

報告

## 凍結防止剤により塩害劣化した鋼橋 RC 床版の詳細調査

本荘 清司<sup>\*1</sup>，藤原 規雄<sup>\*2</sup>，葛目 和宏<sup>\*3</sup>，牧 博則<sup>\*4</sup>

### Investigation of Deteriorated RC Slabs by Chloride Attack of Deicing Salt

Kiyoshi HONJO<sup>\*1</sup>, Norio FUJIWARA<sup>\*2</sup>, Kazuhiro KUZUME<sup>\*3</sup> and Hironori MAKI<sup>\*4</sup>

**要旨：**中国地方の鋼橋 RC 床版の劣化は凍結防止剤による塩害が主である。劣化が顕著になった床版で押抜きせん断試験を行ったところ，浮き・はく離などの変状があっても押抜きせん断耐力に大きな低下がないことや，外観変状を基にした劣化度と押抜きせん断耐力には明確な相関がないことが確認された。これより交通量の少ない環境下の塩害劣化においては，使用性能が床版の寿命の支配的要素になると考えられるが，大きな影響を及ぼす床版上面の劣化状況を調査する手法はまだ確立されていない。床版上面の調査手法の確立を目指して，過年度より試行を続けているカート式電磁波レーダ法の検出精度を検討した。  
**キーワード：**RC 床版，凍結防止剤，塩害劣化，押抜きせん断，カート式電磁波レーダ法

#### 1. はじめに

中国地方の山間部の高速道路では，冬期に散布される凍結防止剤の影響で塩害劣化が顕在化している橋梁がある。一部の鋼橋では，劣化した RC 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，劣化が顕著な箇所を部分的に打ち換える打換え工事も実施されている。これらの補修工事が実施される際には，既設床版の劣化状況を詳細に調査し，塩害劣化のメカニズムや詳細調査および補修方法の検討に資する基礎資料を収集している<sup>1)2)</sup>。

平成 21 年度および平成 22 年度に床版取替工事が実施された E 橋と F 橋では，塩害劣化した RC 床版の耐荷性能を把握するために，撤去前の既設床版において押抜きせん断試験を実施した。また，平成 22 年度と平成 23 年度には，撤去された床版を詳細に調査し，劣化のメカニズムや特徴などを確認するとともに，カート式電磁波レーダ法による調査を試行して床版上面の

調査手法を確立するための検討を行った。

今回の報告は，これらについて取りまとめたものである

#### 2. 塩害劣化した RC 床版の押抜きせん断試験

##### 2.1 試験対象パネルの選定

凍結防止剤による塩害を受けた RC 床版では，劣化が顕著になると鉄筋が腐食してコンクリート表面に浮きやはく離などの特徴的な外観変状が発生する。塩害劣化が主である中国道などの橋梁点検においては，これらの変状を指標として RC 床版の劣化度を評価している。一方，塩害劣化が RC 床版の耐荷性能に及ぼす影響についてはまだ十分に把握されておらず，外観変状から評価した劣化度と耐荷性能の関係を明らかにする必要があった。

このような背景から，E 橋においては下面の外観変状を基に，F 橋については下面および舗装撤去後に確認した上面の外観変状も加味して

\*1 西日本高速道路(株) 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 (株)国際建設技術研究所 技術部 次長

\*3 (株)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(株) 広島保全技術事務所長

劣化度を判定し、各劣化度の代表的なパネルで押抜きせん断試験を実施した。

E 橋および F 橋の橋梁諸元と両橋梁の試験対象パネルの見かけの劣化度を、表-1 および表-2～表-3 に示す。

表-1 橋梁諸元

橋梁名	橋 梁 諸 元
E 橋	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造形式：鋼 3 径間連続非合成鉄桁橋</li> <li>・橋 長：143.15m</li> <li>・支 間：43m+56m+43m</li> <li>・有効復員：10.9m</li> <li>・R C床版：2.8m, t=21cm, <math>\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2</math></li> <li>・建設年度：1977 年</li> <li>・適用道示：昭和 48 年版</li> <li>・設計荷重：TL-20, TT-43</li> </ul>
F 橋	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造形式：鋼 4 径間連続非合成鉄桁橋</li> <li>・橋 長：105m</li> <li>・支 間：38.05m+2@42.00m+41.9m</li> <li>・有効復員：9.85m</li> <li>・R C床版：支間 2.3m, t=22cm, <math>\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2</math></li> <li>・建設年度：1982 年</li> <li>・適用道示：昭和 55 年版</li> <li>・設計荷重：TL-20, TT-43</li> </ul>

表-2 試験対象パネル (E 橋)

名称	パネ	劣化度	外観状況	
E-L	P2-A2 I-5	大	下面	・ほぼ全面に及ぶ広範囲のはく離・鉄筋露出
E-M1	P2-A2 II-5	中	下面	・広範囲の漏水跡・遊離石灰ひび割れ
E-M2	P2-A2 II-4	中	下面	・広範囲の漏水跡・遊離石灰ひび割れ ・A1 側半分にライング
E-M3	P2-A2 III-4	中	下面	・広範囲の漏水跡 ・載荷点から 1.6m に 0.5×0.5m のはく離
E-S	P2-A2 III-5	小	下面	・目立つ外観変状なし

表-3 試験対象パネル (F 橋)

名称	パネ	劣化度	外観状況	
F-L1	P1-P2 II-5	大	上面	・広範囲の浮き ・載荷点のはく離補修部
			下面	・広範囲の水染み ・多数の漏水ひび割れ
F-L2	P1-P2 II-6	大	上面	・広範囲の浮き ・載荷点は浮き境界部
			下面	・多数の漏水ひび割れ ・載荷点近傍に浮き
F-M	P1-P2 I-3	中	上面	・外観変状なし
			下面	・載荷点の両側にはく離・鉄筋露出あり
F-S	P1-P2 III-7	小	上面	・外観変状なし
			下面	・外観変状なし

## 2.2 試験方法

今回の押抜きせん断試験では、試験箇所の上に主桁を反力にした載荷梁を設置し、油圧ジャッキで載荷点に鉛直荷重をかけ、床版が押し抜かれて載荷荷重が低下するまで載荷した。なお、載荷点には、輪荷重の載荷面積を想定して 50cm×20cm の載荷板 (鋼板) を敷設した。載荷装置の概要を図-1 に示す。

試験時には、載荷荷重および反力荷重をロードセルで計測するとともに、床版下面に設置した高感度変位計で床版のたわみをモニタリングしながら載荷した。

試験終了後には、各パネルの下面の破壊状況を観察するとともに、工事で撤去されたのちに載荷点を中心に横断方向および縦断方向に切断し、断面の破壊状況についても観察して状況図を作成した。

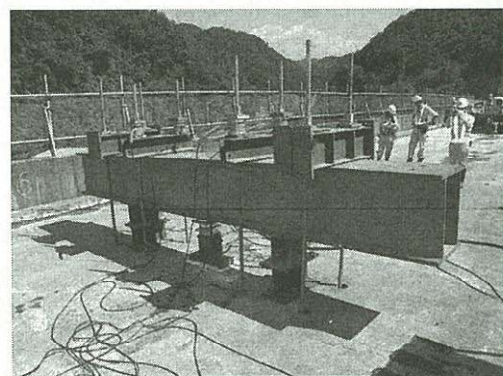
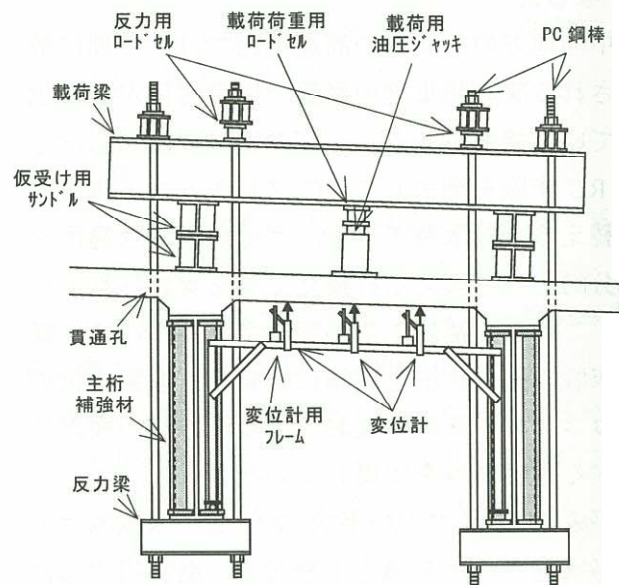


図-1 載荷装置の概要

### 2.3 試験結果

押抜きせん断試験の結果および試験時の載荷荷重と床版たわみの関係を、表-4 および図-2～図-3 に示す。

両橋梁ともに、見かけの劣化度と押抜きせん断耐力との間に明確な相関は見られなかった。E橋では劣化度「中」を3パネル試験したが、押抜きせん断耐力および床版たわみには大きなばらつきが見られた。F橋の劣化度は、床版上面の外観状況も加味されているが、それでも押抜きせん断耐力とは相関がなく、劣化度の大きなパネルが高い耐力を保有していた結果となった。

床版たわみについても明確な傾向はなく、F橋では劣化度「小」のパネルが最大荷重後も大きな伸びを見せたが、E橋の劣化度「小」のパネルは他と同等以下のたわみであった。

表-4 押抜きせん断試験の結果

橋梁	試験パネル	劣化度	押抜きせん断耐力 (kN)	床版たわみ (mm)	
				最大荷重時	最大値
E橋	E-L	大	695	13.90	21.98
	E-M1	中	519	5.94	33.58
	E-M2	中	873	7.34	25.16
	E-M3	中	726	8.52	25.22
	E-S	小	719	9.38	25.46
F橋	F-L1	大	1216	6.32	16.06
	F-L2	大	1327	5.36	15.52
	F-M	中	1141	5.62	13.76
	F-S	小	1077	5.38	29.92

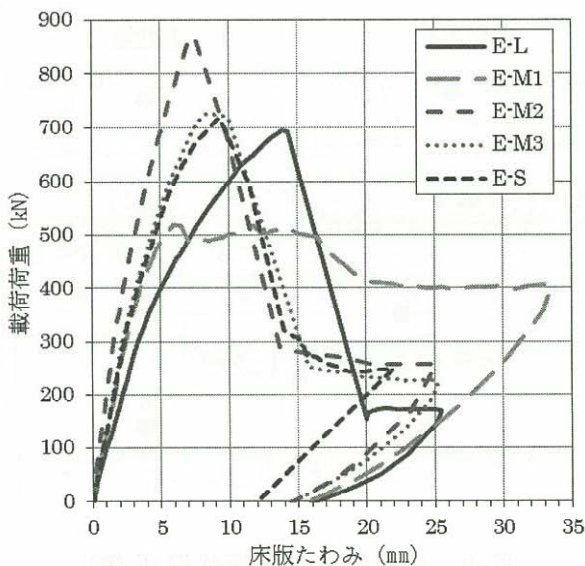


図-2 載荷荷重-たわみ曲線 (E橋)

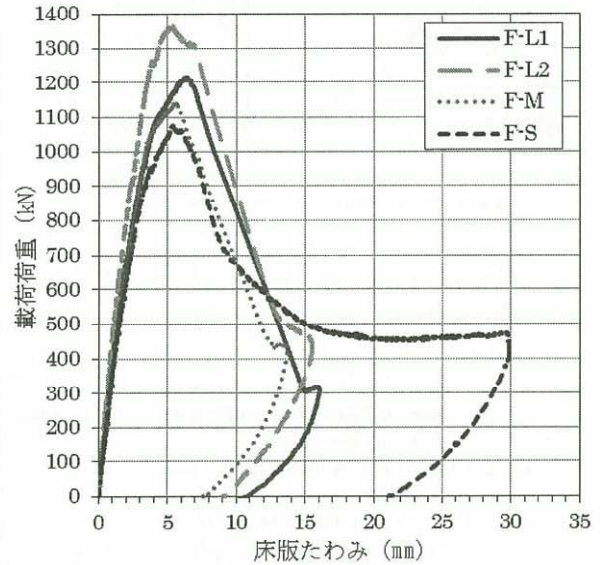


図-3 載荷荷重-たわみ曲線 (F橋)

### 2.4 結果の考察

E橋およびF橋の押抜きせん断試験の結果と理論値の比較を表-5 に示す。なお、理論値の算出は図-4 に示す要領で算出した<sup>3)</sup>。

なお、E橋の理論値の算出においては、はく離による断面欠損は考慮したが、コンクリートの圧縮強度、床版厚、鉄筋のかぶりについては設計値を用いた。

F橋の理論値を算出する際は、より豊富な調査データがあったため、できるだけ実際に近くなるようにコンクリートの圧縮強度、床版厚、鉄筋のかぶりには実測値を用いた。

表-5 押抜きせん断試験の結果

橋梁	試験パネル	劣化度	押抜きせん断耐力		
			試験値	理論値	試験/理論
E橋	E-L	大	695 kN	701 kN	0.99
	E-M1	中	519 kN	704 kN	0.74
	E-M2	中	873 kN	704 kN	1.24
	E-M3	中	726 kN	704 kN	1.03
	E-S	小	719 kN	955 kN	0.75
F橋	F-L1	大	1216 kN	1033 kN	1.18
	F-L2	大	1327 kN	1085 kN	1.22
	F-M	中	1141 kN	1082 kN	1.05
	F-S	小	1077 kN	1151 kN	0.94

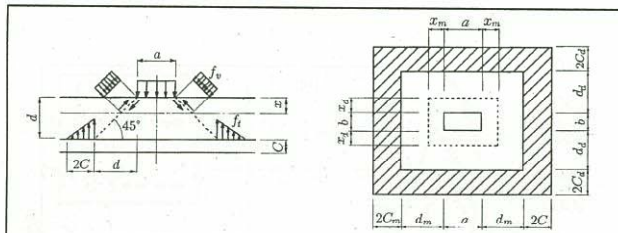


図 3.10 押抜きせん断破壊モデル<sup>[7]</sup>に対する応力分布とその範囲

$$P_0 = f_v [2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m] + f_t [2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4C_d)C_m] \quad (\text{N}) \quad (3.57)$$

$$f_v = 0.656 f_c^{0.606} \quad (3.58)$$

$$f_t = 0.269 f_c^{2/3} \quad (3.59)$$

ここに、 $a, b$  : 載荷板の主鉄筋、配力鉄筋方向の辺長 (mm)  
 $x_m, x_d$  : 主鉄筋、配力鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視したときの中立軸深さ (mm)  
 $d_m, d_d$  : 引張側主鉄筋、配力鉄筋の有効高さ (mm)  
 $C_m, C_d$  : 引張側主鉄筋、配力鉄筋のかぶり深さ (mm)  
 $f_c'$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $f_v$  : コンクリートのせん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $f_t$  : コンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

図-4 押抜きせん断耐力の算出要領<sup>3)</sup>

E 橋については、見かけの劣化度「大」の E-L と「中」の E-M3 の試験値は理論値と同等であったが、他のパネルの試験値は理論値よりも小さなもの (0.75 倍程度) と大きなもの (1.24 倍) に分かれた。E-L については、下面のかぶりがほぼパネル全面ではなく落しているにもかかわらず、押抜きせん断耐力は断面欠損のない E-S (劣化度「小」) と大差なかった。

F 橋については、劣化度「小」の F-S の試験値は理論値よりも小さかったが、他のパネルの試験値はいずれも理論値より大きく、とくに劣

化度「大」の 2 パネルについては理論値を 1.2 倍程度上回る値であった。

両橋梁ともに見かけの劣化度が小さなパネルの押抜きせん断耐力が小さい傾向が見られた。

各パネルの切断面を観察すると (図-5~図-6 参照)、劣化度の小さなパネルの破壊形態は載荷点を頂点にひび割れが台形状に広がるコーン状の破壊形態にあったが、劣化度が大きなパネルについてはひび割れが水平方向に長く進展してコーン状の破壊形態を示さないものがあった。これらは通常押抜きせん断破壊とはやや異なったメカニズムで破壊に至っている可能性が考えられ、それが劣化度の大きなパネルの試験値と理論値に大きな差が生じた要因になっているのではないかと考えられる。

破壊メカニズムの変化などの問題はあがあるが、交通量の少ない環境下での塩害劣化においては、鉄筋破断など著しい劣化状況に至らないかぎり RC 床版の押抜きせん断耐力は大きく低下しないと考えられる。このような環境における RC 床版の寿命は、疲労や断面欠損による耐荷性能の低下ではなく、床版上面の劣化にともなう使用性能の低下 (舗装の陥没・剥がれなどいわゆるポットホールの頻発による走行性の悪化や頻繁な補修による交通規制の増大等) が支配的な要素になるのではないかと考えられる。

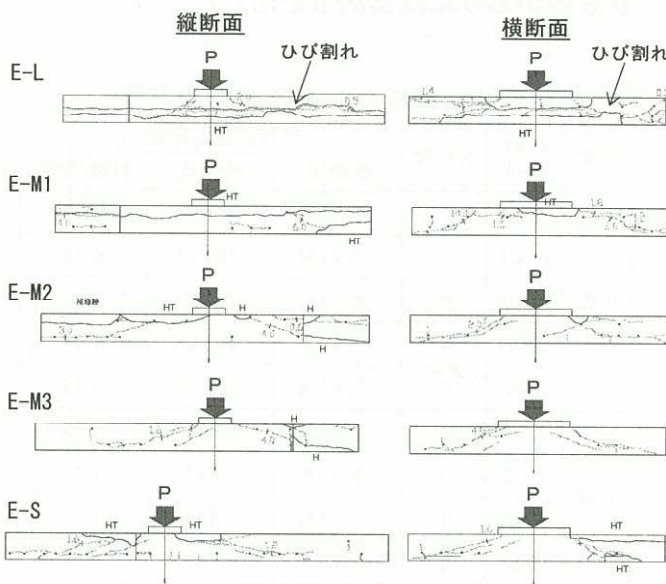


図-5 床版断面の破壊状況 (E 橋)

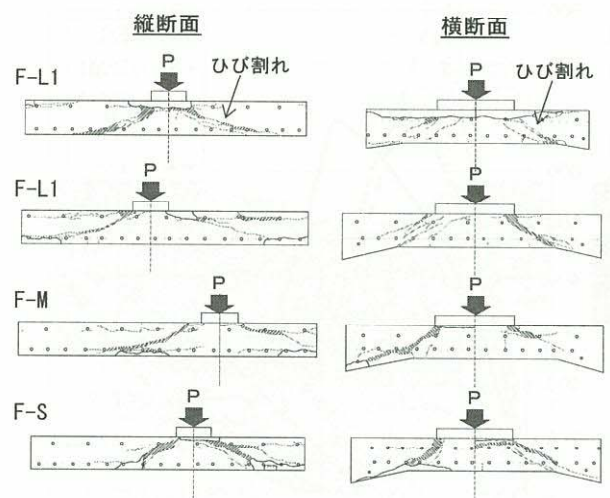


図-6 床版断面の破壊状況 (F 橋)

### 3. 床版上面の調査手法の検討

#### 3.1 鋼橋 RC 床版の塩害劣化メカニズム

過年度に実施された各種の詳細調査によって、凍結防止剤による鋼橋 RC 床版の塩害劣化は上面から進行することや、適切に施工できなかった上面の補修部がかえって塩害劣化を促進することなどがわかっており(図-7~図-8 参照)<sup>2)</sup>、これらについては平成 23 年度に床版取替工事が実施された C 橋においても確認されている。

また E 橋や F 橋での押抜きせん断試験の結果などから、交通量が少ない環境下では上面の劣化による使用性能の低下が RC 床版の寿命を決める支配的な要素になることもわかった。

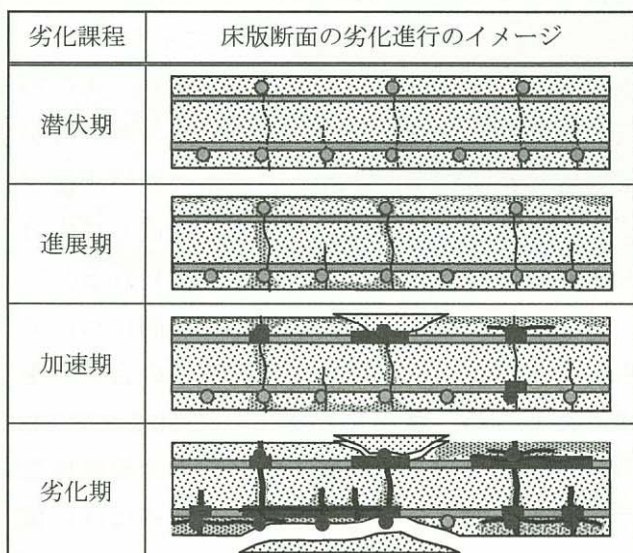


図-7 鋼橋 RC 床版の劣化進行

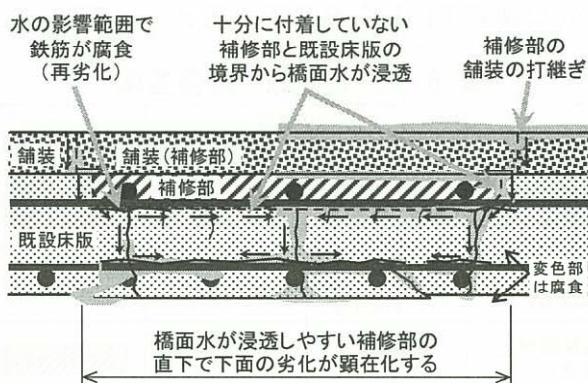


図-8 上面補修部の劣化メカニズム

これらの知見から、鋼橋 RC 床版の維持管理においては、床版上面の劣化状況を的確に把握

することが重要であると認識されたが、床版上面には舗装があるので目視観察や直接触れる必要のある手法の適用は困難である。著しく劣化した箇所については舗装上からの打音点検で特定できる場合もあるが、一般道より舗装が厚い高速道路では熟練者でも劣化部の判別が難しい場合も多い。また、ある程度深い位置の水平ひび割れは、床版上面からの打音点検でも検出が難しいこともわかっている<sup>2)</sup>。

このような背景から、舗装上から調査を実施でき、点検者の技量、天候などの自然環境、舗装厚などの影響を受けにくい床版上面の調査手法の確立が望まれている。

#### 3.2 カート式電磁波レーダ法の試行

過年度より試行・検討を続けているカート式電磁波レーダ法は、高解像度の地中レーダを多数配置したカート式のレーダ装置を用いて舗装面を走査し、そのレーダ画像を解析して床版上面の劣化状況を評価する非破壊検査方法である(写真-1 参照)。舗装上から床版上面の劣化状況を調査する方法として、現時点においては有効な手法と考えられている。



写真-1 カート式電磁波レーダ法の試行

同手法については、床版取替工事が実施された E 橋や F 橋、C 橋においても、詳細調査と併せて評価基準の確立や劣化部の検出精度を検討するために基礎資料を収集している。

今回は、F 橋の試行結果を基に劣化部の検出精度について検討した結果について報告する。

### 3.3 劣化部の検出精度の検討

カート式電磁波レーダ法によって舗装上から床版上面の劣化箇所をある程度検出できることは確認されている<sup>2)</sup>。今回は、電磁波レーダ法の劣化部の検出精度を定量的に検討するために、F橋およびC橋で実施された床版取替工事において撤去された既設床版の劣化状況を近接目視や打音点検およびボーリング調査などで詳細に調査し、事前に収集したカート式電磁波レーダ法のデータと比較検討した。

検出精度の検討は、詳細調査を基に作成した床版上面の外観変状図を実際の劣化状況とし、カート式電磁波レーダ法のレーダ画像を解析して作成した判定図（以下、レーダ判定図という）をそれと照合して、両者の合致する割合（合致率）を求めた。合致率の算出は、外観変状図およびレーダ判定図を30cmメッシュで分割してデジタルデータとし、両者を照合して合致したメッシュの数を数え、それを全メッシュの数で除した百分率とした。

床版上面の劣化が顕著であったF橋P2～P3径間のレーダ画像（上側主鉄筋深さで水平方向にスライスした平面図）を図-9に、メッシュ化したレーダ判定図を図-10に示す。また、メッシュ化した外観変状図を図-11に示す。なお、レーダ判定図の作成においては、図-9に示した平面のレーダ画像だけでなく、他の深さ位置の画像や縦断方向の信号変化なども評価に加えて判定している。

カート式電磁波レーダ法の判定基準はまだ十分に確立されておらず、劣化の程度や影響因子によってレーダ画像がどの程度の変化をするかなどが明確になっていない。このような背景から、今回の検討では、まず床版上面の劣化が顕著であったF橋P2～P3径間のレーダ画像を表-6に示す基準で評価したレーダ判定図を作成し、それを実際の劣化状況と比較し検証した。

なおF橋には、舗装と床版上面の付着が切れている箇所が点在しており（とくに追越車線路肩付近（G5付近）に広範囲の付着切れあり）、

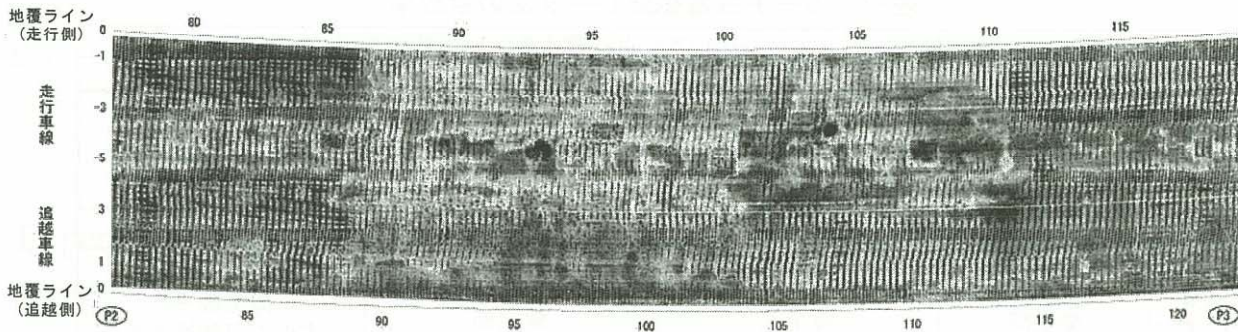
カート式電磁波レーダ法はこれらもある程度捉えていると考えられたが、今回の調査では舗装の付着切れの正確な範囲を把握できなかったため、レーダ判定図に「舗装界面付近の異常」として表された範囲については合致率の検証範囲から除外した。

F橋のRC床版における劣化状況は、かぶりコンクリートが喪失している「はく離」、ハンマーで叩くと明らかな異音がする「浮き」、ある程度かぶりが深い上側鉄筋に沿って水平方向に伸展する「水平ひび割れ」である。レーダ画像の評価では、健全部なら明瞭に現れるはずの鉄筋がまったく見えない箇所については「劣化の可能性大」、鉄筋が不明瞭な箇所を「劣化の可能性あり」と分けて判定したが、表-7に示すように、実際の劣化状況との合致率からすると「劣化の可能性あり」の判定範囲は健全部と考えた方がよいと考えられる。これらの箇所で鉄筋画像が不明瞭になるのは、舗装や床版に浸透した水分の影響によるものではないかと考えられる。

この評価基準によってC橋の3径間についてもレーダ判定図と実際の劣化状況との合致率を求めたところ、表-8に示すように60.2～79.3%の合致率となった。舗装上面からの非破壊検査手法であることを考えるとこの合致率は高い値であり、まだ評価基準の確立などの課題はあるが、カート式電磁波レーダ法はRC床版上面の有効な調査手法になりえると考えられる。

表-6 レーダ画像の評価基準

判定	レーダ画像		判定図の表記
	平面画像	断面画像	
劣化の可能性大			
劣化の可能性あり			
舗装界面付近の異常			
かぶり異常（かぶりが浅い）			
SFRC補修			
As補修			



Copyright©2010 Geo Search Co.,Ltd. All rights reserved

\* レーダ画像の収集範囲は、中分側、路肩側ともに地覆の鉛直面から20cm内側からとなる

図-9 カート式電磁波レーダ法のレーダ画像  
 (上側主鉄筋位置の平面画像)

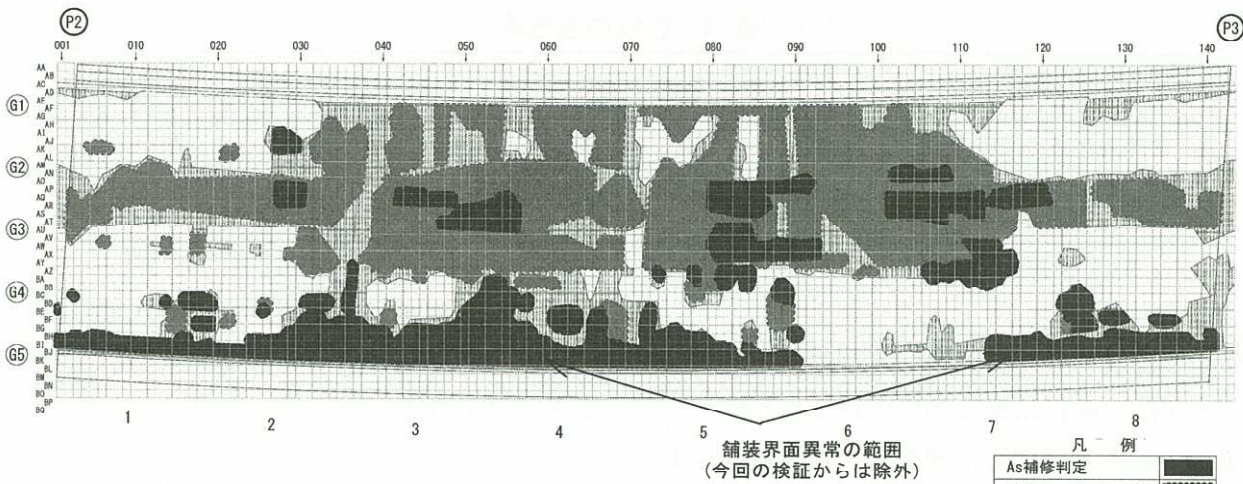


図-10 カート式電磁波レーダ法の判定図  
 (30cmメッシュでデジタルデータ化)

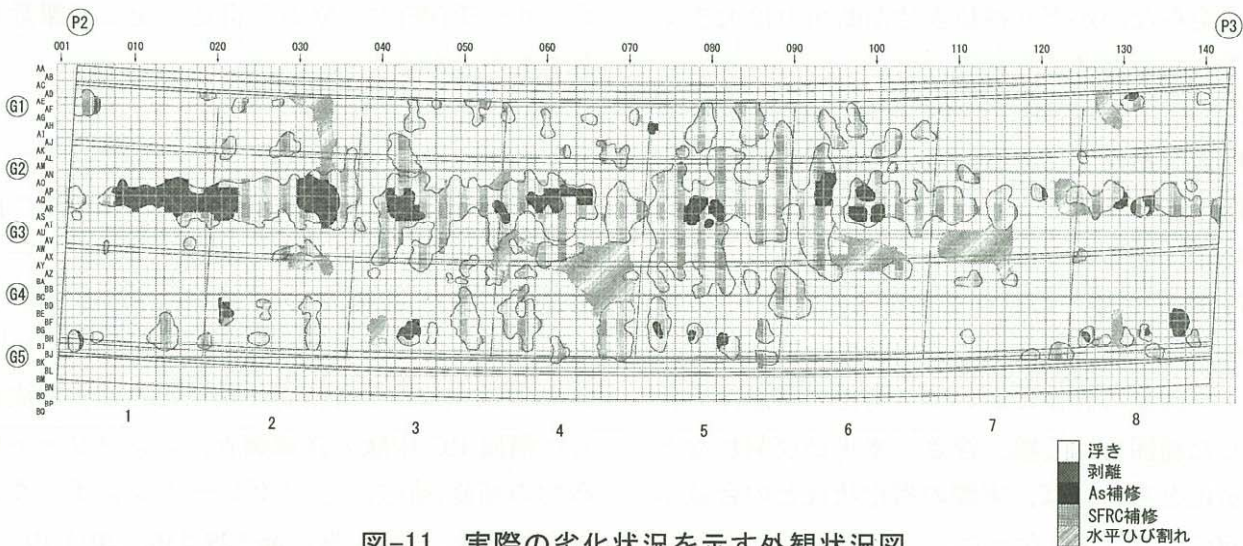


図-11 実際の劣化状況を示す外観状況図  
 (30cmメッシュでデジタルデータ化)

表-7 カート式電磁波レーダ法の合致率

		カート式電磁波レーダ法の判定		
		Case 1	Case 2	Case 3
実際の劣化状況	はく離	劣化の可能性大	劣化の可能性大 +	劣化の可能性大
	浮き			
	水平ひび割れ	劣化の可能性あり	劣化の可能性あり	
	As 補修	As 補修	As 補修	As 補修
	SFRC 補修	SFRC 補修	SFRC 補修	SFRC 補修
	健全部	健全部	健全部	健全部 + 劣化の可能性あり
合致したメッシュ数		2195	2426	2870
合致しないメッシュ数		1618	1387	943
合致率		57.6 %	63.6 %	75.3 %

\*1 合致率 (%) = 実際の劣化状況とレーダ法判定が合致したメッシュ数 / 全メッシュ数 × 100

表-8 各橋の合致率

	F 橋	C 橋		
	P2-P3	A1-P1	P1-P2	P2-P3
合致したメッシュ数	2870	2180	2761	2819
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 %

#### 4. まとめ

今回の押抜きせん断試験およびカート式電磁波レーダ法の試行結果について以下に示す。

- (1) E橋とF橋で実施した押抜きせん断試験においては、外観変状から判定した劣化度と押抜きせん断耐力に明確な相関は見られなかった。
- (2) 交通量の少ない環境下で塩害劣化した RC 床版については、鉄筋破断などの著しい劣化状況に至らないかぎり押抜きせん断耐力は大きく低下しないと考えられる。
- (3) このような環境下の RC 床版の寿命は、疲労や断面欠損などによる耐荷力の低下ではなく、床版上面の劣化による使用性能の低下が支配的な要素になるのではないかと考えられる。
- (4) F橋とC橋での試行結果を基に、カート式電磁波レーダ法の劣化部の検出精度を検討した。レーダ画像の評価において「劣化の可能性大」とした範囲をはく離、浮き、水平ひび割れなどの劣化と考えれば、実際の劣化状況との合致率は60.2~79.3%となった。
- (5) 舗装上からの非破壊検査手法であることを考慮すると合致率は高い値であり、評価基準の

確立などの課題はあるが、カート式電磁波レーダ法は RC 床版上面の有効な調査手法になりえると考えられる。

#### 謝辞

押抜きせん断試験の実施にあたっては、大阪工業大学松井教授のご指導を賜った。また、カート式電磁波レーダ法の試行については、ジオ・サーチ(株)のご協力を得た。記して謝意を表すものである。

#### 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 巻，pp.125-130，2008.10
- 2) 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 巻，pp.529-536，2011.10
- 3) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，pp.44-45，2007.10