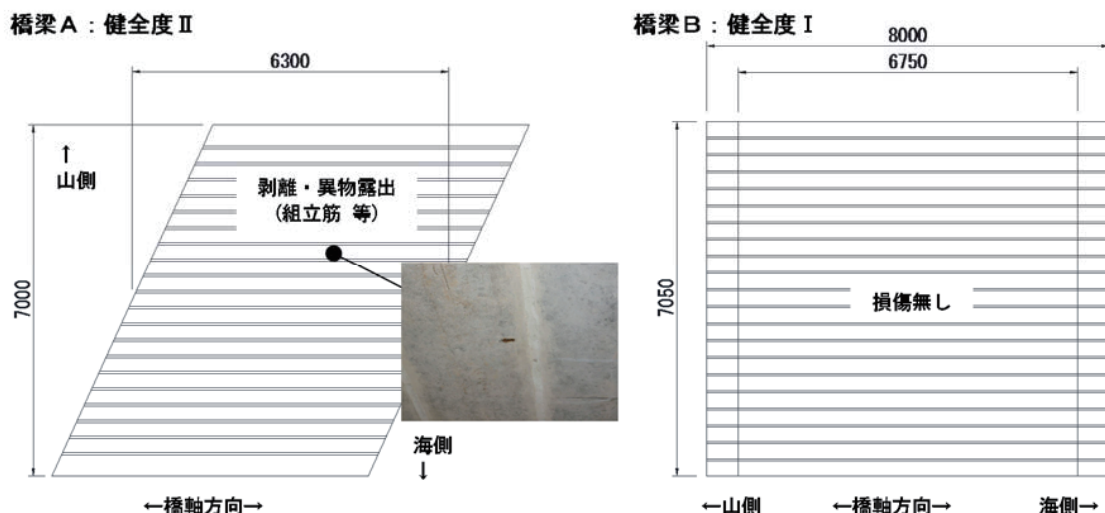


図-1 橋梁定期点検結果

表-3 橋梁諸元

橋梁No	A		B	
供用年数	44年		55年	
点検実施年	2015年		2016年	
構造形式	単純PCI桁橋		単純PCI桁橋	
橋長×幅員	6.3m×7m		8m×7.05m	
主桁	形状：右図 21主桁		形状：右図 21主桁	

人口の多くは海岸部の平地に居住していることから、海岸部の道路は重要である。対象構造物は、この地域で海岸から約 150m, 1000m の距離に建設された単純 PCI 桁橋である (表-3)。これら橋梁では、主部材に構造安全性低下要因となる損傷を生じておらず、直近の橋梁定期点検結果によると、この橋梁の健全度はⅡ, Ⅰと判定され、構造安全性は確保されていると考えられるが、海岸線から橋梁までの間に遮蔽物が無く、塩害の要因である飛来塩分の付着および塩化物イオンの浸透は生じていることが想定され、今後の塩害劣化進行およびそれに伴う構造安全性の低下が懸念される。

橋梁が供用期間を通じて要求される性能は、車両通行および第三者の安全を確保できることであることから、構造安全性低下が想定される場合、修繕実施により性能を回復することが必要であるが、一方で、費用、時間の不足といった課題も有する。ここで示した PCI 桁橋は、小規模であること、迂回路確保が可能で、架け替え時の影響も小さいことから、これら橋梁の維持管理においては、劣化進行に対し、観察維持管理として構造安全性の現状把握、将来の低下予測を実施し、対策実施を最小限とすることで維持管理に要する費用、時間を最小限に抑える手法も有効であると考えられる。

2.2 観察維持管理実施における課題

観察維持管理では、設計耐用期間中の性能が維持管理限界を下回らないことを定期的に確認する必要がある。前節で示した橋梁は塩害が想定される橋梁であり、これら塩害劣化を生じる橋梁に対する一般的な維持管理手順は、まず、橋梁定期点検で鋼材腐食により生じるひび割れやうきなど、顕在化した損傷有無を確認し、そのうち、鋼材腐食状況の調査や塩分含有量の調査など、詳細調査により劣化情報を取得、そして、得られた情報をもとに解析を実施することにより構造安全性を把握する。つまり、その進捗に従い、構造安全性把握の精度は向上するが、詳細調査、解析には費用と時間を要することから、実施数量、頻度は制限され、対象とする範囲はかぎられたものとなっていく。

観察維持管理においては、構造安全性の現状把握、将来低下予測が必要であるが、構造安全性は劣化損傷の進行と構造的要因を複合させて評価する必要があるものの、これらの分布は必ずしも一致しない。したがって、対象橋梁において構造安全性の代表値を示す適切な調査箇所設定を外観より実施する必要がある。しかしながら、塩分浸透のみでは外観に変化は無いことからその設定は困難である。とはいえ、費用、時間の制約より詳細調査、解析を全範囲で実施することも困難である。そこで、本論文では構造安全性を評価する箇所を限定するのではなく、橋梁定期点検と同様、面的に評価する手法の構築を行う。

3. 塩害劣化要因の面的調査手法を用いた維持管理手法

3.1 塩害劣化の面的調査

塩害劣化進行に関して、既設構造物から調査により劣化情報取得を行う場合、従来手法では得られるデータの精度に着目して調査が行われることが多いが、本論文で考える手法では橋梁全体を対象、かつ高頻度での調査実施を考えるため、データ取得あたりの費用、時間を多く要しない手法(電磁波レーダによる塩分量調査⁴⁾、蛍光 X 線による方法⁵⁾)により劣化情報を取得する。電磁波レーダによる塩分調査に関しては、野嶋らによると、構造物表面から鋼材位置までの平均塩化物イオン量と電磁波レーダによ

り取得した出力振幅値が関連を有することが示されている。図-2 に橋梁 B における調査結果の一部を示すが、たとえば、ID. 49 と 50 ではかぶり同一であるが、振幅値が異なっており、異なった塩化物イオン量となる。蛍光 X 線による方法に関しては、渡部らによると、対象構造物からドリルにより少量採取したコンクリート粉末に対し、ポータブル蛍光 X 線計測器で検量線を計測することで、コアを採取することなく、塩化物イオン量を比較的精度よく推定することができることが示されている。

これら手法による調査を橋梁 A, B において実施した。橋梁 A, B の各 2 箇所で行った蛍光 X 線による塩化物イオン量計測結果および、分布の推定を図-3 に示す。図-3 の結果をもとに、橋軸方向 300mm ピッチ、橋軸直角方向 300mm ピッチで計測した電磁波レーダによる振幅値の比率から調査範囲全体の平均塩化物イオン量を算定した結果を図-4 に示す。なお、結果は現地条件より計測可能であった範囲の結果を示している。橋梁 A では、全体的に塩化物イオンが存在しているものの、箇所による差は橋梁 B に比べて小さい。橋梁 B では、海側端の一部で高い値を示している一方で、海側から 7 主桁位置でもっとも高い塩化物イオン量が検出された。また、図-3 によると橋梁 A は内部の塩化物イオン量が多いが、表面付近は少ないことから飛来塩分の影響は小さいと考えられるが、橋梁 B は飛来塩分の影響が大きいとされる。本調査により、橋梁 B においては今後の塩害劣化進行が予測されること、劣化進行は海側端の一部、海側から 7 主桁位置、海側から 13 主桁位置において発生し易い傾向にあることが分かる。

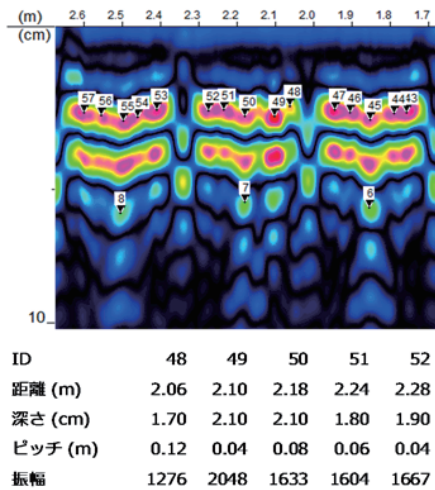


図-2 橋梁 B における電磁波レーダ計測結果

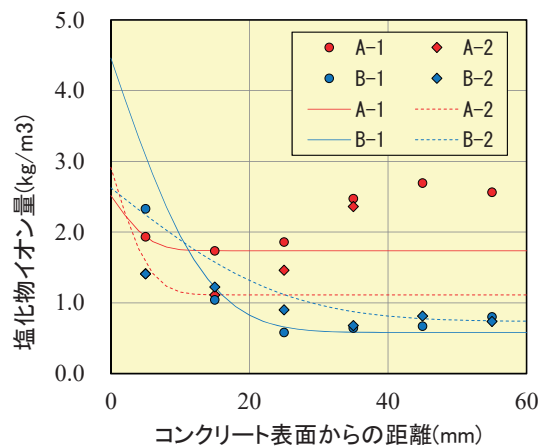


図-3 蛍光 X 線による塩化物イオン量計測結果

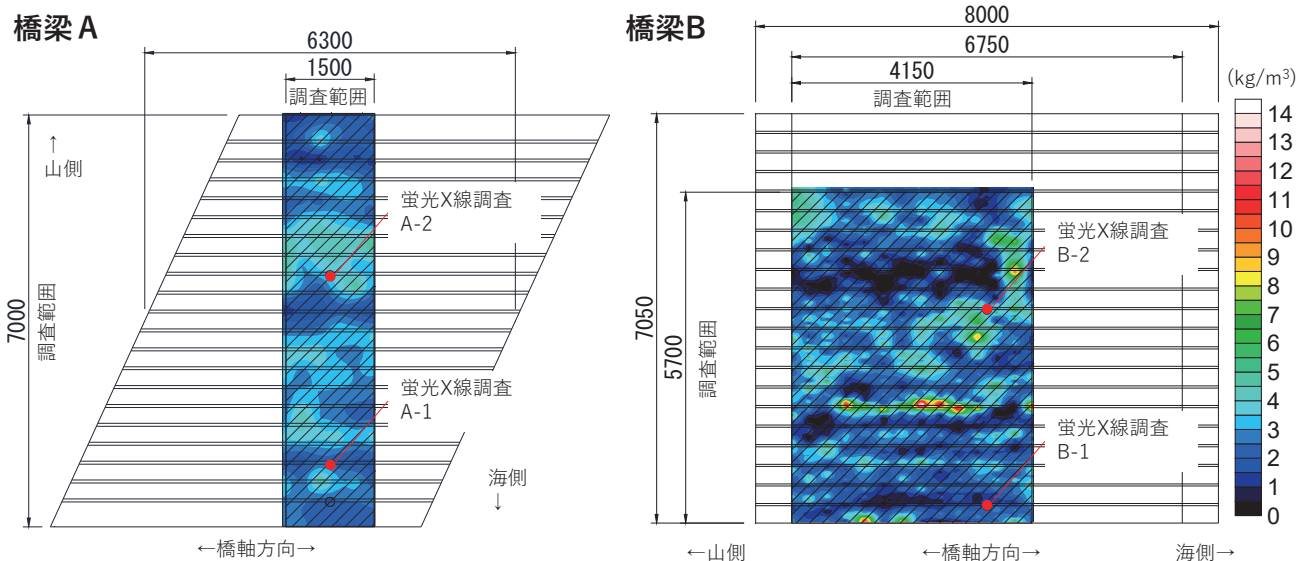


図-4 構造物表面から鋼材位置までの平均塩化物イオン量の分布

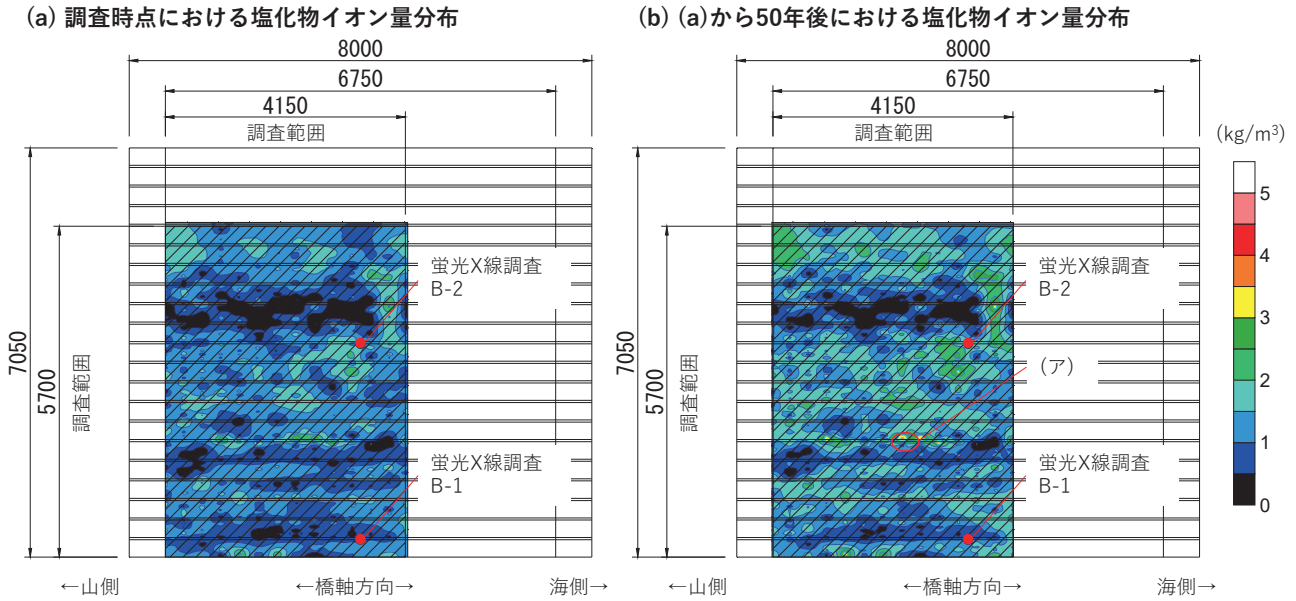


図-5 鋼材位置での塩化物イオン量の分布

3.2 構造安全性の面的把握による橋梁の維持管理

PCI 桁橋は塩害劣化により PC 鋼材に腐食に伴う断面積減少や材料性能に変化を生じると、それに伴い構造安全性が低下する。鋼材の腐食は鋼材位置での塩化物イオン量が腐食発錆限界塩化物イオン量に達した時点で始まり、そののち、環境に応じた速度で進行する。したがって、構造安全性を把握するためには、電磁波レーダおよび蛍光 X 線による手法により算定した平均塩化物イオン量より、鋼材腐食進行を把握する必要がある。しかしながら、そのためには、腐食発錆限界塩化物イオン量、腐食速度、鋼材かぶり、塩化物イオンの拡散などの条件を設定する必要があるが、面的に取得したすべての調査結果に対し、試験や調査を行い、それら条件設定を行うことは現実的ではない。

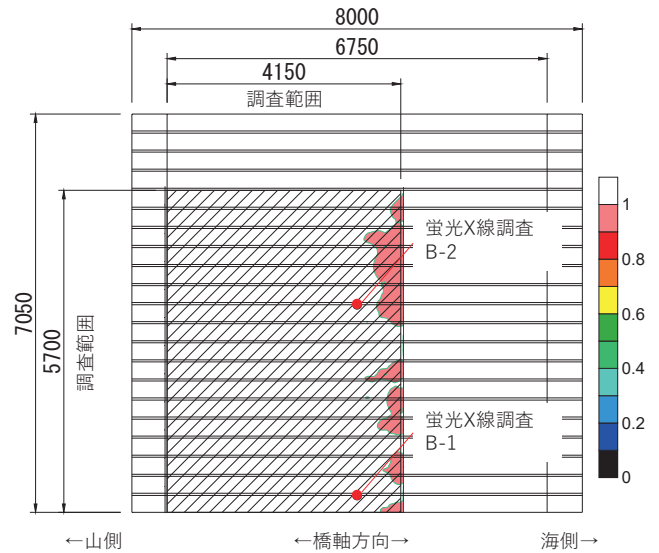


図-6 安全率の分布

したがって、Ito ら⁶⁾の提案する、橋梁定期点検結果を用いた構造性能簡易評価システムを適用する。これは、塩化物イオン量計測結果に外観目視結果を条件として加えて塩害進行を分析することで、鋼材腐食量推定を行なうものであり、破壊をとまなう調査が不要で、解析手法も汎用手法で多くの時間を要しないことから、広範囲に高頻度で構造性能把握を行なうことが可能なシステムである。Ito らは鋼材腐食量から算出した構造安全性をモンテカルロ法により確率評価しているが、本論文では提案手法適用の試行として確率分布の設定は実施せず、Ito らの手法における代表値を用いた確定値として算出した。

図-5 は、橋梁 B 全体における深さ方向の塩化物イオン量分布が、図-3 に示す蛍光 X 線による調査結果と同傾向であると仮定して、図-4 に示した平均塩化物イオン量より算定した鋼材位置での塩化物イオン量であり、(a)は調査時点、(b)は調査時点より 50 年後の分布を示す。この結果に Ito らの手法を適用することにより、鋼材腐食量の推定値を算出したのち、鋼材腐食量を減じた鋼材断面積に基づき、道路橋示方書・同解説における手法により抵抗曲げモーメントを算出する。抵抗曲げモーメントの分布は概ね塩化物イオン量の分布と同様となるが、構造安全性は抵抗曲げモーメントのみでなく、作用曲げモ

ーメントとの比率により評価されることから、抵抗曲げモーメント/作用曲げモーメントとして算出した安全率(ここでいう安全率は構造計算上の安全率で、材料性能等によるものは含まない)の分布を図-6に示す。図-5(b)では、(ア)部の塩化物イオン浸透がもっとも多く、構造安全性不足が懸念されたが、塩化物イオン浸透程度に比べ、作用曲げモーメントが小さい影響が大きく、結果的に安全率が将来的に不足するのは図-6のとおり支間中央付近となった。ただし、塩化物イオン量の浸透によっては支間中央以外の安全率が最も低くなる場合も想定される。一方、劣化進行は橋梁の中で(ア)部がもっとも進みやすい一方で、その同時期に支間中央付近では橋軸直角方向全体で構造安全性低下を生じていることが分かったことから、この手法により得られた結果により、以下の効果が期待できると考える。

- ・ 図-5に示すとおり、塩害劣化の進行も把握できるとともに、図-6に示すとおり構造安全性が将来的に不足する箇所も把握できる
- ・ 供用上問題となる構造安全性の低下を任意の箇所でモニタリング(たとえば(ア)部で損傷が確認された時点で構造安全性の低下発生と判断)するなど、観察維持管理の適用に効果がある
- ・ 詳細な構造安全性確認実施の必要性が生じた場合、調査、解析を実施する箇所選定が容易となる

4. 結論

本論文で提案する手法として、劣化要因の面的調査手法により劣化状況を調査し、調査結果にItoらの提案する構造性能簡易評価システムを適用することで、橋梁全体の構造安全性を把握することができた。この手法は構造物に与える影響が小さく、また、調査、解析含め簡易であることから、橋梁定期点検と併せての実施も可能であり、本手法により定期的に構造安全性を確認することで、小規模PCI桁橋の観察維持管理による効率的維持管理が可能となると考える。本論文で得られた結果を以下に示す。

- ・ 電磁波レーダと蛍光X線による手法を組合せた劣化要因の面的調査手法により、PCI桁橋の塩化物イオン浸透状況を面的に把握でき、外観目視では判断できない塩化物イオンの分布が把握できる
- ・ 劣化要因の面的調査手法にItoらの構造性能簡易評価システムを適用することで、橋梁全体の構造安全性分布を把握できる
- ・ 提案手法によると構造安全性低下が問題となる箇所に加え、劣化進行の傾向を把握することができることから、問題となる構造安全性低下が生じる時点において外観目視で確認可能な損傷を予測でき、観察維持管理の適用に有効である

参考文献

- 1) 原田豊, 杉江匡紀: 勝浦大橋の調査・補強設計について, プレストレストコンクリート工学会第23回シンポジウム論文集, pp. 301-304, 2014. 10.
- 2) 国土交通省道路局, 道路構造物のメンテナンスの現状, 2013. 05 :
http://www.soumu.go.jp/main_content/000497036.pdf (閲覧日: 2018. 10. 1)
- 3) 国土交通省道路局, 道路メンテナンス年報, 2018. 08 :
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/pdf/h29/30_03maint.pdf (閲覧日: 2018. 10. 1)
- 4) 野嶋潤一郎, 池田大樹, 内田真未, 溝渕利明: 電磁波による塩化物イオン量推定手法を用いた塩害の劣化進行予測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1741-1746, 2013.
- 5) 渡部瑠依子, 溝渕利明: 蛍光X線を用いた塩化物イオン量推定に関する研究, 土木学会第72回年次学術講演会, pp. 539-540, 2017. 9.
- 6) Hitoshi, Ito., Toshiaki, Mizobuchi. : Load-bearing performance simple evaluation system of RC bridge deteriorated caused by salt damage, SynerCrete'18 Proceedings, pp. 893-898, 2018.