# 論文 薄板モルタル供試体を用いたミクロ塩害環境評価手法に関する基礎 的検討

### 佐伯 竜彦\*1·能勢 陽祐\*2·菊地 道生\*3

要旨:本研究は、薄板状の小型モルタル供試体を構造物各部位に設置することによって、ミクロな塩害環境 を評価する手法について検討を行った。具体的には、新潟県内の飛来塩分の供給を受ける橋梁の各部位にモ ルタル供試体を貼付け、冬期に供試体に浸透した塩分量を測定した。その結果、同一構造物であっても部位 毎に塩分浸透量が異なることが確かめられた。また、薄板モルタル供試体の短期間における塩分浸透量から、 構造物への長期にわたる塩分浸透量をある程度推定できた。

キーワード: 塩害環境, 飛来塩分, 薄板モルタル供試体, 拡散係数

#### 1. はじめに

本研究では、実構造物におけるミクロな塩害環境評価 手法の構築に資するため、薄板モルタル供試体を用いる 方法の適用性について検討した。対象構造物を飛来塩分 環境下にある橋梁とし、薄板状小型モルタル供試体を橋 梁各部に設置した。これは、塩害を受ける橋梁では同一 構造物でも部位によって劣化の状況が異なることが知 られており、部位によって発来塩分の供給量が異なって いると考えられるためである。薄板状の小型供試体を用 いて塩分浸透量を測定することで、橋梁の部位の違いに よるミクロ塩害環境を塩分浸透の観点から短期間で簡 便に評価することができれば、部位別の劣化予測や点検 の重点箇所の特定などに利用でき、維持管理の効率化に 資するものと考えられる。本手法によれば、コア採取な どで構造物を傷つけることなく、情報を得ることが可能 である。

上記の着眼点に基づき,2009 年度冬期に薄板モルタル 供試体の暴露試験を行った。本論文は、この暴露試験の 結果と薄板供試体を用いた橋梁のミクロ環境の評価手 法の可能性についての検討結果をまとめたものである。

### 2. 実験概要

### 2.1 供試体

### (1) 材料および配合

セメントとして普通セメントまたは早強セメントを 用いた。早強セメントを用いた場合は、セメントの一部 を高炉スラグ微粉末で置換した配合とした。用いた結合 材の物理的性質および化学成分を表-1に示す。モルタ ル供試体の配合は、表-2に示す2種類である。配合Nは 通常のコンクリート,配合 HB は塩分浸透抵抗性を高め たコンクリートを想定したものである。

#### (2) 供試体

モルタル供試体は、4×3×0.5cmの薄板状とした。初 期水中養生期間は28日とした。

実験に薄板供試体を用いたのは、浸透した塩化物イオンの濃度分布ではなく総量に着目したためであり、浸透 量の測定では、供試体全てを粉砕して試料とした。 な お実際には、供試体が薄くてもその内部には濃度分布が あると考えられるが、供試体内部を均一考えた場合に生 じる誤差は、長期的な塩分浸透予測を行う際の多くの不 確定要因の影響に比べて小さいと考えた。

暴露試験は,2009.11~2010.4 の冬期に実施した。測 定を冬期としたのは,新潟県沿岸において飛来塩分量の 大部分が供給されるのがこの期間であることによる<sup>1)</sup>。 回収した供試体中の全塩化物イオン量をJCI-SC4に準じ て測定した。また,初期養生終了直後および回収直後の 質量差から逸散水分量を求め,別途 105℃乾燥した供試 体により求めた蒸発可能水量との比から供試体の相対 含水率を算出した。

### 2.2 供試体暴露橋梁および設置位置

供試体を暴露する橋梁については、実際に飛来塩分に よる塩害を受けているものを対象とするのは当然であ るが、さらに、薄板モルタル供試体による塩害環境評価 結果の妥当性を検証できるよう、過去に構造物への塩分 浸透量を測定したものを選定することを基本方針とし た。その結果、新潟県内のA~Dの4橋を選定した。図 -1にA~D橋の位置を、図-2~5にそれぞれの橋梁の縦 断図と横断図および供試体設置位置を示す。

調査箇所のうち、A橋およびB橋ではN,HBの2種類の 供試体を、CおよびD橋では、HBのみを暴露した。全 ての設置箇所において同一配合の供試体を3個設置し、 その平均値を測定値とした。供試体は、シリコン系の接

種類	密度	ブレーン	化学成分(%)					
	$(g/cm^3)$	$(cm^2/g)$	$SiO_2$	$A1_{2}O_{3}$	$Fe_2O_3$	Ca0	MgO	$SO_3$
普通セメント	3. 16	3310	21.2	5.7	2.6	64.8	1.4	2.0
早強セメント	3.14	4490	21.1	5.0	2.5	65.6	1.0	2.7
高炉スラグ微粉末	2.91	5910	32.8	14.2	0.1	42.8	5.3	2.0

## 表-1 結合材の物理的性質と化学組成

表-2 モルタル供試体の配合

記号	セメント	水結合材比	単位量(kg/m³)				
		(%)	水	セメント	高炉スラグ微粉末	細骨材	
Ν	普通	50	306	612	-	1320	
HB	早強	35	255	364	364	1320	

着剤で橋梁各部位(主として桁,一部,橋脚および橋台) に貼り付けた。設置状況の一例を,**写真-1**に示す。

### 3. 実験結果と考察

### 3.1 暴露供試体の含水状態

供試体の含水状態が塩化物イオンの拡散に影響する こと,また,供試体の置かれた基本的な環境条件の評価 として利用できることから,本研究では供試体の相対含 水率を測定した。

結果の一例を,図-6 に示す。図より,同一桁では海 側側面に暴露した供試体の含水率が高い傾向があり,桁 間の比較でも海側の桁の含水率が山側より高い傾向が 見られる。このように,同一橋梁においても位置よって ミクロな環境が異なることが,含水率からも確認できる。





図-3 B橋の断面図、側面図および供試体設置位置



図-4 C橋の側面図および供試体設置位置



### 3.2 暴露供試体への塩分浸透量

図-7および図-8は、A橋とB橋の塩分浸透量測定結果 である。両橋梁では、2種類の配合(NとHB)の供試体 を暴露した。配合Nの方が拡散係数が大きい、即ち物質



写真-1 供試体設置状況の一例





移動抵抗性が低いために、Nの塩分浸透量が多くなっている。

B橋では,海側の桁の塩分浸透量が多く,また,同一 桁(G14)内では,山側側面の供試体の塩分浸透量が下 面の供試体より少なくなっている。一方,A橋では,若 干ではあるが山側の桁の方が塩分浸透量が多くなる傾 向がある。これは,A橋の背面が山であるため一度桁下 を通り抜けた飛来塩分が滞留するためと推察される。

図-9は、D橋での測定結果である。図より、塩分浸透 量は径間により大きく異なっていることがわかる。特に, P29-P30間において塩分浸透量が非常に少なくなってい る。P29-P30の桁の海側前面には建物があり、これが飛 来塩分に対して遮蔽物となったものと考えられる。この ように,同一橋梁でも径間によって飛来塩分環境が異な ることが確認できる。同一径間内で桁間あるいは同一桁 内での貼付け面の影響を見ると、海側の桁であるG6の海 側側面に設置した供試体への塩分浸透量が最も多くな っている。G6の海側側面は海風を最も受けやすいため, これは当然の結果と言える。G3とG1を比較すると、ばら つきはあるが、同等か山側のG1の方がやや塩分浸透量が 多くなっている。同一桁内で見ると、例外もあるが、海 側側面で塩分浸透量が最も多く,次いで山側側面,最も 少ないのが中央下面となっている。海から供給された飛 来塩分が桁下をどのように移動するかを直接測定して いないため想像となるが、桁海側側面に付着しなかった 飛来塩分は桁下面を通過し,山側側面で滞留するために 桁中央下面より塩分浸透量が多くなると推察される。

このように、同一橋梁においてもその部位によって塩 分浸透量、即ち塩害環境が大きく異なることが薄板供試 体の暴露試験によって確認された。また、どの部位の塩 害環境が厳しいかは橋梁によって異なっており、個別の 状況、例えば、周辺地形や遮蔽物の有無などが影響して いることがわかった。

# 3.3 暴露供試体への塩分浸透量と構造物への塩分浸透量 の関係

#### (1) 薄板供試体中の塩分量とコア供試体中の塩分量

図-10~12に,薄板供試体への塩分浸透量と構造物から採取したコアから測定した構造物への塩分浸透量の比較例を示す。コアのデータと比較した薄板供試体はコア採取位置のごく近傍に設置したものである。なお,図に示す塩分浸透量は、単位表面積当たりの塩分浸透量としたため、薄板供試体では供試体全体の塩分浸透量を暴露面の面積(4×3cm<sup>2</sup>)で割った値とした。

また、コア供試体の場合は、構造物管理者から提供され た塩分濃度分布のデータをFickの拡散方程式の解析解 である式(1)で回帰し、見掛けの拡散係数 $D_a$ と表面濃度 $C_o$ を求めた。求めた $D_a$ および $C_o$ を用いて、式(2)により単位 表面積当たりの塩分浸透量 $M_t$ を計算した<sup>2)</sup>。

$$C = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \tag{1}$$

$$M_{t} = 2C_{0}\sqrt{\frac{D_{a}t}{\pi}}$$
(2)



図-10 A橋のコアおよび薄板供試体の塩分浸透量



図-11 B橋のコアおよび薄板供試体の塩分浸透量

ここに、C<sub>0</sub>:表面塩化物イオン濃度(g/cm<sup>3</sup>) D<sub>a</sub>:見かけの拡散係数(cm<sup>2</sup>/year) M<sub>i</sub>:時刻 tにおける浸透量(g/cm<sup>2</sup>-concrete)

薄板供試体とコア供試体は同一塩害環境に曝されてい るが、両者は材料・配合が異なること、また塩害環境下 におかれた期間が異なること(薄板供試体は2009年度冬 期のみの暴露であるが、コア供試体の採取時期は供用開 始19~29年後)から、塩分浸透量の絶対値は当然異なる。 また、同一橋梁内における塩分浸透量に及ぼす相対的な 部位の影響は、薄板供試体とコアにおいて異なる場合が あった。

# (2) 薄板供試体への塩分浸透量から構造物への塩分浸 透量の推定

薄板供試体の暴露は, 簡便に橋梁部位毎の塩害環境を 定性的に比較するだけでなく, その塩分浸透量から同一 位置の構造物への塩分浸透量を推定することも目的と している。ここでは, 薄板供試体への塩分浸透量からコ アの塩分浸透量を推定することを試みた。

前述したように,薄板供試体と構造物中のコンクリー トでは材料・配合が異なることから,同一の塩害環境下



図-12 D橋のコアおよび薄板供試体の塩分浸透量



図-13 含水率を考慮した見掛けの拡散係数比と
塩分浸透量比の関係<sup>1)</sup>

にあっても塩分浸透量は異なる。そこで、以下のような 方法により、材料・配合の影響を考慮して薄板供試体か ら構造物中への塩分浸透量を推定した<sup>1)</sup>。

本研究で暴露した薄板モルタル供試体の条件,即ち, 厚さ0で一面のみが暴露面で,拡散係数および表面濃度 が一定と仮定した場合のFickの拡散方程式の解析解か ら,供試体単位暴露面積当たりの拡散物質の浸透量は次 の式で与えられる<sup>2)</sup>。



図-14 A橋における塩分浸透量の推定結果



図-15 D橋における塩分浸透量の推定結果



図-16 塩分浸透量の推定結果と測定値の比較(全橋梁)

$\frac{M_t}{M_{\infty}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty}$	$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left\{\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{4\ell^2}\right\} $ (3)
ここに,	<i>θ</i> :供試体厚さ(cm)
	$M_t$ :時刻 $t$ における浸透量 $(g/cm^2-mortar)$
	M <sub>∞</sub> : t=∞における浸透量 (g/cm <sup>2</sup> -mortar)
	D:塩化物イオン実効拡散係数 (cm <sup>2</sup> /year)

同じ環境下におかれた異なる配合のコンクリートの 塩分浸透量の比は、実効拡散係数の比と M<sub>o</sub>の比がわかれ ば式(3)により求めることができる。したがって、薄板 供試体と構造物のコンクリートについて両者の値を把 握しておくことによって、薄板供試体の塩分浸透量から 構造物への浸透量を推定することが可能となる。しかし 本研究では、構造物に用いられているコンクリートの実 効拡散係数と M<sub>o</sub>は不明である。そこで、コアから得られ た塩分濃度分布から見掛けの拡散係数を算出し、それを 用いて検討を行った。

本来,式(3)は自由塩化物イオンを対象としたもので あるが,本研究では浸透塩分量を全塩化物イオン量で評 価しているため,固定化の影響を考慮する必要がある。 式(3)中のDを固定化の影響を含んだ見掛けの拡散係数



図-17 コア中の塩分濃度分布(A橋)



図-18 コア中の塩分濃度分布(D橋)

とすれば、固定化の影響は拡散係数で考慮されることに なるので、材料・配合の異なるコンクリート毎にM<sub>∞</sub>の値 を検討する必要はなく、一定値と見なせる。

なお,塩化物イオン拡散係数は,コンクリートの含水 状態の影響を受ける。構造物から採取したコア中の塩分 濃度度分布から求めた見掛けの拡散係数には,含水率の 影響が自動的に含まれている。

一方,薄板供試体では濃度分布を測定していないので, 見掛けの拡散係数は別途求める必要があり,本研究では 暴露供試体と同一材料・配合の供試体(4×4×16cm)を 塩水浸漬し,濃度分布を測定することによりモルタル供 試体の見掛けの拡散係数を求めた。ただし,この方法で 求められるのは飽水状態の拡散係数であり,構造物に設 置されて水分逸散がある状態の拡散係数とは異なる。含 水率が拡散係数に及ぼす影響は式(4)によって評価でき るので<sup>3)</sup>,薄板供試体については相対含水率を測定して, 含水率を考慮した見掛けの拡散係数を算出した。

$$D/D_0 = 0.0032 \times 10^{0.025W} \tag{4}$$

ここに, D: 含水率を考慮した塩化物イオン拡散係数 D<sub>0</sub>: 飽水状態における塩化物イオン拡散係数 W: 相対含水率(%)

図-13は、異なる配合の薄板供試体における含水率を 考慮した見掛けの拡散係数比と塩分浸透量比の関係で ある<sup>1)</sup>。図より、理論式は実験値を若干下回っているが 同様な傾向を示している。以上より、含水率を考慮した 見掛けの拡散係数により異なる材料・配合間の塩分浸透 量が関連付けられることが確認できる。

図-13の関係を用いて、薄板モルタル供試体の塩分浸 透量から構造物中のコンクリートへの塩分浸透量を推 定した例を図-14 および図-15 に示す。なお、薄板供 試体の暴露期間は 2009 年度の冬期1シーズンのみであ るが、毎年同量の飛来塩分がコンクリートに供給される と仮定して推定を行った。

A橋においては、N, HBの2配合の供試体を用いたので、それぞれの配合からの推定値を示した。A橋における推定結果は、部位毎の塩分浸透量の大小関係の傾向を捉えている。しかし、推定値が実験値よりやや大きくなった。D橋においては、推定値が測定値の傾向を捉えている箇所と両者が大きく異なっている箇所が混在している。図-16は全橋梁における推定値と測定値との関係を示したものであるが、全体的な傾向として推定値が測定値を過大評価するものが多い。

図-17は、推定精度が比較的高かったA橋G1桁にお けるコア中の塩分濃度分布とそれをFickの拡散方程式 の解析解で回帰した結果である。図-18は、推定結果が 測定値と大きく異なっていたD橋P-24-P25間のG6桁の 塩分濃度分布と回帰結果である。図より、A橋G1桁では、 塩分濃度の測定値が深さ方向に4点あり、回帰分析の結 果が良好であることがわかる。一方で、D橋G6桁のコア においては、測定値が3点で回帰の精度も低いことが確 認できる。このことは、D橋P-24-P25間のG6桁で得ら れた見掛けの拡散係数は精度が低いことを示している。 塩分浸透量の推定は薄板モルタル供試体とコアの拡散 係数の比を用いていることから、コアから得られる構造 物の拡散係数の精度が低いことが塩分浸透量の推定精 度が低いことの原因の一つと考えられる。

### 4. まとめ

本研究では、薄板状の小型モルタル供試体を用いて構 造物部位別のミクロな塩害環境を評価し、さらに供試体 への短期間での塩分浸透量を測定することで長期的な 構造物への塩分浸透量を推定することを目的として検 討を行った。

その結果,薄板モルタル供試体の暴露試験によって, 同一橋梁においても部位によって飛来塩分環境が異な っていることが確認できた。さらに,薄板モルタル供試 体の塩分浸透量から供試体設置位置における構造物へ の塩分浸透量をある程度の精度で推定することが可能 であった。しかし,推定値が測定値と大幅に異なる場合 もあり,今後詳細な検討が必要である。

### 謝辞

本研究は,(財)道路保全技術センターの道路防災研 究開発助成金の交付を受けて行ったものであることを 付記し,謝意を表します。また,薄板供試体の暴露試験 では国土交通省北陸地方整備局および新潟県土木部の ご協力をいただきました。関係各位に感謝いたします。

### 参考文献

1)佐伯 竜彦,竹田 光明,佐々木 謙二,嶋 毅:飛来塩分 環境の定量評価に関する研究,土木学会論文集E, Vol. 66, No. 1, pp.1-20, 2010.1

2)J.Crank : The Mathematics of Diffusion, Second Edition, Oxford University Press, 1975.

3)佐伯竜彦, 二木 央: 不飽和モルタル中の塩化物イオン の移動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.963-968, 1996.