

報告

凍結防止剤による鋼橋 RC 床版の塩害劣化メカニズムに関する考察

本荘 清司^{*1}, 藤原 規雄^{*2}, 葛目 和宏^{*3}, 牧 博則^{*4}

Study on Deterioration Mechanism of RC Slabs on Steel Girder by Chloride Attack of Deicing Salt

Kiyoshi HONJO^{*1}, Norio FUJIWARA^{*2}, Kazuhiro KUZUME^{*3} and Hironori MAKI^{*4}

要旨：筆者らは、過去数年間にわたって中国地方の凍結防止剤で塩害劣化した鋼橋 RC 床版を詳細に調査し、劣化状況や劣化のメカニズム、劣化進行に影響を及ぼす要因などについて検討を続けてきた。その結果、交通量が少ない環境で塩害劣化が顕在化した鋼橋 RC 床版については、耐荷性能よりも使用性能や耐久性の低下によって使用寿命が決まることがわかっている。一方、床版上面や断面内部の劣化状況については既往の調査技術では十分に状況を把握できない場合もあることを示してきたが、今回、追加確認した事例を紹介する。また、今後の鋼橋 RC 床版の補修計画の一試案について報告する。

キーワード：鋼橋 RC 床版、凍結防止剤、塩害劣化、維持管理、床版取替

1. はじめに

中国地方の山間部の高速道路では、冬期に凍結防止剤（塩化ナトリウム）が多く散布される路線があり、中国自動車道などでは各地の橋梁で塩害劣化が顕在化している。劣化が顕著になった鋼橋 RC 床版については、既設床版を撤去して PC プレキャスト床版に取替える床版取替工事や、劣化部を広範囲に打ち換える大規模な補修工事が実施されている。

筆者らは、これらの補修工事に併せて鋼橋 RC 床版についての詳細な調査を実施し、塩害劣化の状況や劣化のメカニズム、劣化進行に影響を及ぼす要因、詳細調査の方法や調査結果の評価方法などについて検討を進めてきた^{1)~4)}。

一方、既往の調査技術では、舗装のある床版上面の劣化状況を精度良く把握するのは難しいことも判明し、また、昨年度の床版取替工事で

は上下面に外観変状がない範囲でも断面内部に水平ひび割れが進展している事例が見つかったことなどから、調査方法の高度化や評価方法の見直しが必要であると考えられた。

また、これらの事例から、建設年度が古く、すでに多量の凍結防止剤が散布されている鋼橋 RC 床版については、従来の部分的な補修方法のみでは効果的な維持管理が難しい段階に入っているのではないかと考えられるようになってきている。

2. 中国自動車道の鋼橋 RC 床版の劣化状況

2.1 中国自動車道の環境

中国地方の中国自動車道は、岡山県から山口県にかけて中国山地の山間部に位置しており、これらの地域では区間によって差があるものの冬期に多量の凍結防止剤が散布されている。近

*1 西日本高速道路㈱ 中国支社 事業調整部兼保全サービス事業部 構造技術担当調査役

*2 ㈱国際建設技術研究所 技術部 副部長

*3 ㈱国際建設技術研究所 代表取締役社長

*4 西日本高速道路エンジニアリング中国㈱ 土木保全部長

年は、1シーズン当たり平均で約30t/km、最大約60t/kmの凍結防止剤が散布されており、累計の散布量1000t/km以上となっている（図-1参照）⁵⁾。また、1983年の全線開通からしばらくの間は多くの大型車交通（6~8千台/日）があつたが、1993年に山陽自動車道が全線開通すると並行する区間では交通量が激減した（1千台/日）。このような背景を持つ区間にある鋼橋RC床版

は、活荷重の影響で発生したひび割れを多数有している一方で、その後の交通量の減少によつて疲労による劣化は進行しにくい環境にあるといえる。

近年、中国地方の中国自動車道では、各地で鋼橋RC床版の塩害劣化が顕在化しているが、疲労で抜け落ちたと考えられる事例はまだない。

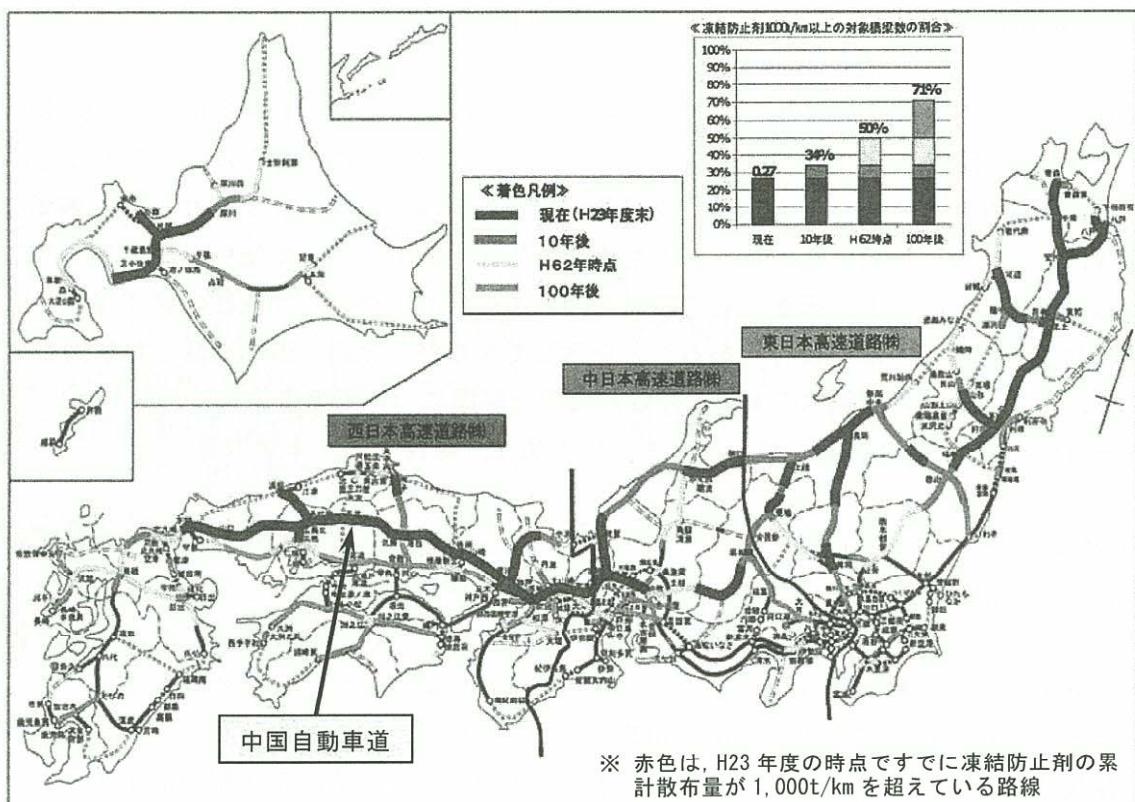


図-1 凍結防止剤の累計散布量が1,000t/kmを超える路線⁵⁾

2.2 凍結防止剤による塩害劣化のメカニズム

これまでの詳細調査およびそれを基にした検討¹⁾²⁾などから、鋼橋RC床版の凍結防止剤による塩害劣化のメカニズムおよび劣化の進行過程は次のように考えられている（図-2参照）。

- ① 潜伏期：床版コンクリートに、打設後の乾燥収縮や供用後の活荷重の影響によって貫通ひび割れが発生する。
- ② 進展期：冬期において橋面に散布された凍結防止剤（塩化ナトリウム）が雨水や融雪水に溶け込み、貫通ひび割れを通じて床版コンクリートの内部に浸透する（建設年度の古い橋梁の橋

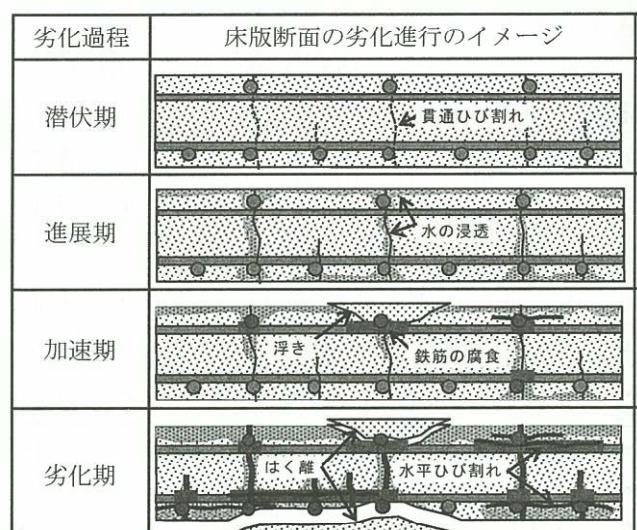


図-2 鋼橋RC床版の塩害劣化の進行過程

面には床版防水が未施工のものがある).

③ 加速期:凍結防止剤を含んだ水が鉄筋の周囲に到達すると、その影響によって鉄筋の不動態皮膜が破壊され、腐食する。

④ 劣化期:鉄筋の腐食膨張によって、床版上面および下面のかぶりコンクリートが破壊され、ひび割れや浮き・はく離が発生する。露出した鉄筋や周囲に浮きが生じた鉄筋は、塩化物や水分、酸素の影響を直接受けるようになって腐食の進行が早まり、劣化が加速される。

床版取替工事で撤去された既設床版の切断面

の調査では、このような劣化メカニズムを裏付ける変状も確認されている(図-3 参照)³⁾。また、作業時の気象条件や時間の制約などから適切に施工されなかつた床版上面の補修が、かえって床版の劣化を促進させているケースも多く見られる²⁾。舗装およびコンクリートの補修部と既設部が完全に密着していないため、その境界は水の浸透しやすい状態になっており、ここから雨水や融雪水に溶けた凍結防止剤が断面内に浸入して塩害が促進されるためと考えられている(図-4 参照)³⁾。

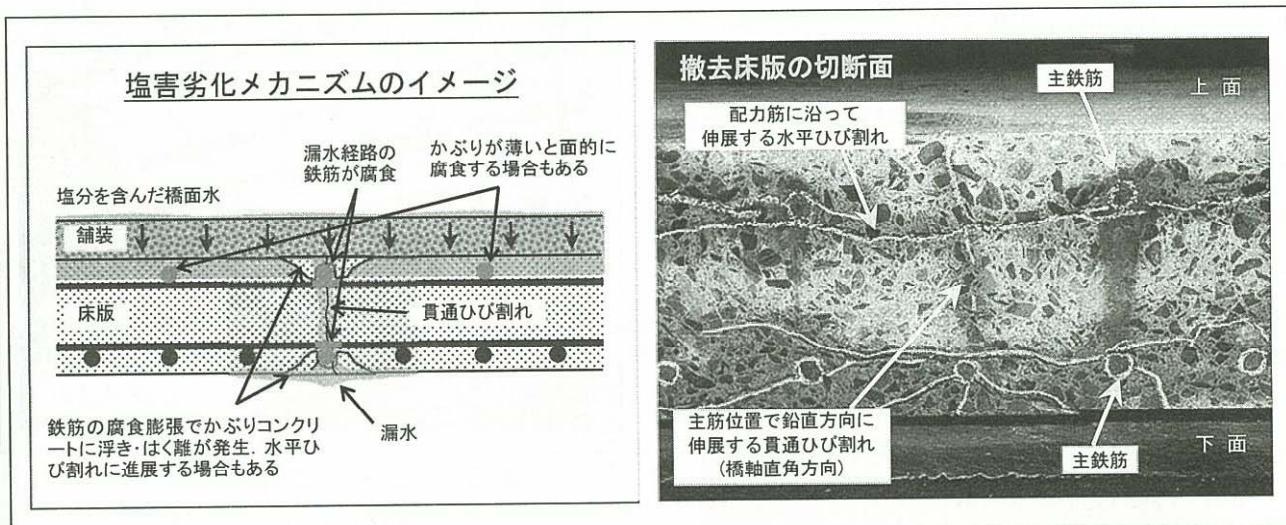


図-3 凍結防止剤による塩害劣化メカニズムのイメージと撤去床版の切断面

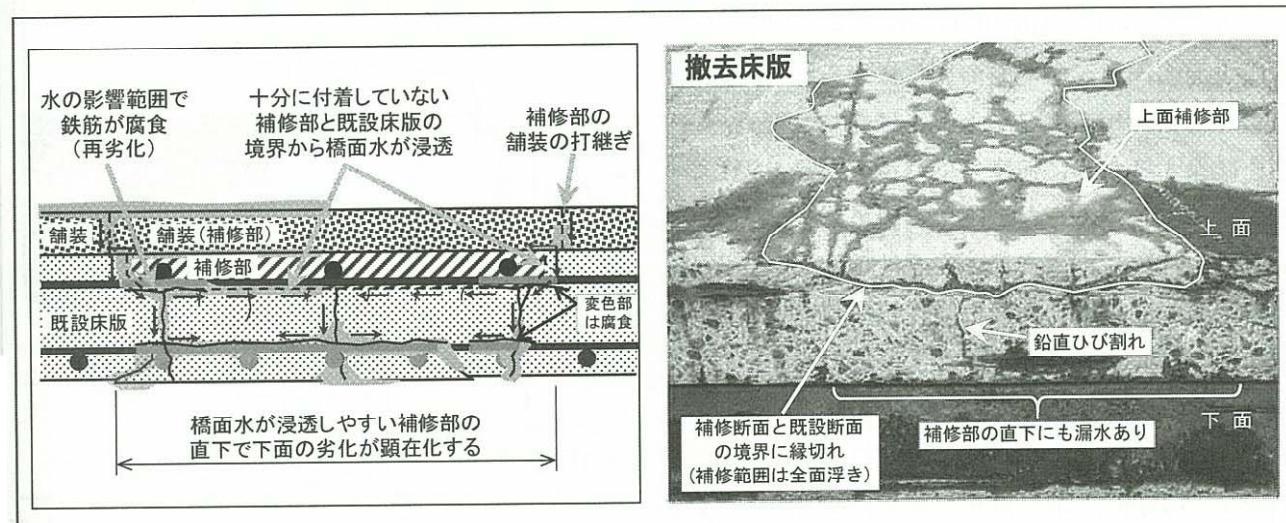


図-4 上面補修部の劣化メカニズムのイメージと撤去床版の切断面

2.3 塩害で劣化した床版の寿命

前述のように、中国地方の中国自動車道における鋼橋 RC 床版については疲労による劣化は顕在化しにくい環境にある。塩害劣化が顕在化すると、鉄筋が腐食して、上下面ともに浮き・はく離が発生し、コンクリートの有効断面が減少する。さらに劣化が進行すると、鉄筋にも断面減少や喪失が生じるが、SH 橋のように、走行車線の床版において上面の土砂化、下面のはく離、主鉄筋および配力筋の部分的な喪失があったにもかかわらず、抜け落ちには至らなかった事例も報告されている（図-5 参照）。

また、床版取替工事の実施された 2 橋において撤去前の既設床版で押抜きせん断試験を実施したところ、浮きやはく離などの外観変状から劣化度が大きいと判定した床版においても押抜きせん断耐力の低下はなかった（図-6 参照）⁴⁾。ただし、劣化度の大きな床版の押抜きせん断耐力は、変状がほとんどない床版の試験値や、コンクリートや鉄筋に断面欠損がない場合の理論値よりもかなり大きく、断面内の水平ひび割れなどの影響で破壊モードが変化している可能性も考えられる。これについては検討の余地があるが、いずれにしても交通量が少ない環境下にある RC 床版では、塩害劣化が相当進んでも耐荷力が急激に低下することはないと考えられている⁴⁾。

一方、塩害劣化が顕在化した鋼橋 RC 床版では、床版上面の浮き・はく離の発生とともに舗装のポットホールが頻発するようになり、交通の安全を確保するために何度も応急復旧が繰り返される。近年、このような床版については、長期的な補修費の抑制や車両交通の安全性確保の観点から、床版取替や広範囲の部分打換え工などの大規模な補修が実施される事例が増えてきている。

これまでの詳細調査や押抜きせん断試験の結果からすると、中国自動車道の一部のように交通量が少なく凍結防止剤の散布量が多い環境にある鋼橋 RC 床版については、耐荷性能の低下ではなく、多発するポットホールなどによる使用性能の低下によって使用寿命が決まるといえる。

【SH 橋】走行車線 上面の土砂化



【SH 橋】打換え補修時 上面側鉄筋の喪失

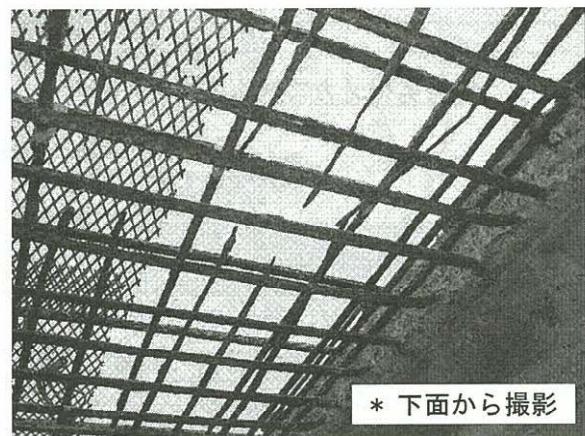


図-5 【SH 橋】鉄筋が喪失しても抜け落ちなかつた事例

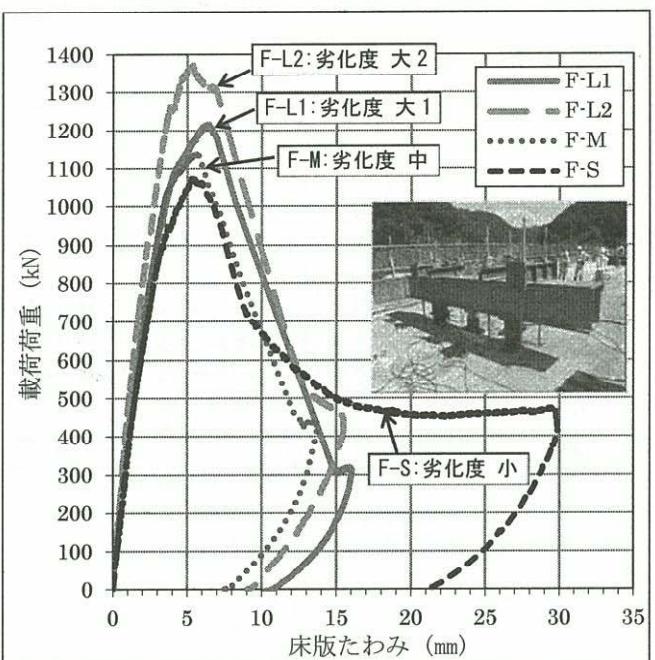


図-6 【F 橋】押抜きせん断試験の結果
(外観の劣化度と載荷荷重ーたわみ)

2.4 検知できない水平ひび割れ

劣化が上面側から進行することや、床版上面の浮き・はく離が交通を阻害する舗装のポットホールの原因となることから、鋼橋 RC 床版の劣化状況を評価するためには上面の状況を把握することが重要になる。しかし、床版上面には舗装が敷設されており直接接触することができないため、適用できる調査手法は少ない。これまでの検討において、舗装上からの打音法や赤外線法などの調査手法を試行したが、実橋の浮き・はく離の有無や範囲を精度よく検出することは難しかった¹⁾。

現段階においては、舗装を開削して床版上面を直接調査する手法がもっとも有効である。表面の状態を目視や打音法で直接点検でき、塩分など分析用の試料も採取できるが、供用中の橋梁では実施できる場所や範囲が限られるのが難点である。

一方、床版取替工事で撤去した既設床版を詳細に調査したところ、床版上面で打音法を実施しても検出できない水平ひび割れがあることが確認されている（図-7 参照）³⁾。

床版内部に発生する水平ひび割れは、主鉄筋または配力筋が広範囲に腐食したことによって水平方向に伸展するひび割れで、浮き・はく離に進展する前段階の変状である。水平ひび割れも、浮き・はく離と同様に、すでに鉄筋位置まで発錆限界を超える塩化物イオン（RC 床版の場合、発錆限界値を 1.2kg/m^3 と想定）が浸透していることを示している（図-8 参照）³⁾。

この段階になると、床版防水などの予防保全的処置のみでは十分な延命効果が得られない段階になっている場合が多い。



図-7 打音法で検出できない水平ひび割れ（F 橋の撤去床版）

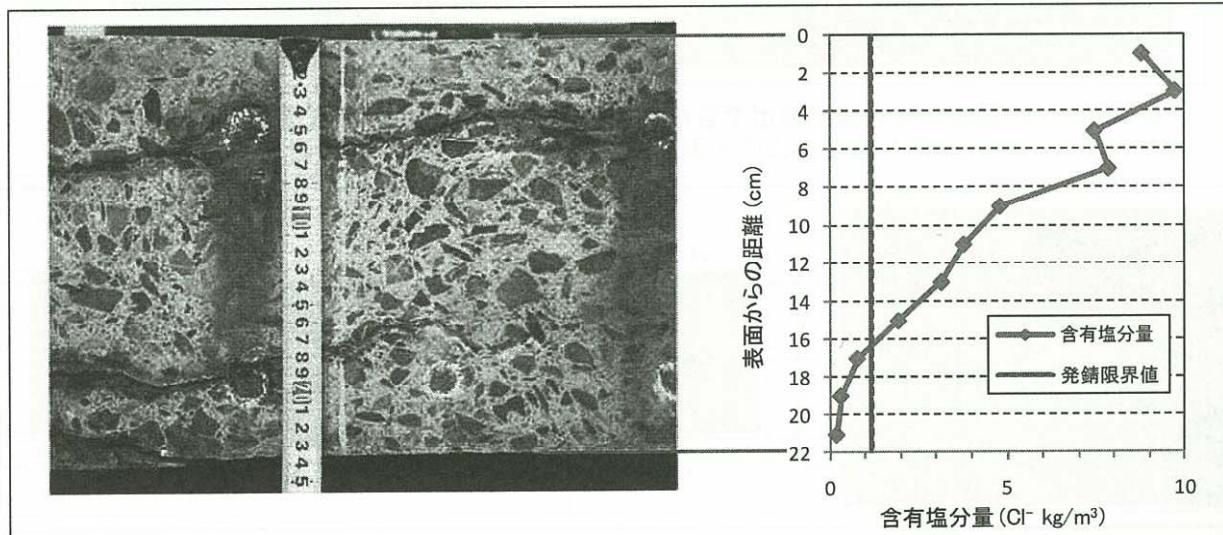


図-8 含有塩分量の分布（貫通ひび割れ近傍の水平ひび割れ）

今回、平成25年度に実施されたG橋の床版取替工事において調査を行ったところ、上下面ともに目立った外観変状が見られない箇所において、上側主鉄筋の位置に水平ひび割れが発生していた事例が確認された（図-9参照）。

このような背景から、より高度な点検手法の確立を目指して各種の調査手法を実橋で試行している。現在のところ、多配列レーダ法は水平ひび割れの検出にも有効との検討結果が得られている⁴⁾。多配列レーダ法は、地中レーダ用のアンテナを並列に多数配置したカート式の探査機で舗装上を走

査し、それを専用ソフトで画像処理して床版の浮き・はく離を検出する調査手法である。多配列レーダ法で床版取替工事前のF橋およびC橋のRC床版を調査し、撤去後にその結果を詳細に検証したところ、上面の浮き・はく離を60～79%まで捉えており、F橋では水平ひび割れもある程度検出できていた（図-10～図-12および表-1参照）⁴⁾。

多配列レーダ法は、まだ開発途上の技術であり、適用できる条件も限られているが、舗装の上から床版上面の状況を把握できる調査手法となりえるものと考えている⁴⁾。

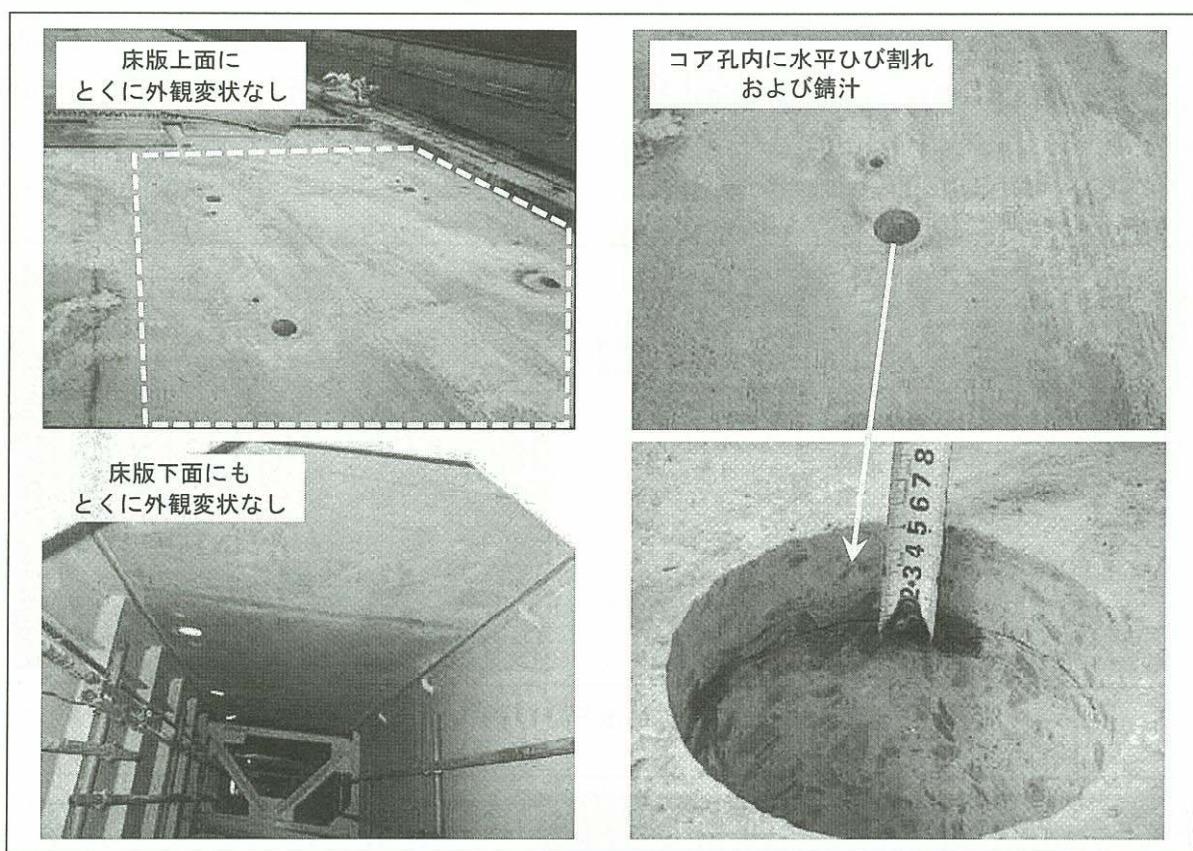


図-9 打音法で検出できない水平ひび割れ（G橋の撤去床版）

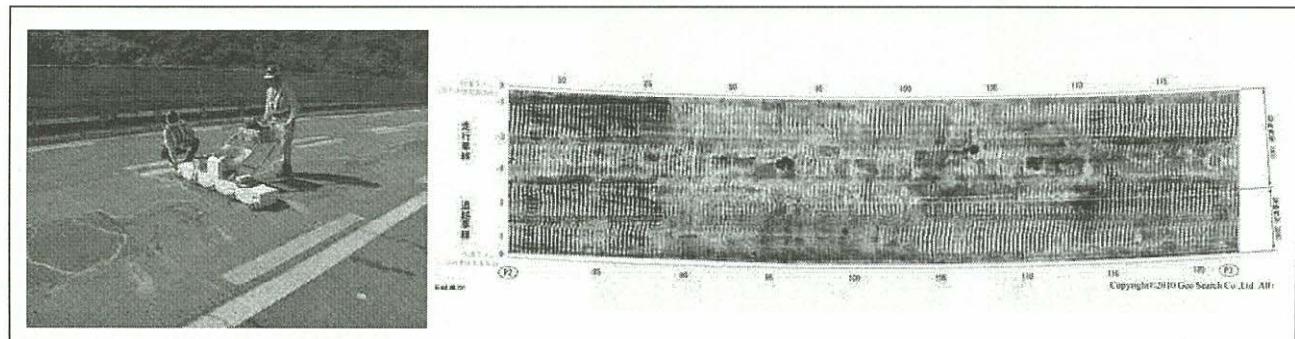


図-10 カート式電磁波レーダ法による床版上面の調査

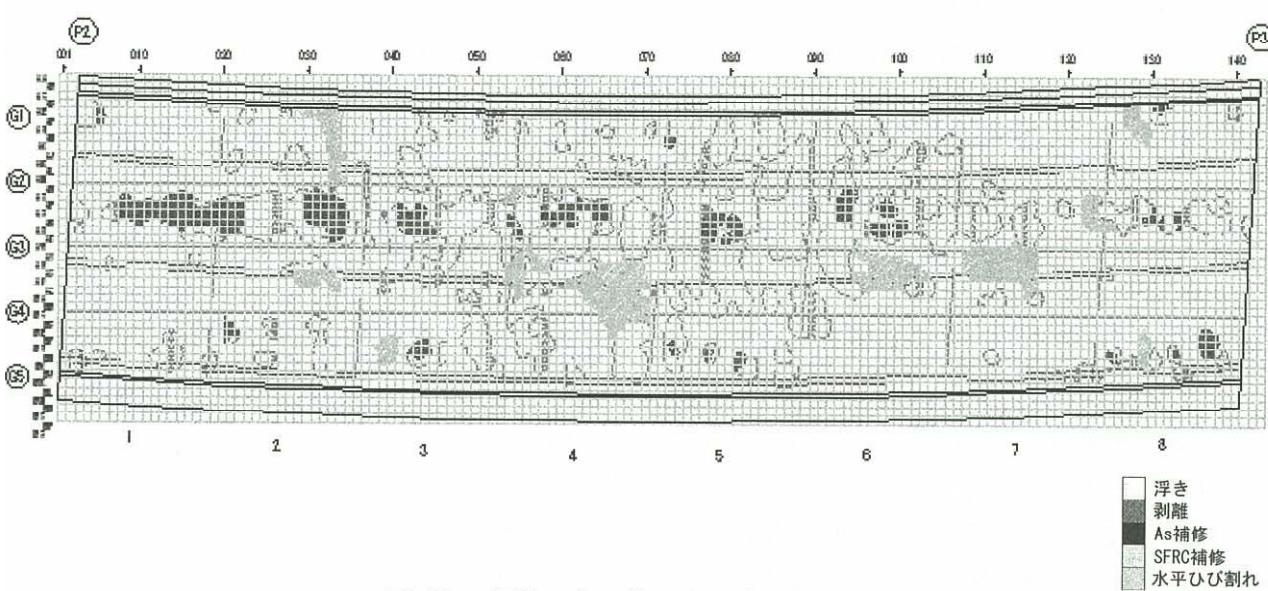
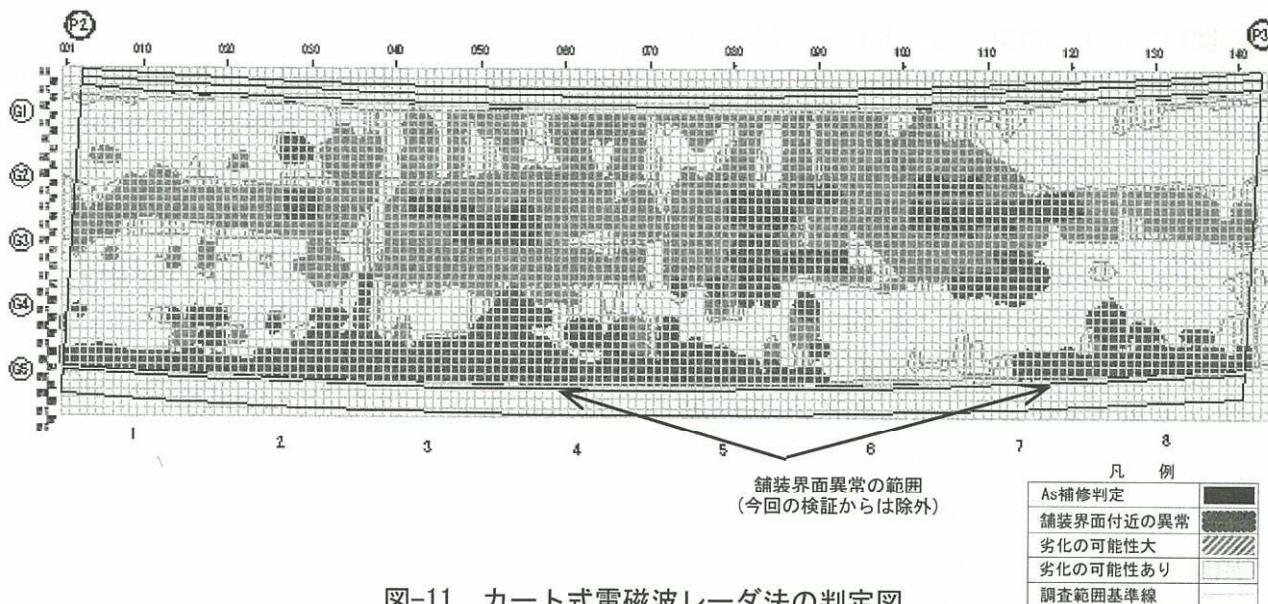


表-1 多配列レーダの判定と床版上面の変状の合致率

	F 橋	C 橋		
	P2-P3	A1-P1	P1-P2	P2-P3
判定と実際の変状が合致したメッシュ数	2870	2180	2761	2819
判定と実際の変状が合致しないメッシュ数	943	1444	868	737
合致率	75.3 %	60.2 %	76.1 %	79.3 %

3. 中国地方の中国自動車道における鋼橋 RC 床版の今後の維持管理計画の一試案

劣化メカニズムの解明や多配列レーダ法など新たな調査手法の開発などにより、鋼橋 RC 床版の維持管理は高度化が進められてきている。その一方で、これまでの調査や検討で得られた知見から、建設年度が古く、長年にわたって大量の凍結防止剤が散布された鋼橋 RC 床版については、目立った外観変状がなくてもすでに効果的な延命対策が難しい段階まで劣化が進行している可能性が高いと考えられる。

中国自動車道は、すでに全線において凍結防止剤の累計散布量が 1000t/km を超えており、劣化が顕在化した鋼橋 RC 床版については抜本的対策である床版取替を基本としたいと考えている。一方で、対象となる鋼橋 RC 床版の数量は多大であるので、更新順序の待機中も安全に供用できるように、中・短期的な延命化対策の検討や、床版取替の優先順位や適切な実施時期を策定するための点検・モニタリング・劣化予測技術の開発が必要であると考える。

本報告は、中国地方の中国自動車道に限った知見を示したものであるが、「高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会」(東・中・西日本高速道路株式会社)の報告書⁵⁾においても、凍結防止剤の累計散布量が 1000t/km を超える RC 床版については大規模更新・大規模修繕の対象とされている。また、健全度(高速道路 3 会社: 保全点検要領(H24))による判定区分、ローマ数字の I ~ V で示される

5 段階の区分で、数字の大きな方が劣化度は大きい)が I ~ II と判定された RC 床版は「高性能防水」や「増厚」による対策(ただし、永続的な使用を考えた場合は「床版取替」を選択)となっているが、健全度 III ~ V と判定されたものについては「床版取替」となる判定フローが示されており、本報告とは齟齬をきたしていない。

参考文献

- 1) 本荘清司ほか: 凍結防止剤による鋼橋 RC 床版の塩害劣化に関する実橋調査、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集、第 8 卷、pp.125-130、2008.10
- 2) 本荘清司ほか: 凍結防止剤によって塩害劣化した鋼橋 RC 床版の詳細調査、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集、第 10 卷、pp.51-56、2010.10
- 3) 本荘清司ほか: 凍結防止剤による塩害で劣化した鋼橋 RC 床版の詳細調査、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集、第 11 卷、pp.529-536、2011.10
- 4) 本荘清司ほか: 凍結防止剤により塩害劣化した鋼橋 RC 床版の詳細調査、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集、第 12 卷、pp.529-536、2012.11
- 5) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会: 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会最終報告書、2014.1.22