

論文 PCT 桁ウェブ内の塩化物イオン濃度分布とその変動

津村 浩三*1・藤田 弘昭*2・河原木 英貴*3・岩崎 隆*4

要旨： 厳しい塩害環境下にある橋梁 5 橋の PCT 桁ウェブ部分から 15 本のコアを貫通させて採取し、塩分浸透状況を調べた。また、14 年間の表面被覆を経た橋梁についても、同様の調査をおこなった。結果を、桁の 2 つの側面からの塩分浸透を考慮した塩化物イオン濃度分布計算値と比較し、パラメーターを同定した。計算により得られた分布は調査結果の分布と概ね良く一致した。ただし、その際に同定したパラメーターは、従来の片面に近い部分での調査と評価から得られた値とは大きく異なる場合があった。表面塩化物イオン濃度については、橋梁内の、どの桁においても海側の側面の方が山側の側面に比べて高い傾向が見られた。

キーワード： 塩害, PCT 桁, 表面被覆, 実構造物

1. はじめに

PCT 桁は拡散係数が比較的小さい¹⁾ので塩分浸透の速さは遅いものの、かぶりが比較の薄いため、腐食開始後、ひび割れ発生から鉄筋の破断にいたる時間が比較の短い可能性がある。従って、点検をおろそかにはできない。現在、塩分浸透状況の調査と評価はひとつの面からの浸透を想定して行われるのが一般的であるが、PCT 桁のウェブ部分は下部工に比べると部材の厚みが薄いため、断面を挟む 2 つの側面からの塩分浸透の影響が懸念される。

こうしたことから、著者らは青森県の厳しい塩害環境下にある PCT 桁のウェブ部分を貫通させてコア抜きを行い、次の研究を行った。(1)PCT 桁ウェブ内への両側面からの塩分浸透状況の把握、(2)PCT 桁ウェブのように薄い部材における塩分浸透状況評価方法と塩分浸透予測方法の検討。さらに、今回調査から 14 年前に塩分浸透から保護するために表面被覆された橋梁から(3)表面被覆された PCT 桁内の塩分移動の予測と現況の比較。

2. 調査の概要

表-1 に調査対象の諸元を示す。ただし、表面被覆を施した PCT 桁に関する調査については別途 5 章で述べる。調査を行ったのは、青森県内の厳しい塩害環境下にある 5 橋で、表-1 に示すように海岸線からの距離が 10m~200m のものである。供用開始は 1966 年から 1979 年、供用開始から調査までの経年数は 28 年から 40 年である。

コンクリートコアは図-1 に示すように桁のウェブ部分を水平方向に貫通させて計 15 本採取した。採取コアの直径は 50mm である。なお、本稿では橋梁内の桁の相対的位置を表すため、図-1 に示すように、1 つの橋梁の中で最も海に近い桁を海桁、最も海から遠い桁を山桁、その他の桁を中桁と呼ぶ。また、各桁には側面が 2 面あるので、これらを区別するため、各桁の海側の側面に若い番号を割り当て、図-1 に示すように海に近い桁の側面から順に 1 から 6 まで側面番号を付す。

採取した資料の塩化物イオン濃度の分析は、JCI-SC4 法²⁾に準拠し、電位差滴定法により全塩化物イオン濃度を測定した。コアのスライス間隔は 20mm を基本とし、一部 15mm とした。桁ウェブの厚さは 140mm~180mm である。

3. 浸透評価方法

3.1 塩分浸透の計算方法

コンクリート内部への塩分浸透の進行は、次のフィックの拡散方程式を差分法で求めた³⁾。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (1)$$

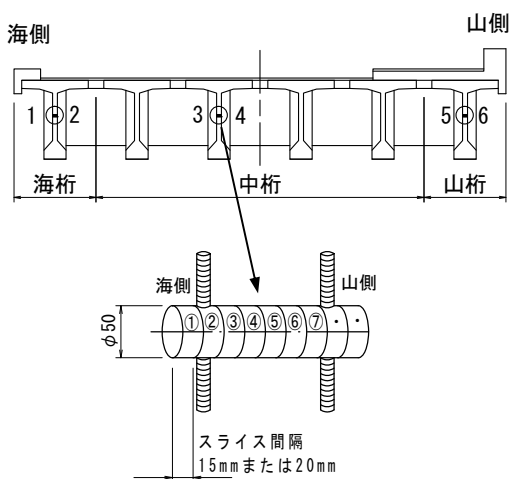


図-1 調査断面図

*1 弘前大学 理工学研究科准教授 博士 (工学) (正会員)

*2 (株)キタコン 博士 (工学) (正会員)

*3 青森県県土整備部道路課

*4 (株)キタコン 技術部

ここで、 x はコンクリート表面からの深さ(cm)、 t は経過年数(年)、 C は塩化物イオン濃度(kg/m³)、 D は塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm²/年)で以後拡散係数と呼ぶ。なお、 x の単位は計算上 cm を使うが、本稿の説明では習慣上 mm を使う。

差分化した計算の主要部分は次の通りである。

当該時刻ステップ i 、当該コンクリート層番号 j の塩化物イオン濃度 $C_{i,j}$ は、前時刻ステップ $i-1$ における当該コンクリート層番号 j の塩化物イオン濃度 $C_{i-1,j}$ および両隣りのコンクリート層の塩化物イオン濃度 $C_{i-1,j-1}$ と $C_{i-1,j+1}$ を使って、次式のように表される。

$$C_{i,j} = C_{i-1,j} + (C_{i-1,j-1} - 2C_{i-1,j} + C_{i-1,j+1}) \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} \quad (2)$$

ここで、コンクリート層番号 j は PCT 桁の片側（ここでは海側）の側面から反対側の側面までの間を 1 から m 層に区切ってつけた番号で、さらにその外側に境界条件付与用の 0 層と $m+1$ 層を設け、それぞれ別に表面塩化物イオン濃度（定数）を与えた。被覆期間中は境界条件付与層の表面塩化物イオン濃度をゼロとした。時刻ステップ $i=0$ の時にはコンクリート層の塩化物イオン濃度として初期塩化物イオン濃度を与えた。

3.2 パラメーターの同定方法

塩分浸透状況調査用に抜き出した各コンクリートコアから、塩分浸透を決定するパラメーターを同定するに

あたっては、「コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シート」^{4),5)}（以下、簡易分析シート）を参考にして同様のシートを作成し、試行錯誤的に与えたパラメーターを用いて前述の計算方法により求めた塩化物イオン濃度分布と実測値をシート上に描いたグラフ上で比較し、両者の残差の自乗和が小さくなるようなパラメーターを探索し、決定した。その際、少数の何点かのデータを棄却すれば他の多数の点で適合が良くなる場合には、棄却を行うこととした。結果的に棄却をおこなったのは、表面に近いデータで、それが従来の中性化に基づく判断基準よりも深く、30mm 程度までとなったコア No. は、No.1, No.2, No.3, No.4, No.6 である。

同定したパラメーターは海側側面の表面塩化物イオン濃度、山側側面の表面塩化物イオン濃度、拡散係数、初期塩化物イオン濃度の 4 つである。

4. 調査結果とその考察（表面被覆したものを除く）

4.1 分布適合の実際

2 章で述べた調査により得られた塩化物イオン濃度調査値に対して 3 章の計算方法を適用して適合させた結果（計算値と呼ぶ）の例を図-2 に示す。調査値は塗りつぶした菱形、計算値は白抜き四角で示している。なお本稿では、コンクリート表面からの深さ x は海側の桁側面を起点 ($x=0$) にして表示している。同図グラフの左寄りの部分（桁の海側寄り）で塩化物イオン濃度が高いという適合結果となっている。当然これに対応して、表面

表-1 本調査に供したコンクリートコアの諸元

橋梁名	供用開始年(年)	コア採取年(年)	径年数(年)	海岸線からの距離(m)	コアNo.	桁位置	側面番号 ^{注1)}	表面塩化物イオン濃度 Co(kg/m ³)	拡散係数 D(cm ² /年)	初期塩化物イオン濃度 Ci(kg/m ³)	C ₀ /平均	
A橋	1976	2004	28	10	1	海桁	1	18.80	0.17	0.15	1.49	
							2	19.50				
					2	中桁	3	23.80	0.25			1.88
							4	14.70				
A橋	1976	2005	29	10	3	海桁	1	19.50	0.20	0.15	1.54	
							2	8.00				
					4	中桁	3	15.80	0.18		1.25	
							4	7.80				
					5	中桁	3	7.20	0.15		0.57	
							4	7.50				
6	山桁	5	7.30	0.20	0.58							
		6	2.00									
B橋	1973	2006	33	130	7	海桁	1	8.10	0.08	0.21	1.89	
							2	3.90				
					8	山桁	5	2.00	0.06		0.47	
							6	3.10				
C橋	1979	2007	28	95	9	海桁	1	19.00	0.18	0.20	1.45	
							2	9.00				
					10	山桁	5	16.00	0.25		1.22	
							6	8.30				
D橋	1968	2006	38	10	11	海桁	1	3.95	0.12	0.05	0.49	
							2	0.70				
					12	中桁	3	16.50	0.10		2.05	
							4	6.60				
					13	山桁	5	16.80	0.11		2.09	
							6	3.70				
E橋	1966	2006	40	200	14	海桁	1	12.60	0.12	0.00	2.94	
							2	1.20				
					15	海桁	1	2.90	0.03		0.68	
							2	0.45				

注 1) 図-1 に示す桁側面のクラス分け番号で、海に近い側面から 1 から 6 までとしている。

塩化物イオン濃度の計算値も海側の方が高い値となっている。なお、中性化深さについては高々2mm程度と、どのコアにおいても無視できる程度であった。

4.2 本適合方法の特徴に関する考察

ここで行った適合方法の特徴について考察するため、図-2 で用いたデータのうち、片側（左側）にプロットした7点のデータから、現在広く使われている片面からの浸透のみ考慮した手法（簡易分析シート³⁾）による適合の例を図-3 に示す。この片面からの浸透のみ考慮した手法によると、拡散係数 $0.35\text{cm}^2/\text{年}$ 、表面塩化物イオン濃度 $13.0\text{kg}/\text{m}^3$ となり、2面からの浸透を考慮した本適合方法による拡散係数 $0.25\text{cm}^2/\text{年}$ 、表面塩化物イオン濃度 $23.8\text{kg}/\text{m}^3$ （海側の値）と大きく異なる結果となった。この差は図-2 の計算値を表す破線と図-3 の計算値を表す破線の違いに良く表れている。図-2 の例では、表面に近い左側の2点と右側1点のデータを棄却すると他の多数の点で良く適合するパラメーター設定ができた。中性化はほとんど進行していないので、雨水等に側面が洗われたことが、このずれの原因として考えられる。このように中性化によらず、表面から30mm程度までの値が低すぎると思われる濃度データを棄却したケースは3.2節で述べたように他にも多数あった。なお、図-4には参考のため、棄却したデータのない事例を示した。これと、図-2 を比較してみれば、図-2 の表面に近い部分におけるデータ値が、他の部分のデータの傾向から外れていることが判るだろう。このように、本適合方法によると表面に近いデータの採否の判断が比較的容易にできた。

このことはまた、従来の片面からの浸透のみを考慮した調査・評価手法では、表面塩化物イオン濃度を過小評価する可能性があることを示している。言い換えれば、今回のような調査・評価手法をとった方が、より安全側の判断ができると考えられる。ただし、桁を貫通させてコアを抜き、詳細に濃度分布を調べるのはコストがかかるのが難点である。

この他、本適合方法の利点としては、塩化物イオン濃度実測値が一定となる部分無くとも初期塩化物イオン濃度が比較的容易に推定できること、表面塩化物イオン濃度の側面による違いが評価できることなどが挙げられる。欠点としては、パラメーターが増えるので任意性が増すことと、繰り返すことになるが、測定点が増す分コストがかかるということが、挙げられる。

4.3 塩分飛散・塩分浸透状況

表面塩化物イオン濃度の橋梁内分布の特徴について調べるため、図-5 に示すグラフを作成した。ここで、横軸は橋梁内の位置の違いを表す側面番号である。2章

の図-1 の説明でも述べたが、海に近いほうから海桁、中桁、山桁の順に並んでおり、各桁には側面が2面ある

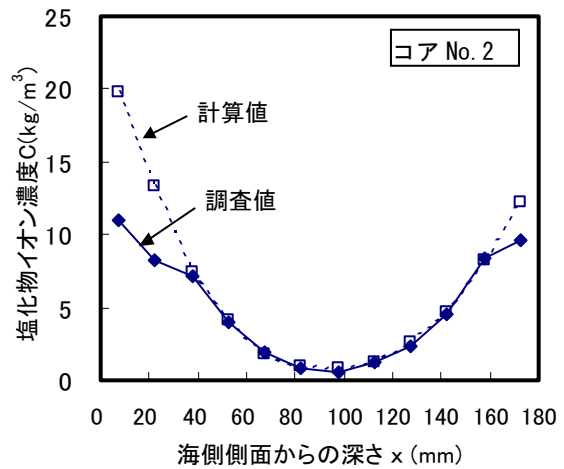


図-2 塩化物イオン濃度の分布例
(両面からの浸透を考慮)

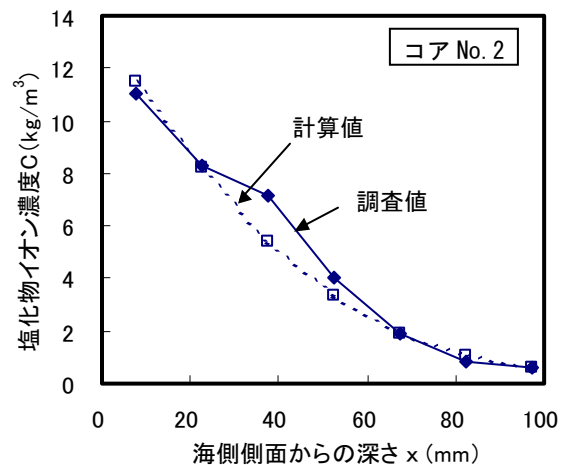


図-3 塩化物イオン濃度の分布例
(片面からの浸透のみ考慮)

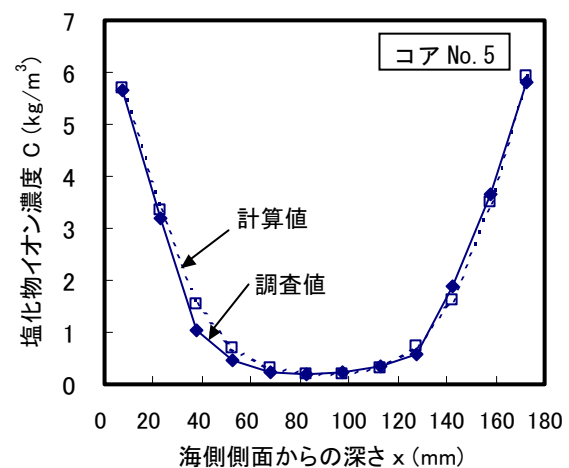


図-4 塩化物イオン濃度の分布例
(棄却したデータのない事例)

ので海側側面のデータは左側に、山側側面のデータは右側にプロットされている。ペアとなる同じ桁のデータは実線で結んでいる。この図-5によると、実線のほとんどは右肩下がりとなっており、海側側面の値が相対的に高い傾向にあることが判る。山桁の山側側面には海からの風が下から巻き上げられることにより表面塩化物イオン濃度が海側側面に比べて高くなる可能性があると思われたが、そのような傾向となったのは3組のペアのうち1組だけであり、山桁に特別な傾向があるとは言えなかった。

4.4 拡散係数

拡散係数は表-1に示すように最低値 $0.03 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、最大値 $0.25 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、平均値 $0.15 \text{ cm}^2/\text{年}$ であり、特に問題ないと思われる値であった。標準偏差は $0.06 \text{ cm}^2/\text{年}$ であり、バラツキは大きくなかった。これに対しコンクリート標準示方書⁶⁾による普通ポルとランドセメントを使用した場合の塩化物イオンに対する拡散係数の推定式(式(11))による計算値は、水セメント比50%の時 $1.3 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、水セメント比60%の時 $2.6 \text{ cm}^2/\text{年}$ であり、本調査で得られた値を大きく上回っている。水セメント比が、この程度であったとすれば計算値は十分安全側の値であったと言える。

5. 表面被覆を施したPCT桁の塩分浸透状況

ポリウレタン樹脂系塗料により表面被覆を行った後14年が経過したPCT桁の塩化物イオン濃度分布を調査した。この橋梁は青森県内、日本海海岸線から280mの距離に位置するもので、供用開始は1963年。1991年(平成3年)に塩害調査が行われ、その際、桁の海側の側面から深さ60mmのコアが4本採取され、スライス幅20mmごとの塩化物イオン濃度測定が行われた。その結果の例を図-6に塗りつぶし丸形を実線でつないだグラフで示す(図中にH3調査と表示)。図-6によると表面に最も近いところで塩化物イオン濃度がすでに 6.5 kg/m^3 を超えており、大量の塩化物イオンが進入しつつあったことがわかる。さらにコンクリート表面にひび割れや剥離が生じていたため、緊急に何らかの対処が必要とされていた。図-6にH3計算とある白抜き三角を結んだグラフはH3調査の結果に基づいて3章の方法でパラメーターを同定し、その年の塩化物イオン濃度分布を推定したもので、参考のために示した。一定の部分がほとんど無いので断面中心部まで飛来塩分が浸透している可能性があることがわかる。なお、ここでは調査データの制限から桁の山側海側両側面とも同じ表面塩化物イオン濃度を仮定しているが、図-5の結果によると、山側の面の表面塩化物イオン濃度は海側の表面塩化物イオン濃度に比べて低い傾向があるので、グラフ上で右側(山側)の値は

多少大きすぎる推定となっている可能性があることに留意しておく必要がある。そのH3調査から2年後の1993年(平成5年)に表面被覆が行われた。表面被覆から14年後の2007年に4章調査と同様の桁を貫通するコア抜き調査を行った。その結果得られた塩化物イオン濃度の分布を塗りつぶし菱形を実線で結んだグラフ(H19調査値と表示)で図-6に示す。ウェブの厚さは160mmである。これによると、最も表面に近い部分の塩化物イオン濃度が 0.5 kg/m^3 程度と、H3調査時から大きく低下しており、表面被覆の効果が良く現れている。全体の濃度分布形状を見ると二つに並んだ左右の山が繋がった形となっており、外部からの塩分流入が遮断され、塩化物イオンが均一化に向かって移動した結果、濃度のピークが桁断面の中央に寄ったものと解釈できる。同図中にはH3調査時のデータにもとづいて得られたパラメーターを使い、被覆時以降は表面塩化物イオン濃度をゼロとして供用開始からの塩化物イオン濃度の移動を2章の方法

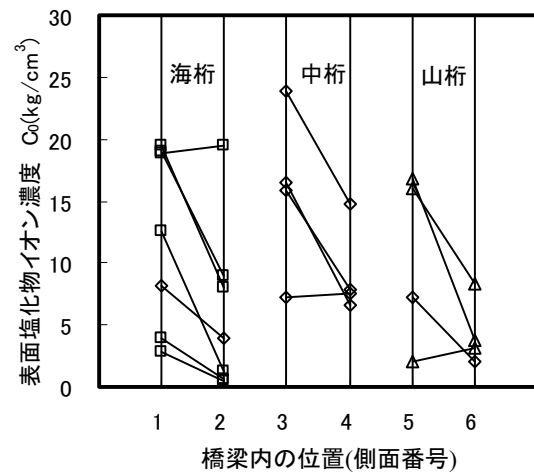


図-5 橋梁内の位置(1~6)ごとの塩化物イオン濃度

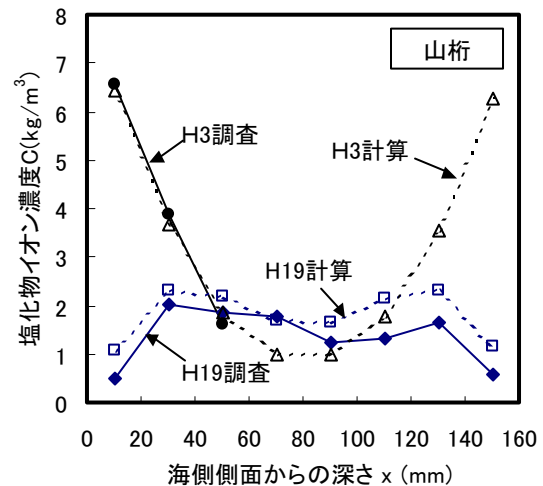


図-6 表面被覆を行った桁の塩化物イオン濃度の分布(調査値と計算値の適合が比較的良好事例)

で推定した結果得られた塩化物イオン濃度の分布を（H19 計算と表示）、白抜き四角を点線で結んだグラフで示した。このグラフの形状は H19 調査結果の形状とよく似ており、ここで用いた塩化物イオン移動の推定方法の有効性を示している。細かく両グラフを比べると、右側の推定ピーク値が調査値に比べて多少大きめになっているが、これは山側面の表面塩化物イオン濃度を海側と同じに仮定したものの、実際にはそれより多少低かったためであろう。

図-7と図-8は図-6と採取されたコアが異なるのみで、グラフの構成は同じである。これらは最近（2007年）の調査値が計算値と大きく異なるものの例として挙げた。まず、図-7では、図の左側（海側）に注目すると、最近の H19 調査値は推定値よりはるかに大きく、概ね2倍程度である。また、表面に最も近い部分を除いて、H3 調査値と比べてもはるかに大きく、表面被覆が不完全で

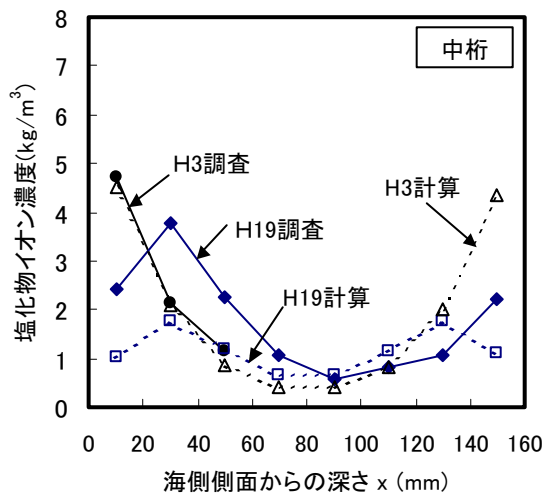


図-7 表面被覆を行った桁の塩化物イオン濃度の分布
(調査値と計算値が異なる事例)

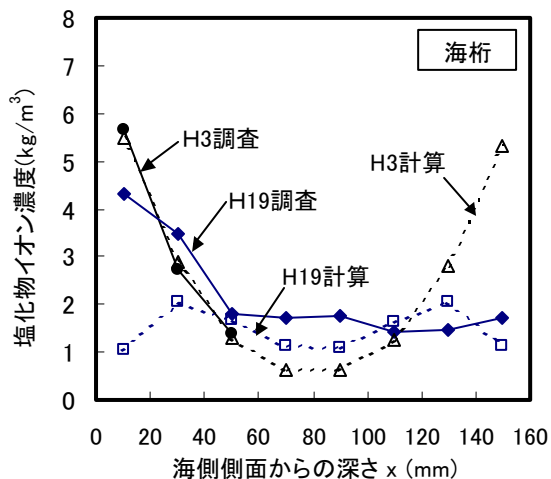


図-8 表面被覆を行った桁の塩化物イオン濃度の分布
(調査値と計算値が異なる事例)

あったか表面被覆の内側に塩分が残っていた可能性が疑われる。

一方、山側では被覆の効果により塩化物イオン濃度が減少している可能性もあるが不明確である。図-8の場合には、H3 調査の領域だけ見ると、H19 調査値は推定値ほどには減っていないが H3 調査値とほぼ変わらず、増加していないので、表面被覆の効果は中程度と言えよう。

以上のように、表面被覆の効果は認められる場合と認め難い場合、その中間的な場合があった。表面被覆前のデータに基づいた表面被覆後の塩化物イオン濃度の予測は調査値と合致する場合もあれば、合致しない場合もあった。合致した場合の分布形状が偶然に起こる可能性の小ささを考えると、3章の計算方法は、ある程度有効であると言えよう。

6. まとめ

青森県の厳しい塩害環境下において、供用開始から28年から40年経過した橋梁5橋のPCT桁ウェブ部分から15本のコアを貫通させて採取し、塩分浸透状況の評価方法の検討と浸透状況の検討を行った。さらに別の14年間の表面被覆を経た橋梁を対象に、表面被覆を施した場合の塩化物イオンの移動について検討した。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) フィックの拡散方程式に基づき、桁ウェブの2側面からの塩分浸透を考慮した差分法計算値は調査結果の分布と概ね良く適合させることができた。その際に同定したパラメーターは、従来の片面に近い部分での調査と評価から得られた値とは大きく異なる場合があった。
- (2) これは、本研究のような調査を行わなくとも判ることであるが、桁ウェブの2側面からの塩分浸透を考慮した調査と評価では、初期塩化物イオン濃度の同定に際して、必ずしも一定分布の領域を必要としないという利点がある。
- (3) (1)の方法で適合を行った際、表面近くの塩化物イオン濃度データで、従来の中性化に基づく判断基準よりも深い、表面から30mm程度までの、濃度データを棄却したほうが適合が良いケースが多数あった。これは、表面近くが雨水により洗われたためかもしれない。
- (4) 表面塩化物イオン濃度の値が橋梁内の相対的な位置関係によりどのように異なるか、5橋のデータから検討した結果、桁の海側側面と山側側面を比較すると桁の位置にかかわらず、海側のほうが高い傾向にあった。
- (5) 表面被覆を施したPCT桁ウェブ内における塩化物イオン濃度分布は、ウェブの2側面において被覆期間中の表面塩化物イオン濃度をゼロとして求めた計算による分布と概ね良く一致した。しかし、計算で予想したほど減少していない場合もあった。

参考文献

- 1) 藤田弘昭, 津村浩三, 相馬 基: 苛酷塩害地域の実
構造物調査結果に基づく維持管理計画, コンクリー
ト構造物の補修補強アップグレード論文報告集
Vol.7, pp.47-54, 2007.11
- 2) 日本コンクリート工業協会: コンクリート構造物の
腐食・防食に関する試験方法ならびに規準 (案),
1987.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[維持管理
編]2001年制定, 2001
- 4) (独) 土木研究所: コンクリート中の塩化物イオン
濃度分布簡易分析シート使用マニュアル, 2003
- 5) 古賀裕久, 河野広隆: コンクリート中の塩化物イオン
濃度分布簡易分析シートを用いた塩害劣化予測
の実用性検証, 土木技術資料, Vol.46, No.4, pp.56-61,
2004
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書[維持管理
編]2001年制定, 2001